



TUGAS AKHIR (WE 40050)

**ANALISIS VARIASI FILLER METAL DAN TEMPERATURE
PREHEAT TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR
MIKRO PADA SAMBUNGAN LAS GTAW ALUMINIUM 6061**

ADITYA KURNIA SHANDY
NRP. 0722040102

DOSEN PEMBIMBING:
BACHTIAR, S.T., M.T.
HIDAYAT, S.T., M.Sc.

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

This page is intentionally empty
(halaman ini sengaja dikosongkan)

**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

**ANALISIS VARIASI FILLER METAL DAN TEMPERATURE PREHEAT
TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR MIKRO PADA
SAMBUNGAN LAS GTAW ALUMINIUM 6061**

Disusun Oleh:
Aditya Kurnia Shandy
0722040102

**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 : 22 Juli 2026
Periode Wisuda : Oktober 2026

Menyetujui,

Dosen Penguji

1. Bachtiar, S.T., M.T.
2. Hendri Budi Kurniyanto, S.ST., M.T.
3. Alvalo Toto Wibowo, S.ST., M.T.
4. Hidayat, S.T., M.Sc.

NIDN/NUPTK

(0004127002)
(0007039003)
(0005039501)
(9037773674130363)

Tanda Tangan

(.....)
(.....)
(.....)
(.....)

Dosen Pembimbing

1. Bachtiar, S.T., M.T.
2. Hidayat, S.T., M.Sc.

NIDN/NUPTK

(0004127002)
(9037773674130363)

Tanda Tangan

(.....)
(.....)

Menyetujui
Ketua Jurusan,



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

Mengetahui
Koordinator Program Studi,

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

This page is intentionally empty
(halaman ini sengaja dikosongkan)



PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT

No. : F. WD I. 021

Date : 3 Nopember 2015

Rev. : 01

Page: 1 dari 1

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Aditya Kurnia Shandy

NRP : 0722040102

Jurusan/Prodi : Teknik Bangunan Kapal/D4-Teknik Pengelasan

Dengan ini menyatakan dengan sesungguhnya bahwa:

Tugas Akhir yang akan saya kerjakan dengan judul:

ANALISIS VAIASI *FILLER METAL* DAN *TEMPERATURE PREHEAT* TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR MIKRO PADA SAMBUNGAN LAS GTAW ALUMINIUM 6061

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, 22 Juli 2026

Yang Membuat Pernyataan



Aditya Kurnia Shandy
NRP. 0722040102

This page is intentionally empty
(halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis ucapkan kepada ALLAH SWT Tuhan Semesta Alam yang senantiasa melimpahkan rahmat, karuna, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “Analisis Variasi *Filler Metal* Dan *Temperatur Preheat* Terhadap Sifat Mekanik Dan Struktur Pada Sambungan Las Gtaw Aluminium 6061”. Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih atas segala hal baik yang telah diberikan kepada penulis, khususnya kepada:

1. Ibuku, ibuku, ibuku, baru kemudian ayahku, Untuk Ibu Ponisri dan almarhum Bapak Rukiwandono Terimakasih sudah menjadi orang tua terbaik yang selalu mengusahakan apapun, tanpa dukungan, doa yang kau langitkan, dan cinta yang kalian berikan, aku tidak akan bisa mencapai apa yang aku impikan saat ini. Setiap langkah yang kuambil, setiap usaha yang ku lakukan, adalah hasil dari semua pengorbanan dan dorongan kalian. Aku sangat bersyukur atas segala bimbingan dan kasih sayang yang tak ternilai. Semoga di masa depan, aku bisa membanggakan kalian dan mewujudkan semua harapan yang kita impikan bersama.
2. Kepada Kakak tersayang Alfia Laili Shandy, serta Nenek Rukiyani yang selalu menanyakan makan, penulis mengucapkan terima kasih atas cinta, kesabaran, dan kebersamaan yang selalu ada, bahkan di saat penulis merasa paling lelah dan hampir menyerah. Kalian adalah rumah tempat penulis kembali, penguat di tengah rapuh, dan alasan untuk terus bertahan hingga titik ini.
3. Bapak Rachmad Tri Soelistijono, S.T., M.T. selaku Direktur Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, yang telah memberikan kesempatan dan fasilitas pendidikan kepada penulis.
4. Bapak Ir. Priyambodo Nur Ardi Nugroho, S.T., M.T., Ph.D selaku Ketua Jurusan Teknik Bangunan Kapal, yang telah mendukung proses akademik penulis.

5. Bapak Moh. Syaiful Amri, S.ST., M.T. selaku Koordinator Program studi D4 Teknik Pengelasan, atas arahnya selama masa studi dan selaku dosen penguji pada sidang tugas akhir.
6. Ibu Adristi Nisazarifa, S.T., M.T. selaku Koordinator Tugas akhir dan selaku dosen penguji pada sidang tugas akhir.
7. Bapak Eriek Wahyu Restu Widodo, S.Si., M.T. selaku wali kelas TL D yang saya banggakan dan seluruh dosen dan staf di lingkungan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya yang telah memberikan ilmu dan pengalaman yang sangat berarti selama masa perkuliahan.
8. Bapak Bachtiar, S.ST., M.T. selaku dosen pembimbing 1 yang dengan sabar telah membimbing, mengarahkan, dan memberikan masukan berharga dalam penyusunan tugas akhir ini dan selaku dosen penguji pada sidang tugas akhir.
9. Bapak Hidayat, S.T., M.Sc. selaku dosen pembimbing 2 yang dengan sabar telah membimbing, mengarahkan, dan memberikan masukan berharga dalam penyusunan tugas akhir ini dan selaku dosen penguji pada sidang tugas akhir.
10. PT. SILOG Gesik dan Rekan – rekan tim QC Welding dan Dimensi yang telah memberikan semangat kepada penulis untuk menyelesaikan tugas akhir.
11. Kopi Giras 71 yang telah menyediakan tempat berdiskusi dan rekan-rekan TL 22 Khususnya yang sudah membuat perjalanan penulis dalam menempuh kuliah menjadi penuh tawa, cerita, dan lika-liku yang memberikan banyak motivasi, semangat, bahkan sedikit kerumitan yang justru menjadi warna tersendiri dalam perjalanan ini.
12. Aditya Kurnia Shandy, ya' diri saya sendiri. Apresiasi sebesar-besarnya karena telah bertanggung jawab untuk menyelesaikan apa yang telah dimulai. Terimakasih karena terus berusaha dan tidak menyerah, serta senantiasa menjalankan setiap prosesnya yang tidak mudah. Ini merupakan pencapaian yang patut dibanggakan untuk diri sendiri. Terimakasih sudah bertahan.

Surabaya, 22 Juli 2026

Penulis

ANALISIS VARIASI *FILLER METAL* DAN *TEMPERATURE PREHEAT* TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR MIKRO PADA SAMBUNGAN LAS GTAW ALUMINIUM 6061

Aditya Kurnia Shandy

ABSTRAK

Pengelasan adalah proses penyambungan logam yang banyak digunakan dalam industri manufaktur, konstruksi, dan pembuatan kapal. Aluminium 6061 adalah paduan yang dapat dipanaskan, berkekuatan tinggi, ringan, dan tahan korosi, sehingga banyak digunakan sebagai bahan konstruksi, dengan Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) sebagai metode penyambungan yang umum digunakan. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan pengaruh variasi pemanasan awal (suhu kamar, 70°C, 110°C) dan logam pengisi (ER5356, ER4043) terhadap sifat mekanik dan mikrostruktur lasan aluminium 6061, melalui inspeksi visual, uji tarik, uji lentur, uji kekerasan Vickers, serta pengamatan makro- dan mikrostruktur sesuai dengan AWS D1.2. Hasil menunjukkan bahwa semua spesimen lulus inspeksi visual tanpa cacat permukaan yang melebihi batas penerimaan, sementara peningkatan suhu pemanasan awal memengaruhi lebar Zona Terpengaruh Panas (HAZ) dan distribusi fasa logam las. Kekerasan logam las tertinggi diperoleh dengan ER4043 pada suhu kamar (60,40 HV), sedangkan ER5356 pada suhu pemanasan awal 70°C dan 110°C menunjukkan kekerasan yang lebih tinggi (57,59 HV dan 55,85 HV). Uji lentur menunjukkan bahwa pemanasan awal pada 70°C dengan ER5356 memberikan hasil terbaik, dengan semua spesimen diterima sesuai dengan AWS D1.2, sementara kekuatan tarik tertinggi juga dicapai dengan kombinasi tersebut (160,93 MPa), dan yang terendah terjadi pada suhu kamar dengan ER4043 (89,45 MPa), meskipun tidak ada spesimen yang memenuhi persyaratan kekuatan tarik minimum AWS D1.2 dan oleh karena itu ditolak. Disimpulkan bahwa variasi suhu pemanasan awal dan logam pengisi memengaruhi mikrostruktur, distribusi kekerasan, kinerja lentur, dan kekuatan tarik sambungan las aluminium 6061, dengan kombinasi pemanasan awal 70°C dan ER5356 yang memberikan kinerja terbaik.

Kata Kunci: Aluminium 6061, *Preheat*, *Filler Metal*.

This page is intentionally empty
(halaman ini sengaja dikosongkan)

ANALYSIS OF THE EFFECTS OF FILLER METAL AND PREHEAT TEMPERATURE ON THE MECHANICAL PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE OF GTAW WELDED JOINTS IN 6061 ALUMINUM

Aditya Kurnia Shandy

ABSTRACT

Welding is a metal joining process widely used in the manufacturing, construction, and shipbuilding industries. Aluminum 6061 is a high-strength, lightweight, and corrosion-resistant heat treatable alloy, making it widely used as a construction material, with Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) as a commonly used joining method. This study aims to determine the effect of variations in preheat (room temperature, 70°C, 110°C) and filler metal (ER5356, ER4043) on the mechanical properties and microstructure of 6061 aluminum welds, through visual inspection, tensile testing, bending testing, Vickers hardness testing, and macro- and microstructural observations in accordance with AWS D1.2. The results showed that all specimens passed the visual inspection without surface defects exceeding the acceptance limits, while increased preheat affected the HAZ width and the phase distribution of the weld metal. The highest weld metal hardness was obtained with ER4043 at room temperature (60.40 HV), whereas ER5356 at preheat temperatures of 70°C and 110°C exhibited higher hardness (57.59 HV and 55.85 HV). The bending test showed that a 70°C preheat with ER5356 yielded the best results, with all specimens accepted according to AWS D1.2, while the highest tensile strength was also achieved with that combination (160.93 MPa), and the lowest was at room temperature with ER4043 (89.45 MPa), although none of the specimens met the minimum tensile strength requirements of AWS D1.2 and were therefore rejected. It is concluded that variations in preheat temperature and filler metal affect the microstructure, hardness distribution, bending performance, and tensile strength of 6061 aluminum welds, with the combination of 70°C preheat and ER5356 providing the best performance

Keywords: *Aluminum 6061, Preheat, Filler Metal.*

This page is intentionally empty
(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT	v
KATA PENGANTAR.....	vii
ABSTRAK	ix
<i>ABSTRACT</i>	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR GAMBAR.....	xix
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusuan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Manfaat Penelitian.....	4
1.5 Batasan Masalah.....	5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Pengelasan.....	7
2.2 <i>Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)</i>	7
2.3 Aluminium	9
2.3.1 Aluminium 6061	13
2.3.2 <i>Chemical Composition</i> Aluminium 6061.....	13
2.3.3 <i>Mechanical Properties</i> Aluminium 6061.....	13
2.3.4 Pengelasan Aluminium	14
2.4 <i>Filler Metal</i>	15
2.4.1 <i>Mechanical Properties Filler Metal</i>	16
2.5 Gas Pelindung	16
2.6 <i>Preheat</i> (Pemanasan Awal)	17
2.7 <i>Hot Crack</i>	18
2.7.1 <i>Solidification Cracking</i>	18
2.7.2 <i>Liquation Cracking</i>	19
2.8 Jenis Pengujian.....	20
2.8.1 Uji Visual	20
2.8.2 Uji Tarik	20

2.8.3 Uji Struktur Makro	22
2.8.4 Uji Struktur Mikro.....	23
2.8.5 Uji Kekerasan	24
2.8.6 Uji Tekuk.....	25
2.9 Penelitian Sebelumnya	30
BAB 3 METOLOGI PENELITIAN.....	33
3.1 Diagram Alir Penelitian	33
3.2 Studi Literatur	34
3.3 Studi Lapangan.....	34
3.4 Rumusan Masalah	34
3.5 Persiapan Alat dan Bahan	34
3.5.1 Persiapan Alat	34
3.5.2 Persiapan Material.....	35
3.6 Proses Pengelasan	37
3.6.1 Parameter Pengelasan.....	38
3.7 Uji Spesimen	39
3.7.1 Uji Visual	40
3.7.2 Uji Kekeasan	40
3.7.3 Uji Tarik	41
3.7.4 Uji Tekuk.....	43
3.7.5 Uji Macro	44
3.7.6 Uji Mikro.....	45
3.8 Analisis dan Pembahasan	47
3.9 Kesimpulan dan Saran.....	47
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	49
4.1 Pendahuluan Hasil Penelitian	49
4.1.1 Pengujian Visual	49
4.1.2 Uji Macro	50
4.1.3 Uji Mikro.....	53
4.1.4 Uji Kekerasan.....	61
4.1.5 Uji Tekuk.....	74
4.1.6 Uji Tarik	78
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	85

DAFTAR PUSTAKA.....	89
LAMPIRAN.....	93
BIODATA PENULIS	112

This page is intentionally empty
(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 <i>Chemical Composition</i>	13
Tabel 2. 2 <i>Mechanical Properties</i>	13
Tabel 2. 3 <i>Chemical Composition Filler Metal ER5356 dan ER4043.</i>	16
Tabel 2. 4 <i>Mechanical Komposisi</i>	16
Tabel 2. 5 Kesimpulan Penelitian Terdahulu.....	30
Tabel 3. 1 Parameter Pengelasan	38
Tabel 4. 1 Hasil Visual Inspeksi	49
Tabel 4. 2 Hasil Uji Kekerasan	62
Tabel 4. 3 Hasil Uji Tekuk.....	76
Tabel 4. 4 Hasil Uji Tarik	79

This page is intentionally empty
(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Rangkaian Las GTAW	8
Gambar 2. 2 Karakteristik Tipe Arus untuk Las GTAW	9
Gambar 2. 3 Oxyacetylene Gas	18
Gambar 2. 4 <i>Liquation Cracking</i>	19
Gambar 2. 5 <i>Liquation Cracking</i>	20
Gambar 2. 6 Grafik hasil pengujian tarik	21
Gambar 2. 7 Struktur Mikro <i>Base Metal</i> Aluminium 6061	23
Gambar 2. 8 Indentor <i>Hardness Vickers</i>	25
Gambar 2. 9 Pengujian Tekuk pada Bahan Uji.....	26
Gambar 2. 10 Skema Pengujian Tekuk <i>Face Bend</i> pada <i>Transversal Bending</i>	27
Gambar 2. 11 Skema Pengujian Tekuk <i>Root Bend</i> pada <i>Transversal Bending</i>	27
Gambar 2. 12 Skema Pengujian Tekuk <i>Side Bend</i> pada <i>Transversal Bending</i>	28
Gambar 2. 13 Skema Pengujian Tekuk <i>Root Bend</i> pada <i>Longitudinal Bending</i> ..	28
Gambar 2. 14 Penentuan Diameter Mandril	29
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian	33
Gambar 3. 2 Desain Spesimen Pengelasan	36
Gambar 3. 3 Deposit Las.....	36
Gambar 3. 4 <i>Cutting Plan</i>	39
Gambar 3. 5 Alur Identifikasi Pada <i>But Joint</i>	41
Gambar 3. 6 Mesin Uji Tarik	42
Gambar 3. 7 Spesimen Uji Tarik.....	43
Gambar 3. 8 Spesimen Makro.....	45
Gambar 3. 9 Pengujian Mikro.....	46
Gambar 3. 10 Spesimen Mikro	47
Gambar 4. 1 Hasil Visual <i>Temperatur Ruang</i>	49
Gambar 4. 2 Hasil Visual <i>Temperatur 70°</i>	50
Gambar 4. 3 Hasil Visual <i>Temperatur 110°</i>	50
Gambar 4. 4 Hasil Gambar <i>Macrostructure</i>	51
Gambar 4. 5 Hasil Interpretasi Struktur Mikro Pada <i>Base Metal</i>	54

Gambar 4. 6 Hasil Interpretasi Struktur Mikro Pada HAZ	56
Gambar 4. 7 Hasil Interpretasi Struktur Mikro <i>Fusion Line</i>	58
Gambar 4. 8 Hasil Interpretasi Struktur Mikro <i>Weld Metal</i>	60
Gambar 4. 9 Hasil Nilai Kekerasan <i>Filler</i> 5356 Dan 4043 <i>Temperature</i> Ruang...	63
Gambar 4. 10 Hasil Nilai Kekerasan <i>Filler</i> 5356 Dan 4043 <i>Temperature</i> 70°C...	64
Gambar 4. 11 Hasil Nilai Kekerasan <i>Filler</i> 5356 Dan 4043 <i>Temperature</i> 110°C.	66
Gambar 4. 12 Hasil Nilai Kekerasan <i>Filler</i> 5356 Dan 4043.....	67
Gambar 4. 13 <i>Tests Normality</i>	68
Gambar 4. 14 <i>Levene's Test of Equality of Error Variances</i>	69
Gambar 4. 15 <i>Tests of Between-Subjects Effects</i>	69
Gambar 4. 16 <i>Tests Normality</i>	70
Gambar 4. 17 <i>Levene's Test of Equality of Error Variances</i>	71
Gambar 4. 18 <i>Tests of Between-Subjects Effects</i>	71
Gambar 4. 19 <i>Tests Normality</i>	72
Gambar 4. 20 <i>Levene's Test of Equality of Error Variances</i>	72
Gambar 4. 21 <i>Tests of Between-Subjects Effects</i>	73
Gambar 4. 22 Hasil Uji <i>Bending</i>	76
Gambar 4. 23 Grafik Hasil Uji Tarik	80
Gambar 4. 24 Hasil Patahan Uji Tarik <i>Filler</i> 5356 Suhu Ruang (A1).....	81
Gambar 4. 25 Hasil Patahan Uji Tarik <i>Filler</i> 4043 Suhu Ruang (B1).....	81
Gambar 4. 26 Hasil Patahan Uji Tarik <i>Filler</i> 5356 70° (A2).....	82
Gambar 4. 27 Hasil Patahan Uji Tarik <i>Filler</i> 4043 70° (B2).....	82
Gambar 4. 28 Hasil Patahan Uji Tarik <i>Filler</i> 5356 110° (A3).....	82
Gambar 4. 29 Hasil Patahan Uji Tarik <i>Filler</i> 5356 110° (B3).....	83

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Menurut *American Welding Society* (AWS), pengelasan adalah proses penyambungan antara logam atau non logam dengan cara pemberian panas pada material yang akan disambung hingga mencapai temperature las, dengan atau tanpa tekanan (pressure). Salah satunya proses pengelasan Gas Tungsten Arc Welding (GTAW), proses pengelasan ini sering digunakan pada material aluminium dan paduannya.

Aluminium memiliki daya tahan yang baik dalam kondisi dingin dan ketahanan korosi yang tinggi. Paduan aluminium dikelompokkan menjadi 2 yaitu *heat treatable* dan *non heat treatable*. Aluminium 6061 termasuk dalam paduan aluminium heat treatable karena memiliki kandungan Mg dan Si yang dapat diberi perlakuan panas. Material jenis ini banyak dipakai dalam konstruksi umum termasuk konstruksi kapal karena aluminium mempunyai berat yang lebih ringan dari baja.

Penggunaan teknologi pengelasan seiring dengan perkembangan zaman dalam teknik pengelasan busur menggunakan gas mulia menyebabkan pengelasan aluminium dan paduannya menjadi sederhana serta dapat dipercaya, oleh karenanya penggunaan aluminium dibidang manufaktur atau industri telah berkembang (Wicaksono et al., 2013) . Namun, pada proses pengelasan yang terjadi di lapangan biasanya akan terjadi deformasi, *crack*, *porosity* ataupun cacat-cacat las lain yang mengakibatkan berubahnya susunan metalurgi material aluminium sehingga mengakibatkan kekuatan material berkurang.

(Purwaningrum et al., 2019) melakukan penelitian pada material aluminium paduan 5051 menyatakan bahwa penerapan preheat pada pengelasan GMAW berpengaruh terhadap kekuatan tarik, distribusi kekerasan, dan karakteristik struktur mikro hasil pengelasan aluminium. Pada penelitian tersebut menggunakan parameter preheat dengan suhu 70°C, 90°C, 110°C dengan hasil terbaik pada suhu 70°C., melakukan penelitian pada aluminium 6061 dengan pengelasan TIG menyatakan bahwa *preheat* dapat meningkatkan kekuatan tarik dan kekerasan pada

sambungan las TIG aluminium 6061. Pada penelitian tersebut didapatkan hasil terbaik pada suhu *preheat* 190°C Namun, (Wang et al., 2022) menegaskan bahwa *temperatur preheat* yang terlalu tinggi dapat menurunkan kekerasan akibat pertumbuhan butir yang berlebihan, sehingga diperlukan pengendalian *temperature preheat* yang tepat. Perlakuan berupa pemberian *preheat* sebelum proses pengelasan untuk mengurangi perbedaan *temperatur* pada daerah pengelasan dan mendapatkan struktur mikro yang diharapkan serta meminimalisir terjadinya cacat las sehingga dapat memperbaiki sifat mekanik pada material tersebut. (Structural Welding Code Aluminium, 2014) Berdasarkan suhu *preheat* pada aluminium *heat treatable* dapat diberikan dengan syarat maksimum 120°C.

Selain *temperatur preheat*, pemilihan jenis *filler metal* (logam pengisi) merupakan parameter krusial yang sangat memengaruhi kualitas sambungan las GTAW pada aluminium 6061. Perbedaan komposisi kimia *filler metal*, khususnya kandungan Mg dan Si, berpengaruh signifikan terhadap distribusi panas, laju pendinginan, serta pembentukan struktur mikro pada daerah lasan (Ishak, 2015) menemukan bahwa penggunaan *filler* ER5356 menghasilkan struktur butir yang lebih halus (25,69 μm) dibandingkan dengan ER4043 (52,75 μm) dan ER4047 (76,78 μm), yang berkorelasi langsung dengan peningkatan kekuatan tarik mencapai 171,53 MPa. (Tiara & Marjianti, n.d.) mengungkapkan bahwa peningkatan masukan panas menghasilkan struktur mikro yang lebih kasar, memperlebar HAZ dan PMZ, sehingga berdampak pada penurunan sifat mekanik sambungan. Interaksi antara *temperatur preheat* dan jenis *filler metal* menciptakan kompleksitas termal yang memengaruhi siklus pemanasan-pendinginan, di mana *temperatur preheat* yang optimal dapat memperlambat laju pendinginan dan memberikan waktu yang cukup bagi presipitat Mg_2Si untuk terdistribusi secara merata dalam matriks aluminium.

Namun demikian, pemilihan *filler metal* juga memengaruhi kecenderungan terjadinya cacat pengelasan. (Suherman et al., 2023) menjelaskan bahwa penggunaan *filler* dengan kandungan Si tinggi seperti ER4043 dan ER4047 dapat menimbulkan risiko *hot cracking* akibat peningkatan konsentrasi Si di zona mushy, sedangkan kandungan Mg yang lebih tinggi dalam ER5356 menurunkan

kecenderungan retak solidifikasi dan meningkatkan ketahanan korosi. (Alzahrani et al., 2025) menegaskan bahwa *filler* ER5356 menghasilkan struktur butir terbaik ($18,03 \pm 3 \mu\text{m}$) dengan kekerasan tertinggi $72,7 \pm 5 \text{ HV}$ dan efisiensi pengelasan 86,07%, meskipun *filler* ER4047 menunjukkan ketangguhan impak superior (139 J). (Lubis & Wahyudianto, 2025) menambahkan bahwa pengelasan dengan ER5356 menghasilkan nilai kekerasan tertinggi (70,6 HVN) tanpa distorsi visual, sementara ER4043 mengalami distorsi pada parameter yang sama. Oleh karena itu, penelitian ini tidak hanya menganalisis pengaruh variasi *temperatur preheat*, tetapi juga mengintegrasikan pemahaman mengenai peran *filler metal* dalam mengontrol mikrostruktur dan sifat mekanik sambungan las, sehingga kombinasi optimal antara keduanya diharapkan dapat menghasilkan sambungan las aluminium 6061 berkualitas superior yang memenuhi standar industri.

Berdasarkan uraian tersebut, dapat disimpulkan bahwa sebagai paduan aluminium *heat treatable*, aluminium 6061 sangat dipengaruhi oleh kondisi termal selama proses pengelasan melalui interaksi antara *temperatur preheat* dan jenis *filler metal*. Variasi *filler metal* dengan komposisi berbeda khususnya kandungan Mg dan Si berpengaruh signifikan terhadap distribusi panas, laju pendinginan, pembentukan struktur mikro, dan kecenderungan cacat pengelasan. Oleh karena itu, analisis variasi *filler metal* dan *temperatur preheat* terhadap sifat mekanik dan struktur pada sambungan las gtaw aluminium 6061 menjadi penting untuk dilakukan. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai peran kombinasi *preheat* dan *filler metal* dalam mengendalikan perubahan mikrostruktur serta menjadi acuan dalam penentuan parameter pengelasan yang optimal bagi aplikasi industry.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang di atas, maka didapat beberapa rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana hasil kekuatan Tarik sambungan las GTAW aluminium 6061 dengan variasi *filler metal* dan *temperatur preheat*?

2. Bagaimana pengaruh variasi *filler metal* dan *temperatur preheat* pada sambungan las GTAW aluminium 6061 terhadap nilai kekerasan?
3. Bagaimana struktur metalografi variasi *filler metal* dan *temperatur preheat* pada sambungan las GTAW aluminium 6061?
4. Bagaimana hasil uji bending dari variasi *filler metal* dan *temperatur preheat* pada sambungan las GTAW aluminium 6061?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, adapun tujuan dari diadakannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui hasil kekuatan Tarik sambungan las GTAW aluminium 6061 dengan variasi *filler metal* dan *temperatur preheat*.
2. Mengetahui pengaruh variasi *filler metal* dan *temperatur preheat* pada sambungan las GTAW aluminium 6061 terhadap nilai kekerasan.
3. Mengetahui struktur metalografi variasi *filler metal* dan *temperatur preheat* pada sambungan las GTAW aluminium 6061
4. Mengetahui hasil uji bending dari variasi *filler metal* dan *temperatur preheat* pada sambungan las GTAW aluminium 6061.

1.4 Manfaat Penelitian

Dengan dilakukan penelitian ini maka dapat diambil manfaat sebagai berikut:

1. Bagi Mahasiswa
Sebagai implementasi pengetahuan yang diperoleh selama masa perkuliahan, khususnya yang berkaitan dengan proses pengelasan GTAW pada material aluminium 6061 menggunakan variasi *temperatur preheat* dan *filler metal*.
2. Bagi Industri
Diharapkan hasil penelitian ini dapat menjadi acuan tambahan dalam dunia pengelasan dan memberikan kontribusi bagi kemajuan sektor industri terkait optimasi proses pengelasan GTAW pada material aluminium 6061 dengan berbagai parameter pengelasan.

3. Bagi Masyarakat

Sebagai sumber informasi ilmiah dan bahan bacaan atau rujukan mengenai proses pengelasan GTAW pada material aluminium 6061 serta pengaruh *temperatur preheat* dan jenis *filler metal* terhadap kualitas sambungan las.

1.5 Batasan Masalah

Agar pembahasan pada penelitian tugas akhir ini tidak meluas, maka penulis memberikan batasan masalah pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Material yang digunakan adalah aluminium seri 6061 dengan ketebalan 6mm.
2. proses pengelasan menggunakan GTAW dengan posisi 1G.
3. Bentuk bevel adalah single v Groove 60°.
4. komposisi gas pelindung yang di gunakan adalah argon UHP 99,99%
5. *Filler metal* menggunakan ER5356 dan ER 4043 dengan diameter 2,4mm.
6. Variasi *temperature preheat* menggunakan suhu ruang, 70° dan 110°
7. Menggunakan *Flow Rate* 15 L/min
8. Menggunakan Argon UHP 99,99%
9. Parameter pengelasan Konstan

This page is intentionally empty
(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengelasan

Proses pengelasan, menurut definisi yang ditetapkan oleh *American Welding Society* (AWS), merupakan teknik penyambungan material logam maupun non-logam melalui aplikasi energi termal hingga mencapai temperatur fusi yang diperlukan. Proses ini dapat dilakukan dengan atau tanpa penerapan tekanan mekanis, serta dapat melibatkan atau tidak melibatkan penggunaan material pengisi tambahan. Dalam perspektif metalurgi, pengelasan dapat dipahami sebagai fenomena ikatan atomik melalui mekanisme tarik-menarik antar atom pada antarmuka material yang disambung. Meskipun sambungan las umumnya menunjukkan kekuatan mekanik yang lebih superior dibandingkan logam dasar, karakteristik daktilitasnya cenderung mengalami penurunan (Sunaryo, 2021). Sementara itu, standar Deutsche Industri Normen (DIN) mendefinisikan pengelasan sebagai pembentukan ikatan metalurgi antara logam atau paduan logam yang terjadi dalam kondisi leleh. Definisi ini menekankan bahwa esensi pengelasan adalah proses penyatuan beberapa komponen logam dengan memanfaatkan energi panas sebagai medium penyambungan.

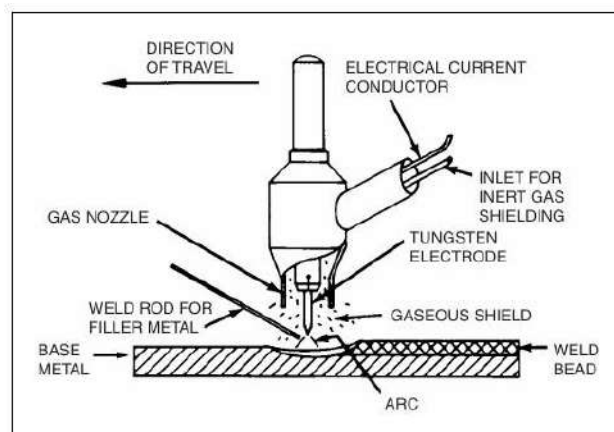
2.2 Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)

Dalam pelaksanaan penelitian ini, teknik penyambungan material yang diterapkan adalah metode *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW). Penggunaan metode GTAW secara ekstensif dalam industri pengelasan aluminium didasarkan pada fungsi gas inert yang mampu mengeksklusikan oksigen dari zona las, sehingga mencegah terbentuknya oksida logam yang memiliki tingkat kekerasan sangat tinggi (Budiyanto et al., 2017). Keunggulan GTAW dalam menghasilkan sambungan yang lebih clean dengan ekonomi biaya yang superior dibandingkan GMAW diimbangi oleh keterbatasan dalam hal kecepatan produktivitas. Mekanisme fundamental GTAW melibatkan pelelehan material base melalui panas yang dibangkitkan oleh busur listrik, di mana seluruh zona pengelasan diselubungi

oleh atmosfer gas inert yang berfungsi sebagai barier preventif terhadap oksidasi material yang tidak dikehendaki

Teknologi pengelasan yang digunakan dalam riset ini adalah *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) atau yang secara alternatif disebut *Tungsten Inert Gas* (TIG). Prosedur ini mengklasifikasikan sebagai teknik arc welding dengan elektroda tipe *non-consumable*, yang mengeksplotasi gas mulia sebagai sistem proteksi dari pengaruh kontaminan atmosfer. Metode ini mendemonstrasikan kesesuaian tinggi untuk aplikasi fusion welding pada mayoritas paduan tempa yang termasuk dalam kategori seri 1XXX, 3XXX, 5XXX, dan 6XXX.

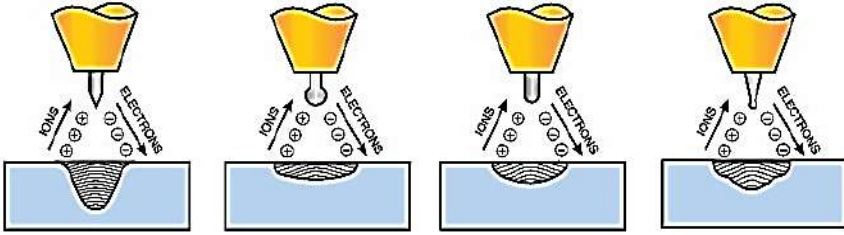
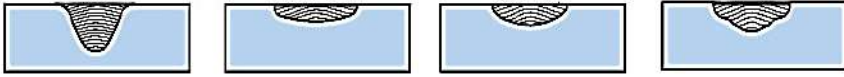
Tungsten Inert Gas (TIG), yang juga didesignasikan sebagai Gas Tungsten Arc Welding (GTAW), merupakan subdivisi dari teknik arc welding yang mengimplementasikan gas inert sebagai medium protektif, dengan elektroda tungsten atau wolfram berperan sebagai penghantar elektrik untuk mengenerasi sambungan las. Area pengelasan dilindungi oleh gas shielding, di mana gas mulia yang secara konvensional digunakan dalam GTAW adalah Argon (Ar) dan Helium (He), baik secara tunggal maupun kombinasi. Studi ini mengadopsi Argon sebagai gas pelindung. Skema sistem pengelasan GTAW ditampilkan pada Gambar 2.1 berikut



Gambar 2. 1 Rangkaian Las GTAW (Welding Handbook Vol 2, n.d.)

Prosedur pengelasan aluminium secara tipikal membutuhkan aplikasi arus bolak-balik (alternating current/AC). Pada mode pengelasan AC, aktivasi busur terjadi saat elektroda bermuatan positif dan workpiece logam bermuatan negatif,

mekanisme ini memungkinkan disintegrasi lapisan oksida superfisial pada aluminium yang pada gilirannya memfasilitasi kelancaran proses pengelasan. Parameter karakteristik arus dalam operasi pengelasan GTAW dipresentasikan dalam Gambar 2.2 berikut

Current type	DC	DC	Balanced AC	Unbalanced AC
Electrode polarity	Negative	Positive	50% Negative 50% Positive	70% Negative 30% Positive
Electron and ion flow				
Joint penetration characteristics				
Oxide cleaning action	None	Very wide zone	Wide zone	Narrow zone
Heat balance in the arc (approx.)	70% at work end 30% at electrode end	30% at work end 70% at electrode end	50% at work end 50% at electrode end	70% at work end 30% at electrode end
Joint penetration	Deep; narrow	Shallow; wide	Medium	Deep; medium
Electrode capacity	Excellent e.g., 3.18 mm (0.125 in.)— 400 A	Poor e.g., 6.35 mm (0.250 in.)— 120 A	Good e.g., 3.18 mm (0.125 in.)— 225 A	Very good e.g., 3.18 mm (0.125 in.)— 325 A

Gambar 2. 2 Karakteristik Tipe Arus untuk Las GTAW (Handbook and Committee 2015)

2.3 Aluminium

Aluminium termasuk ke dalam kelompok logam non-ferrous yang dikenal sebagai material ringan dengan ketahanan korosi yang tinggi. Selain itu, aluminium memiliki konduktivitas listrik dan termal yang baik serta kemudahan dalam proses manufaktur, baik melalui metode pembentukan maupun permesinan. Keunggulan sifat-sifat tersebut menjadikan aluminium banyak dimanfaatkan dalam berbagai aplikasi teknik. Secara kimia, aluminium (Al) merupakan unsur ketiga terbanyak di kerak bumi setelah oksigen dan silikon.

Kemampuan deformasi plastis aluminium yang sangat baik berkaitan erat dengan struktur kristalnya yang simetris dan stabil secara termodinamik, yaitu struktur *Face Centered Cubic* (FCC). Dalam kondisi murni, aluminium memiliki modulus elastisitas yang relatif rendah, sekitar 70 GPa, serta kekuatan tarik yang juga rendah, yaitu sekitar 80 MPa. Keunggulan lain dari aluminium adalah ketahanannya terhadap korosi, yang dihasilkan dari terbentuknya lapisan oksida

tipis dan stabil di permukaan logam. Lapisan aluminium oksida (Al_2O_3) tersebut terbentuk akibat tingginya afinitas aluminium terhadap oksigen, sehingga berfungsi sebagai pelindung alami yang menghambat proses korosi lebih lanjut, berbeda dengan perilaku baja. Meskipun demikian, aluminium jarang digunakan dalam bentuk murni untuk aplikasi struktural karena keterbatasan kekuatannya, sehingga umumnya dipadukan dengan unsur paduan tertentu guna meningkatkan sifat mekaniknya (Mathers, 2002). Berdasarkan responsnya terhadap perlakuan panas, paduan aluminium dapat dikelompokkan ke dalam dua kategori utama, yaitu paduan aluminium yang dapat diperkuat melalui perlakuan panas (*heat treatable*) dan paduan aluminium yang tidak mengalami peningkatan kekuatan melalui perlakuan panas (*non-heat treatable*). Klasifikasi ini selanjutnya menjadi dasar dalam pengelompokan berbagai seri paduan aluminium yang digunakan dalam aplikasi teknik dan industri.

A. Aluminium–Copper Alloy (Seri 2xxx)

Paduan aluminium dengan unsur tembaga pada seri 2xxx tergolong paduan yang dapat diperkuat melalui proses *heat treatment*, khususnya bila kadar Cu berada pada kisaran 2,5–5%. Salah satu paduan yang paling dikenal dalam kelompok ini adalah paduan 2017, yang dikenal sebagai *duralumin*, dengan komposisi standar sekitar 4% Cu, 0,5% Mg, dan 0,5% Mn. Pengembangan lebih lanjut dilakukan dengan meningkatkan kandungan magnesium, sehingga dihasilkan paduan 2024 yang dikenal sebagai *super duralumin*, dengan komposisi mendekati Al–4,5%Cu–1,5%Mg–0,5%Mn. Namun demikian, keberadaan Cu menyebabkan ketahanan korosi paduan ini relatif rendah. Oleh karena itu, apabila dibutuhkan ketahanan korosi yang tinggi, permukaannya biasanya dilapisi aluminium murni atau paduan aluminium tahan korosi yang dikenal sebagai *alclad sheet*. Paduan seri ini banyak diaplikasikan pada komponen yang beroperasi pada suhu tinggi, seperti piston dan *cylinder head* pada mesin pembakaran dalam.

B. Aluminium–Manganese Alloy (Seri 3xxx)

Mangan merupakan unsur paduan yang mampu meningkatkan kekuatan aluminium tanpa menurunkan ketahanan korosinya, sehingga banyak digunakan dalam pembuatan paduan tahan korosi. Berdasarkan diagram fasa,

senyawa Al_6Mn (25,3%) berada dalam kondisi setimbang dengan larutan padat aluminium. Dalam praktiknya, paduan $\text{Al}-1,2\%\text{Mn}$ serta paduan dengan tambahan 1,0% Mg dikenal sebagai paduan 3003 dan 3004, yang digunakan tanpa perlakuan panas. Seri 3xxx termasuk kelompok paduan yang tidak dapat dikeraskan melalui *heat treatment*. Paduan 3003 dengan kandungan 1,2% Mn memiliki sifat mudah dibentuk, ketahanan korosi yang baik, serta kemampuan las (*weldability*) yang tinggi, sehingga banyak digunakan pada pipa dan tangki penyimpanan minyak.

C. Aluminium–Silicon Alloy (Seri 4xxx)

Paduan aluminium–silikon memiliki kemampuan alir yang sangat baik, menghasilkan permukaan coran yang halus, serta tidak mengalami *hot shortness*, sehingga sangat sesuai untuk aplikasi pengecoran. Selain itu, paduan ini bersifat ringan, memiliki ketahanan korosi yang baik, koefisien muai termal yang rendah, serta konduktivitas panas dan listrik yang tinggi. Keunggulan tersebut menyebabkan paduan $\text{Al}-\text{Si}$ digunakan secara luas. Dalam kondisi tertentu, modifikasi struktur tidak selalu diperlukan. Sifat mekanik silumin dapat ditingkatkan secara signifikan melalui perlakuan panas, serta sedikit ditingkatkan dengan penambahan unsur paduan. Umumnya digunakan tambahan 0,15–0,4% Mn dan sekitar 0,5% Mg. Paduan yang diberi perlakuan pelarutan dan penuaan dikenal sebagai silumin gamma, sedangkan paduan yang hanya ditemper disebut silumin beta. Untuk aplikasi yang memerlukan kekuatan pada temperatur tinggi, paduan ini dapat ditambahkan Mg serta Cu dan Ni, dan banyak dimanfaatkan sebagai bahan torak mesin.

D. Aluminium–Magnesium Alloy (Seri 5xxx)

Pada sistem biner $\text{Al}-\text{Mg}$, fasa tunggal yang berada dalam kesetimbangan dengan larutan padat aluminium adalah senyawa antarlogam Al_3Mg_2 . Struktur kristalnya umumnya berbentuk *hexagonal close-packed* (hcp), meskipun dalam beberapa kondisi dapat dijumpai struktur *face-centered cubic* (fcc) yang kompleks. Sistem ini memiliki titik eutektik sekitar 450°C pada kadar 35% Mg. Batas kelarutan padat magnesium mencapai 17,4% pada *temperatur eutektik* dan menurun hingga sekitar 1,9% Mg pada suhu kamar, sehingga potensi terjadinya penuaan masih dimungkinkan. Paduan $\text{Al}-\text{Mg}$ dikenal memiliki

ketahanan korosi yang sangat baik dan sering disebut sebagai *hidronalium*. Paduan dengan kandungan 2–3% Mg mudah ditempa, digulung, dan diekstrusi. Secara umum, seri 5xxx tergolong paduan non-*heat treatable*. Salah satu paduan yang banyak digunakan adalah 5083 dalam kondisi anil, dengan sekitar 4,5% Mg, yang memiliki kekuatan tinggi serta kemampuan las yang sangat baik, sehingga sering digunakan sebagai material tangki LNG.

E. Alumunium magnesium silikon alloy (seri 6xxx)

Penambahan sedikit Mg pada Al akan menyebabkan pengerasan penuaan sangat jarang terjadi, namun apabila secara simultan mengandung Si, maka dapat diperkeras dengan penuaan panas setelah perlakuan pelarutan. Hal ini dikarenakan senyawa Mg_2Si berkelakuan sebagai komponen murni dan membuat keseimbangan dari sistem biner semu dengan Al. Paduan dalam sistem ini memiliki kekuatan yang lebih kecil dibanding paduan lainnya yang digunakan sebagai bahan tempaan, tetapi sangat liat, sangat baik kemampuan bentuknya untuk penempaan, ekstrusi dan sebagai tambahan dapat diperkuat dengan perlakuan panas setelah pengerjaan. Paduan 6061 banyak digunakan sebagai rangka konstruksi kapal. Karena paduannya memiliki kekuatan yang cukup baik tanpa mengurangi hantaran listrik maka dipergunakan untuk kabel tenaga. Dalam hal ini percampuran dengan Cu, Fe, dan Mn perlu dihindari karena unsure unsur tersebut menyebabkan tahanan listrik menjadi tinggi. Magnesium dan Silikon membentuk senyawa Mg_2Si (Magnesium Silisida) yang memberikan kekuatan tinggi pada paduan ini setelah proses heat treatment. Seri 6053, 6061, 6063 memiliki sifat tahan korosi sangat baik dari pada heat treatable aluminium lainnya. Penggunaan aluminium seri 6xxx banyak digunakan untuk piston motor dan silinder head motor bakar, part sepeda

F. Alumunium Zink alloy (seri 7xxx)

Aluminium menyebabkan keseimbangan biner semu dengan senyawa antar logam $MgZn_2$ dan kelarutannya menurun apabila temperaturnya turun. Telah diketahui sejak lama bahwa paduan sistem ini dapat dibuat keras sekali dengan penuaian setelah perlakuan pelarutan. Tetapi sejak lama, tidak dipakai sebab mempunyai sifat patah getas oleh retakan korosi tegangan. Di Jepang pada

permulaan tahun 1940, Iragashi dkk mengadakan studi dan berhasil dalam pengembangan suatu paduan dengan penambahan kira-kira 0,3%Mn atau Cr, dimana butir Kristal padat diperhalus, dan mengubah bentuk presipitasi serta retakan korosi tegangan tidak terjadi. Paduan ini mempunyai kekuatan tertinggi diantara paduan. paduan lainnya. Penggunaan paduan ini paling besar adalah untuk konstruksi pesawat udara. Di samping itu penggunaannya menjadi lebih penting sebagai bahan konstruksi.

2.3.1 Aluminium 6061

Alumunium seri 6061 adalah seri alumunium dengan kekuatan sedang namun memiliki ketahanan korosi yang bagus. Seri ini merupakan seri alumunium dengan kekuatan yang paling tinggi daripada seri 6000 lainnya. Kandungan mangan yang banyak mengatur struktur butiran sehingga menjadikan alumunium seri ini lebih kuat. Adapun *chemical composition*, *physical properties*, *mechanical properties*, dan *thermal properties* yang tertera.

2.3.2 Chemical Composition Aluminium 6061

Chemical composition dari material aluminium 6061 dapat dilihat pada tabel 2.1 berikut.

Tabel 2. 1 *Chemical Composition*

Alloy	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Other Elements		Aluminium Min
									Each	Total	
6061	0.40 -0.8	0.7	0.15 0.40	0.15	0.8- 1.2	0.04 0.35	0.25	0.15	0.05	0.15	remainder

Sumber ASTM B 209, 2021

2.3.3 Mechanical Properties Aluminium 6061

Sedangkan kekuatan sifat mekanis material aluminium 6061 dicantumkan pada Tabel 2.2 berikut:

Tabel 2. 2 *Mechanical Properties*

Alloy	Tensile Strength		Yield Strength		Elongation %		Reduction of Area %	Hardness
	Ksi	Mpa	Ksi	Mpa				
6061	42	290	34	240	10		-	-

Sumber ASTM B 209, 2021

2.3.4 *Pengelasan Aluminium*

Kualitas hasil las pada aluminium cenderung lebih rendah dibandingkan dengan hasil las pada material baja. Permasalahan utama yang kerap muncul berkaitan dengan karakteristik aluminium yang rentan mengalami proses oksidasi sehingga menghasilkan senyawa Al_2O_3 . Oleh karena itu, prosedur standar mengharuskan pembersihan area permukaan aluminium terlebih dahulu, yang kemudian segera diikuti dengan proses pengelasan guna meminimalkan risiko terjadinya oksidasi. Durasi paparan oksidasi berbanding lurus dengan munculnya tekstur kasar berbentuk bintik-bintik pada zona sambungan las. Proses pembentukan lapisan Al_2O_3 dapat diidentifikasi melalui perubahan tampilan visual dimana permukaan Al yang awalnya berwarna perak berkilau secara bertahap menjadi kusam seiring dengan perkembangan lapisan oksida akibat interaksi langsung dengan O_2 . Apabila permukaan logam aluminium terpapar langsung ke atmosfer terbuka, reaksi pembentukan aluminium oksida terjadi dengan laju yang sangat tinggi (Ederson, 2008).

Paduan aluminium memiliki sejumlah karakteristik yang kurang menguntungkan dalam proses pengelasan sebagaimana dikemukakan oleh C di antaranya sebagai berikut.

1. Aluminium mempunyai konduktivitas panas yang sangat tinggi, sehingga energi panas yang diberikan cepat menyebar. Kondisi ini menyulitkan pemanasan dan peleburan secara lokal hanya pada area tertentu.
2. Paduan aluminium sangat mudah bereaksi dengan oksigen dan membentuk lapisan oksida aluminium (Al_2O_3) yang memiliki titik leleh jauh lebih tinggi dibandingkan logam induknya. Lapisan oksida tersebut menghambat terjadinya peleburan dan penyatuan yang baik antara logam dasar dan logam las.
3. Nilai koefisien muai aluminium tergolong besar, sehingga material ini mudah mengalami perubahan bentuk selama pemanasan dan pendinginan. Akibatnya, paduan aluminium yang memiliki kecenderungan getas pada temperatur tinggi rentan mengalami pembentukan retak panas.

4. Terdapat perbedaan yang signifikan antara kelarutan hidrogen dalam aluminium cair dan dalam keadaan padat. Apabila proses pembekuan berlangsung terlalu cepat, hidrogen yang terjebak akan membentuk pori-pori halus akibat kantong gas yang tertinggal di dalam logam las.
5. Aluminium memiliki massa jenis yang rendah, sehingga berbagai unsur atau senyawa lain yang terbentuk selama proses pengelasan cenderung mengendap atau terperangkap di dalam logam cair. Kondisi ini mempermudah masuknya zat-zat yang tidak diinginkan. Selain itu, titik leleh dan viskositas aluminium yang relatif rendah menyebabkan daerah yang terpengaruh panas mudah mencair dan menetes.

2.4 Filler Metal

Material pengisi (*filler metal*) merupakan unsur logam murni atau campuran paduan yang berfungsi sebagai bahan tambahan dalam operasi penyambungan seperti welding, soldering, maupun brazing yang dikenal dengan istilah consumable material (AWS D1.1, 2025). Penentuan jenis material pengisi memerlukan pertimbangan yang matang dan teliti guna memastikan output sambungan las mencapai standar yang diinginkan dengan karakteristik kekuatan yang optimal serta menekan potensi terjadinya defect pada hasil lasan (Lubis & Wahyudianto, 2025). Ketidaksesuaian antara material tambahan dengan base metal tidak dapat diabaikan karena akan mengakibatkan kegagalan sambungan. Dalam kondisi dimana penyambungan tetap harus dilakukan meskipun terdapat incompatibility, diperlukan penggunaan material perantara (*intermediate layer*) yang compatible terhadap kedua material tersebut. Pada aplikasi proses GTAW untuk logam aluminium 6061, digunakan filler metal tipe ER5356 dan ER4043. Pemilihan ER5356 didasarkan pada performa shear strength yang superior serta resistensi korosi yang excellent ketika terpapar lingkungan air laut (Muralidharan & Dinakar, 2022). Di bawah ini merupakan Tabel 2.3 yang menunjukkan *chemical composition* dari *filler metal* ER 5356.

Tabel 2. 3 *Chemical Composition Filler Metal ER5356 dan ER4043.*

Type	Composition								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Other Elements
ER5356	0,25	0,40	0,10	0,05-0,20	4,5-5,5	0,05-0,20	0,10	0,06-0,20	0,15
ER4043	4.5–6.0	0.8	0.30	0.05	0.05	—	0.10	0.20	0,15

Sumber (AWS A5.10, 2021)

2.4.1 *Mechanical Properties Filler Metal*

Sedangkan dari *Mechanical Properties filler metal* dicantumkan pada Tabel 2.4 berikut:

Tabel 2. 4 *Mechanical Komposisi*

AWS Clasification	Tensile Strength, minimum (ksi) [MPa]	Yield Strength (ksi) [MPa]	Persent Elongation
ER5356	35 [240]	Not specified	Not specified
ER4043	24 [165]	Not specified	Not specified

Sumber (AWS A5.10, 2021)

2.5 Gas Pelindung

Gas pelindung (*shielding gas*) adalah gas yang diaplikasikan selama operasi pengelasan berlangsung. Fungsi dari gas ini mencakup beberapa aspek, yaitu:

1. Memberikan proteksi terhadap kontaminasi elemen-elemen yang tidak diinginkan.
2. Mengontrol tegangan pada arc welding.
3. Mengatur suhu pada zona arc.
4. Menentukan kualitas dari *deposited metal*.

Metode GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) termasuk dalam kategori arc welding yang memanfaatkan gas inert sebagai medium proteksi dengan menggunakan elektroda berbahan tungsten atau wolfram. Jenis gas pelindung yang kompatibel untuk teknik pengelasan ini meliputi argon, helium, ataupun kombinasi dari kedua gas tersebut. Gas argon sebagai gas mulia tersedia dalam berbagai level kemurnian, yakni grade A (kemurnian ultra tinggi), grade B (kemurnian tinggi), dan grade C (grade untuk aplikasi welding). Klasifikasi gas argon terbagi menjadi 3 kategori:

1. Grade A merupakan argon dengan *Ultra High Purity* yang diaplikasikan pada sektor elektronik dan industri sejenis, serta dalam pengoperasian spectrograph.
2. Grade B merupakan argon *High Purity* yang digunakan pada industri manufaktur lampu dan aplikasi serupa.
3. Grade C merupakan argon *Commercial Grade* yang diterapkan dalam sektor pengelasan dan aplikasi metalurgi.

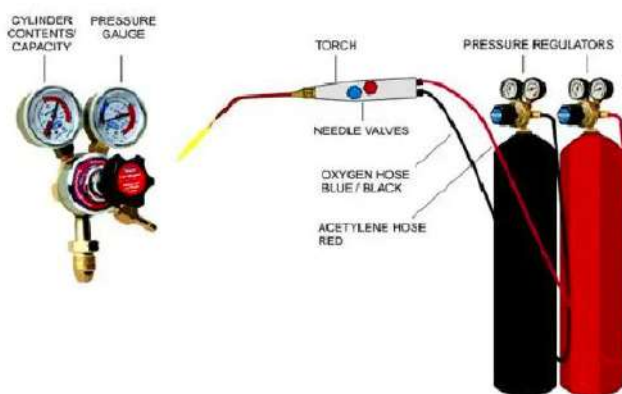
2.6 Preheat (Pemanasan Awal)

Berdasarkan definisi AWS (*American Welding Society*), preheat merupakan energi panas yang diaplikasikan pada material logam yang akan mengalami proses welding dengan tujuan mencapai dan mempertahankan preheat temperature. Adapun preheat temperature didefinisikan sebagai temperatur base metal di sekitar zona yang akan di-weld sebelum proses pengelasan diinisiasi. Zona dengan jarak 50-100 mm (ekuivalen dengan 6 kali thickness pelat) pada masing-masing sisi joint dipanaskan secara merata (Sunaryo, 2021). Dalam studi ini, variasi temperatur preheat yang diterapkan mencakup tanpa preheat (temperatur ambient), 80°C dan 120°C. Prosedur pemanasan awal pada aluminium 6061 memiliki kesamaan dengan prosedur pada baja yakni menggunakan gas oxyacetylene. Perbedaan fundamental terletak pada level temperature. Yang diaplikasikan. Aluminium dengan melting point yang lebih rendah dibanding baja memerlukan pendekatan blender, yaitu dengan mengatur posisi torch agar temperatur pemanasan terkontrol (ASM Welding handbook vol 2, 1990). Mengacu pada (Structural Welding Code Aluminium, 2014), aplikasi suhu preheat untuk aluminium heat treatable diperbolehkan dengan batasan maksimum 120°C.

Tujuan fundamental dari preheat adalah mengurangi kecepatan cooling rate pada weld metal dan base metal yang memfasilitasi difusi hidrogen keluar sehingga meminimalisir risiko cracking dan meningkatkan toughness material (Meng, 2010). (Studi et al., 2021) mengkaji dampak temperature preheat terhadap karakteristik mekanis dan microstructure pada sambungan TIG aluminium alloy. Output pengujian tensile mengindikasikan bahwa fracture terjadi pada interface antara coarse HAZ dan fine HAZ. Fenomena ini disebabkan oleh zona interface yang

memiliki strength dan hardness teren (ASM Welding handbook vol 2, 1990) dah sehingga menjadi area paling vulnerable.

(Haris et al., 2024) Efek preheat pada Al 6061-T6 dengan variasi temperatur 125°C, 150°C, 200°C yang menunjukkan bahwa treatment preheat menghasilkan transformasi microstructure yang ditandai dengan grain boundary enlargement pada weld metal, grain coarsening pada zona HAZ dan parent metal. (Zhu et al., 2018) melakukan investigasi menggunakan Aluminium alloy 3003 yang menyimpulkan bahwa preheat mampu meningkatkan tensile strength dan mempengaruhi morfologi microstructure. Penelitian tersebut mengaplikasikan parameter preheat pada temperatur 100°C, 150°C dan 200°C dengan performa optimal dicapai pada 200°C. Temperatur preheat 200°C juga efektif dalam mereduksi defect lack of fusion Rangkaian oxyacetylene gas dapat dilihat pada Gambar 2.3 berikut



Gambar 2. 3 *Oxyacetylene* Gas (Technology Student, 2021)

2.7 Hot Crack

Hot crack terbagi menjadi 2 yaitu *solidification cracking* yang terjadi pada *weld metal* dan *liquation crackining* Yang terjadi pada daerah HAZ.

2.7.1 Solidification Cracking

Solidification cracking merupakan fenomena yang terjadi pada *weld metal*. (sindo kou, 2003) dalam kajiannya mengenai welding metalurgi menyatakan bahwa faktor-faktor metalurgis yang berkontribusi terhadap susceptibility weld metal terhadap solidification cracking meliputi: rentang temperatur solidifikasi, kuantitas dan pola distribusi liquid phase pada tahap final solidifikasi, *primary solidification phase*, serta *surface* tension terhadap grain boundary liquid. Pada proses pengelasan aluminium alloy dengan

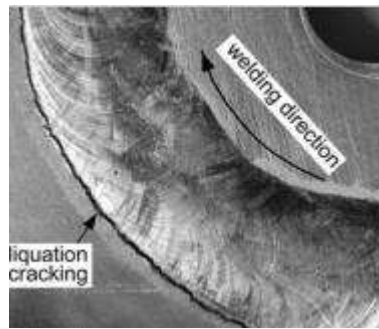
karakteristik *fine equiaxed grain* ditemukan memiliki resistensi terhadap solidification cracking. Struktur *fine equiaxed grain* mampu mengalami deformasi untuk mengakomodasi contraction strain sehingga menghasilkan ductility yang lebih tinggi. Mekanisme crack healing juga dapat berlangsung lebih efektif pada material dengan grain refinement. Selain itu, grain boundary area pada material berbutir halus memiliki luasan yang jauh lebih ekstensif. Fenomena *solidification cracking* pada aluminium dapat diobservasi pada Gambar 2.4 berikut.



Gambar 2. 4 *Liquation Cracking* (sindo kou, 2003)

2.7.2 *Liquation Cracking*

Liquation cracking terbentuk pada zona coarse grain HAZ yang berdekatan dengan fusion line sebagai konsekuensi dari pemanasan material hingga mencapai temperatur tinggi yang sufficient untuk menyebabkan liquation dari low melting point constituents yang terletak pada grain boundaries. Mayoritas aluminium alloy menunjukkan high susceptibility terhadap liquation cracking yang diakibatkan oleh beberapa faktor yaitu: *wide range cooling temperature*, elevated thermal conductivity, significant solidification shrinkage (density solid phase melebihi density liquid phase), serta high coefficient thermal expansion (sindo kou, 2003). Oleh karena itu, untuk meminimalisir tensile strain pada material aluminium dapat diimplementasikan prosedur preheating sesuai standar (Structural Welding Code Aluminium, 2014). Prosedur preheating berkontribusi dalam mitigasi *hot cracking* melalui mekanisme pengurangan cooling rate dan modifikasi material properties. Fenomena *Liquation Cracking* pada aluminium dapat diobservasi pada Gambar 2.5 berikut.



Gambar 2. 5 *Liquation Cracking* (sindo kou, 2003)

2.8 Jenis Pengujian

Tujuan dilakukannya pengujian material adalah untuk mengetahui karakteristik mekanik suatu bahan atau mengidentifikasi keberadaan cacat pada material maupun produk akhir, sehingga pemilihan material dapat dilakukan secara tepat sesuai dengan kebutuhan aplikasinya. Metode pengujian diklasifikasikan menjadi dua kategori utama, yaitu: pengujian destruktif (*destructive test*) dan pengujian non-destruktif (*non-destructive test*). Pengujian destruktif dilaksanakan dengan cara memberikan beban atau tekanan pada spesimen uji hingga mengalami kegagalan atau kerusakan, dimana dari metode ini dapat diperoleh data mengenai sifat-sifat mekanik material. Sementara itu, pengujian non-destruktif dilakukan dengan memberikan perlakuan khusus pada spesimen uji atau produk jadi tanpa menyebabkan kerusakan permanen, sehingga cacat atau diskontinuitas pada benda uji dapat terdeteksi (Wang et al., 2022)

2.8.1 Uji Visual

Uji visual merupakan pengujian hasil pengelasan yang termasuk dalam metode NDT yang dilakukan untuk memastikan bahwa hasil lasan terbebas dari cacat yang tidak diinginkan. Proses ini dilakukan dengan cara mata telanjang dengan pencahayaan yang memadai dan jarak pandang yang tepat (Ginzel, 2014).

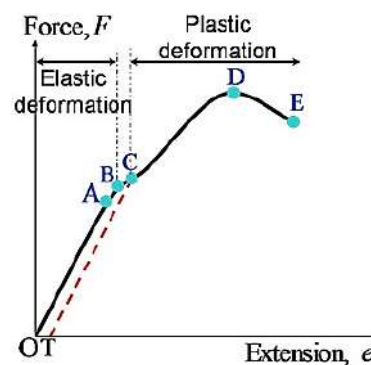
2.8.2 Uji Tarik

Pengujian tarik sering dilakukan untuk melengkapi informasi dasar mengenai kekuatan suatu material dan sebagai data pendukung untuk spesifikasi bahan. Kekuatan (*strength*) menunjukkan kemampuan bahan untuk

menerima tegangan tanpa menyebabkan bahan menjadi patah. Kekuatan ini ada beberapa jenis, tergantung pada jenis beban yang diberikan, seperti: kekuatan tarik, kekuatan geser, kekuatan tekan, kekuatan torsi, dan kekuatan lengkung. Uji tarik adalah metode yang digunakan untuk menguji kekuatan tarik (*tensile strength*) suatu material dengan cara memberikan beban statis yang searah dan diberikan secara perlahan atau cepat. Hasil dari pengujian ini berupa sifat mekanik material seperti kekuatan dan elastisitas. Nilai kekuatan dan elastisitas dari material dapat dilihat dari kurva hasil uji tarik (Munir, 2019) Selain kekuatan dan elastisitas, sifat lain yang dapat diketahui adalah:

1. Kekuatan luluh (*yield strength*) dari material
2. Keuletan (*ductility*) dari material
3. Kelentingan (*resilience*) dari material

Pada pengujian tarik, spesimen diberi beban aksial yang semakin besar secara terus menerus. Akibat pembebanan aksial tersebut, spesimen mengalami perubahan panjang. Perubahan beban (P) dan perubahan panjang (ΔL) tercatat pada mesin uji tarik berupa grafik yang merupakan fungsi beban dan pertambahan panjang, disebut sebagai grafik P - ΔL , yang kemudian diubah menjadi grafik Stress-Strain (grafik σ - ϵ) yang menggambarkan sifat bahan secara umum seperti pada Gambar 2.7



Gambar 2. 6 Grafik hasil pengujian tarik (Munir, 2019)

Keterangan :

- A : Titik proporsionalitas
 B : Titik elastis

- C : Titik yield
- D : Titik maksimum
- E : Titik patah

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Hasan Ikhwani, 2020) perlakuan *preheat* pada material aluminium 6061 dapat mempengaruhi sifat mekanik dari material tersebut, semakin tinggi temperatur *preheat* yang diberikan dapat meningkatkan kekuatan tarik pada material tersebut. Adapun *acceptance criteria* yang digunakan pada penelitian ini adalah AWS D1.2. Bahwa nilai kekuatan tarik spesimen tidak boleh kurang dari nilai minimum yang disyaratkan untuk material induk dalam kondisi lunak AWS D1.2. Kekuatan tarik minimum pada material aluminium 6061 sesuai dengan AWS D1.2 adalah 165 MPa.

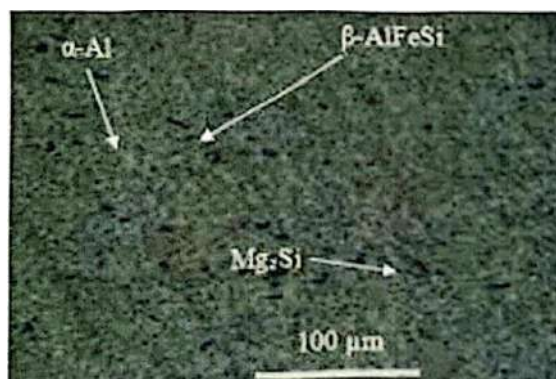
2.8.3 Uji Struktur Makro

Pengujian makrostruktur adalah metode inspeksi visual untuk mendeteksi cacat menggunakan mata telanjang, lensa makro, atau mikroskop dengan perbesaran rendah (di bawah 50x) baik dengan maupun tanpa proses etsa. Proses etsa dilakukan untuk meningkatkan kemampuan melihat struktur optik dan mikrostruktur material menggunakan larutan khusus yang dipilih berdasarkan komposisi kimia, kondisi tegangan, atau struktur kristal material, sehingga memudahkan penentuan ukuran butir (*grain size*) dan identifikasi fasa. Tujuan dari pengujian makrostruktur adalah untuk mengamati kedalaman penetrasi dan deformasi yang terjadi akibat proses pengelasan serta menampakkan dengan jelas batas fusi (*fusion line*), zona HAZ (*Heat Affected Zone*), susunan jalur las, serta logam induk yang tidak terpengaruh panas. Hasil pemeriksaan harus menunjukkan profil sambungan las secara keseluruhan, fusi yang sempurna antara lapisan-lapisan las yang berdekatan dengan logam induk, serta ketiadaan cacat seperti retakan dan lack of fusion (Structural Welding Code Aluminium, 2014).

2.8.4 Uji Struktur Mikro

Pengujian mikrostruktur merupakan salah satu tipe pengujian metalografi. Metode ini dilakukan untuk mengidentifikasi cacat dan struktur butir (*grain structure*) pada logam induk (*base metal*), logam las (*weld metal*), dan zona HAZ menggunakan mikroskop dengan perbesaran 50x hingga 500x. Sebelum dilakukan pemeriksaan menggunakan mikroskop, permukaan logam las harus melalui proses etsa terlebih dahulu. Proses etsa dilakukan untuk meningkatkan kemampuan melihat struktur optik dan mikrostruktur material menggunakan larutan khusus yang dipilih berdasarkan komposisi kimia, kondisi tegangan, atau struktur kristal material, sehingga memudahkan identifikasi fasa.

Material yang digunakan pada penelitian ini adalah aluminium 6061 T4. Berdasarkan *ASM Handbook Metallography*, pada logam induk terbentuk mikrostruktur berupa Mg_2Si dan Fe_3SiAl_{12} . Mikrostruktur Mg_2Si pada logam induk terlihat sebagai titik-titik berwarna hitam sedangkan Fe_3SiAl_{12} terlihat sebagai partikel berwarna abu-abu. Fe_3SiAl_{12} adalah fasa yang terbentuk karena adanya unsur Fe dan Si yang berikatan dengan aluminium. Mg_2Si adalah senyawa yang terbentuk ketika magnesium bereaksi dengan mengikat silicon yang mengandung presipitat Mg_2Si , dimana Mg_2Si cenderung memiliki sifat keras dan kuat. Partikel Mg_2Si memiliki bentuk agak bulat dan jumlahnya lebih banyak pada tahap awal presipitasi (pada suhu lebih rendah), tetapi menjadi lebih memanjang dan jumlahnya lebih sedikit pada suhu tinggi (Bayat et al., 2017). Struktur mikro pada logam induk aluminium 6061 dapat dilihat pada Gambar 2.7 berikut.



Gambar 2. 7 Struktur Mikro *Base Metal* Aluminium 6061 (Wicaksono et al., 2013)

2.8.5 Uji Kekerasan

Pengujian kekerasan merupakan metode yang paling efektif untuk menentukan nilai kekerasan dari suatu material. Metode pengujian kekerasan yang umum digunakan adalah Rockwell, Brinell, dan Vickers. Perbedaan dari ketiga metode tersebut terletak pada bentuk indenter yang digunakan (Tan & Said, 2009). Kekerasan adalah salah satu properti mekanik dari suatu material. Kekerasan material menunjukkan kemampuan material untuk menahan perubahan bentuk atau deformasi plastis yang disebabkan oleh benda yang lebih keras. Nilai kekerasan setiap jenis material berbeda-beda tergantung pada komposisi kimia, proses manufaktur, atau proses pengelasan pada material. Pada penelitian yang dilakukan oleh Henny S.N. dan Fauzan N.A. (2019) terkait perlakuan preheat pada aluminium 6061, nilai kekerasan pada logam las (*weld metal*) lebih tinggi dibandingkan logam induk (*base metal*) pada hasil pengelasan aluminium 6061, hal ini dapat disebabkan oleh adanya mekanisme *precipitation hardening* (pengerasan endapan).

Metode pengujian Vickers atau lebih dikenal sebagai *Diamond Pyramid Hardness test* (DPH), pada dasarnya memiliki prinsip yang hampir sama dengan metode Brinell, namun yang membedakan adalah jenis indenter yang digunakan. Beberapa hal yang perlu diperhatikan pada metode pengujian kekerasan Vickers adalah sebagai berikut:

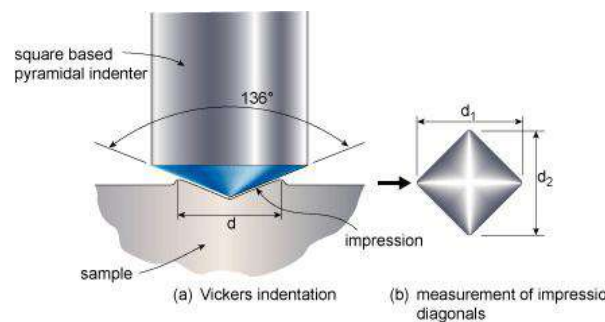
1. Spesimen harus memenuhi persyaratan permukaan yang rata dan halus, dapat ditumpu dengan baik, dan posisi permukaan harus horizontal.
2. Indenter yang digunakan berbentuk piramida intan (*diamond pyramid*) dengan alas berbentuk bujur sangkar dan sudut puncak antara dua sisi yang berhadapan adalah 136° .
3. Pada dasarnya semua beban dapat digunakan, kecuali untuk pelat tipis yang harus menggunakan beban yang ringan.
4. Pada pelaksanaannya, pengujian kekerasan ini dilakukan dengan menekan indenter pada permukaan spesimen selama 10-30 detik.

5. Nilai kekerasan dari pengujian ini dinyatakan dalam satuan DPH (*Vickers Diamond Pyramid Hardness*) yang dihitung berdasarkan panjang diagonal indentasi dengan persamaan sebagai berikut:

$$HV = (2P \sin(\alpha/2))/d^2 = 1,8544P/d^2 \quad (2.1)$$

Dimana:

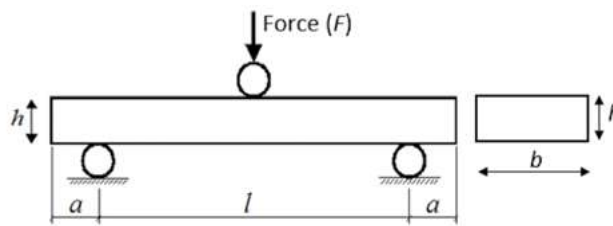
- HV = Hardness Vickers
- P = Beban (kgf)
- α = Sudut antara 2 sisi yang berhadapan pada indenter (136°)
- d = Diagonal indentasi rata-rata (mm)



Gambar 2. 8 Indentor *Hardness Vickers* (Munir, 2019)

2.8.6 Uji Tekuk

Pengujian tekuk (*bending*) merupakan proses pembebanan menggunakan mandrel atau pendorong yang dimensinya telah ditentukan untuk memaksa bagian tengah bahan uji atau spesimen tertekuk diantara dua penyangga yang dipisahkan oleh jarak yang telah ditentukan. Selanjutnya bahan akan mengalami deformasi dengan dua buah gaya yang berlawanan bekerja pada saat yang bersamaan. Pengujian *bending* dilakukan untuk mengetahui nilai modulus elastisitas suatu material. Pada pengujian ini pun terdapat fenomena yang dapat diamati, yaitu deformasi plastis. Fenomena tersebut ditandai dengan adanya defleksi pada spesimen ketika diberi beban secara perlahan (Pentura et al., 2023). Gambar 2.9 berikut ini memperlihatkan skema pengujian tekuk pada bahan uji



Gambar 2. 9 Pengujian Tekuk pada Bahan Uji (Munir, 2019)

Setelah menekuk, permukaan spesimen yang berbentuk cembung harus diperiksa dari kemungkinan adanya retak atau cacat permukaan yang lain. Jika spesimen mengalami patah (fracture) setelah ditebuk, maka spesimen dinyatakan gagal uji (rejected). Namun jika tidak patah maka kriteria keberterimaan seperti jumlah retak, dimensi retak atau cacat permukaan lain yang terlihat pada permukaan harus disesuaikan dengan standar yang diacu. Adanya retak pada sisi ketebalan atau sudut-sudut spesimen tidak dinyatakan sebagai kegagalan pengujian. Kecuali dimensinya melebihi ukuran yang ditentukan oleh standar (Munir, 2019)

Dalam pengujian tekuk (Bending Test) ada 2 jenis pengujian bending berdasarkan pengambilan spesimennya, pengujian bending transversal atau melintang dan pengujian bending longitudinal atau memanjang. Pada penelitian ini digunakan pengujian bending transversal atau melintang. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui sifat keuletan logam las serta kemampuan sambungan menahan deformasi tanpa mengalami retak pada daerah las, logam induk, maupun logam campuran (HAZ).

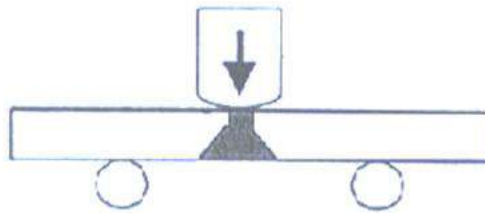
Adapun jenis-jenis pengujian bending, serta penentuan diameter mandril / penekan yang sesuai dengan ketentuan standar. Selain itu, terdapat syarat kriteria penerimaan (*acceptance criteria*) yang ditetapkan sebagai berikut:

1. Pengujian Tekuk Melintang (*Transversal Bending*)

Pada pengujian jenis ini, pengambilan spesimen tegak lurus dengan arah pengelasan. Berdasarkan arah pembebanan dan lokasi pengamatan, pengujian *transversal bending* dibagi menjadi tiga :

a) *Face Bend*

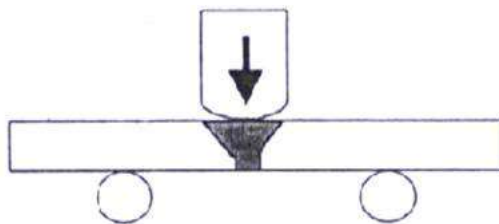
Dikatakan *face bend* jika permukaan las mengalami tegangan tarik dan akar las mengalami tegangan tekan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.10 Pengamatan dilakukan pada permukaan las yang mengalami tegangan tarik, apakah timbul retak atau tidak. Jika timbul retak dimanakah letaknya, apakah di *weld metal*, HAZ atau *fusion line* (garis perbatasan WM dan HAZ).



Gambar 2. 10 Skema Pengujian Tekuk *Face Bend* pada *Transversal Bending* (Munir, 2019)

b) *Root Bend*

Dikatakan *root bend* jika akar las mengalami tegangan tarik dan permukaan las mengalami tegangan tekan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.11 Pengamatan dilakukan pada permukaan las yang mengalami tegangan tarik, apakah timbul retak atau tidak. Jika timbul retak dimanakah letaknya, apakah di *weld metal*, HAZ atau *fusion line* (garis perbatasan WM dan HAZ).



Gambar 2. 11 Skema Pengujian Tekuk *Root Bend* pada *Transversal Bending* (Munir, 2019)

c) *Side Bend*

Dikatakan *side bend* karena penekanan dilakukan pada sisi las seperti yang ditunjukkan Pengujian ini dilakukan jika ketebalan material yang

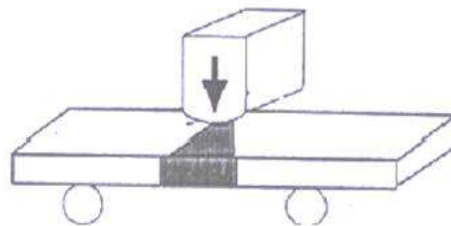
dilas lebih besar dari 3/8 inchi. Pengamatan dilakukan pada sisi las tersebut.

2. Pengujian Tekuk Memanjang (*Longitudinal Bending*)

Pada pengujian jenis ini, pengambilan spesimen searah dengan arah pengelasan berdasarkan arah pembebanan dan lokasi pengamatan. Pengujian *longitudinal bending* dibagi menjadi dua :

a) *Face Bend*

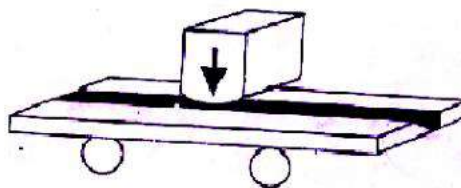
Dikatakan *face bend* jika permukaan las mengalami tegangan tarik dan akar las mengalami tegangan tekan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.04 Pengamatan dilakukan pada permukaan las yang mengalami tegangan tarik, apakah timbul retak atau tidak. Jika timbul retak dimanakah letaknya, apakah di *weld metal*, HAZ atau *fusion line* (garis perbatasan WM dan HAZ).



Gambar 2. 12 Skema Pengujian Tekuk *Side Bend* pada *Transversal Bending* (Munir, 2019)

b) *Root Bend*

Dikatakan *root bend* jika akar las mengalami tegangan tarik dan permukaan las mengalami tegangan tekan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2,12 Pengamatan dilakukan pada permukaan las yang mengalami tegangan tarik, apakah timbul retak atau tidak. Jika timbul retak dimanakah letaknya, apakah di *weld metal*, HAZ atau *fusion line* (garis perbatasan WM dan HAZ).



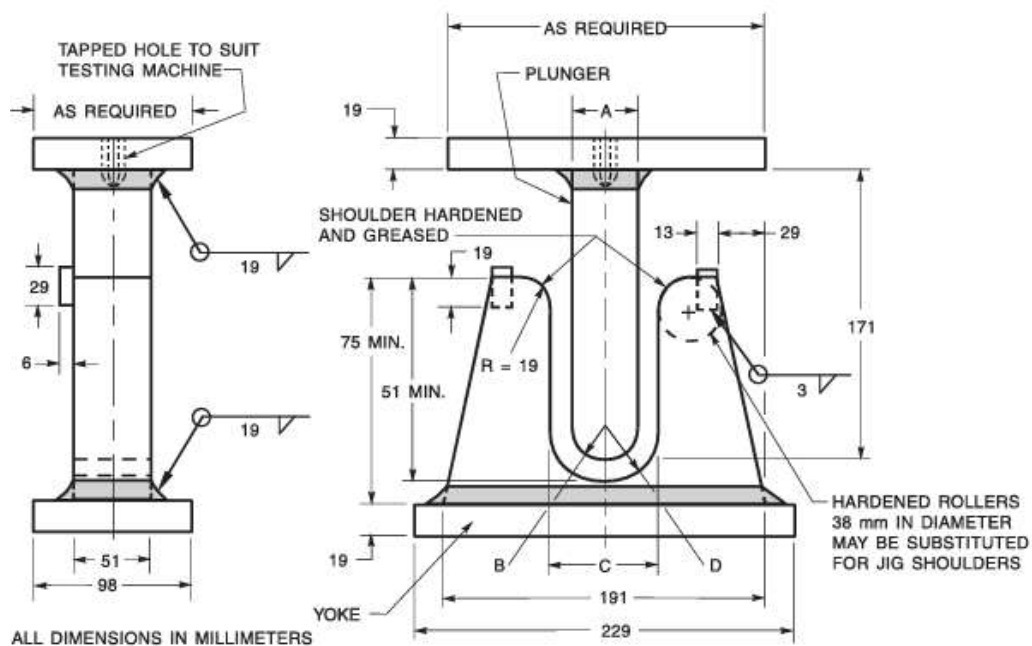
Gambar 2. 13 Skema Pengujian Tekuk *Root Bend* pada *Longitudinal Bending* (Munir, 2019)

3. Penentuan Diameter Mandril / Penekan

Dalam pemberian beban dan penentuan dimensi mandril ada beberapa faktor yang harus diperhatikan, yaitu :

- a) P-No. dari material yang diuji
- b) Elongation dari material yang diuji
- c) Kekuatan luluh (*yield strength*) dari material yang diuji

Berdasarkan standard and code AWS D1.2 menggunakan data kekuatan luluh (*yield strength*) dari material yang diuji untuk menentukan diameter mandril atau penekan. Pada Gambar 2.14 dapat dilihat cara penentuan diameter mandril / penekan berdasarkan standard and code AWS D1.2 *Structural Welding Code-Steel* .



Thickness of Specimen (mm)	A, mm	B, mm	C, mm	D, mm	Materials
10	38	19	60	30	M21 and M22
t	4t	2t	6t + 3	3t + 1.6	
3	52	26	60	30	M23 or F23 Welds
t (<3)	16-1/2t	8-1/4t	18-1/2t + 1.6	9-1/4t + 1	
10	64	32	86	43	M25 and Annealed M23
t	6-2/3t	3-1/3t	8-2/3t + 3	4-1/3t + 1.6	
10	75	38	98	49	M27 and Annealed M24
t	8t	4t	10t + 3	5t + 1.6	

Gambar 2. 14 Penentuan Diameter Mandril (Structural Welding Code Aluminium, 2014)

4. Syarat Keberterimaan Berdasarkan AWS D1.2

Untuk dapat lulus dari uji tekuk (*bending*) berdasarkan standard and code AWS D1.2 maka hasil pengujian harus memenuhi kriteria berikut ini:

Las dan zona pengaruh panas (HAZ) pada spesimen las melintang yang dibengkokkan harus sepenuhnya berada di bagian yang dibengkokkan dari spesimen setelah pembengkokan. Permukaan cembung spesimen uji lentur harus diperiksa secara visual untuk memastikan tidak adanya ketidaksempurnaan permukaan. Untuk diterima, permukaan tidak boleh mengandung ketidaksempurnaan yang melebihi dimensi berikut:

1/4 in [6 mm] Maksimum untuk retak sudut, kecuali jika retak sudut tersebut disebabkan oleh inklusi yang terlihat atau ketidaksempurnaan fusi lainnya, maka batas maksimum 1/8 in [3 mm] berlaku.

2.9 Penelitian Sebelumnya

Dari beberapa penelitian yang telah dijelaskan sebelumnya penulis telah mempelajari dan menyimpulkan dari setiap hasil penelitian yang dilakukan, dan hal tersebut dilampirkan agar dapat menjadi pembandingan dan pedoman yang dilihat pada Tabel 2.5 berikut

Tabel 2. 5 Penelitian Terdahulu

NO	Nama Peneliti	JUDUL	Variasi Penelitian	KESIMPULAN
1	T. B. Sitorus dan R. K. Sinaga (2019)	<i>Effect of Preheat and Post Heat On Mechanical properties of 6061 Aluminium Tungsten Inert Gas Welded Joints</i>	<i>Preheat</i> dan <i>post heat</i> dengan variasi suhu 130C, 160°C dan 190C	Semakin tinggi suhu <i>preheat</i> , nilai kekuatan tarik akan semakin meningkat
2	Wei Gong (2023)	<i>Influence of Preheating Temperature on the Microstructure and Mechanical Properties of 6061/TAl Composite Plates</i>	-Material: 6061-T6 Al alloy rod (10×10×200 mm ³) + TA1 Ti sheet (10 mm thick) - Metode: AFSD (Additive Friction Stir Deposition)	Lebar difusi interface Al/Ti dan <i>bonding shear strength</i> meningkat seiring peningkatan suhu preheating dan dari zona boundary ke center. Sample center pada preheating 200°C menunjukkan lebar difusi terbesar dan <i>bonding strength</i> tertinggi (148 MPa). Terdapat korelasi positif antara lebar difusi

		<i>Fabricated by AFSD</i>	- Suhu preheating: RT (25°C), 100°C, 200°C	<i>interface dan bonding shear strength. Pada P-RT zona boundary: mechanical bonding saja; sample lain: kombinasi mechanical dan metallurgical bonding. IMCs (TiAl₃) muncul karena suhu tinggi di center zone, preheating 200°C, dan energi Gibbs rendah, meningkatkan shear strength composite plate</i>
3	Riadini Wanty Lubis (2024),	Analisis Pengaruh Variasi Logam Pengisi (<i>Filler</i>) pada Proses Pengelasan GTAW Paduan Aluminium terhadap Uji Kekerasan dan Struktur Mikro	-Material: Aluminium 6061 (300×150×6 mm) - Metode: GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) - Filler: ER 4043 dan ER 5356	<i>Filler ER 5356 tidak mengalami distorsi atau cacat visual, sedangkan filler ER 4043 mengalami distorsi akibat panas tinggi dan pendinginan cepat. Filler ER 5356 menghasilkan nilai kekerasan lebih tinggi (70,6 HVN) dibanding filler ER 4043 (69,9 HVN). Pada perbesaran 50×, 200×, 500× di daerah base metal, HAZ, dan weld area terdapat bagian berwarna terang dan hitam. Di variasi filler ER 5356, bagian weld area terdapat cacat las (porositas) yang menurunkan kualitas pengelasan</i>
4	M. Ishak (2015)	<i>Effect of Filler on Weld Metal Structure of AA6061 Aluminum Alloy by Tungsten Inert Gas Welding</i>	-Material: AA6061 (tebal 2 mm, 150×150 mm) - Metode: TIG/GTAW (AC-TIG welding) - Filler: ER5356 (Mg 4,5-6%), ER4043 (Si 4,5-6%), ER4047 (Si 11-13%) - Arus: 60A dan 70A	<i>Filler ER5356 menghasilkan ukuran butir paling halus (25,69 µm) dibanding ER4043 (52,75 µm) dan ER4047 (76,78 µm). Filler ER5356 menghasilkan nilai kekerasan tertinggi (72,9 HV) dibanding ER4043 (59,3 HV) dan ER4047 (57,6 HV). Kekuatan tarik tertinggi dicapai menggunakan filler ER5356 (171,53 MPa) dibanding ER4043 (167,34 MPa) dan ER4047 (168,03 MPa). TIG welding menggunakan filler ER5356 (Mg-rich) menghasilkan sambungan yang lebih baik dibanding ER4043 dan ER4047 (Si-rich). Peningkatan suhu preheating meningkatkan tensile stress; diperlukan investigasi lebih lanjut terhadap efek preheating untuk kualitas optimal</i>
5	(Hasan Ikhwan, 2020)	<i>Influence of Pre-Weld Heat Treatment and Aging Post-Weld Heat Treatment on Tensile Test and Microstructure of</i>	Variasi Preheat (Pre-Weld Heat Treatment) 80 °C 100 °C 120 °C Variasi PWHT (Aging Post-	<i>preheat dipilih dibandingkan PWHT karena preheat secara langsung mengendalikan laju pendinginan dan pembentukan struktur mikro selama proses pengelasan, sehingga memberikan peningkatan kekuatan tarik yang konsisten</i>

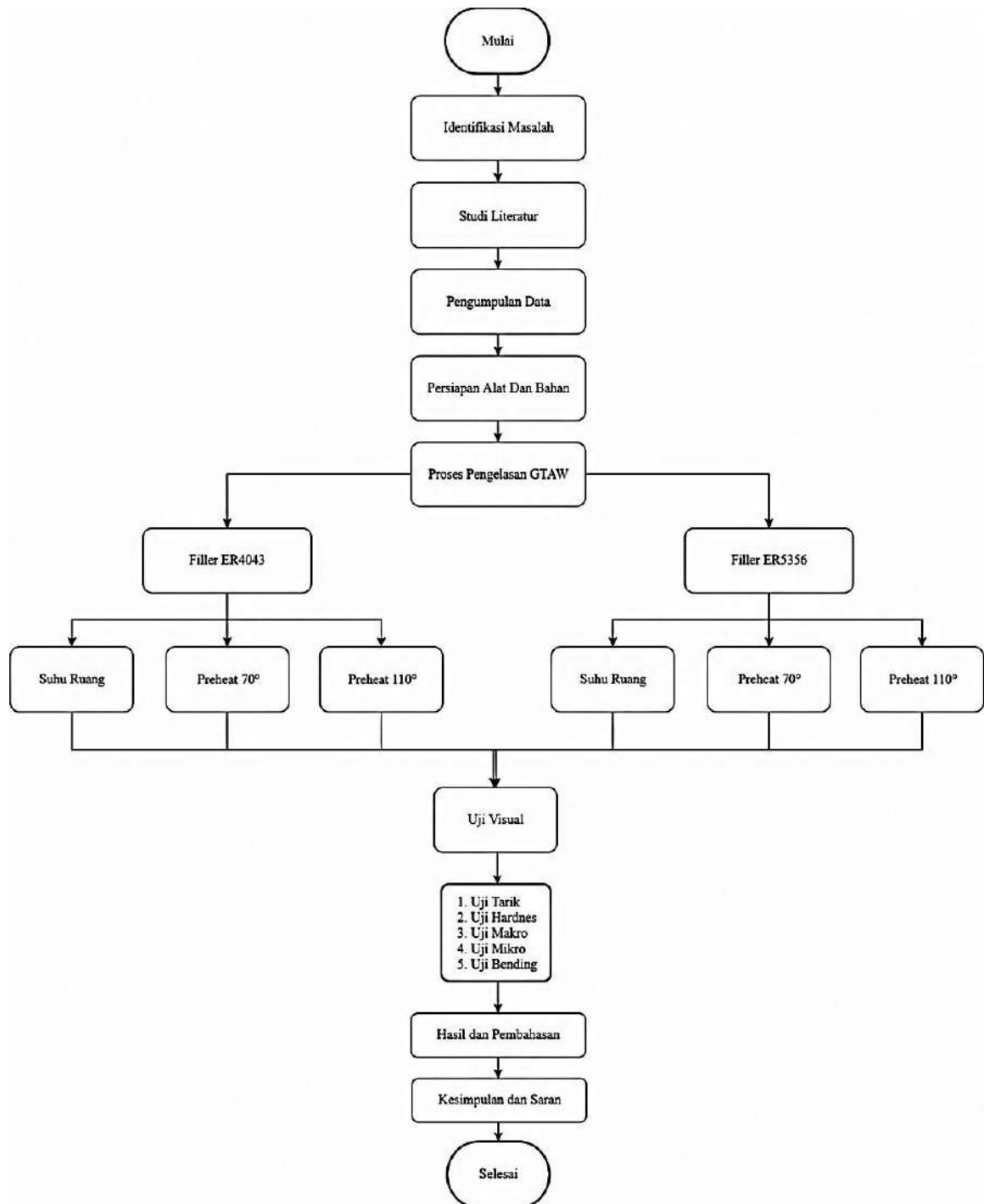
		<i>Aluminium 6061 Weld Joint</i>	<i>Weld Heat Treatment)</i> 180 °C 260 °C	pada aluminium 6061. PWHT hanya berperan sebagai perlakuan lanjutan dan tidak dapat menggantikan peran <i>preheat</i> dalam menghasilkan kualitas sambungan las yang optimal.
--	--	--------------------------------------	---	---

BAB 3

METOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Adapun diagram alir penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.1 berikut



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Studi Literatur

Studi literatur dilaksanakan sebagai proses akumulasi informasi yang kemudian berfungsi sebagai landasan teoritis dalam riset ini. Fondasi rujukan yang dimanfaatkan mencakup standar teknis/kode industri, buku panduan teknik, publikasi ilmiah, bahan ajar, kajian terdahulu, dan sumber lainnya yang relevan. Seluruh literatur yang dirujuk memiliki keterkaitan erat dengan topik-topik seperti paduan Aluminium, teknik pengelasan GTAW, prosedur pemanasan awal (preheat), logam pengisi (filler metal), properti mekanis berupa kekuatan tarik dan kekerasan, serta analisis makrostruktur dan mikrostruktur material.

3.3 Studi Lapangan

Studi lapangan meliputi identifikasi permasalahan yang terjadi ketika proses pekerjaan berlangsung di workshop fabrikasi yang berkaitan dengan nilai kekuatan logam pengisi *filler metal* dan efek *temperatur preheat* pada proses pengelasan GTAW material Aluminium 6061, serta beberapa pengujian yang akan dilakukan pada penelitian ini. Agar hasilnya dapat dijadikan referensi dan wawasan baru.

3.4 Rumusan Masalah

Berdasarkan hasil studi literatur dan studi lapangan yang telah diperoleh, sejumlah poin penting teridentifikasi sebagai fondasi penelitian yang memicu kemunculan ide dan konsep. Tahapan berikutnya meliputi formulasi permasalahan serta penentuan objektif penelitian. Rumusan masalah yang telah disusun kemudian dijadikan basis dalam melatarbelakangi pengangkatan topik tugas akhir yang akan dikaji dalam riset ini.

3.5 Persiapan Alat dan Bahan

Sebelum melaksanakan tahapan penelitian, diperlukan penyiapan seluruh peralatan dan material yang akan digunakan. Peralatan serta material yang harus disiapkan dalam riset ini meliputi:

3.5.1 Persiapan Alat

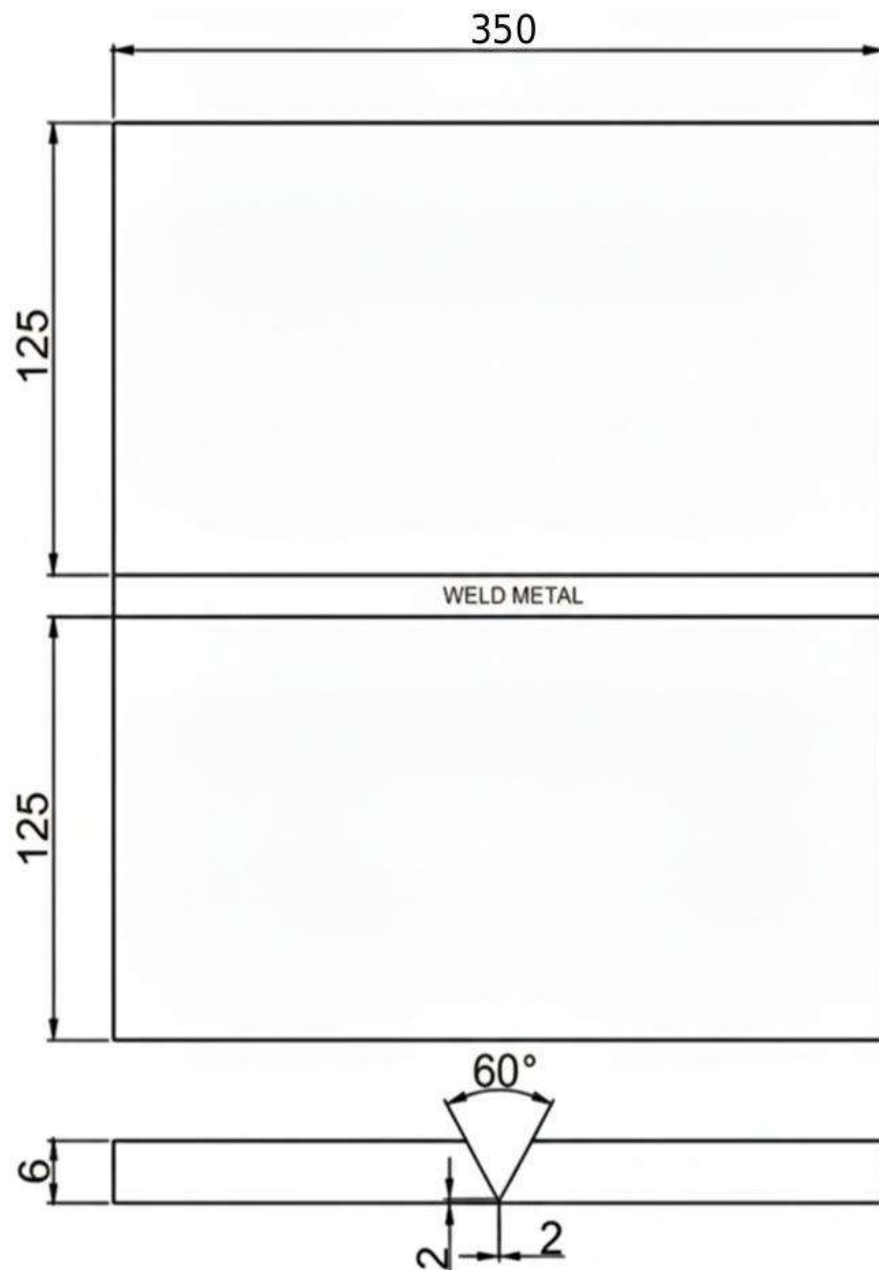
1. Mesin Las GTAW
2. Peralatan Mesin Las GTAW
3. Alat Pelindung Diri (APD)

4. Helm Las
5. Sarung Tangan Las
6. Masker
7. Apron
8. Sepatu Safety
9. Welding gauge
10. Jangka sorong
11. Taper gauge
12. Penggaris
13. Tang ampere
14. Thermogun
15. Gerinda
16. Sikat Baja
17. Kamera

3.5.2 *Persiapan Material*

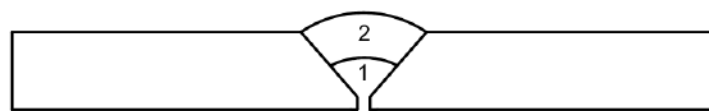
Pada penelitian ini material yang digunakan adalah material aluminium 6061 dan *filler metal* ER5356 dan ER4043. Data pengelasan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut

Material	: 6061
Ukuran	: 350mm x 250mm x 6mm
Proses pengelasan	: GTAW
Shielding gas	: Argon UHP 99,99%
Desain Sambungan	: V Groove
Root gap	: 2mm
Tipe sambungan	: <i>Butt Joint</i>
Posisi pengelasan	: 1G
Ketebelan	: 6 mm
Jumlah	: 6 <i>Test Piece</i>



Gambar 3. 2 Desain Spesimen Pengelasan

Gambar 3.3 berikut menunjukkan deposit las hasil pengelasan GTAW aluminium 6061 dengan variasi *filler metal* dan *temperatur preheat*. Deposit las terbentuk dari logam pengisi yang mencair, dan mempengaruhi penetrasi, bentuk manik las, serta kualitas ikatan sambungan.



Gambar 3. 3 Deposit Las

3.6 Proses Pengelasan

Pengelasan dikerjakan menggunakan metode GTAW mulai dari *root*, *capping* hingga *backweld*. Proses pengelasan menggunakan sebanyak 3 layer dengan menggunakan jenis logam pengisi (*filler metal*) yang berbeda di setiap *test piece*. Dalam penelitian ini, pengelasan dilakukan dengan arus bolak-balik (Alternating Current) dan menggunakan posisi datar 1G. Langkah – Langkah proses pengelasan yang dilakukan adalah sebagai berikut

1. Penyiapan Material

Material yang akan dilas disiapkan terlebih dahulu sebelum proses pengelasan dimulai.

2. Pemberian Tanda Identifikasi

Material diberi tanda pengenal agar tidak tertukar dan proses pengelasan berjalan sesuai rencana awal yang telah ditetapkan.

3. Persiapan Peralatan Pengelasan

Mesin las GTAW beserta seluruh perlengkapannya disiapkan dalam kondisi siap pakai.

4. Penyediaan Logam Pengisi

Dua jenis *filler metal* disiapkan, yaitu ER 5356 dan ER 4043 yang akan digunakan dalam proses pengelasan.

5. Penyiapan Gas Pelindung

Gas argon dengan kemurnian tinggi (UHP 99,999%) disiapkan sebagai shielding gas untuk proses GTAW.

6. Pembersihan Permukaan Material

Permukaan material yang akan dilas dibersihkan menggunakan cairan acetone untuk menghilangkan kotoran, minyak, dan debu yang menempel.

7. Pembersihan Logam Pengisi

Filler metal juga dibersihkan dengan acetone agar bebas dari kontaminasi debu, minyak, dan kotoran lainnya.

8. Proses Pemanasan Awal (*Preheat*)

Material dipanaskan terlebih dahulu menggunakan pemanas induksi (*induction heater*) atau *torch gas oxy-acetylene* hingga mencapai suhu 70°C dan 110°C.

Suhu *preheat* diukur menggunakan thermometer untuk memastikan temperatur yang akurat sebelum pengelasan dimulai.

9. Pengaturan Parameter Pengelasan

Seluruh parameter pengelasan seperti arus, voltase, dan kecepatan pengelasan diatur sesuai spesifikasi yang telah ditentukan.

10. Proses Pengelasan Material

Pengelasan dikerjakan dalam posisi (1G) down hand sesuai dengan parameter yang sudah diatur.

11. Pencatatan dan Dokumentasi

Semua parameter selama pengelasan berlangsung dicatat dan didokumentasikan untuk keperluan analisis data.

3.6.1 Parameter Pengelasan

Parameter yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3.1 di bawah ini.

Tabel 3. 1 Parameter Pengelasan

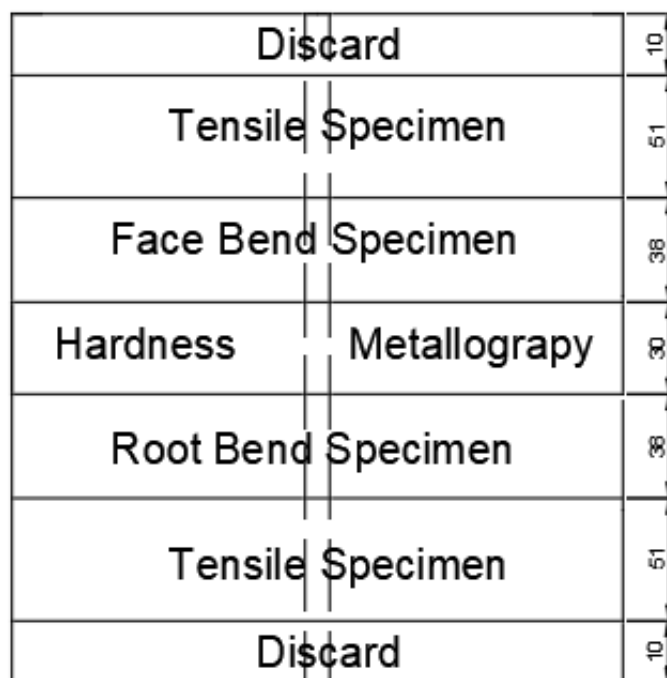
ER5356						
Vaiasi	Layer	Arus (A)	Volt (v)	Time (s)	Travel Speed (mm/s)	Heat Input (kJ/mm)
Suhu Ruang	1	180	17	211	1,65	1,112
	2			234	1,49	1,232
	3			205	1,70	1,080
Preheat 70°	1	180	17	227	1,54	1,192
	2			222	1,57	1,169
	3			237	1,47	1,249
Preheat 110°	1	180	17	142	2,46	0,746
	2			141	2,48	0,740
	3			229	1,52	1,207
ER4043						
Vaiasi	Layer	Arus (A)	Volt (v)		Travel Speed (mm/s)	Heat Input (kJ/mm)
Suhu Ruang	1	180	17	215	1,62	1,130
	2			207	1,69	1,086
	3			205	1,70	1,080
Preheat 70°	1	180	17	156	2,24	0,819
	2			154	2,27	0,808
	3			221	1,58	1,162
Preheat 110°	1	180	17	143	2,44	0.752
	2			142	2,46	0,746
	3			230	1,52	1,207

3.7 Uji Spesimen

Setelah semua proses pengelasan telah selesai dilakukan maka langkah selanjutnya adalah proses pengujian spesimen. Tujuan dilakukannya pengujian spesimen ini yaitu untuk mengetahui apakah hasil las tersebut telah sesuai dengan standar dan untuk mengetahui *mechanical properties* pada hasil las tersebut. Semua spesimen yang telah di las akan dilakukan pengujian berikut :

1. Uji Visual
2. Uji Struktur Mikro
3. Uji Kekerasan
4. Uji Tarik
5. Uji Tekuk

Menurut standart (Structur Welding Code Aluminium) *cutting plan* yang akan digunakan untuk dilakukannya uji mikro, makro, Tarik, bending dan kekerasan. Berikut merupakan dimensi yang akan digunakan yang ditunjukkan pada Gambar 3.4 Berikut



Gambar 3. 4 *Cutting Plan* (Structural Welding Code Aluminium, 2014)

3.7.1 Uji Visual

Uji visual merupakan pengujian paling umum digunakan di dunia pengelasan. Pengujian ini juga diimplementasikan pada penelitian ini guna mengetahui apakah benda uji terdapat kerusakan atau tidak. Uji visual ini dilakukan dengan mata telanjang untuk mengamati indikasi cacat yang terjadi. Setelah benda uji lolos dari uji visual maka dapat dilanjutkan dengan pengujian berikutnya.

3.7.2 Uji Kekeasan

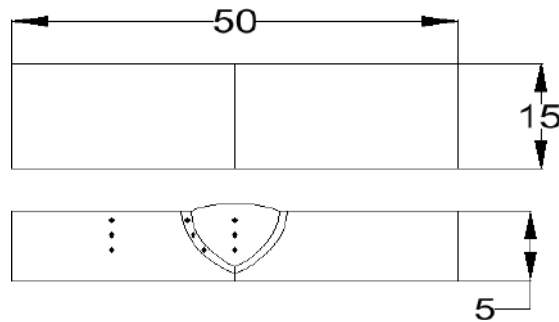
Pengujian kekerasan bertujuan untuk mengetahui tingkat kekerasan hasil pengelasan pada area *weld metal*, daerah pengaruh panas (*Heat Affected Zone/HAZ*), serta base metal. Metode pengujian ini dilakukan dengan menekan sebuah indenter ke permukaan material menggunakan beban tertentu dalam jangka waktu yang telah ditentukan. Jejak atau bekas tekanan yang terbentuk kemudian diukur untuk menentukan nilai kekerasan, yang diperoleh dari perbandingan antara gaya tekan dengan luas bekas indentasi. Pada penelitian ini, jenis indenter yang digunakan adalah Vickers. Peralatan dan bahan yang dibutuhkan dalam pengujian kekerasan meliputi:

1. Spesimen uji
2. Kertas gosok
3. Tisu
4. Mesin poles
5. Larutan etsa
6. Kuas
7. Stopwatch
8. Mesin uji universal
9. Indenter berbentuk piramida intan (Vickers)
10. Pensil

Langkah-langkah pelaksanaan pengujian kekerasan metode Vickers adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan spesimen uji dengan cara menghaluskan permukaannya menggunakan mesin poles.

2. Mengoleskan cairan etsa pada permukaan spesimen untuk membedakan area *base metal*, HAZ, dan *weld metal*.
3. Menentukan titik-titik pengujian pada masing-masing daerah (*base metal*, HAZ, dan *weld metal*), kemudian memberi tanda pada setiap area yang akan diuji, seperti ditunjukkan pada Gambar 3.6



Gambar 3. 5 Alur Identitasi Pada *Butt Joint*

1. Mengatur posisi handle alat uji kekerasan pada mode Vickers.
2. Menentukan besar beban indentasi sesuai dengan jenis dan ukuran indenter yang digunakan.
3. Mengatur waktu pembebanan selama 10–15 detik.
4. Meletakkan spesimen uji di atas anvil atau landasan penjepit.
5. Menaikkan anvil hingga permukaan spesimen bersentuhan dengan ujung indenter.
6. Melepaskan tuas beban sesuai dengan waktu pembebanan yang telah ditetapkan.
7. Mengembalikan tuas beban ke posisi awal, kemudian mengukur panjang diagonal bekas indentasi dan mencatat hasilnya.
8. Mengulangi langkah nomor 7 hingga 10 pada setiap titik pengujian yang telah ditentukan, baik pada *base metal*, HAZ, maupun *weld metal*.

3.7.3 Uji Tarik

Uji tarik (*Tensile Test*) adalah salah satu metode pengujian yang termasuk dalam kategori pengujian destruktif (*Destructive Test/DT*). Pengujian ini dilakukan dengan cara memberikan beban tarik secara bertahap pada spesimen hingga material tersebut mengalami patah. Tujuan utama dari uji tarik adalah untuk mengetahui karakteristik mekanik suatu material, seperti

nilai kekuatan tarik maksimum, batas luluh, serta sifat elastisitasnya. Dalam penelitian ini, pelaksanaan uji tarik mengacu pada standar AWS D1.2 yang digunakan sebagai pedoman dalam menentukan apakah hasil pengujian memenuhi kriteria penerimaan yang ditetapkan



Gambar 3. 6 Mesin Uji Tarik

Berikut alat dan bahan yang perlu dipersiapkan adalah :

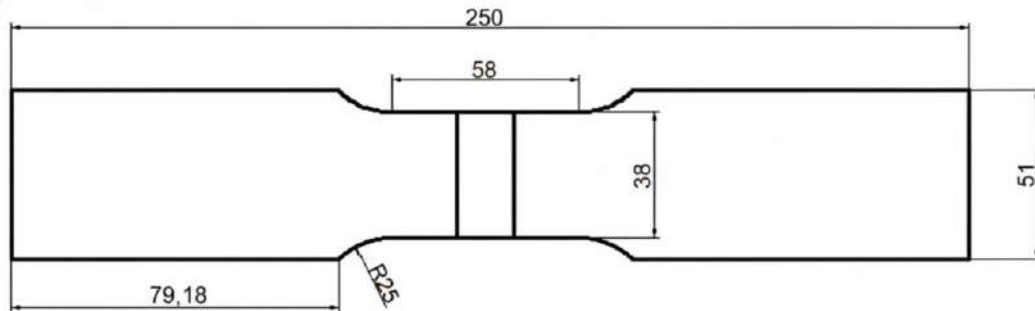
1. Mesin uji tarik
2. Spesimen uji
3. Jangka sorong
4. Penitik

Adapun langkah – langkah dalam pengujian *tensile* Adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan spesimen yang akan digunakan dalam pengujian tarik.
2. Memberikan tanda atau melakukan proses stamping pada spesimen uji sebagai identitas.
3. Melakukan pengukuran dimensi spesimen, meliputi lebar dan ketebalan, yang selanjutnya dimasukkan ke dalam sistem mesin uji.
4. Menghidupkan mesin uji tarik dengan menekan tombol daya (power) pada peralatan.
5. Memasang spesimen uji pada bagian pencekam mesin uji tarik.
6. Memastikan bahwa pencekam menjepit spesimen dengan kuat dan posisi yang benar.
7. Mengatur parameter pembebanan sesuai dengan ketentuan pengujian.
8. Memulai proses pengujian hingga beban maksimum (load max) tercapai, kemudian beban akan menurun dan spesimen mengalami patah.

9. Melepaskan spesimen dari pencekam setelah seluruh proses pengujian selesai dilakukan.

Adapun Ilustrasi spesimen uji tarik ditunjukkan pada Gambar 3.7 berikut.



Gambar 3. 7 Spesimen Uji Tarik

3.7.4 Uji Tekuk

Uji tekuk (*bending test*) merupakan salah satu bentuk pengujian untuk menentukan mutu suatu material secara visual. Proses pembebanan menggunakan mandrel atau pendorong yang dimensinya telah ditentukan untuk memaksa bagian tengah bahan uji atau spesimen tertekuk diantara dua penyangga yang dipisahkan oleh jarak yang telah ditentukan. Selanjutnya bahan akan mengalami deformasi dengan dua buah gaya yang berlawanan bekerja pada saat yang bersamaan. Pada penelitian ini digunakan jenis pengujian tekuk melintang (*Transversal Bending Test*) yang mengacu pada standar AWS D1.2: Structural Welding Code – Aluminium, dengan tujuan untuk mengevaluasi kualitas sambungan las berdasarkan kemampuan material menahan deformasi tanpa terjadi retak atau cacat pada area las maupun daerah sekitarnya. Berikut alat dan bahan yang perlu dipersiapkan adalah :

1. Mesin uji bending
2. Spesimen
3. Penggaris
4. Spidol

Adapun langkah-langkah pengujian tarik adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan material
2. Menandai setiap spesimen uji
3. Pengukuran dimensi

- a. Mengambil spesimen dan ukur dimensinya.
- b. Catat kode spesimen dan data pengukuran pada lembar kerja
- c. Mengulangi langkah di atas untuk seluruh spesimen.
4. Pengujian pada mesin uji a.
 - a. Mencatat data mesin pada lembar kerja.
 - b. Mengambil spesimen, letakkan pada tempatnya secara tepat.
 - c. Menyeting beban dan berikan beban secara kontinyu
 - d. Mengambil spesimen uji dan amati apakah terdapat cacat.

3.7.5 Uji Macro

Metalografi merupakan ilmu yang mempelajari struktur mikro pada logam dan paduannya dengan bantuan berbagai jenis mikroskop, seperti mikroskop optik, mikroskop elektron, dan peralatan sejenis lainnya. Dalam praktiknya, pengujian makro banyak dimanfaatkan pada kegiatan pengembangan material, proses inspeksi, produksi, manufaktur, serta analisis kegagalan suatu komponen. Pemeriksaan ini dapat dilakukan secara langsung dengan mata telanjang atau menggunakan pembesaran rendah, umumnya kurang dari 50 kali, baik dengan maupun tanpa proses etsa.

Adapun peralatan dan bahan yang harus disiapkan dalam pengujian makro meliputi:

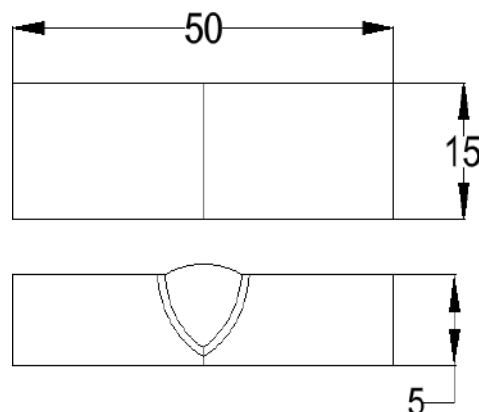
1. Spesimen uji sebanyak 4 buah
2. Lensa makro
3. Mesin poles
4. Larutan etsa
5. Pengering (dryer)
6. Penggaris
7. Kain majun atau tisu

Langkah-langkah pelaksanaan pengujian makro adalah sebagai berikut:

1. Memotong material dengan ukuran lebar 15 mm dan panjang 30 mm.
2. Meratakan sisi spesimen menggunakan proses grinding agar permukaan uji menjadi lebih halus dan mempercepat proses pemolesan.

3. Karena ketebalan spesimen relatif tipis, dilakukan penambahan resin untuk memperbesar penampang serta mempermudah proses pengujian.
4. Menghaluskan permukaan uji menggunakan mesin poles dengan amplas bertahap berukuran 240, 600, 1000, dan 2000, kemudian dilanjutkan dengan proses pemolesan menggunakan kain wol dan autosol. Setelah itu, permukaan dibersihkan menggunakan kain majun atau tisu.
5. Menyiapkan larutan etsa yang terdiri dari 2 ml HF, 3 ml HCl, 5 ml HNO₃, dan 190 ml air, kemudian larutan tersebut diaduk hingga tercampur merata dan diaplikasikan pada permukaan spesimen.
6. Membilas permukaan spesimen dengan air, mengeringkannya menggunakan dryer, dan selanjutnya spesimen siap untuk dilakukan pengujian.

Potongan spesimen yang digunakan untuk pengamatan makrostruktur diambil secara melintang pada area las, meliputi bagian *base metal*, HAZ, dan *weld metal*. Potongan tersebut ditunjukkan pada Gambar 3.7



Gambar 3. 8 Spesimen Makro

3.7.6 Uji Mikro

Pemeriksaan mikro (micro examination) merupakan metode pengujian yang dilakukan dengan menggunakan mikroskop pada tingkat pembesaran antara 50× hingga 500×. Pengujian ini dapat dilakukan baik dengan maupun tanpa melalui proses etsa, tergantung pada kebutuhan analisis struktur material.



Gambar 3. 9 Pengujian Mikro

Peralatan dan bahan yang diperlukan dalam pelaksanaan pengujian mikro meliputi:

1. Spesimen uji sebanyak 6 buah
2. Mesin poles
3. Larutan etsa
4. Pengering (dryer)
5. Alat uji mikro

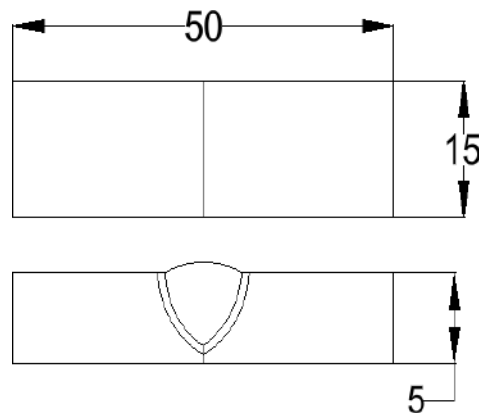
Langkah-langkah dalam melakukan pengujian mikro adalah sebagai berikut:

1. Memotong material dengan ukuran lebar 15 mm dan panjang 30 mm.
2. Menghaluskan sisi spesimen untuk membentuk kontur permukaan uji yang lebih rata sehingga proses pemolesan dapat berlangsung lebih cepat dan optimal.
3. Melakukan proses mounting menggunakan resin untuk menambah luas penampang, sehingga spesimen lebih mudah ditangani dan disiapkan untuk pengujian.
4. Menghaluskan permukaan uji menggunakan mesin poles dengan amplas bertahap berukuran 80, 150, 250, 400, 600, 800, 1000, hingga 2000, kemudian dilanjutkan dengan pemolesan menggunakan kain wol dan autosol. Setelah itu, permukaan spesimen dibersihkan menggunakan kain majun atau tisu.
5. Menyiapkan larutan etsa yang terdiri dari 2 ml HF, 3 ml HCl, 5 ml HNO₃, dan 190 ml air, lalu mengaduknya hingga tercampur merata. Larutan

tersebut diaplikasikan ke permukaan spesimen menggunakan pipet dan dibiarkan selama 2–30 detik sebelum dibilas dengan air.

6. Mengeringkan spesimen yang telah diberi larutan etsa menggunakan dryer, setelah itu pengujian mikro dapat dilakukan.

Potongan melintang spesimen las aluminium 6061 yang telah dipersiapkan untuk pengujian mikro, dengan tujuan mengamati profil penetrasi dan morfologi hasil las, bentuk potongan ditunjukkan pada Gambar 3. 10



Gambar 3. 10 Spesimen Mikro

3.8 Analisis dan Pembahasan

Setelah seluruh data diperoleh dari proses pengelasan serta rangkaian pengujian yang telah dilakukan, tahap berikutnya adalah analisis dan pembahasan hasil. Pada tahap ini akan dievaluasi pengaruh variasi jenis filler metal dan temperatur preheat terhadap munculnya cacat las, nilai kekerasan, kekuatan tarik, serta struktur mikro dan makro. Tahapan ini merupakan bagian akhir dari penelitian, sehingga berdasarkan hasil analisis yang diperoleh dapat ditarik kesimpulan dan disusun saran yang relevan.

3.9 Kesimpulan dan Saran

Setelah seluruh data penelitian dianalisis dan dibahas, tahap selanjutnya berfokus pada perumusan kesimpulan dari hasil penelitian yang telah dilakukan. Pada bagian ini juga disampaikan saran-saran yang dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan untuk pengembangan penelitian di masa mendatang.

This page is intentionally empty
(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pendahuluan Hasil Penelitian

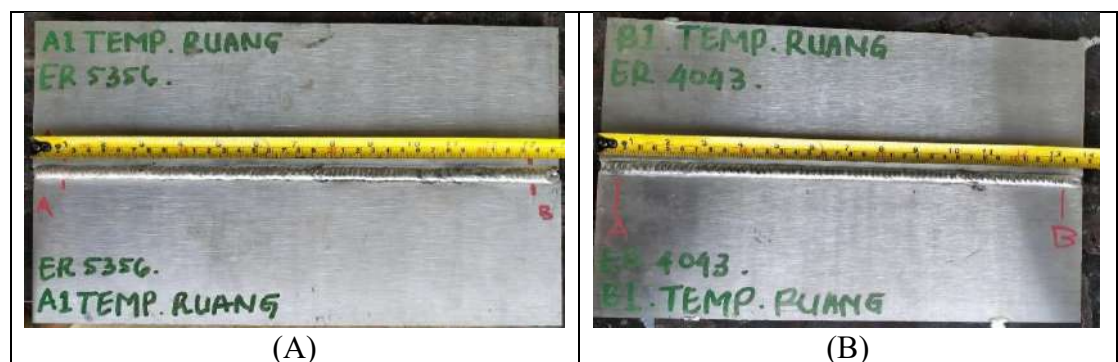
Setelah dilakukan proses pengelasan material aluminium 6061 dengan variasi *Temperature Preheat* dan *Filer Metal* menggunakan proses pengelasan GTAW pada 6 spesimen. Kemudian di dapatkan hasil yang akan di jabarkan berikut ini. Analisis hasil pengelasan meliputi parameter pengelasan dan pengujian hasil pengelasan, yaitu pengujian visual, pengujian tarik, pengujian tekuk, pengujian makro, pengujian mikro dan pengujian *kekeraan*.

4.1.1 Pengujian Visual

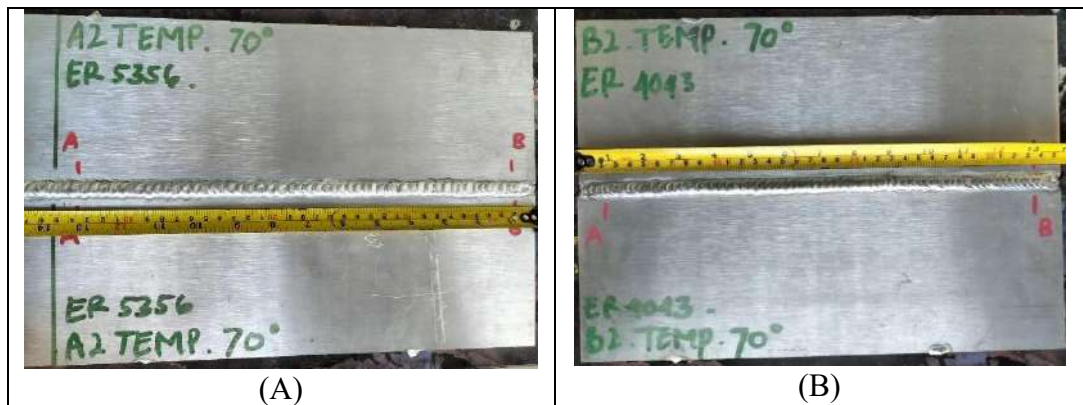
Pengujian visual ini dilakukan pada seluruh variabel *temperature Preheat* dan *filler metal* untuk mengetahui cacat *external imperfection* atau cacat permukaan dari hasil pengelasan. Hasil pengujian visual test pada pengelasan variasi *temperature preheat* dan *filler metal* ini dilakukan dengan alat bantu senter, marker welding gauge dan jangka sorong sebagai alat untuk mengukur hasil lasan. Pada uji visual ini mengacu berdasarkan AWS D1.2 2014, untuk hasil visual dapat dilihat pada Tabel 4.1 diawah ini.

Tabel 4. 1 Hasil Visual Inspeksi

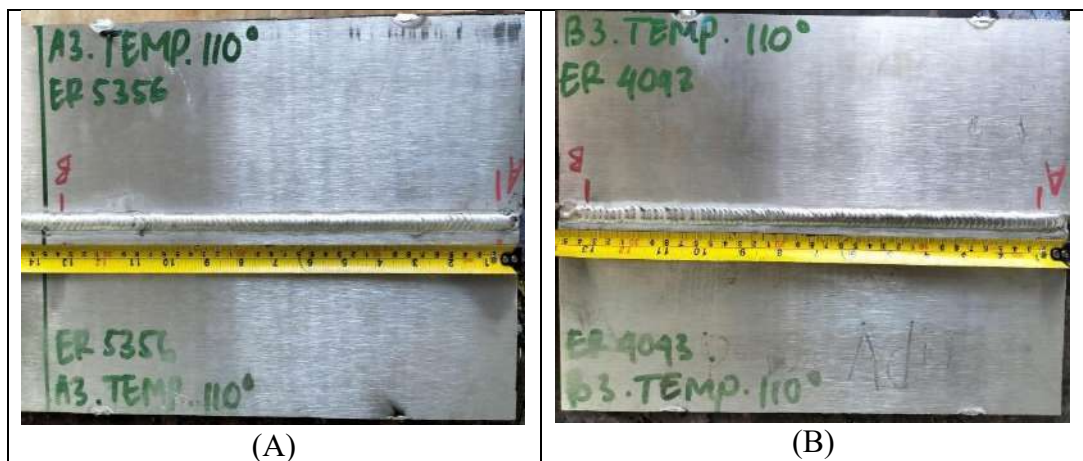
No	Type of imperfections	ER 5356			ER 4043			Result
		Suhu ruang	70°	110°	Suhu ruang	70°	110°	
1	Crack	-	-	-	-	-	-	Accepted
2	Incomplite Fusion	-	-	-	-	-	-	Accepted
3	Undercut	-	-	-	-	-	-	Accepted
4	Porosity	-	-	-	-	-	-	Accepted



Gambar 4. 1 Hasil Visual *Temperatur Ruang*
 (A). *Filler 5356 Temperature Ruang* (B). *Filler 4043 Temperature Ruang*



Gambar 4. 2 Hasil Visual Temperatur 70°
 (A). Filler 5356 Temperature 70° (B). Filler 4043 Temperature 70°



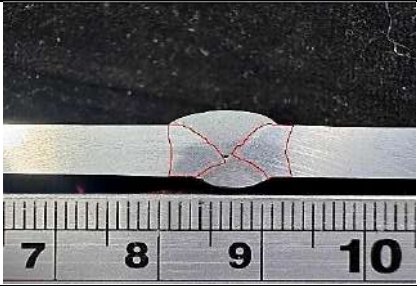
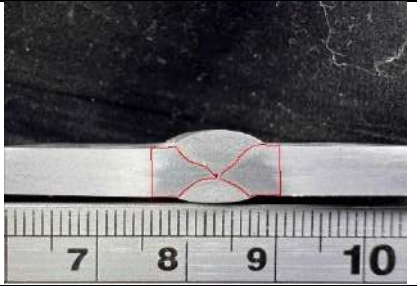
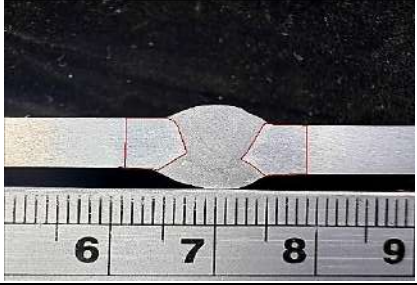
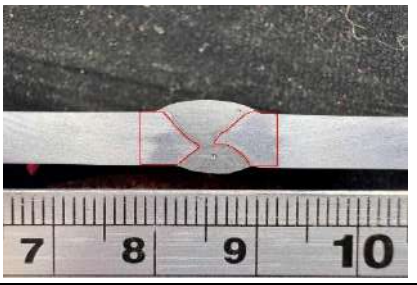
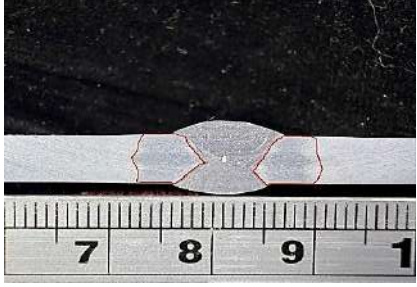
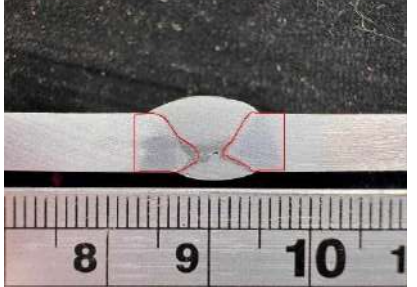
Gambar 4. 3 Hasil Visual Temperatur 110°
 (A). Filler 5356 Temperature 70°g (B). Filler 4043 Temperature 70°

Berdasarkan hasil pengujian visual (VT) yang mengacu pada standar AWS D1.2, seluruh spesimen dinyatakan *accepted* karena tidak ditemukan indikasi cacat permukaan yang melampaui batas *acceptance criteria* yang telah ditetapkan. Pengamatan menunjukkan bahwa variasi temperatur *preheat* dan jenis filler metal yang digunakan tidak menimbulkan diskontinuitas signifikan seperti retak, porositas terbuka, undercut, maupun *overlap* pada permukaan las. Dengan demikian, parameter pengelasan yang diterapkan masih berada dalam rentang yang dapat menghasilkan kualitas visual sambungan las yang memenuhi persyaratan standar *American Welding Society*.

4.1.2 Uji Macro

Pengujian struktur makro dilakukan menggunakan spesimen yang diambil pada daerah sambungan las. Pengujian ini bertujuan untuk

mengevaluasi kualitas fusi antara logam las dan logam induk, mengidentifikasi adanya cacat internal pada sambungan las, serta mengamati tingkat penetrasi hasil pengelasan. Sebelum pengamatan dilakukan, permukaan spesimen dipoles hingga rata untuk memperoleh hasil pengamatan yang jelas. Selanjutnya, spesimen mengalami proses etsa menggunakan larutan yang terdiri atas HCl, HF, dan HNO₃. Proses etsa bertujuan untuk menampilkan batas mikrostruktur, khususnya daerah heat affected zone (HAZ), sehingga karakteristik sambungan las dapat diamati dengan lebih jelas. Hasil uji makro di tunjukan pada Gambar 4.4 berikut.

<i>Temperature Preheat</i>	<i>Macroscopic Examination</i>	
Suhu Ruang		
	Spesimen A1 ER5356	Spesimen B1 ER4043
Suhu 70°		
	Spesimen A2 ER5356	Spesimen B2 ER4043
Suhu 110°		
	Spesimen A3 ER5356	Spesimen B3 4043

Gambar 4. 4 Hasil Gambar *Macrostructure*

Dari hasil uji *macrostructure* diatas, dapat dilihat jika semua spesimen menghasilkan hasil pengelasan yang bervariasi pada zona HAZ nya, dari hasil uji *macrostructure* diketahui lebar HAZ semakin melebar, hal ini disebabkan oleh masukan panas yang meningkat akibat variasi *preheat*. Hasil pengukuran luas HAZ ditunjukkan pada Tabel 4.2. berikut.

Tabel 4. 2 Pengukuran Luas Daerah HAZ

<i>Stamp</i>	<i>Variation</i>	Luas Daerah HAZ (mm ²)
A1	<i>ER5356 Suhu ruang</i>	47,15
A2	<i>ER5356 70°C</i>	63,02
A3	<i>ER5356 110°C</i>	64,96
B1	<i>ER4043 Suhu ruang</i>	49,64
B2	<i>ER4043 70°C</i>	53,44
B3	<i>ER4043 110°C</i>	57,80

Pengamatan makro pada seluruh variasi memperlihatkan garis fusi (*fusion line*) yang secara umum menyatu antara logam las dan logam induk, dengan profil penetrasi dan lebar HAZ yang bervariasi mengikuti temperatur *preheat* yang diterapkan. Pada spesimen dengan *preheat* 110°C, lebar HAZ pada kedua *filler* tampak relatif lebih lebar dibandingkan spesimen suhu ruang dan 70°C, sejalan dengan prinsip bahwa *preheat* yang lebih tinggi memperlambat laju pendinginan dan memperpanjang waktu material berada pada rentang suhu tinggi, sehingga daerah yang terpengaruh panas menjadi lebih luas (AWS Welding Handbook Vol. 1). Pada beberapa spesimen, khususnya kelompok *filler* ER4043, penampang weld metal menunjukkan tekstur yang kurang homogen dengan sebaran titik-titik gelap kecil yang mengindikasikan kemungkinan porositas mikro

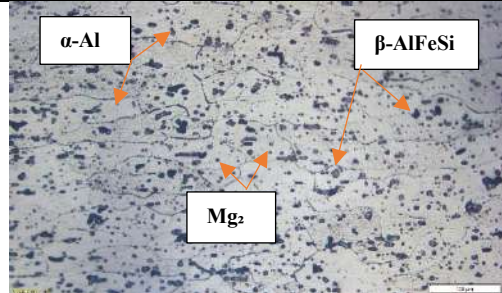
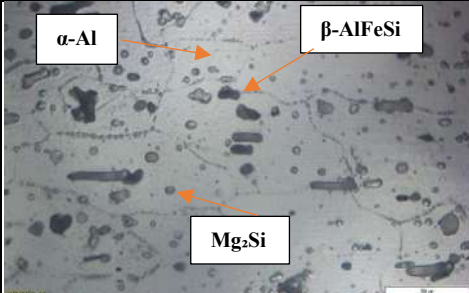
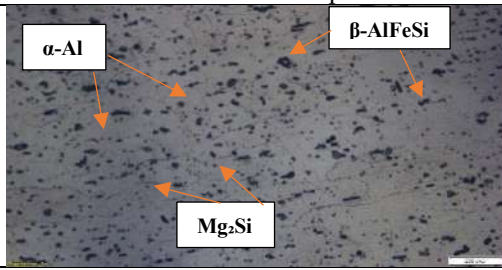
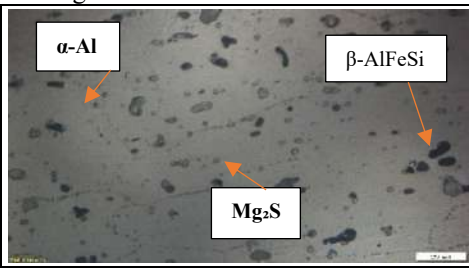
Kualitas fusi yang teramati pada uji makro ini menjadi dasar penting bagi pengamatan mikrostruktur pada sub-bab berikutnya, karena batas-batas zona makroskopik (*base metal*, HAZ, *fusion line*, dan *weld metal*) yang teridentifikasi di sini menjadi acuan lokasi pengambilan sampel untuk pengamatan mikrostruktur pada perbesaran 200× dan 500×. Secara umum, kondisi makro yang relatif baik pada spesimen *preheat* 70°C untuk kedua *filler* konsisten dengan hasil uji tarik dan bending yang menunjukkan performa optimum pada variasi tersebut, sementara indikasi ketidakhomogenan pada

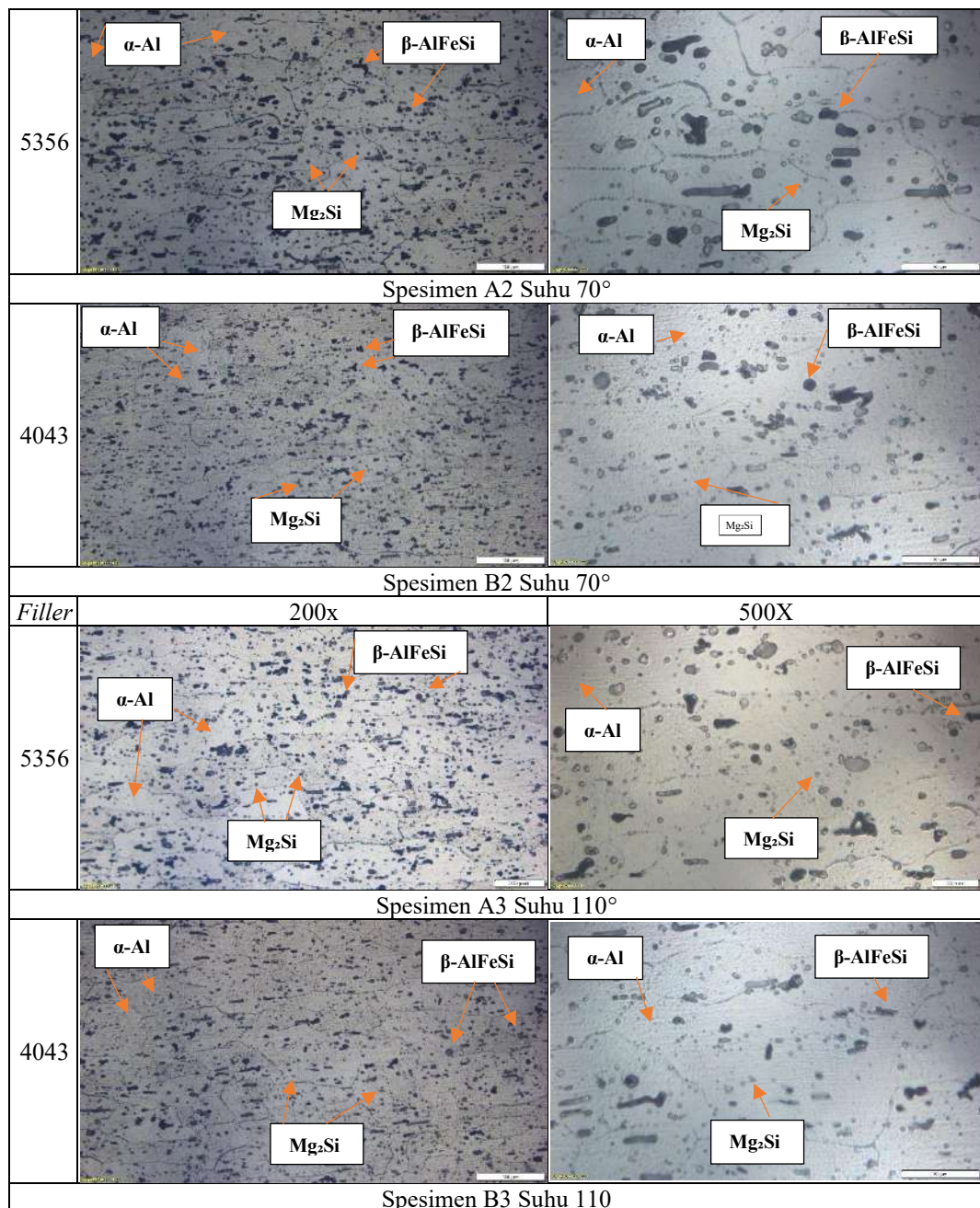
weld metal filler ER4043 turut mendukung temuan nilai kekuatan tarik dan tingkat kelulusan bending yang lebih rendah dibandingkan ER5356.

4.1.3 Uji Mikro

Dalam penelitian ini, karakterisasi mikrostruktur dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik pada pembesaran 200× dan 500× guna menghasilkan pengamatan yang lebih detail terhadap struktur material di area sambungan las. Pemilihan dua variasi pembesaran tersebut dimaksudkan untuk meningkatkan ketelitian dalam mengidentifikasi karakteristik mikrostruktur pada masing-masing daerah pengelasan. Pengamatan dilaksanakan pada beberapa zona yang telah dipersiapkan melalui prosedur metalografi, sehingga fitur mikrostruktur dapat diamati secara lebih jelas. Selanjutnya, hasil pengamatan mikrostruktur digunakan sebagai dasar untuk menganalisis pengaruh filler metal dan temperatur preheat terhadap perubahan struktur material serta karakteristik sambungan.

Hasil pengamatan mikrostruktur pada daerah Base Metal (BM) Aluminium 6061 bisa di lihat Gambar 4.5 di bawah ini

Base Metal (BM)		
Filler	200x	500X
5356		
Spesimen A1 Suhu Ruang		
4043		
Spesimen B1 Suhu Ruang		
Filler	200x	500X

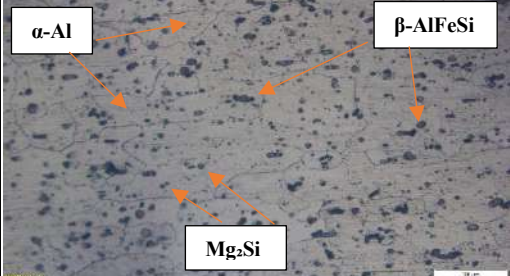
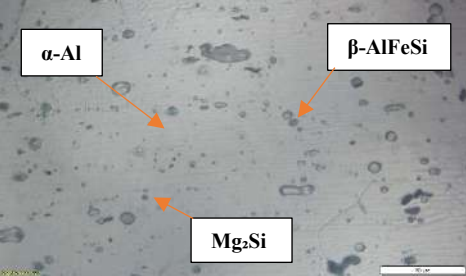
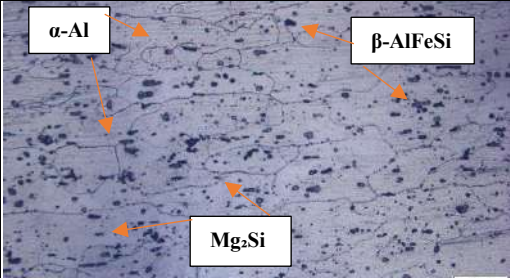
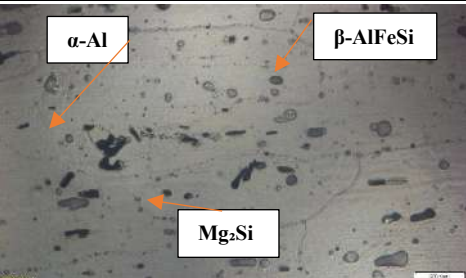


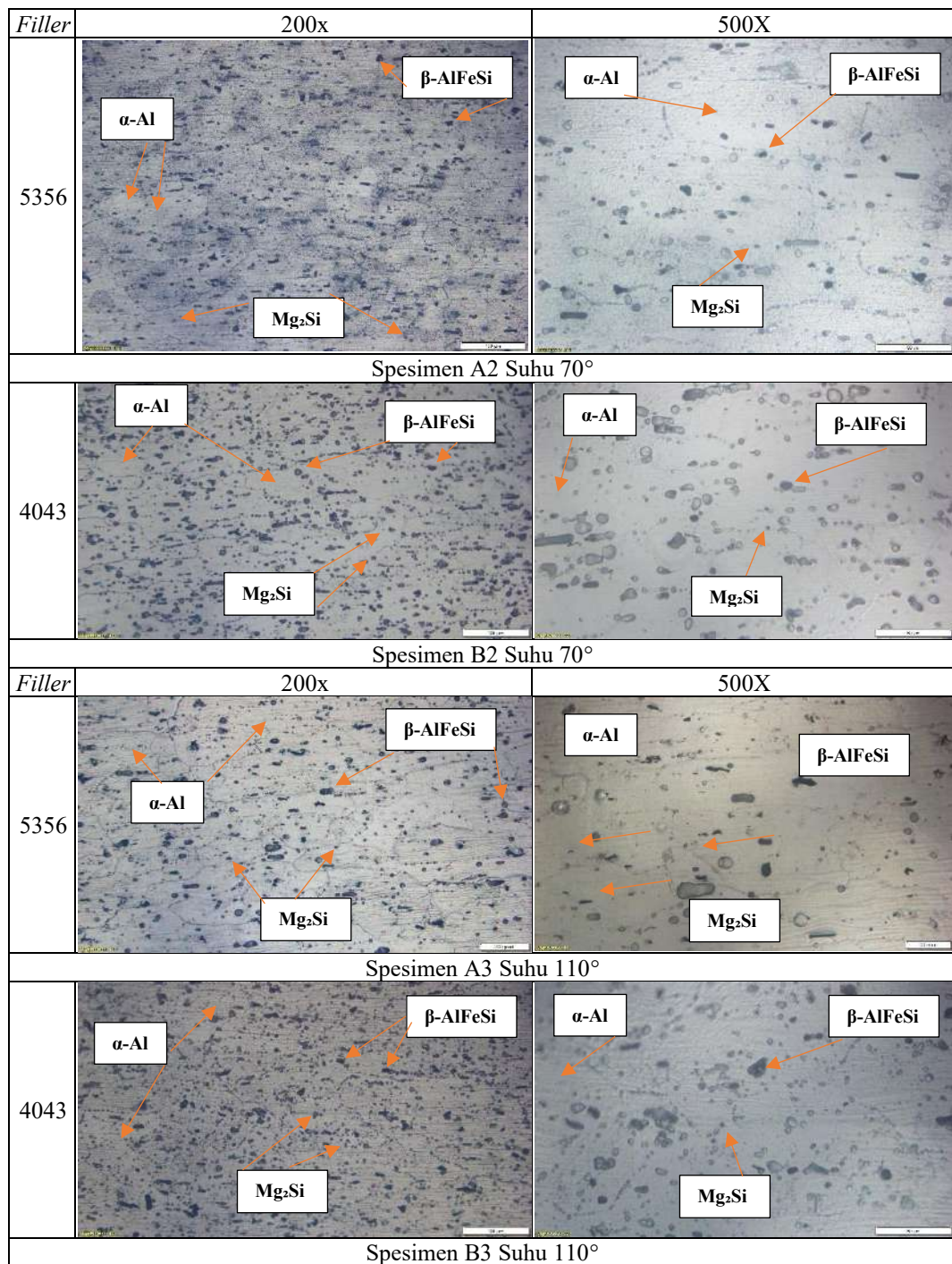
Gambar 4. 5 Hasil Interpretasi Struktur Mikro Pada *Base Metal*

Pengamatan mikrostruktur pada daerah *base metal* (BM) menunjukkan struktur butir equiaxed yang relatif seragam pada seluruh spesimen, dengan sebaran presipitat Mg_2Si yang terdistribusi merata sebagai hasil dari proses perlakuan panas T6 (*solution heat treatment* dan *artificial aging*) yang diterima material aluminium 6061 sebelum proses pengelasan. Struktur ini konsisten dengan nilai kekerasan base metal yang relatif tinggi pada sebagian besar spesimen (44,67–63,87 kg/mm²), karena presipitat Mg_2Si yang halus dan

terdispersi merata berperan sebagai penghalang pergerakan dislokasi melalui mekanisme *precipitation strengthening* (Hatch, Aluminum: *Properties and Physical Metallurgy*). Variasi nilai kekerasan *base metal* antarspesimen yang cukup lebar mengindikasikan adanya perbedaan lokal pada distribusi presipitat maupun titik pengukuran, namun secara umum struktur mikro pada zona ini tidak menunjukkan perubahan akibat siklus termal pengelasan karena berada di luar jangkauan panas signifikan dari proses GTAW

Kondisi mikrostruktur *base metal* ini menjadi baseline penting dalam mengevaluasi perubahan yang terjadi pada HAZ dan weld metal akibat siklus termal pengelasan, karena tingkat degradasi sifat mekanik pada kedua zona tersebut pada dasarnya diukur relatif terhadap kondisi awal base metal yang belum terpengaruh panas. Tidak ditemukannya perubahan struktur butir yang signifikan pada base metal di seluruh variasi filler dan preheat mengonfirmasi bahwa parameter pengelasan yang diterapkan tidak menghasilkan heat input berlebihan yang dapat memengaruhi zona di luar.

Heat Affected Zone (HAZ)		
Filler	200x	500X
5356		
Spesimen A1 Suhu Ruang		
4043		
Spesimen B1 Suhu Ruang		

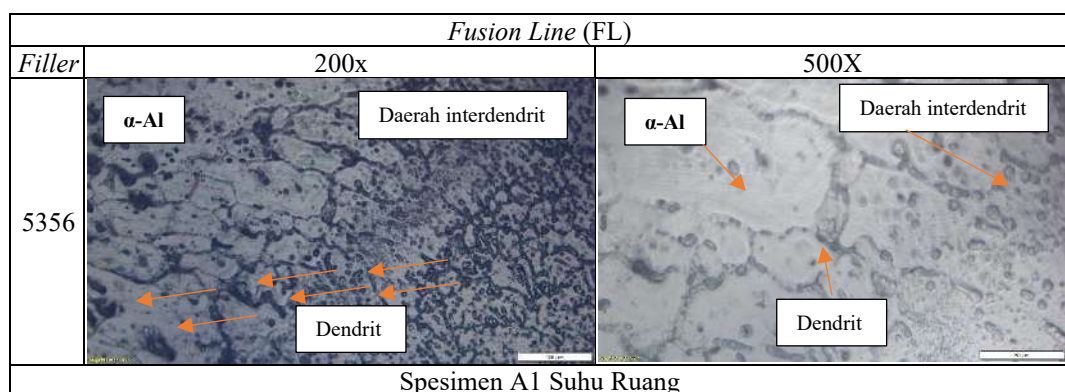


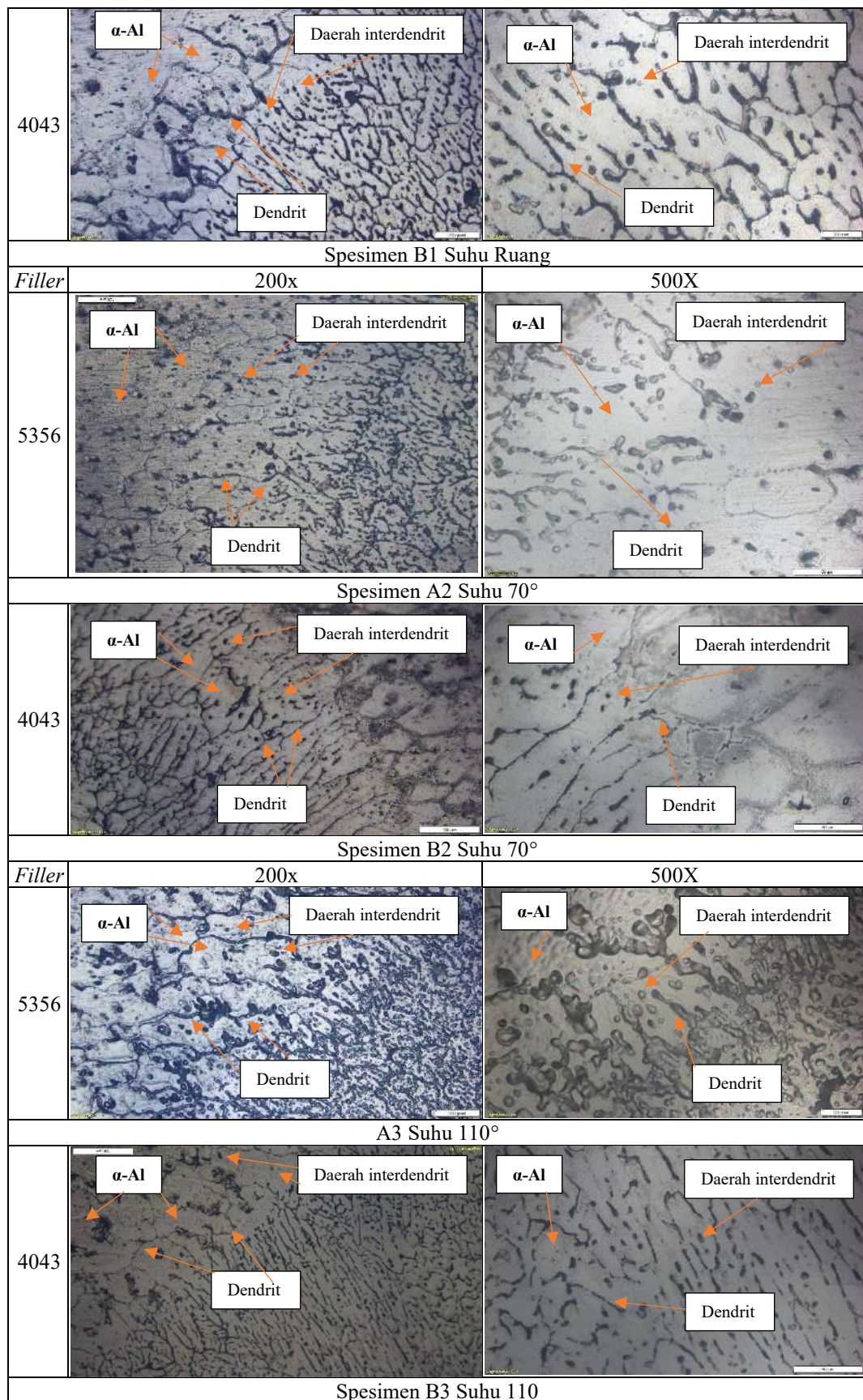
Gambar 4. 6 Hasil Interpretasi Struktur Mikro Pada HAZ

Pengamatan mikrostruktur pada daerah *heat affected zone* (HAZ) menunjukkan indikasi pertumbuhan butir (*grain growth*) dan pelarutan sebagian presipitat Mg_2Si dibandingkan kondisi *base metal*, terutama pada spesimen dengan preheat 110°C. Fenomena ini merupakan konsekuensi langsung dari siklus termal (*thermal cycle*) yang dialami HAZ selama proses

pengelasan, di mana daerah ini terpapar suhu tinggi mendekati atau melampaui suhu solvus tanpa mengalami pencairan, sehingga terjadi pelarutan kembali (*dissolution*) presipitat penguat dan koarsening butir ASM Handbook Vol. 9). Hal ini sejalan dengan data kekerasan, di mana pada beberapa variasi nilai kekerasan HAZ justru lebih tinggi dibandingkan weld metal (misalnya 60,09 kg/mm² pada ER5356 suhu ruang berbanding 49,89 kg/mm² pada weld metal), namun tetap menunjukkan kecenderungan penurunan dibandingkan *base metal* pada variasi preheat yang lebih tinggi.

Pada paduan aluminium *non-heat-treatable* seri 5xxx dan *heat-treatable* seri 6xxx seperti 6061, HAZ softening merupakan fenomena yang umum terjadi akibat pengelasan busur (Mathers, Aluminium Welding). Untuk 6061 secara spesifik, pelunakan HAZ terutama disebabkan oleh koarsening dan pelarutan sebagian presipitat Mg₂Si yang sebelumnya terbentuk melalui proses artificial aging pada kondisi T6. Semakin tinggi temperatur *preheat* yang diterapkan, semakin lama waktu material berada pada rentang suhu kritis tersebut, sehingga tingkat pelunakan HAZ turut meningkat. Kondisi inilah yang menjelaskan mengapa spesimen A2 (filler ER5356, *preheat* 70°C) mengalami pergeseran lokasi patahan ke HAZ pada uji tarik, karena pada kondisi tersebut *weld metal* mengalami penguatan optimal sementara HAZ justru menjadi zona yang relatif lebih lemah akibat pelunakan yang telah terjadi.

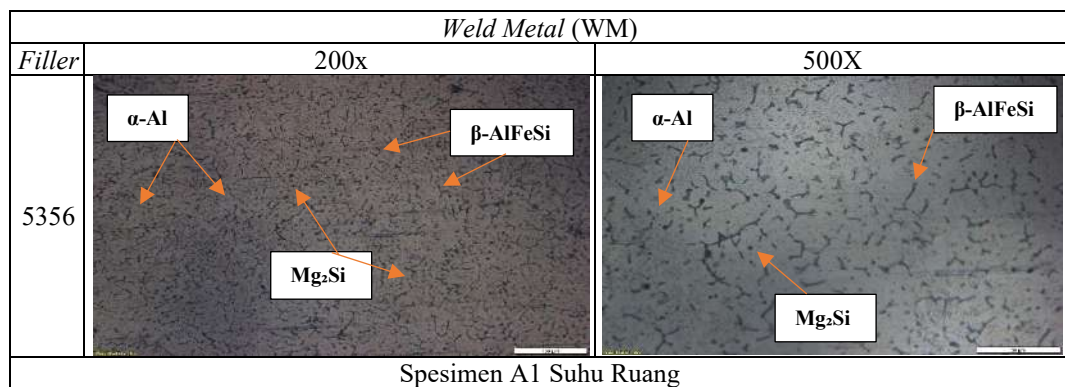


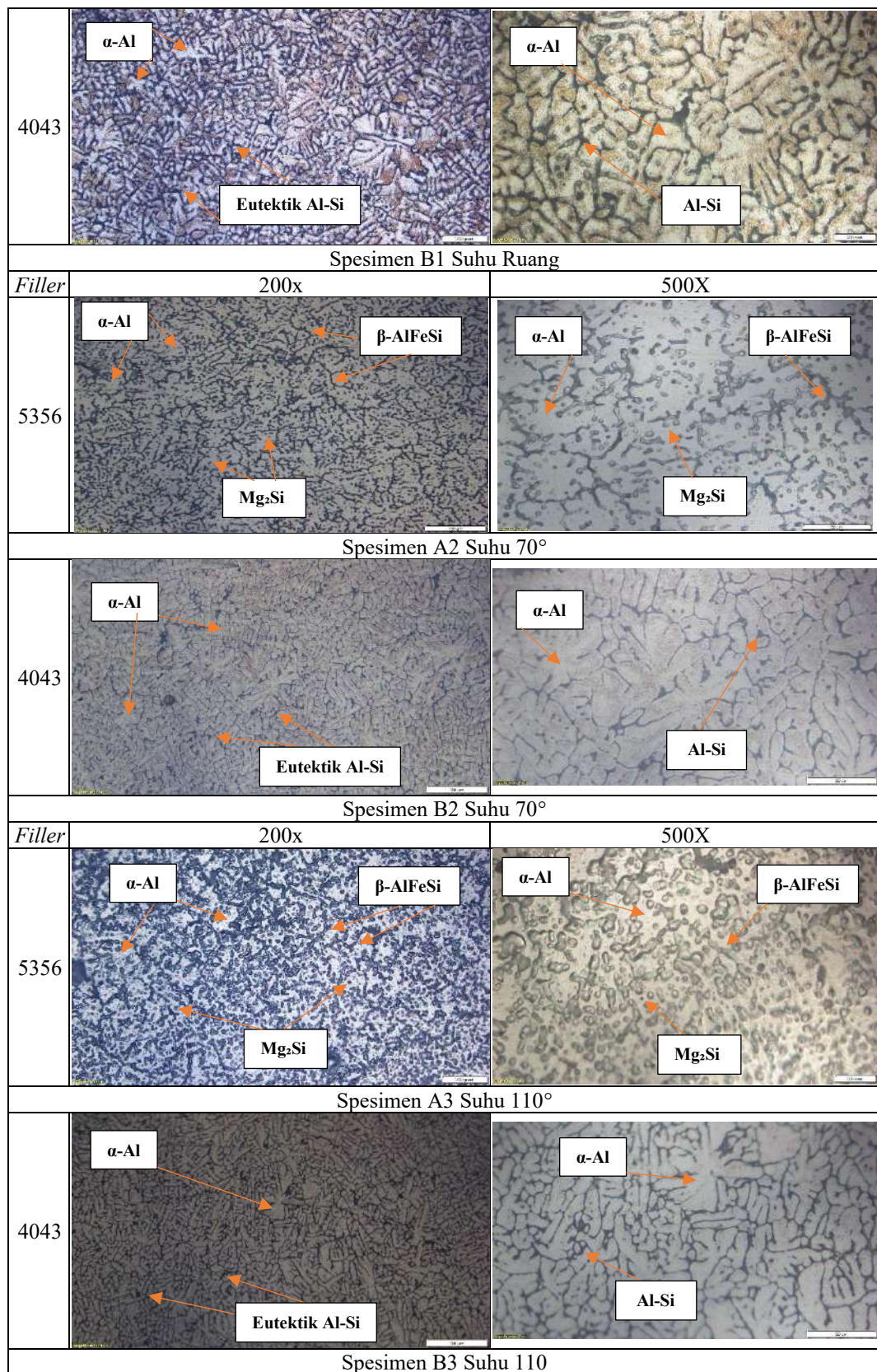


Gambar 4. 7 Hasil Interpretasi Struktur Mikro *Fusion Line*

Pengamatan pada *fusion line* (FL) memperlihatkan zona transisi antara *base metal* dan *weld metal* yang ditandai dengan perubahan morfologi butir secara bertahap, dari struktur equiaxed *base metal* menuju struktur kolumnar khas hasil solidifikasi cepat pada *weld metal*. Zona ini juga mencakup partially melted zone (PMZ), yaitu daerah sempit di tepi *fusion line* yang mengalami pencairan sebagian (partial melting) akibat adanya fasa dengan titik leleh lebih rendah, seperti eutektik Mg_2Si atau Al-Si pada batas butir, sehingga rentan terhadap liquation *cracking* apabila tegangan sisa yang timbul selama pendinginan cukup tinggi (Lippold, Welding Metallurgy and Weldability). Kualitas penyatuan pada *fusion line* yang teramati secara umum baik pada seluruh spesimen turut menjelaskan mengapa hasil uji visual tidak menunjukkan indikasi *lack of fusion* pada permukaan.

Fusion line merupakan zona kritis karena mempertemukan dua struktur mikro dengan sifat mekanik yang berbeda secara tiba-tiba, sehingga berpotensi menjadi lokasi konsentrasi tegangan saat pembebanan. Tingkat dilusi yang terjadi pada *fusion line* turut memengaruhi komposisi kimia lokal *weld metal* di dekat batas fusi, di mana pencampuran *filler* dengan *base metal* yang tidak merata dapat menghasilkan variasi komposisi Mg dan Si yang menciptakan zona lemah lokal, sebagaimana telah diuraikan pada pembahasan uji tarik. Pengamatan ini memperkuat pentingnya kontrol heat input dan kecepatan pengelasan yang konsisten untuk menjaga keseragaman dilusi di sepanjang *fusion line*.





Gambar 4. 8 Hasil Interpretasi Struktur Mikro *Weld Metal*

Pengamatan mikrostruktur pada *weld metal* (WM) menunjukkan struktur dendritik/kolumnar sebagai hasil solidifikasi cepat dari logam cair, dengan perbedaan morfologi yang jelas antara kedua *filler*. *Weld metal* dengan *filler* ER4043 menunjukkan struktur butir yang tampak lebih halus disertai fasa eutektik Al-Si pada batas dendrit, sejalan dengan tingginya kandungan silikon (4,5–6% Si) pada *filler* tersebut yang menurunkan suhu solidus dan mempersempit rentang pembekuan (*freezing range*), sehingga menghasilkan struktur yang lebih halus namun juga lebih rentan terhadap pembentukan porositas gas akibat kelarutan hidrogen yang tinggi pada fasa cair. Sebaliknya, *weld metal* dengan *filler* ER5356 menunjukkan struktur dendritik yang relatif lebih kasar dengan distribusi Mg pada larutan padat (*solid solution*), konsisten dengan mekanisme *solid solution strengthening* yang menjadi ciri khas paduan Al-Mg (Kou, Welding Metallurgy, 2003).

Perbedaan morfologi mikrostruktur ini secara langsung menjelaskan pola nilai kekerasan *weld metal* yang telah diuraikan sebelumnya, di mana ER4043 secara konsisten unggul pada zona *weld metal* akibat penghalusan butir dari silikon, sementara ER5356 lebih unggul secara keseluruhan pada kekuatan tarik akibat *solid solution strengthening* dari magnesium yang bekerja pada skala yang lebih luas, bukan hanya pada penghalusan butir lokal. Ukuran dendrit yang relatif lebih kasar pada spesimen dengan *preheat* lebih tinggi turut teramati, sejalan dengan laju pendinginan yang lebih lambat, sehingga waktu solidifikasi menjadi lebih panjang dan memberikan kesempatan lebih besar bagi pertumbuhan butir dendritic

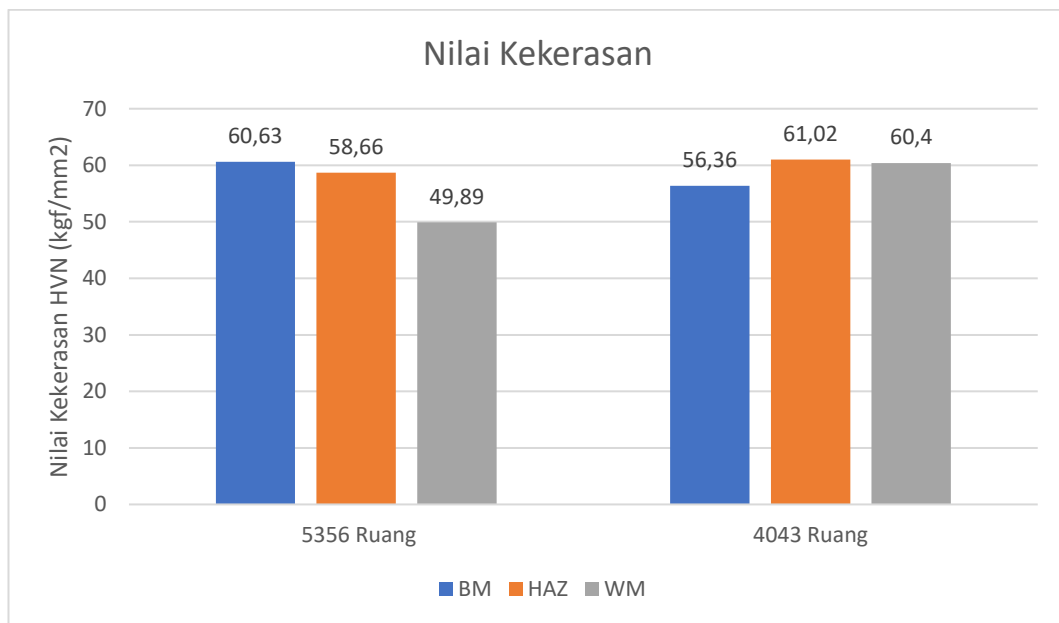
4.1.4 Uji Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi proses pengelasan terhadap nilai kekerasan material aluminium 6061 yang dilas menggunakan metode *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) dengan variasi logam pengisi (*filler metal*) ER4043 dan ER5356, serta variasi suhu *preheat*, yaitu suhu ruang, 70°C, dan 110°C. Pengujian ini dilakukan pada tiga daerah pengelasan, yaitu *base metal*, *heat affected zone* (HAZ), dan *weld metal*, guna membandingkan distribusi nilai kekerasan pada masing-masing daerah tersebut akibat pengaruh parameter proses yang diterapkan.

Metode pengujian yang digunakan adalah metode Vickers, dengan indenter berbentuk piramida intan, beban indentasi sebesar 5 kgf, dan waktu penekanan (*dwell time*) selama 12 detik. Pada setiap daerah pengujian dilakukan pengambilan data sebanyak sembilan titik indentasi untuk memperoleh nilai kekerasan. Pengujian kekerasan ini dilaksanakan di Laboratorium Uji Bahan, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

Tabel 4. 3 Hasil Pengujian Kekerasan

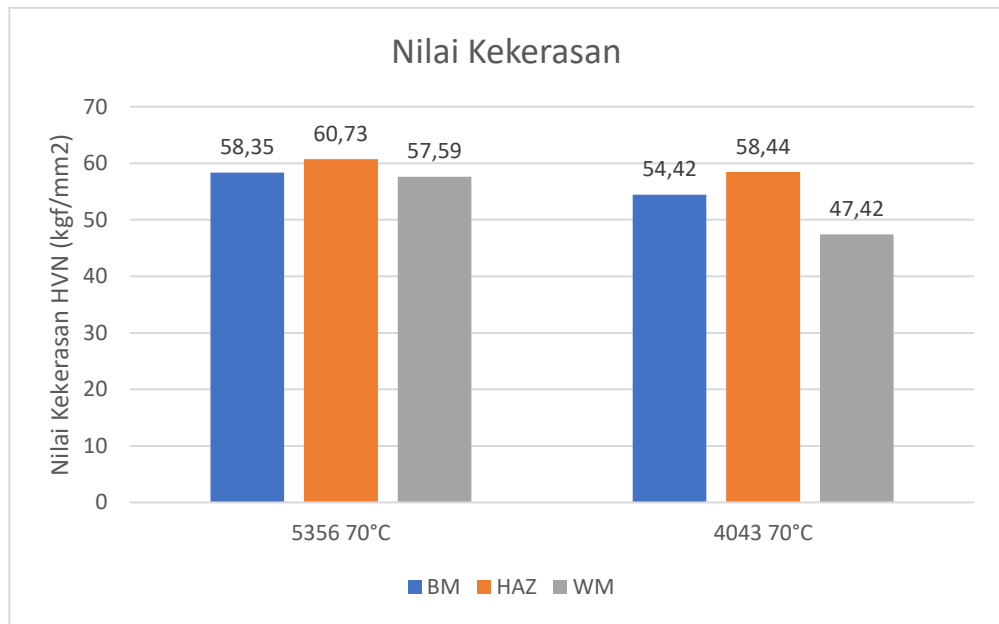
Variasi		Daerah	Nilai kekerasan (kg/mm^2)			Rata-rata (kg/mm^2)
			1	2	3	
Suhu Ruang	Filler 5356	<i>Base Metal</i>	59,38	60,78	61,74	60,63
		HAZ	58,70	59,34	57,95	58,66
		<i>Weld Metal</i>	48,48	48,85	52,35	49,89
	Filler 4043	<i>Base Metal</i>	58,40	52,45	58,20	56,36
		HAZ	60,23	62,11	60,72	61,02
		<i>Weld Metal</i>	59,96	60,14	61,51	60,40
Preheat 70°C	Filler 5356	<i>Base Metal</i>	57,39	58,35	59,32	58,35
		HAZ	60,,89	61,34	59,98	60,73
		<i>Weld Metal</i>	53,88	55,93	62,98	57,59
	Filler 4043	<i>Base Metal</i>	53,11	52,29	57,88	54,42
		HAZ	58,20	59,20	57,92	58,44
		<i>Weld Metal</i>	44,23	48,45	49,60	47,42
Preheat 110°C	Filler 5356	<i>Base Metal</i>	49,24	51,59	51,83	50,88
		HAZ	59,88	59,43	60,34	59,88
		<i>Weld Metal</i>	54,14	55,20	58,23	55,85
	Filler 4043	<i>Base Metal</i>	59,62	65,43	66,56	63,87
		HAZ	56,78	54,70	58,15	56,54
		<i>Weld Metal</i>	48,64	50,04	51,30	49,99



Gambar 4. 9 Hasil Nilai Kekerasan *Filler* 5356 Dan 4043 *Temperature* Ruang

Pada kondisi suhu ruang, perbedaan paling mencolok antara kedua *filler* terletak pada zona *weld metal*, di mana *filler* ER4043 menghasilkan kekerasan 60,40 HV, jauh lebih tinggi dibandingkan ER5356 yang hanya 49,89 HV selisih lebih dari 10 poin. Fenomena ini berkaitan langsung dengan komposisi kimia *filler*. ER4043 mengandung silikon (Si) 4,5–6% sebagai elemen paduan utama. Menurut prinsip metalurgi paduan Al-Si, kandungan silikon membentuk fasa eutektik Al-Si yang membeku pada suhu lebih rendah dan menghasilkan struktur butir yang lebih halus pada logam las. Berdasarkan prinsip semakin halus ukuran butir maka kekerasan material akan semakin meningkat inilah yang menjelaskan mengapa *weld metal* dari ER4043 jauh lebih keras.

Sebaliknya, ER5356 mengandung magnesium (Mg) 4,5-5,5%. Mg memang meningkatkan kekuatan melalui mekanisme *solid solution strengthening*, namun laju pembekuannya cenderung menghasilkan struktur butir yang relatif lebih kasar dibanding Al-Si. Akibatnya, meskipun secara teori Mg meningkatkan kekuatan tarik logam las secara umum, efeknya terhadap kekerasan pada zona *weld metal* tidak sekuat efek penghalusan butir dari (Kou, *Welding Metallurgy*, 2003).



Gambar 4. 10 Hasil Nilai Kekerasan Filler 5356 Dan 4043 Temperature 70°C

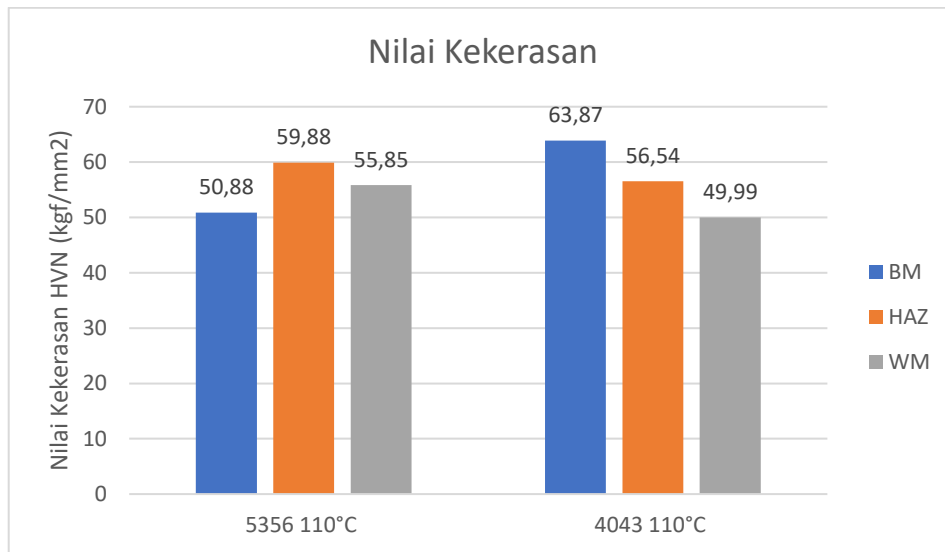
Pada variasi *preheat* 70°C, data Tabel menunjukkan pola yang berbeda dan justru berlawanan arah dibandingkan kondisi suhu ruang. Nilai kekerasan *weld metal* spesimen A2 (*filler* ER5356) tercatat sebesar 57,59 HV, meningkat cukup signifikan dari 49,89 HV pada suhu ruang, sedangkan *weld metal* spesimen B2 (*filler* ER4043) justru turun tajam dari 60,40 HV menjadi hanya 47,42 HV. Akibatnya, pada *preheat* 70°C *weld metal* ER5356 tercatat lebih keras dibandingkan *weld metal* ER4043, kebalikan dari pola yang teramati pada suhu ruang. Pada zona base metal, spesimen B2 (54,42 HV) juga tercatat jauh lebih rendah dibandingkan A2 (58,35 HV), sedangkan pada zona HAZ kedua *filler* relatif berdekatan (60,73 HV untuk A2 dan 58,44 HV untuk B2).

Pengulangan pola kekerasan *weld metal* ini dapat dijelaskan melalui pengaruh laju pendinginan terhadap masing-masing mekanisme penguatan *filler*. Pada ER4043, kekerasan *weld metal* yang tinggi pada suhu ruang bergantung pada laju pendinginan cepat yang menghasilkan fasa eutektik Al-Si berbutir halus. Ketika *preheat* diterapkan, laju pendinginan melambat sehingga eutektik Si memiliki waktu lebih lama untuk tumbuh dan mengalami pengasaran, yang menurunkan efektivitas penghalusan butir dan menyebabkan kekerasan *weld metal* ER4043 menurun signifikan (ASM Handbook Volume 9) Sebaliknya, pada ER5356, perlambatan laju pendinginan akibat *preheat*

memberikan waktu difusi yang lebih memadai bagi magnesium untuk terdistribusi merata dalam larutan padat serta menekan pembentukan porositas gas akibat solidifikasi yang tidak terburu-buru, sehingga kekerasan weld metal ER5356 pada *preheat* 70°C justru meningkat dibandingkan suhu ruang (Hatch, Aluminum: Properties and Physical Metallurgy). Adapun rendahnya nilai *base metal* pada spesimen B2 dibandingkan A2, meskipun keduanya berasal dari logam induk 6061 T6 yang identik, lebih mengindikasikan variasi lokal pada distribusi presipitat maupun heterogenitas material pelat akibat proses rolling, bukan akibat pengaruh *filler metal*, karena *base metal* tidak mengalami pencairan maupun pencampuran langsung dengan *filler*.

Grafik distribusi kekerasan untuk spesimen A2 dan B2 (*preheat* 70°C) memperlihatkan secara visual perbedaan pola dibandingkan grafik pada kondisi suhu ruang. Batang *weld metal* pada spesimen A2 (ER5356) tampak lebih tinggi dibandingkan batang weld metal B2 (ER4043), berkebalikan dengan grafik suhu ruang yang menunjukkan batang *weld metal* ER4043 lebih dominan. Selain itu, batang base metal pada spesimen B2 tervisualisasi jauh lebih pendek dibandingkan ketiga batang lainnya pada grafik tersebut, menjadikannya titik dengan kekerasan terendah pada kombinasi *preheat* 70°C, alih-alih *weld metal* yang biasanya menjadi zona terlemah pada variasi lain. Kondisi ini menegaskan bahwa *preheat* 70°C mengubah zona kritis kekerasan pada sambungan *filler* ER4043 dari *weld metal* menjadi *base metal*.

Perubahan zona kritis ini konsisten dengan hasil pengujian tarik pada sub-bab sebelumnya, di mana spesimen A2 (ER5356 *preheat* 70°C) justru mengalami kegagalan pada daerah HAZ, bukan pada weld metal. Peningkatan kekerasan weld metal ER5356 yang tervisualisasi pada grafik ini memperkuat penjelasan bahwa *weld metal* A2 menjadi relatif lebih kuat pada kondisi *preheat* 70°C, sehingga HAZ yang mengalami pelunakan akibat siklus termal justru menjadi bagian tersambungan yang secara relatif paling lemah dan menjadi lokasi inisiasi kegagalan saat menerima beban tarik.



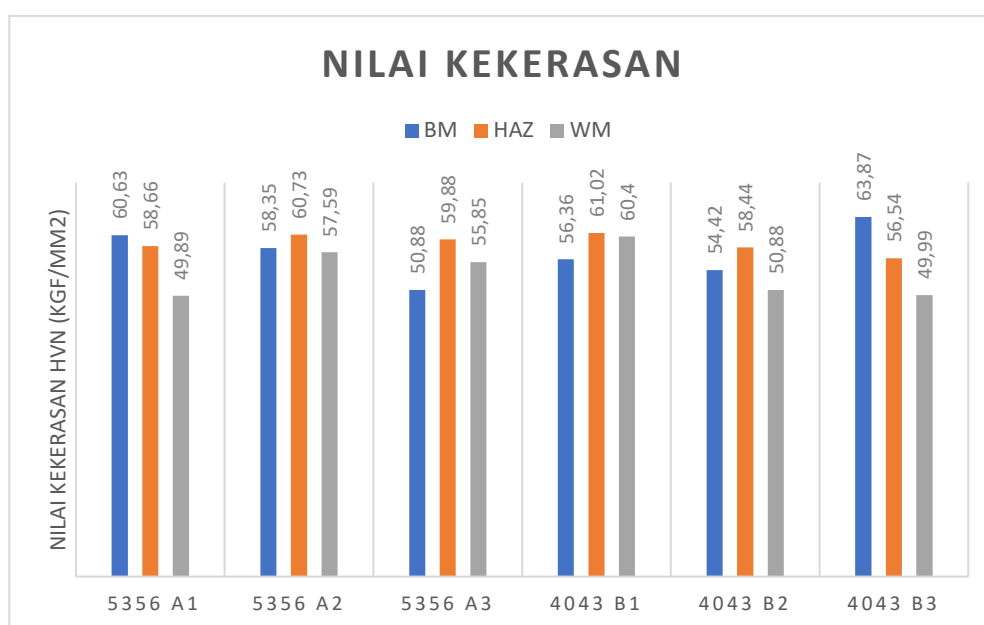
Gambar 4. 11 Hasil Nilai Kekerasan *Filler* 5356 Dan 4043 *Temperature* 110°C

Pada variasi *preheat* 110°C, data kekerasan menunjukkan bahwa *weld metal* ER5356 (55,85 HV) tetap lebih tinggi dibandingkan *weld metal* ER4043 (49,99 HV), mengikuti pola yang sama seperti *preheat* 70°C meskipun dengan selisih yang lebih kecil. Hal ini menunjukkan bahwa reversal pola kekerasan *weld metal* akibat perlambatan laju pendinginan bersifat konsisten pada kedua level *preheat* yang diterapkan (70°C dan 110°C), bukan sekadar penyimpangan pada satu variasi saja. Pada zona *base metal*, spesimen B3 (63,87 HV) justru tercatat lebih tinggi dibandingkan A3 (50,88 HV), sedangkan pada HAZ kedua *filler* kembali berdekatan (59,88 HV untuk A3 dan 55,54 HV untuk B3), sejalan dengan penjelasan bahwa HAZ hanya dipengaruhi oleh siklus termal dan bukan oleh komposisi *filler* secara langsung.

Grafik perbandingan distribusi kekerasan pada Gambar di atas menegaskan pola yang konsisten di seluruh variasi, yaitu *weld metal* secara umum menempati posisi kekerasan terendah dibandingkan *base metal* dan HAZ, dengan pengecualian pada beberapa spesimen *filler* ER4043 di mana *weld metal* justru mendekati atau melampaui HAZ akibat efek penghalusan butir dari silikon. Pola ini secara langsung berkorelasi dengan dominasi lokasi patahan pada *weld metal* yang telah diuraikan pada sub-bab uji tarik, karena zona dengan kekerasan terendah pada suatu sambungan las umumnya juga

memiliki kekuatan tarik lokal yang lebih rendah, sehingga menjadi lokasi inisiasi retak yang paling mungkin ketika sambungan menerima beban tarik.

Secara keseluruhan, hasil uji kekerasan memperkuat temuan dari pengujian tarik dan bending bahwa *preheat* 70°C memberikan distribusi sifat mekanik yang paling seimbang antara base metal, HAZ, dan *weld metal* untuk kedua *filler*, sedangkan *preheat* 110°C cenderung melebarkan HAZ dan menurunkan kekerasan pada seluruh zona akibat pelunakan yang lebih ekstensif. *Filler* ER5356 secara umum menghasilkan distribusi kekerasan yang lebih merata di sepanjang sambungan dibandingkan ER4043, konsisten dengan performanya yang lebih baik pada uji tarik dan uji bending.



Gambar 4. 12 Hasil Nilai Kekerasan *Filler* 5356 Dan 4043

Grafik distribusi kekerasan secara keseluruhan (perbandingan enam spesimen pada Gambar rangkuman) menegaskan bahwa laju pendinginan yang dikendalikan melalui temperatur *preheat* merupakan variabel paling menentukan dalam pergeseran zona kritis kekerasan sambungan las. Pada suhu ruang, *weld metal* ER4043 unggul akibat pembekuan cepat yang menghasilkan eutektik Al-Si halus, sedangkan pada *preheat* 70°C dan 110°C pola tersebut berbalik karena laju pendinginan yang lebih lambat mengasarkan eutektik Si pada ER4043 sekaligus memperbaiki homogenitas larutan padat Mg pada ER5356. Fenomena ini menjelaskan mengapa zona terlemah suatu sambungan

las aluminium tidak selalu tetap pada *weld metal*, melainkan dapat berpindah ke HAZ maupun *base metal* tergantung pada kombinasi *filler metal* dan parameter *preheat* yang diterapkan, sejalan dengan prinsip bahwa kekuatan sambungan las ditentukan oleh zona dengan sifat mekanik terlemah pada kondisi tertentu (Lancaster, Metallurgy of Welding). Proses pengelasan aluminium menyebabkan daerah yang menerima panas lebih besar melampaui suhu kritis dari aluminium yaitu pada HAZ dan *weld metal*. Oleh karena itu nilai kekerasan pada HAZ cenderung naik. Selain itu naiknya kekerasan dipengaruhi adanya unsur Mg, pada daerah HAZ distribusi kekerasan paling tinggi, hal ini dipengaruhi oleh banyaknya kandungan Al(Mg,Si) akibat penggunaan *filler* ER 5356. Jadi dapat dikatakan bahwa pada daerah HAZ nilai distribusi kekerasan lebih meningkat dari daerah *Weld Area* dan *Base metal* begitupun pada ER 4043 (Riadini Wanty Lubis).

Pada pengujian kekerasan, dilakukan analisis statistik menggunakan metode *Two-Way Analysis of Variance* (Two-Way ANOVA) untuk mengetahui pengaruh faktor *preheat*, jenis *filler*, serta interaksi antara kedua faktor tersebut terhadap nilai kekerasan (*hardness*). Hasil analisis disajikan sebagai berikut :

A. Base Metal

Tests of Normality						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Standardized Residual for Hardness	.129	18	.200*	.963	18	.658

*. This is a lower bound of the true significance.
a. Lilliefors Significance Correction

Gambar 4. 13 Tests Normality

Berdasarkan hasil uji normalitas pada Tabel 4. 13 diperoleh nilai signifikansi *Kolmogorov-Smirnov* sebesar 0,200 dan *Shapiro-Wilk* sebesar 0,658. Kedua nilai tersebut lebih besar dari taraf signifikansi 0,05 (Sig. > 0,05), sehingga menunjukkan bahwa data residual hardness berdistribusi normal. Dengan demikian, asumsi normalitas telah terpenuhi dan data layak untuk dianalisis lebih lanjut menggunakan metode *Two-Way* ANOVA.

Levene's Test of Equality of Error Variances ^{a,b}					
		Levene Statistic	df1	df2	Sig. ^c
Hardness	Based on Mean	3.256	5	12	.044
	Based on Median	.324	5	12	.889
	Based on Median and with adjusted df	.324	5	6.822	.883
	Based on trimmed mean	2.757	5	12	.070

Tests the null hypothesis that the error variance of the dependent variable is equal across groups.

a. Dependent variable: Hardness
b. Design: Intercept + Preheat + Filler + Preheat * Filler
c. Confidence Interval: 0%

Gambar 4. 14 *Levene's Test of Equality of Error Variances*

Berdasarkan hasil *Levene's Test of Equality of Error Variances* pada Tabel 4. 14 diperoleh nilai signifikansi Based on Mean sebesar 0,044, *Based on Median* sebesar 0,889, Based on Median and with adjusted df sebesar 0,883, dan Based on Trimmed Mean sebesar 0,070. Meskipun nilai signifikansi berdasarkan mean lebih kecil dari 0,05, hasil berdasarkan median dan trimmed mean menunjukkan nilai signifikansi lebih besar dari 0,05, sehingga secara umum varians antar kelompok dapat dianggap relatif homogen. Oleh karena itu, data masih memenuhi asumsi homogenitas dan analisis dapat dilanjutkan menggunakan metode *Two-Way ANOVA*, dengan interpretasi hasil dilakukan secara hati-hati karena terdapat sedikit penyimpangan pada pengujian berdasarkan mean.

Tests of Between-Subjects Effects						
Dependent Variable: Hardness						
Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	Partial Eta Squared
Corrected Model	316.766 ^a	5	63.353	9.801	<.001	.803
Intercept	59347.015	1	59347.015	9181.246	<.001	.999
Preheat	13.267	2	6.633	1.026	.388	.146
Filler	11.392	1	11.392	1.762	.209	.128
Preheat * Filler	292.107	2	146.053	22.595	<.001	.790
Error	77.567	12	6.464			
Total	59741.348	18				
Corrected Total	394.333	17				

a. R Squared = .803 (Adjusted R Squared = .721)

Gambar 4. 15 *Tests of Between-Subjects Effects*

Berdasarkan hasil *Tests of Between-Subjects Effects* pada Tabel 4. 15, diperoleh nilai signifikansi faktor preheat sebesar 0,388 (Sig. > 0,05) dan *filler*

sebesar 0,209 (Sig. > 0,05), sehingga secara parsial kedua faktor tersebut tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai hardness pada base metal. Namun, interaksi antara *preheat* dan *filler* menunjukkan nilai signifikansi < 0,001 (Sig. < 0,05) dengan nilai F sebesar 22,595 dan Partial Eta Squared sebesar 0,790, yang menunjukkan bahwa kombinasi kedua faktor memberikan pengaruh yang signifikan dan memiliki ukuran efek yang besar terhadap nilai hardness. Selain itu, model yang digunakan memiliki nilai R^2 sebesar 0,803 (Adjusted $R^2 = 0,721$), yang berarti sekitar 80,3% variasi nilai hardness dapat dijelaskan oleh model penelitian, sedangkan sisanya sebesar 19,7% dipengaruhi oleh faktor lain di luar model. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa perubahan nilai hardness lebih dipengaruhi oleh kombinasi perlakuan preheat dan jenis filler dibandingkan oleh masing-masing faktor secara terpisah.

B. HAZ

Tests of Normality						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Standardized Residual for Hardness	.112	18	.200*	.971	18	.824

*. This is a lower bound of the true significance.
a. Lilliefors Significance Correction

Gambar 4. 16 Tests Normality

Berdasarkan hasil uji normalitas pada Tabel 4. 16 diperoleh nilai signifikansi *Kolmogorov-Smirnov* sebesar 0,200 dan *Shapiro-Wilk* sebesar 0,824. Kedua nilai signifikansi tersebut lebih besar dari taraf signifikansi 0,05 (Sig. > 0,05), sehingga menunjukkan bahwa data residual hardness berdistribusi normal. Dengan demikian, asumsi normalitas telah terpenuhi, sehingga data memenuhi persyaratan untuk dilakukan analisis statistik parametrik menggunakan metode *Two-Way* ANOVA.

Levene's Test of Equality of Error Variances^{a, b}

		Levene Statistic	df1	df2	Sig. ^c
Hardness	Based on Mean	1.846	5	12	.178
	Based on Median	.831	5	12	.552
	Based on Median and with adjusted df	.831	5	6.514	.569
	Based on trimmed mean	1.766	5	12	.194

Tests the null hypothesis that the error variance of the dependent variable is equal across groups.

a. Dependent variable: Hardness

b. Design: Intercept + Preheat + Filler + Preheat * Filler

c. Confidence Interval: 0%

Gambar 4. 17 *Levene's Test of Equality of Error Variances*

Berdasarkan hasil *Levene's Test of Equality of Error Variances* pada Tabel 4. 17 diperoleh nilai signifikansi Based on Mean sebesar 0,178, *Based on Median* sebesar 0,552, Based on Median and with adjusted df sebesar 0,569, dan *Based on Trimmed Mean* sebesar 0,194. Seluruh nilai signifikansi tersebut lebih besar dari taraf signifikansi 0,05 (Sig. > 0,05), sehingga menunjukkan bahwa varians data antar kelompok bersifat homogen. Dengan demikian, asumsi homogenitas telah terpenuhi, sehingga data layak untuk dianalisis lebih lanjut menggunakan metode *Two-Way ANOVA*.

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: Hardness						
Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	Partial Eta Squared
Corrected Model	34.936 ^a	5	6.987	4.587	.014	.657
Intercept	62700.487	1	62700.487	41163.210	<.001	1.000
Preheat	7.956	2	3.978	2.612	.114	.303
Filler	2.233	1	2.233	1.466	.249	.109
Preheat * Filler	24.746	2	12.373	8.123	.006	.575
Error	18.279	12	1.523			
Total	62753.702	18				
Corrected Total	53.215	17				

a. R Squared = .657 (Adjusted R Squared = .513)

Gambar 4. 18 *Tests of Between-Subjects Effects*

Berdasarkan hasil *Tests of Between-Subjects Effects* pada Tabel 4. 18 diperoleh nilai signifikansi faktor *preheat* sebesar 0,114 (Sig. > 0,05) dan *filler* sebesar 0,249 (Sig. > 0,05), sehingga secara parsial kedua faktor tersebut tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai hardness pada daerah *Heat Affected Zone* (HAZ). Namun, interaksi antara *preheat* dan *filler* menunjukkan nilai signifikansi 0,006 (Sig. < 0,05) dengan nilai F sebesar 8,123

dan *Partial Eta Squared* sebesar 0,575, yang menunjukkan bahwa kombinasi kedua faktor memberikan pengaruh yang signifikan dengan ukuran efek yang besar terhadap nilai hardness HAZ. Selain itu, model penelitian memiliki nilai R^2 sebesar 0,657 ($\text{Adjusted } R^2 = 0,513$), yang berarti sekitar 65,7% variasi nilai *hardnes* HAZ dapat dijelaskan oleh model penelitian, sedangkan 34,3% sisanya dipengaruhi oleh faktor lain di luar model. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa perubahan nilai hardness pada daerah HAZ lebih dipengaruhi oleh interaksi antara temperatur *preheat* dan jenis *filler* dibandingkan oleh pengaruh masing-masing faktor secara terpisah.

C. WM

Tests of Normality						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Standardized Residual for Hardness	.126	18	.200 [*]	.963	18	.663

^{*}. This is a lower bound of the true significance.
^a. Lilliefors Significance Correction

Gambar 4. 19 Tests Normality

Berdasarkan hasil uji normalitas pada Tabel 4. 19 diperoleh nilai signifikansi *Kolmogorov-Smirnov* sebesar 0,200 dan *Shapiro-Wilk* sebesar 0,663. Kedua nilai signifikansi tersebut lebih besar dari taraf signifikansi 0,05 ($\text{Sig.} > 0,05$), sehingga menunjukkan bahwa data residual hardness berdistribusi normal. Dengan demikian, asumsi normalitas telah terpenuhi, sehingga data memenuhi persyaratan untuk dianalisis lebih lanjut menggunakan metode *Two-Way* ANOVA.

Levene's Test of Equality of Error Variances ^{a,b}					
		Levene Statistic	df1	df2	Sig. ^c
Hardness	Based on Mean	3.012	5	12	.055
	Based on Median	.550	5	12	.736
	Based on Median and with adjusted df	.550	5	5.856	.736
	Based on trimmed mean	2.692	5	12	.074

Tests the null hypothesis that the error variance of the dependent variable is equal across groups.

- a. Dependent variable: Hardness
b. Design: Intercept + Preheat + Filler + Preheat * Filler
c. Confidence Interval: 0%

Gambar 4. 20 Levene's Test of Equality of Error Variancesa

Berdasarkan hasil *Levene's Test of Equality of Error Variances* pada Tabel 4.20 diperoleh nilai signifikansi Based on Mean sebesar 0,055, Based on Median sebesar 0,736, *Based on Median and with adjusted df* sebesar 0,736, serta Based on Trimmed Mean sebesar 0,074. Seluruh nilai signifikansi tersebut lebih besar dari taraf signifikansi 0,05 (Sig. > 0,05), sehingga menunjukkan bahwa varians data antar kelompok bersifat homogen. Dengan demikian, asumsi homogenitas telah terpenuhi dan data memenuhi persyaratan untuk dianalisis lebih lanjut menggunakan metode *Two-Way ANOVA*.

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: Hardness

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	Partial Eta Squared
Corrected Model	402.078 ^a	5	80.416	11.397	<,001	.826
Intercept	51617.916	1	51617.916	7315.516	<,001	.998
Preheat	25.446	2	12.723	1.803	.207	.231
Filler	14.526	1	14.526	2.059	.177	.146
Preheat * Filler	362.106	2	181.053	25.660	<,001	.810
Error	84.671	12	7.056			
Total	52104.666	18				
Corrected Total	486.749	17				

a. R Squared = .826 (Adjusted R Squared = .754)

Gambar 4. 21 *Tests of Between-Subjects Effects*

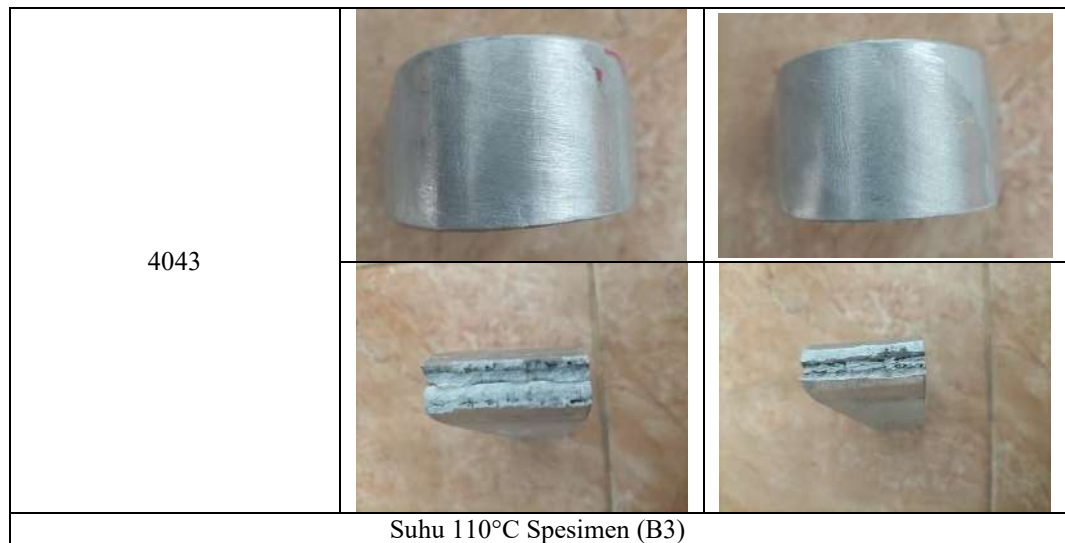
Berdasarkan hasil *Tests of Between-Subjects Effects* pada Tabel 4. 21 diperoleh nilai signifikansi faktor *preheat* sebesar 0,207 (Sig. > 0,05) dan *filler* sebesar 0,177 (Sig. > 0,05), sehingga secara parsial kedua faktor tersebut tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai *hardness* pada daerah weld metal. Namun, interaksi antara *preheat* dan *filler* menunjukkan nilai signifikansi < 0,001 (Sig. < 0,05) dengan nilai F sebesar 25,660 dan Partial Eta Squared sebesar 0,810, yang menunjukkan bahwa kombinasi kedua faktor memberikan pengaruh yang signifikan dengan ukuran efek yang sangat besar terhadap nilai *hardness*. Selain itu, model penelitian memiliki nilai R² sebesar 0,826 (Adjusted R² = 0,754), yang berarti sekitar 82,6% variasi nilai *hardness* dapat dijelaskan oleh model, sedangkan 17,4% sisanya dipengaruhi oleh faktor lain di luar penelitian. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa perubahan nilai *hardness* pada daerah weld metal lebih dipengaruhi oleh interaksi antara temperatur *preheat* dan jenis *filler* dibandingkan oleh pengaruh masing-masing faktor secara terpisah.

4.1.5 Uji Tekuk

Pengujian tekuk merupakan metode pengujian yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi *filler metal* dan *temperatur preheat* pada proses pengelasan GTAW terhadap tingkat keuletan material, sekaligus mengidentifikasi keberadaan cacat pada sambungan hasil pengelasan. Pelaksanaan pengujian bending mengacu pada metode transversal bending, yang mencakup pengujian pada bagian *face bend* dan *root bend*, dengan masing-masing variasi menggunakan 4 spesimen uji. Hasil pengujian bending tersebut. Hasil uji bending bisa di lihat pada Gambar 4.13

<i>Filler</i>	<i>Face Bend</i>	<i>Root Bend</i>
5356		
		
Suhu Ruang Spesimen (A1)		
4043		
		
Suhu Ruang Spesimen (B1)		

5356		
		
	Suhu 70°C Spesimen (A2)	
4043		
		
	Suhu 70°C Spesimen (B2)	
5356		
		
	Suhu 110°C Spesimen (A3)	



Gambar 4. 22 Hasil Uji Tekuk

Tabel 4. 4 Hasil Uji Tekuk

Variasi		Kode Material	With	Thicknes	Diskontunuitas		Result
					Type of Diskontunuitas	Sze (mm)	
Suhu Ruang	Filler 5356	A1.F1	38	6	No Indication	0	Accepted
		A1.F2	38	6	No Indication	0	Accepted
		A1.R1	38	6	No Indication	0	Accepted
		A1.R2	38	6	Crack	38	Reject
	Filler 4043	B1.F1	38	6	Crack	38	Reject
		B1.F2	38	6	Crack	38	Reject
		B1.R1	38	6	No Indication	0	Accepted
		B1.R2	38	6	Crack	38	Reject
Suhu 70°C	Filler 5356	A2.F1	38	6	No Indication	0	Accepted
		A2.F2	38	6	No Indication	0	Accepted
		A2.R1	38	6	No Indication	0	Accepted
		A2.R2	38	6	No Indication	0	Accepted
	Filler 4043	B2.F1	38	6	Crack	38	Reject
		B2.F2	38	6	No Indication	0	Accepted
		B2.R1	38	6	Crack	38	Reject
		B2.R2	38	6	Crack	38	Reject
Suhu 110°C	Filler 5356	A3.F1	38	6	Crack	38	Reject
		A3.F2	38	6	Crack	38	Reject
		A3.R1	38	6	No Indication	0	Accepted
		A3.R2	38	6	No Indication	0	Accepted
	Filler 4043	B3.F1	38	6	No Indication	0	Accepted
		B3.F2	38	6	Crack	38	Reject
		B3.R1	38	6	No Indication	0	Accepted
		B3.R2	38	6	Crack	38	Reject

Tabel di atas menunjukkan bahwa Hasil pengujian bending 24 spesimen sambungan las GTAW paduan aluminium menunjukkan tingkat kelulusan (13 spesimen accepted) dan tingkat (11 spesimen) akibat munculnya *crack* dengan ukuran diskontinuitas 38 mm, yang menurut kriteria penerimaan AWS D1.2 *Structural Welding Code Aluminum* dikategorikan sebagai cacat tidak dapat diterima karena melebihi batas ukuran retak yang diizinkan pada uji *bending*. Variasi *preheat* 70°C dengan *filler* ER5356 (kode A2) memberikan performa terbaik dengan seluruh spesimen dinyatakan *accepted*, sedangkan *filler* ER4043 pada suhu ruang maupun 70°C (kode B1 dan B2) menunjukkan performa terendah.

Kecenderungan ini secara metalurgi berkaitan dengan pengaruh *preheat* terhadap *cooling rate* dan *thermal cycle* selama solidifikasi logam las. *Preheat* pada rentang moderat memperlambat laju pendinginan sehingga waktu bagi gas hidrogen untuk keluar dari kolam las menjadi lebih panjang dan residual stress akibat kontraksi termal dapat direduksi, sebagaimana dijelaskan dalam prinsip solidifikasi dan pembentukan cacat las pada aluminium. Sebaliknya, *preheat* yang terlalu rendah mempercepat pendinginan sehingga meningkatkan risiko porositas dan tegangan sisa, sementara *preheat* berlebih memperpanjang waktu tinggal logam pada suhu tinggi dan memicu HAZ softening melalui pertumbuhan butir serta koarsening presipitat penguat, pola yang juga teramati pada studi pengaruh *preheat* terhadap sifat mekanik sambungan las aluminium AA6061-T6 berfiller ER5356 (AWS Welding Handbook Vol 4, n.d.)

Perbedaan performa antar-*filler* dijelaskan oleh mekanisme penguatan yang berbeda. ER5356 yang berbasis paduan Al-Mg memperoleh kekuatan melalui *solid solution strengthening* tanpa membentuk fasa kedua yang getas dalam jumlah signifikan, sehingga memberikan kombinasi kekuatan dan keuletan yang lebih seimbang dibandingkan ER4043 berbasis Al-Si, yang unsur silikonnya membentuk fasa eutektik getas pada batas butir dan berperan sebagai stress raiser saat menerima beban lentur. Karakteristik ini konsisten dengan panduan pemilihan *filler* pada AWS D1.2 yang menyatakan ER5356 memiliki keuletan dan kekuatan geser lebih tinggi dibandingkan ER4043, meskipun ER4043 lebih tahan terhadap hot cracking selama proses pengelasan

berlangsung AWS D1.2 hasil serupa juga dilaporkan pada studi pengaruh kandungan Mn *filler* ER5356 terhadap sifat mekanik sambungan paduan aluminium, (Xianpeng Ni, 2024).

Secara keseluruhan, kombinasi *preheat* 70°C dengan *filler* ER5356 terbukti menghasilkan sambungan las GTAW aluminium dengan kemampuan deformasi plastis terbaik, sedangkan hubungan antara *preheat* dan keuletan sambungan bersifat tidak linier dan memiliki titik optimum tertentu. Temuan ini menegaskan pentingnya pengendalian parameter *preheat* secara cermat agar tidak melampaui ambang batas yang dapat menurunkan sifat mekanik akibat *overheating*, sejalan dengan prinsip pengendalian *thermal cycle* pada pengelasan paduan aluminium yang ditekankan baik dalam literatur welding metallurgy maupun kode AWS D1.2.

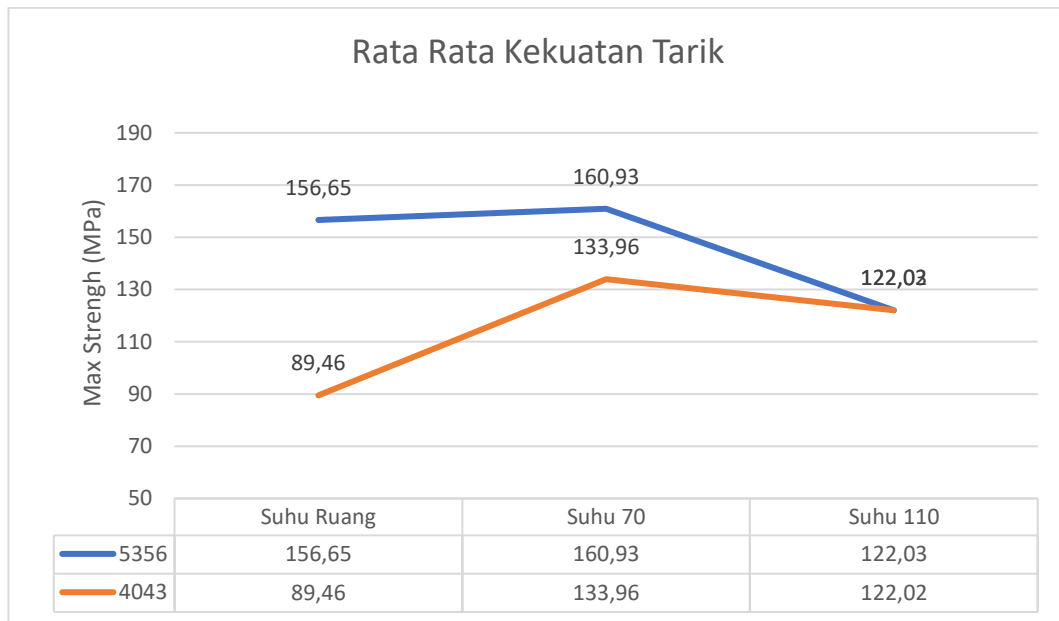
4.1.6 Uji Tarik

Pengujian kekuatan tarik dilaksanakan di Laboratorium Uji Bahan pada bengkel konstruksi PPNS dengan tujuan mengidentifikasi karakteristik mekanik, khususnya kekuatan tarik, pada sambungan las aluminium alloy 6061 T6 dengan variasi jenis *filler metal* dan *temperatur preheat*. Metode pembebanan yang diterapkan dalam pengujian ini bersifat statis dan dilakukan secara bertahap hingga spesimen mengalami kegagalan (patah). Acuan standar yang digunakan dalam pelaksanaan pengujian ini adalah AWS D1.2 . Data yang diperoleh dari hasil uji tarik tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar penentuan status *accepted* atau *reject* terhadap kekuatan sambungan las hasil proses GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) dengan menggunakan *filler metal* ER5356 dan ER4043 pada beberapa variasi *temperatur preheat*. Hasil uji tarik bisa di lihat pada Tabel 4.4

Tabel 4. 5 Hasil Uji Tarik

Variasi		Kode Material	Max. Strength (MPa)	Average (MPa)	Failure Location
Suhu Ruang	Filler 5356	A1.T1	166,47	156,65	Weld Metal
		A1.T2	146,84		Weld Metal
	Filler 4043	B1.T1	84,56	89,45	Weld Metal
		B1.T2	94,36		Weld Metal
Suhu 70°	Filler 5356	A2.T1	160,93	160,93	HAZ
		A2.T2	160,93		HAZ
	Filler 4043	B2.T1	138,14	133,96	Weld Metal
		B2.T2	129,78		Weld Metal
Suhu 110°	Filler 5356	A3.T1	134,14	122,03	Weld Metal
		A3.T2	109,93		Weld Metal
	Filler 4043	B3.T1	125,47	122,03	Weld Metal
		B3.T2	118,57		Weld Metal

Berdasarkan hasil uji tarik pada 12 spesimen, diketahui bahwa 10 spesimen mengalami kegagalan pada daerah *weld metal*, sedangkan 2 spesimen lainnya mengalami kegagalan pada daerah HAZ (*heat affected zone*). Nilai kuat tarik yang diperoleh dari seluruh spesimen belum mencapai persyaratan penerimaan yang ditetapkan, sehingga seluruh hasil pengujian dinyatakan reject sesuai dengan ketentuan AWS D1.2 *Structural Welding Code – Aluminum*. Kode ini dijadikan sebagai standar evaluasi sambungan las aluminium, yang mengharuskan setiap sambungan memiliki sifat mekanik sesuai dengan persyaratan kualifikasi prosedur pengelasan.



Gambar 4. 23 Grafik Hasil Uji Tarik

Hasil pengujian tarik menunjukkan bahwa seluruh spesimen belum memenuhi penerimaan (reject) berdasarkan AWS D1.2 Structural Welding Code Aluminum, *Tensile Test Acceptance Criteria*. Hal ini ditunjukkan oleh nilai kekuatan tarik yang diperoleh masih berada di bawah persyaratan minimum logam induk yang digunakan sebagai acuan. Menurut AWS D1.2, hasil uji tarik sambungan las dinyatakan memenuhi syarat apabila kekuatan tarik spesimen mencapai atau melebihi nilai minimum yang dipersyaratkan untuk logam induk dengan kekuatan tarik yang lebih rendah.

Berdasarkan lokasi patahan, spesimen dengan *filler* ER5356 pada suhu ruang dan 110°C mengalami patah pada *weld metal*, sedangkan pada suhu *preheat* 70°C patahan berpindah ke *Heat Affected Zone (HAZ)*. Perpindahan lokasi patahan ini menunjukkan bahwa perubahan temperatur *preheat* memengaruhi distribusi sifat mekanik pada sambungan las. Pada suhu 70°C, kekuatan *weld metal* meningkat sehingga daerah HAZ menjadi bagian yang relatif paling lemah akibat mengalami siklus termal selama proses pengelasan. Sebaliknya, pada suhu ruang dan 110°C, *weld metal* masih menjadi lokasi dengan konsentrasi tegangan tertinggi sehingga patahan terjadi pada daerah tersebut.

Untuk spesimen yang menggunakan *filler* ER4043, seluruh spesimen mengalami patah pada *weld metal* pada semua variasi temperatur. Kondisi ini menunjukkan bahwa kekuatan logam las masih lebih rendah dibandingkan daerah HAZ maupun logam induk. Menurut Kou (2003), kegagalan yang terjadi pada weld metal umumnya dipengaruhi oleh komposisi logam pengisi, tingkat pengenceran (*dilution*), pembentukan mikrostruktur selama solidifikasi, serta kemungkinan adanya diskontinuitas internal yang menurunkan kemampuan sambungan dalam menahan beban tarik.



Gambar 4. 24 Hasil Patahan Uji Tarik *Filler* 5356 Suhu Ruang (A1)



Gambar 4. 25 Hasil Patahan Uji Tarik *Filler* 4043 Suhu Ruang (B1)



Gambar 4. 26 Hasil Patahan Uji Tarik *Filler* 5356 70° (A2)



Gambar 4. 27 Hasil Patahan Uji Tarik *Filler* 4043 70° (B2)



Gambar 4. 28 Hasil Patahan Uji Tarik *Filler* 5356 110° (A3)



Gambar 4. 29 Hasil Patahan Uji Tarik *Filler* 5356 110° (B3)

Berdasarkan keseluruhan analisis, terdapat keterkaitan yang jelas antara lokasi patahan, kualitas sambungan las, dan kekuatan tarik yang diperoleh. Dominasi lokasi patahan pada *weld metal* menegaskan bahwa daerah tersebut merupakan titik terlemah pada sambungan, yang disebabkan oleh kombinasi mikrostruktur hasil pembekuan cepat, dilusi yang tidak merata, serta indikasi cacat porositas dan penetrasi tidak sempurna, sebagaimana juga dilaporkan oleh Zhu et al. (2018) bahwa cacat porositas dan lack of fusion pada pengelasan GMAW paduan aluminium seri 5xxx menjadi penyebab utama menurunnya kekuatan tarik sambungan las. Variasi suhu *preheat* terbukti memengaruhi kekuatan tarik secara tidak linear, dengan suhu 70°C memberikan hasil optimum, sementara suhu 110°C menurunkan kekuatan akibat pelunakan HAZ dan pertumbuhan butir, sejalan dengan temuan Zhu et al. (2018) bahwa *preheat* yang tepat dapat menekan cacat porositas dan *lack of fusion* sehingga kekuatan tarik sambungan las dapat mendekati 90% kekuatan tarik logam induk, namun *preheat* yang berlebihan berpotensi memperbesar HAZ dan menurunkan sifat mekanik. Temuan ini juga sejalan dengan penelitian Rachmatullah et al. (2021) yang secara spesifik meneliti pengelasan GTAW aluminium 6061 dengan *filler* ER5356 pada variasi suhu *preheat* 70°C, 100°C, dan 120°C, di mana kekuatan tarik tertinggi yang diperoleh dari seluruh variasi hanya sebesar 246,74 MPa (pada kombinasi *preheat* 120°C dengan aging *post weld heat treatment* 260°C), sementara variasi *preheat* lain menghasilkan kekuatan tarik yang berada di

bawah nilai minimum spesifikasi *filler* ER5356 (240 MPa), sehingga memperkuat temuan bahwa variasi *preheat* semata belum tentu mampu membawa kekuatan tarik sambungan las 6061 mencapai kekuatan tarik minimum *filler* yang digunakan. *Filler* ER5356 secara konsisten menghasilkan kekuatan tarik lebih tinggi dibandingkan ER4043 pada seluruh variasi suhu, sejalan dengan penelitian Fakhri et al. (2022) pada pengelasan GTAW aluminium 6061 yang juga menunjukkan bahwa variasi parameter pengelasan (arus/heat input) menghasilkan perubahan mikrostruktur signifikan pada HAZ dan weld metal berupa penyebaran butir Mg₂Si, serta kekuatan tarik hasil las yang tetap berada jauh di bawah kekuatan tarik logam induk 6061. Namun demikian, karena keberadaan cacat porositas yang teridentifikasi pada hampir seluruh permukaan patahan, seluruh spesimen belum mampu mencapai kekuatan tarik minimum yang dipersyaratkan AWS D1.2, sehingga dinyatakan *reject*. Sebagai acuan, spesifikasi AWS A5.10/A5.10M menetapkan kekuatan tarik minimum logam pengisi ER5356 sebesar 240 MPa dan ER4043 sebesar 165 MPa, sedangkan kekuatan tarik minimum logam induk 6061 menurut ASTM B209 adalah 290 MPa. Mengacu pada ketentuan AWS D1.2 yang mensyaratkan penggunaan nilai terendah antara kekuatan tarik minimum logam induk dan logam pengisi sebagai kriteria penerimaan, maka nilai 165 MPa (ER4043) menjadi acuan terendah yang harus dipenuhi pada variasi *filler* ER4043, sedangkan pada variasi *filler* ER5356 acuan terendahnya adalah 240 MPa. Seluruh nilai kuat tarik hasil pengujian pada penelitian ini berada jauh di bawah kedua nilai acuan tersebut, sehingga memperkuat kesimpulan bahwa seluruh spesimen dinyatakan *reject*.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, pengujian, dan pembahasan mengenai variasi *filler metal* dan temperatur *preheat* pada sambungan las GTAW aluminium, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Hasil pengujian Tarik menunjukkan bahwa seluruh 12 spesimen belum memenuhi kriteria penerimaan AWS D1.2 sehingga dinyatakan *reject*, karena nilai kekuatan tarik seluruh spesimen berada jauh di bawah nilai minimum yang dipersyaratkan 240 MPa untuk ER5356 dan 165 MPa untuk ER4043. Nilai kekuatan tarik tertinggi diperoleh pada spesimen A2 *filler* ER5356, *preheat* 70°C sebesar 160,93 MPa, sedangkan nilai terendah pada spesimen B1 *filler* ER4043, suhu ruang sebesar 89,45 MPa. *filler* ER5356 secara konsisten menghasilkan kekuatan tarik lebih tinggi dibandingkan ER4043 pada seluruh variasi suhu, dan *preheat* 70°C memberikan hasil optimum sedangkan *preheat* 110°C menurunkan kekuatan tarik akibat pelunakan di daerah HAZ.
2. Berdasarkan hasil pengujian kekerasan, kenaikan *temperatur preheat* berpengaruh signifikan terhadap penurunan kekerasan di daerah HAZ dan *weld metal*, di mana semakin tinggi temperatur *preheat* dari suhu ruang, 70°C, hingga 110°C material menjadi semakin lunak akibat perlambatan laju pendinginan yang memicu pelarutan presipitat Mg₂Si serta pertumbuhan butir pada logam induk. Sementara itu, penggunaan *filler metal* berpengaruh secara spesifik di daerah *weld metal* namun tidak berpengaruh signifikan pada daerah HAZ, pada kondisi suhu ruang *filler* ER4043 terbukti lebih keras 60,40 HV dibanding ER5356 49,89 HV akibat pembentukan struktur eutektik Si yang halus, tetapi pada kondisi *preheat* 70°C dan 110°C posisi berbalik menjadi ER5356 yang lebih keras 57,59 HV pada 70°C dibanding ER4043 47,42 HV pada 70°C karena laju pendinginan lambat mengasarkkan struktur eutektik silikon pada ER4043 sekaligus mengoptimalkan difusi unsur magnesium untuk penguatan larutan padat pada ER5356. Hal ini diperkuat oleh hasil uji ANOVA, di mana interaksi antara *temperatur preheat* dan jenis *filler*

memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai kekerasan baik pada daerah HAZ (nilai signifikansi 0,006) maupun *weld metal* (nilai signifikansi < 0,001), sedangkan *preheat* dan *filler* secara terpisah tidak berpengaruh signifikan (nilai signifikansi > 0,05), sehingga fenomena pembalikan kekerasan antara ER4043 dan ER5356 tersebut lebih ditentukan oleh kombinasi kedua faktor dibandingkan pengaruh masing-masing faktor secara terpisah.

3. Variasi *filler metal* dan *temperatur preheat* terhadap metalografi sambungan aluminium 6061 dengan proses GTAW, sehingga setiap spesimen memperlihatkan karakteristik struktur makro dan mikro yang tidak sama. Dari sisi struktur makro, luas daerah HAZ terpantau membesar sejalan dengan kenaikan *preheat*, terlihat pada *filler* ER5356 yang meningkat dari 47,15 mm² pada suhu ruang menjadi 63,02 mm² pada 70°C dan 64,96 mm² pada 110°C. Pola serupa juga terjadi pada *filler* ER4043, dengan luas HAZ bertambah dari 49,64 mm² menjadi 53,44 mm² kemudian 57,80 mm² pada tiga tingkat *temperatur* yang sama. Kondisi ini terjadi sebab *heat input* yang diberikan selama pengelasan turut meningkat mengikuti kenaikan *preheat*. Sementara itu, pengamatan pada tingkat mikro memperlihatkan bahwa naiknya *temperatur preheat* memicu terjadinya pembesaran ukuran butir di daerah HAZ, disertai larutnya sebagian presipitat Mg₂Si akibat paparan siklus termal yang lebih intens, meskipun jenis fasa yang muncul tetap sama, yakni α -Al, β -AlFeSi, dan Mg₂Si yang konsisten teramati pada keseluruhan spesimen. Fenomena yang tidak jauh berbeda juga ditemukan pada daerah *weld metal*, di mana peningkatan *heat input* turut memicu pembesaran struktur dendrit sebagai konsekuensi melambatnya laju pendinginan. Namun demikian, karakteristik morfologi yang terbentuk berbeda antara kedua *filler* ER4043 cenderung membentuk struktur yang lebih halus dengan kehadiran fasa Al-Si, sedangkan *filler* ER5356 justru menghasilkan struktur dendrit yang lebih kasar dengan Mg terdistribusi dalam larutan padat. Secara keseluruhan, perbedaan siklus termal selama proses pengelasan menjadi faktor utama yang mendasari perubahan-perubahan tersebut, sehingga turut menentukan karakteristik mikrostruktur akhir pada sambungan las yang dihasilkan.

4. Hasil pengujian bending, variasi *filler metal* dan *temperatur preheat* terbukti berpengaruh terhadap keuletan sambungan las GTAW aluminium 6061. Spesimen dengan filler ER5356 pada preheat 70°C (spesimen A2) berhasil lolos kriteria penerimaan AWS D1.2 *accepted*, ditandai dengan tidak ditemukannya diskontinuitas atau retak terbuka baik pada pengujian *face bend* maupun *root bend*. Sebaliknya, spesimen *filler* ER4043 pada suhu ruang dan *preheat* 70°C (spesimen B1 dan B2) sebagian besar dinyatakan tidak lolos *rejected*, ditandai dengan munculnya retak terbuka sepanjang 38 mm yang melampaui batas toleransi. Ketidakkululusan ini diperkirakan berasal dari kehadiran fasa Al-Si yang bersifat getas di sepanjang batas butir *weld metal* ER4043, yang bertindak sebagai titik konsentrasi tegangan (*stress raiser*) saat spesimen menerima beban lentur, ditambah dengan cacat porositas akibat proses pembekuan yang berlangsung cepat sehingga menurunkan kemampuan sambungan.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut.

1. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan variasi temperatur *preheat* yang lebih beragam serta menambahkan variasi parameter pengelasan, seperti arus, *travel speed*, dan *heat input*, sehingga dapat diketahui kombinasi parameter yang menghasilkan kualitas sambungan las yang paling baik.
2. Penelitian selanjutnya dapat menambahkan perlakuan panas setelah pengelasan (*Post Weld Heat Treatment/PWHT*) seperti *solution heat treatment* dan *artificial aging* untuk mengetahui pengaruhnya terhadap peningkatan kekuatan tarik, kekerasan, serta perubahan struktur mikro pada sambungan las aluminium 6061.
3. Pengujian yang dilakukan pada penelitian selanjutnya dapat dilengkapi dengan uji impak, uji kelelahan (*fatigue*), uji korosi, serta pengamatan menggunakan. Pengujian tersebut dapat memberikan informasi yang lebih rinci mengenai mekanisme patahan, morfologi permukaan, distribusi unsur, dan karakteristik sambungan las.

4. Penelitian selanjutnya juga disarankan melakukan pengujian radiografi untuk mengidentifikasi cacat internal, seperti porositas, *lack of fusion*, dan retak yang tidak dapat diamati melalui pengujian visual maupun metalografi. Hasil pengujian tersebut dapat digunakan untuk menghubungkan cacat internal dengan sifat mekanik sambungan las.

DAFTAR PUSTAKA

- Alzahrani, B., Ahmed, M. M. Z., Habba, M. I. A., Fouad, R. A., Elshaghoul, Y. G. Y., & Gadallah, E. A. (2025). TIG Welding of EN AW-6082 Al Alloy: A Comparative Analysis of Filler Rods on Microstructural and Mechanical Performance. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 9(1). <https://doi.org/10.3390/jmmp9010021>
- ASM Welding handbook vol 2. (1990). Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v02.9781627081627>
- ASTM B 209. (2021). *ASTM B 209: Vol. i*. <https://doi.org/10.1520/B0209>
- AWS A5.10. (2021). *AWS A5.10 2021 (1).pdf*.
- AWS D1.1. (2025). Structural Welding Code. In *Struct Weld Code*.
- AWS Welding Handbook Vol 4. (n.d.). *AWS Welding Handbook VOL 4* (Vol. 4).
- Budiyanto, E., Nugroho, E., & Masruri, A. (2017). Pengaruh Diameter Filler Dan Arus Pada Pengelasan. *Jurnal Elektronik Universitas Muhammadiyah Metro*, 6(1), 54–61. <http://ojs.ummetro.ac.id/index.php/turbo%0APENGARUH>
- Ederson. (2008). *Directory_of_American_Medical_Education*.
- Ginzl, E. A. (2014). *Misconceptions about NDT Workmanship Acceptance Criteria for Quality Control*. 19(03).
- Haris, E., Van Gunawan, L., Luthfi, M., & Rakhman, A. (2024). Analisis Pengaruh Suhu Preheating 125°C, 150°C Dan 200°C Hasil Pengecoran Logam Terhadap Terjadinya Hot Tearing Menggunakan Material Aluminium 6061. *Journal of Applied Mechanical Engineering and Renewable Energy*, 4(1), 15–21. <https://doi.org/10.52158/jamere.v4i1.783>

- Hasan Ikhwan. (2020). *Influence of Pre-Weld Heat Treatment and Aging Post-Weld Heat Treatment on Tensile Test and Microstructure of Aluminium 6061 Weld Joint*. 4(1), 1–8.
- Ishak, M. (2015). *FEASIBILITY STUDY ON JOINING DISSIMILAR ALUMINUM ALLOYS AA6061 AND AA7075 BY TUNGSTEN INERT GAS (TIG)*. 7, 79–84.
- Lubis, R. W., & Wahyudianto, F. X. A. (2025). *Corrosion Behavior of Al6061-T6 by GTAW with Different Filler Metals*. 20(3), 351–358.
- Mathers. (2002). Welding of aluminium and its alloys. In *Nature* (Vol. 177, Issue 4508). <https://doi.org/10.1038/177568b0>
- Meng, C. (2010). Effect of Preheating Condition on Strength of AA6060 Aluminium Alloy for Extrusion. *School of Engineering, MSc*(March), 136.
- Munir, M. M. (2019). *Modul praktik*.
- Muralidharan, S., & Dinakar, N. (2022). A comparative investigation on weld metal properties of similar and dissimilar TIG welded joints on Al-Mg alloys. *Materials Today: Proceedings*, 62, 2217–2223. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.373>
- Pentura, B., Tornando, R., Taufiqurrahman, M., & Lubis, G. S. (2023). *Rancang Bangun Alat Uji Bending Pada Laboratorium Dasar Teknik Mesin*. 4(2), 90–97.
- Purwaningrum, Y., Mustofa, M. H., Wibowo, F. A., Mesin, T., & Indonesia, U. I. (2019). *PENGARUH TEMPERATUR PREHEAT TERHADAP SIFAT FISIK DAN MEKANIK HASIL PENGELASAN ALUMINIUM*. April, 25–26.
- sindo kou. (2003). *Solidification and Liquation Cracking Issues in Welding*.
- Structural Welding Code Aluminium. (2014). *Structural Welding Code Aluminium*.
- Studi, P., Mesin, T., & Industri, F. T. (2021).

- sumpena, +4. +Jurnal+pak+wartonoI_TNY. 5(1), 24–31.
- Suherman, S., Abdullah, I., Suprianto, Surya dharma, & Hendri Budi Kurniyanto. (2023). Effect of Welding Current on Mechanical Properties and Microstructure of Aluminium AA1135 Alloys by Gas Tungsten Arc Welding (GTAW). *Dinamis*, 11(2), 24–31.
<https://doi.org/10.32734/dinamis.v11i2.14334>
- Sunaryo, H. (2021). *Teknik Pengelasan Kapal Jilid 1* (Vol. 32, Issue 3).
- Tan, C. F., & Said, M. R. (2009). *Effect of Hardness Test on Precipitation Hardening Aluminium Alloy 6061-T6*. 36(3), 276–286.
- Tiara, A., & Marjianti. (n.d.). *tiaraariani, +04+-+Martijanti+-+Pengaruh+variasi+jenis+logam.pdf*.
- Wang, J., Chen, X., Yang, L., & Zhang, G. (2022). Effect of preheat & post-weld heat treatment on the microstructure and mechanical properties of 6061-T6 aluminum alloy welded sheets. *Materials Science and Engineering: A*, 841, 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.143081>
- Welding Handbook Vol 2. (n.d.). *Welding Handbook* (Vol. 2).
- Wicakcosono, R., Suharno, Harjanto, B., & sebelas maret surakarta, U. (2013). Jurnal Pendidikan Teknik Elektro. *Uny*, 3 (2), 153.
- Xianpeng Ni. (2024). *Effect of Mn-content of ER5356 welding rods on mechanical properties of Al-alloys joints*. April, 1–13.
<https://doi.org/10.3389/fmech.2024.1351922>
- Zhu, C., Tang, X., He, Y., Lu, F., & Cui, H. (2018). Effect of preheating on the defects and microstructure in NG-GMA welding of 5083 Al-alloy. *Journal of Materials Processing Tech.*, 251(May 2017), 214–224.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.08.037>

This page is intentionally empty
(halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

Lampiran 1. mill certificate material dan filler metal

Mill Test Certificate

Customer:		Product: TIG Welding Wire AWS A5.10 ER5356										NO:				
AWS Model	Sizes mm* g	Quantity (KG)	Lot No.	Chemical Composition of Deposited Metal %										X-ray Test		
				Other	Ti	Fe	Cr	Cu	Si	Mn	Mg	Zn	Al			
				Each	Total											
				0.05	0.15	0.08-0.20	MAX0.4	0.05-0.20	0.10	MAX0.25	0.05-0.20	4.5-5.5	MAX0.1	Remain		
ER5356	2.4	1000	2219450	0.008	0.09	0.07	0.15	0.10	0.08	0.16	0.059	5.00		-----	I	
WE HEREBY CERTIFY THAT THIS REPORT IS CORRECT AND THAT ALL TEST RESULTS ARE IN COMPLIANCE WITH SPECIFICATION DESCRIBED HEREIN. THE MANUFACTURING PROCESS OF OUR PRODUCT IS IN ACCORDANCE WITH THE CERTIFICATION CONDITION. WE ARE RESPONSIBLE THE QUALITY OF OUR PRODUCTS INSPECTOR: WANG MING ISSUED BY QUALITY DEPARTMENT DATE: 2022-12-27 天津华泰科技有限公司 李同超 GENERAL MANAGER																



**Certified Material Test Report
AWS A5.01 Schedule H, Class S1**

Hobart Aluminum · 1631 International Drive · Traverse City, MI 49686

☎ 231-933-1234 📠 231-933-6110 ✉ adam.treon@hobartbrothers.com 🌐 www.hobartbrothers.com

R/ER 5356

Lot Chemical Analysis vs. AWS A5.10 Chemistry Classification Designation

	Alloy	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Be	Cd	Other		Al
												Each	Total	
AWS (1)	5356	0.25	0.40	0.10	0.05-0.20	4.5-5.5	0.05-0.20	0.10	0.06-0.20	<0.0003	<0.05	<0.05	<0.15	Rem.
Lot (2) (3)	5356	0.04-0.06	0.11-0.14	<0.01	0.14-0.17	4.9-5.3	0.11-0.12	<0.01	0.06-0.8	<0.0001	<0.01	<0.05	<0.15	Rem.

(1) Single values shown are maximum percentage, except where minimum is specified.

(2) Certified composition results

(3) Mercury is not a normal contaminant in aluminum alloys and neither it nor any of its compounds are used in the manufacture of this product.

TYPICAL MECHANICAL PROPERTIES

Mechanical Results		AWS Specification	
Tensile	41,700 psi (288 Mpa)	35,000 psi (240 Mpa) Min.	
Yield	22,300 psi (154 Mpa)	Not Specified	
Elongation	27%	Not Specified	

*This typical mechanical information should not be construed as the actual results of this specific lot of material.
No alloy formulation changes since the initiation of this original cert.*

Other customer requirements on sales order: DFARS applies to "specialty metals" and aluminum is not included in the DFARS definition of specialty metals (section 252.225(a)(12)).

Hobart Aluminum hereby certifies that the material covered by this report has been drawn in the USA to the requirements of AWS A5.01, class S1, schedule F & H, controlled chemical composition, and tested in accordance with and been found to meet the requirements of specifications AWS A5.10, ASME/SFA 5.10.

4/2/2026

Adam Treon, Process Quality Systems Manager
Certifying Signature
Hobart Aluminum



Certified Material Test Report AWS A5.01 Schedule H, Class S1

Hobart Aluminum - 1631 International Drive - Traverse City, MI 49686

☎ 231-933-1234 📠 231-933-6110 ✉ adam.treon@hobartbrothers.com 🌐 www.hobartbrothers.com

R/ER 4043

Lot Chemical Analysis vs. AWS A5.10 Chemistry Classification Designation

	Alloy	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Be	Other		Al
											Each	Total	
AWS (1)	4043	4.5- 6.0	0.8	0.3	0.05	0.05	-	0.10	0.20	0.0003	<0.05	<0.15	Rem.
Lot (2) (3)	4043	4.72- 4.85	0.11- 0.13	0.02	0.00	<0.01	-	0.00	0.01- 0.02	0.0000	<0.05	<0.15	Rem.

(1) Single values shown are maximum percentages, except where minimum is specified.

(2) Certified composition results

(3) Mercury is not a normal contaminant in aluminum alloys and neither it nor any of its compounds are used in the manufacture of this product.

TYPICAL MECHANICAL PROPERTIES

Mechanical Results		AWS Specification	
Tensile	29,000 psi (200 Mpa)	24,000 psi (165 Mpa) Min.	
Yield	14,350 psi (99 Mpa)	Not Specified	
Elongation	19%	Not Specified	

*This typical mechanical information should not be construed as the actual results of this specific lot of material.
No alloy formulation changes since the initiation of this original cert.*

Other customer requirements on sales order: DFARS applies to "specialty metals" and aluminum is not included in the DFARS definition of specialty metals (section 252.225(a)(12)).

Hobart Aluminum hereby certifies that the material covered by this report has been drawn in the USA to the requirements of AWS A5.01, class S1, schedule F & H, controlled chemical composition, and tested in accordance with and been found to meet the requirements of specifications AWS A5.10, ASME/SFA 5.10.

4/2/2026

Adam Treon, Process Quality Systems Manager
Certifying Signature
Hobart Aluminum

Lampiran 2. Dokumentasi Persiapan Material dan Proses pengelasan



Persiapan Material



pemotongan material dan bevel



Mesin Las GTAW



Flowrate



Proses pengelasan



Parameter Pengelasan



Stopwatch



Suhu Ruang



Preheat 70°



Preheat 110°

Lampiran 3 Proses Pengujian





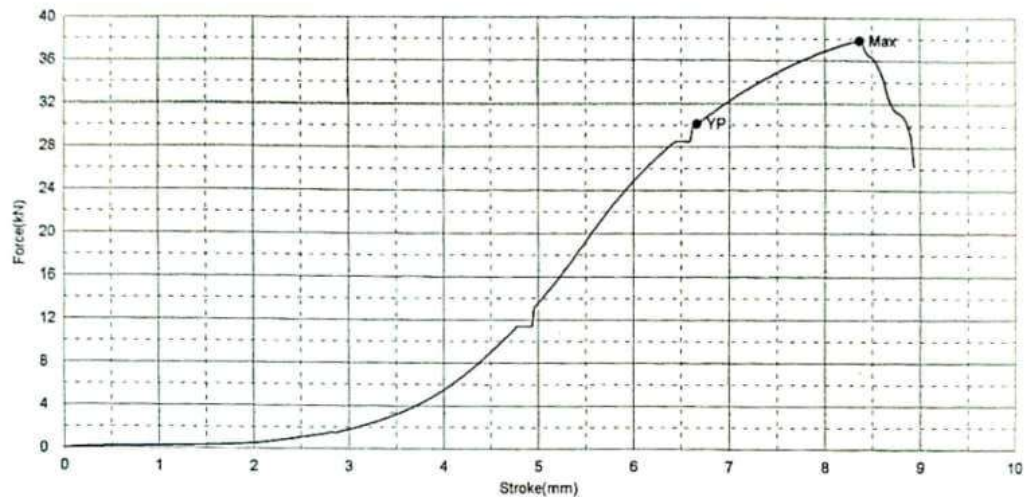
Lampiran 4 Hasil Pengujian Tensil

POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA LABORATORIUM UJI BAHAN

Shape: Plate

	Thickness	Width	Gauge Length
Units	mm	mm	mm
A1T1	6,0000	37,8800	0,0001

Name	Area	Yield Force	Max. Force	Yield Strength	Max. Strength
Parameter		0,1 %/FS		0,1 %/FS	
Units	mm ²	kN	kN	MPa	MPa
A1T1	227,28	30,10	37,84	132,42	166,47



Comment
Break at Weld Metal

SPK No. : 25-III/PL19/BJP/2026
Customer : Sdr. Aditya Kurnia Sandy NRP. 0722040102
Project: TUGAS AKHIR
Specimen : Plate
Material : Aluminium 6061
Weld. process/Position/Welder : GTAW / 1G / Adin
Test method: ASME E8/E8M
Reference code: AWS D1.2

Surabaya, June 02 2026

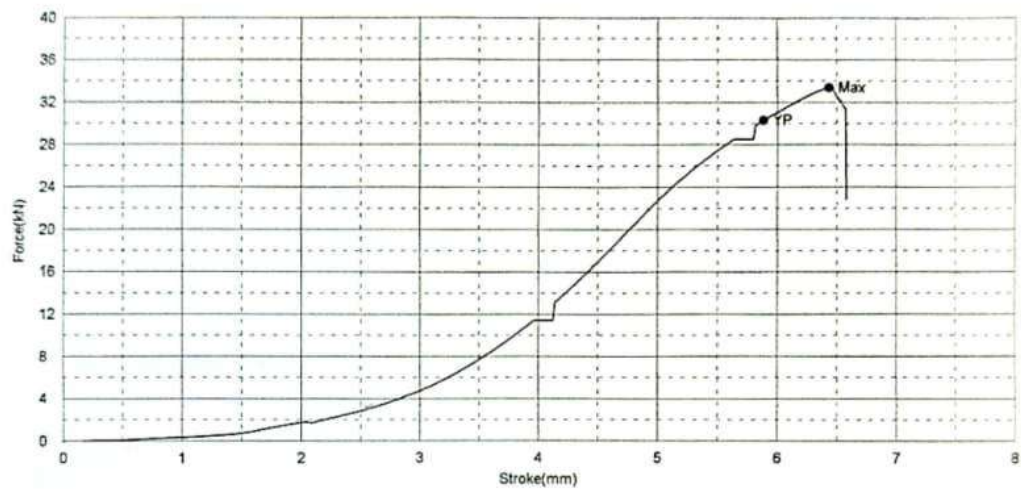
(Signature)
Pikty

POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM UJI BAHAN

Shape: Plate

	Thickness	Width	Gauge Length
Units	mm	mm	mm
A1T2	6,0000	37,8800	0,0001

Name	Area	Yield Force	Max. Force	Yield Strength	Max. Strength
Parameter		0,1 %/FS		0,1 %/FS	
Units	mm ²	kN	kN	MPa	MPa
A1T2	227,28	30,29	33,37	133,27	146,84



Comment

Break at Weld Metal

SPK No. : 25-III/PL19/BJP/2026
Customer : Sdr. Aditya Kurnia Sandy NRP. 0722040102
Project: TUGAS AKHIR
Specimen : Plate
Material : Aluminium 6061
Weld. process/Position/Welder : GTAW / 1G / Adin
Test method: ASME E8/E8M
Reference code: AWS D1.2

Surabaya, June 02 2026

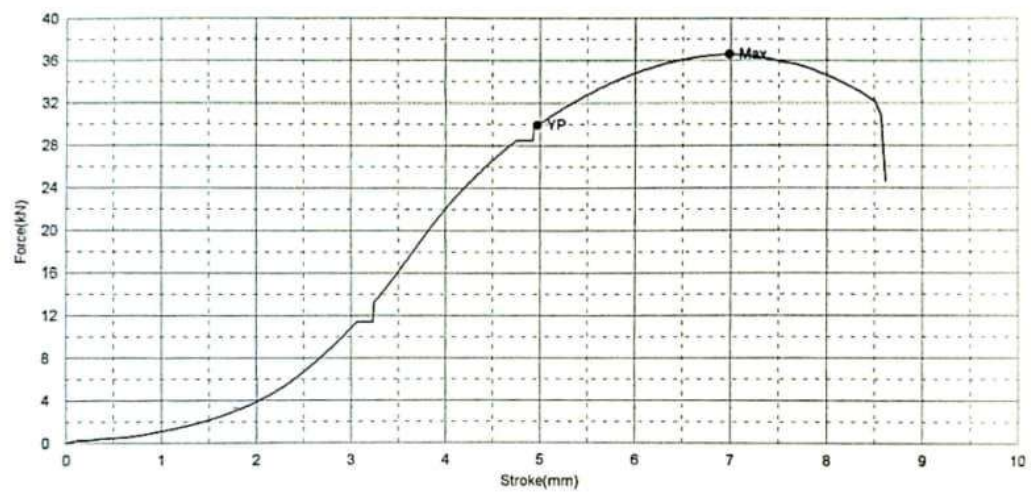
(.....)

POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM UJI BAHAN

Shape: Plate

	Thickness	Width	Gauge Length
Units	mm	mm	mm
A2T1	6,0000	37,8900	0,0001

Name	Area	Yield Force	Max. Force	Yield Strength	Max. Strength
Parameter		0,1 %/FS		0,1 %/FS	
Units	mm ²	kN	kN	MPa	MPa
A2T1	227,34	29,91	36,59	131,55	160,93



Comment

Break at Weld Metal

SPK No. : 25-III/PL19/BJP/2026
Customer : Sdr. Aditya Kurnia Sandy NRP. 0722040102
Project: TUGAS AKHIR
Specimen : Plate
Material : Aluminium 6061
Weld. process/Position/Welder : GTAW / 1G / Adin
Test method: ASME E8/E8M
Reference code: AWS D1.2

Surabaya, June 02 2026

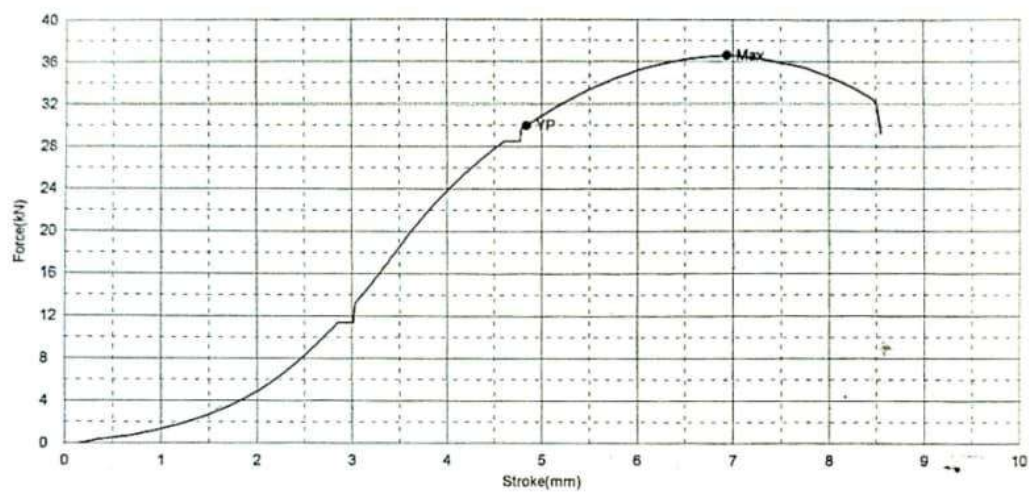

 (.....)

POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM UJI BAHAN

Shape: Plate

	Thickness	Width	Gauge Length
Units	mm	mm	mm
A2T2	6,0000	37,8800	0,0001

Name	Area	Yield Force	Max. Force	Yield Strength	Max. Strength
Parameter		0,1 %/FS		0,1 %/FS	
Units	mm ²	kN	kN	MPa	MPa
A2T2	227,28	29,95	36,58	131,79	160,93



Comment

Break at Weld Metal

SPK No. : 25-III/PL19/BJP/2026
Customer : Sdr. Aditya Kurnia Sandy NRP. 0722040102
Project: TUGAS AKHIR
Specimen : Plate
Material : Aluminium 6061
Weld. process/Position/Welder : GTAW / 1G / Adin
Test method: ASME E8/E8M
Reference code: AWS D1.2

Surabaya, June 02 2026

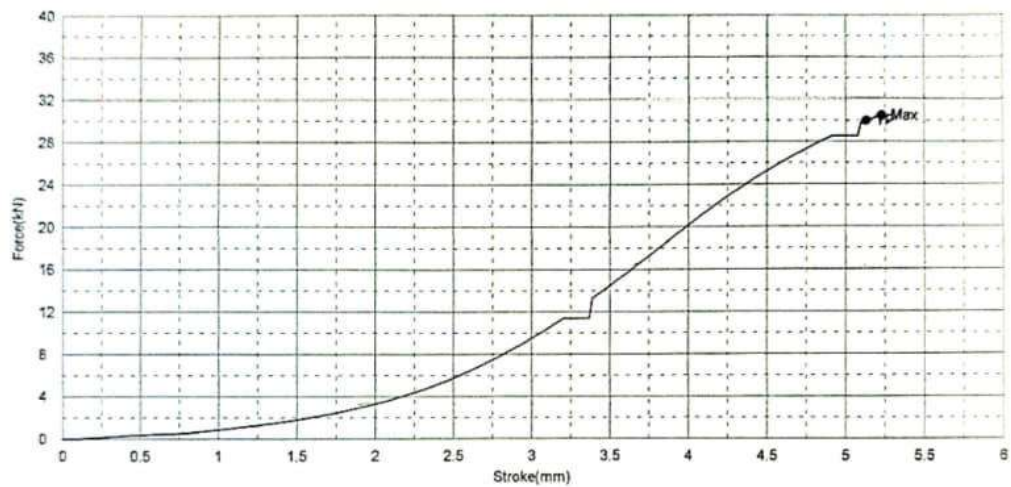

 (.....)

**POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM UJI BAHAN**

Shape: Plate

	Thickness	Width	Gauge Length
Units	mm	mm	mm
A3T1	6,0000	37,8800	0,0001

Name	Area	Yield Force	Max. Force	Yield Strength	Max. Strength
Parameter		0,1 %/FS		0,1 %/FS	
Units	mm ²	kN	kN	MPa	MPa
A3T1	227,28	29,95	30,49	131,80	134,14



Comment

Break at Weld Metal

SPK No. : 25-III/PL19/BJP/2026
 Customer : Sdr. Aditya Kurnia Sandy NRP. 0722040102
 Project: TUGAS AKHIR
 Specimen : Plate
 Material : Aluminium 6061
 Weld. process/Position/Welder : GTAW / 1G / Adin
 Test method: ASME E8/E8M
 Reference code: AWS D1.2

Surabaya, June 02 2026

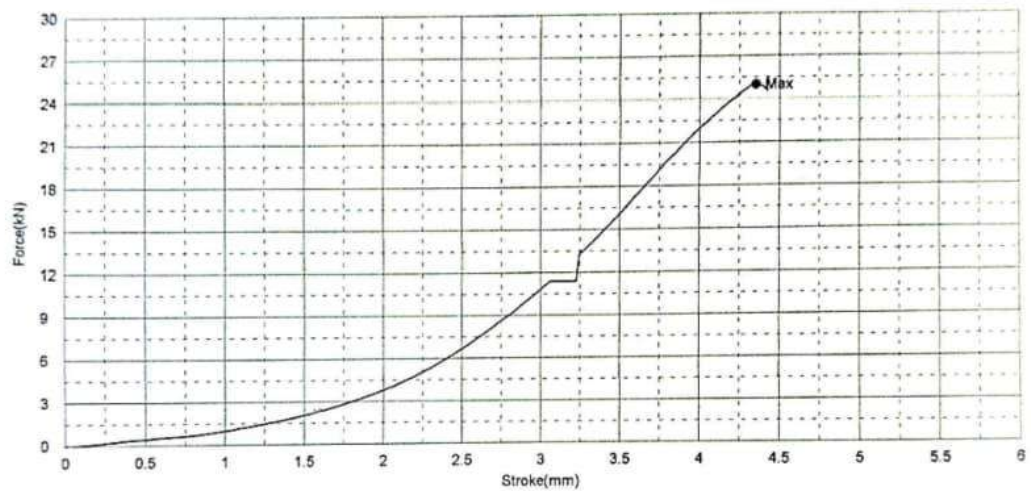
(Signature)
 Aditya

POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM UJI BAHAN

Shape: Plate

	Thickness	Width	Gauge Length
Units	mm	mm	mm
A3T2	6,0000	37,8900	0,0001

Name	Area	Yield Force	Max. Force	Yield Strength	Max. Strength
Parameter		0,1 %/FS		0,1 %/FS	
Units	mm ²	kN	kN	MPa	MPa
A3T2	227,34	-	24,99	-	109,93



Comment

Break at Weld Metal

SPK No. : 25-III/PL19/BJP/2026
Customer : Sdr. Aditya Kumia Sandy NRP. 0722040102
Project: TUGAS AKHIR
Specimen : Plate
Material : Aluminium 6061
Weld. process/Position/Welder : GTAW / 1G / Adin
Test method: ASME EB/E8M
Reference code: AWS D1.2

Surabaya, June 02 2026

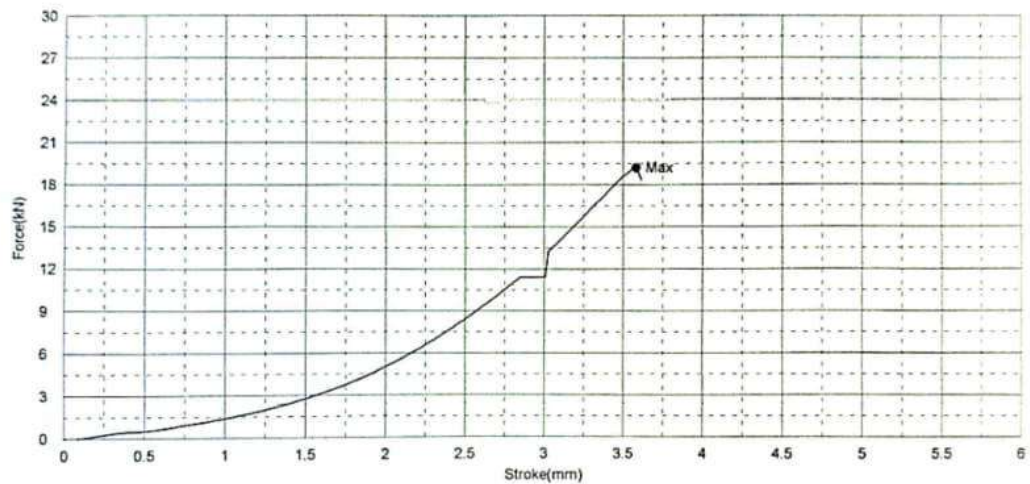

 (.....)

**POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM UJI BAHAN**

Shape: Plate

	Thickness	Width	Gauge Length
Units	mm	mm	mm
B1T1	6,0000	37,8800	0,0001

Name	Area	Yield Force	Max. Force	Yield Strength	Max. Strength
Parameter		0,1 %/FS		0,1 %/FS	
Units	mm ²	kN	kN	MPa	MPa
B1T1	227,28	-,-	19,22	-,-	84,56



Comment

Break at Weld Metal

SPK No. : 25-III/PL19/BJP/2026
 Customer : Sdr. Aditya Kurnia Sandy NRP. 0722040102
 Project: TUGAS AKHIR
 Specimen : Plate
 Material : Aluminium 6061
 Weld. process/Position/Welder : GTAW / 1G / Adin
 Test method: ASME E8/E8M
 Reference code: AWS D1.2

Surabaya, June 02 2026

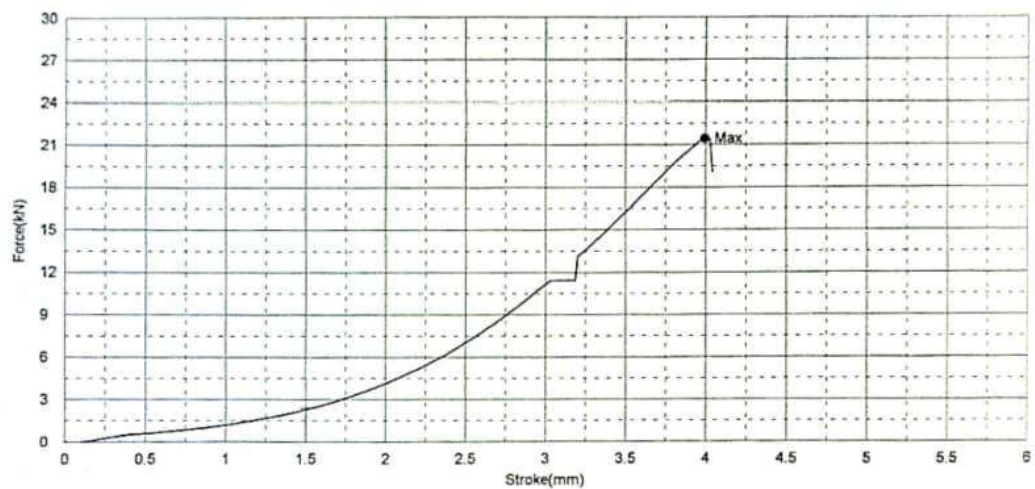
(Signature)

POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM UJI BAHAN

Shape: Plate

	Thickness	Width	Gauge Length
Units	mm	mm	mm
B1T2	6,0000	37,8800	0,0001

Name	Area	Yield Force	Max. Force	Yield Strength	Max. Strength
Parameter		0,1 %/FS		0,1 %/FS	
Units	mm ²	kN	kN	MPa	MPa
B1T2	227,28	-,-	21,44	-,-	94,35



Comment

Break at Weld Metal

SPK No. : 25-III/PL19/BJP/2026
Customer : Sdr. Aditya Kurnia Sandy NRP. 0722040102
Project: TUGAS AKHIR
Specimen : Plate
Material : Aluminium 6061
Weld. process/Position/Welder : GTAW / 1G / Adin
Test method: ASME E8/E8M
Reference code: AWS D1.2

Surabaya, June 02 2026

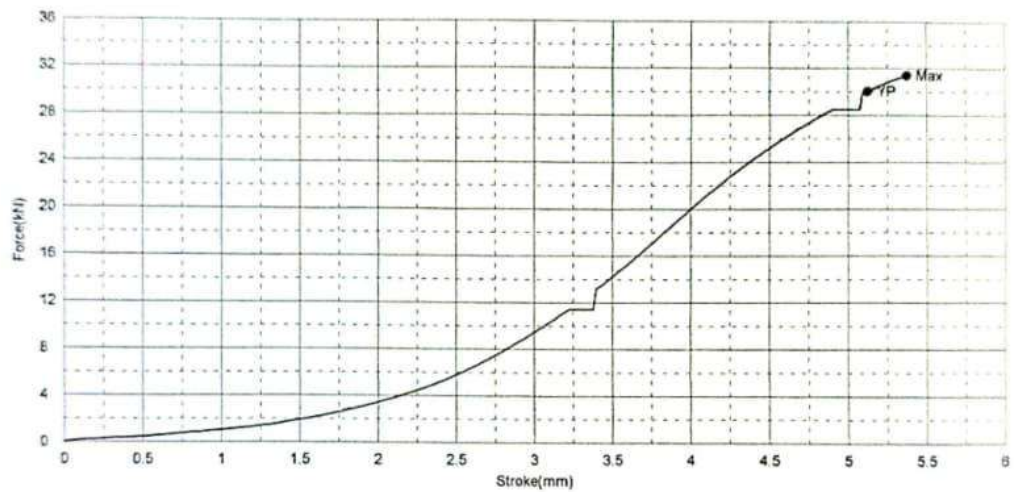

 (.....)

**POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM UJI BAHAN**

Shape: Plate

	Thickness	Width	Gauge Length
Units	mm	mm	mm
B2T1	6,0000	37,8900	0,0001

Name	Area	Yield Force	Max. Force	Yield Strength	Max. Strength
Parameter		0,1 %/FS		0,1 %/FS	
Units	mm ²	kN	kN	MPa	MPa
B2T1	227,34	30,03	31,40	132,08	138,14



Comment

Break at Weld Metal

SPK No. : 25-III/PL19/BJP/2026
 Customer : Sdr. Aditya Kurnia Sandy NRP. 0722040102
 Project: TUGAS AKHIR
 Specimen : Plate
 Material : Aluminium 6061
 Weld process/Position/Welder : GTAW / 1G / Adin
 Test method: ASME E8/E8M
 Reference code: AWS D1.2

Surabaya, June 02 2026

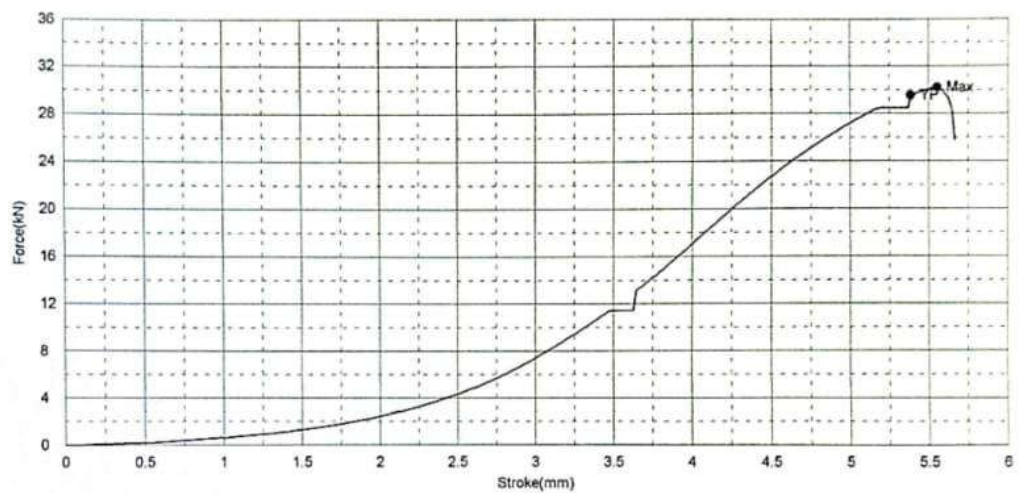
(.....)

**POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM UJI BAHAN**

Shape: Plate

	Thickness	Width	Gauge Length
Units	mm	mm	mm
B2T2	6,0000	38,8100	0,0001

Name	Area	Yield Force	Max. Force	Yield Strength	Max. Strength
Parameter		0,1 %/FS		0,1 %/FS	
Units	mm ²	kN	kN	MPa	MPa
B2T2	232,86	29,56	30,22	126,96	129,78



Comment

Break at Weld Metal

SPK No. : 25-III/PL19/BJP/2026
Customer : Sdr. Aditya Kurnia Sandy NRP. 0722040102
Project: TUGAS AKHIR
Specimen : Plate
Material : Aluminium 6061
Weld. process/Position/Welder : GTAW / 1G / Adin
Test method: ASME E8/E8M
Reference code: AWS D1.2

Surabaya, June 02 2026

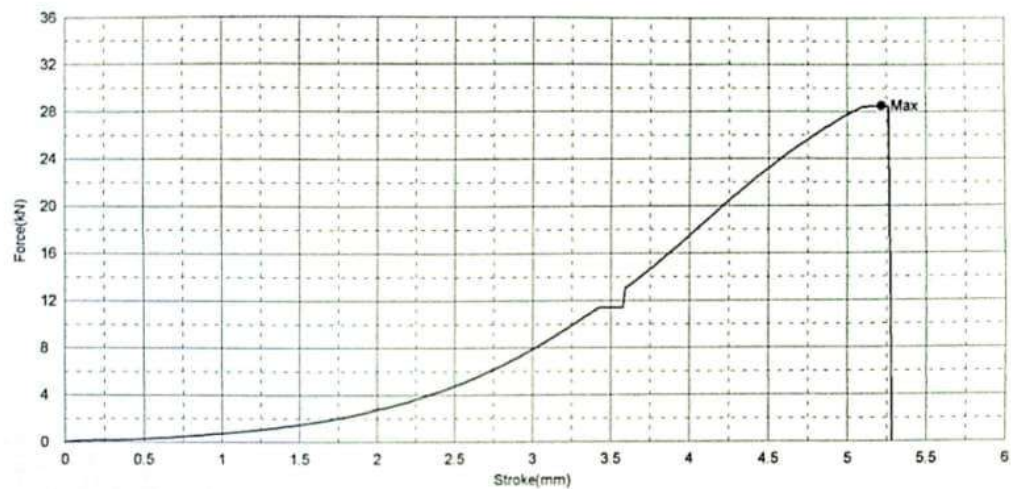
(Signature)

POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM UJI BAHAN

Shape: Plate

	Thickness	Width	Gauge Length
Units	mm	mm	mm
B3T1	6,0000	37,8800	0,0001

Name	Area	Yield Force	Max. Force	Yield Strength	Max. Strength
Parameter		0,1 %/FS		0,1 %/FS	
Units	mm ²	kN	kN	MPa	MPa
B3T1	227,28	-,-	28,52	-,-	125,47



Comment

Break at Weld Metal

SPK No. : 25-III/PL19/BJP/2026
Customer : Sdr. Aditya Kumia Sandy NRP. 0722040102
Project: TUGAS AKHIR
Specimen : Plate
Material : Aluminium 6061
Weld. process/Position/Welder : GTAW / 1G / Adin
Test method: ASME E8/E8M
Reference code: AWS D1.2

Surabaya, June 02 2026

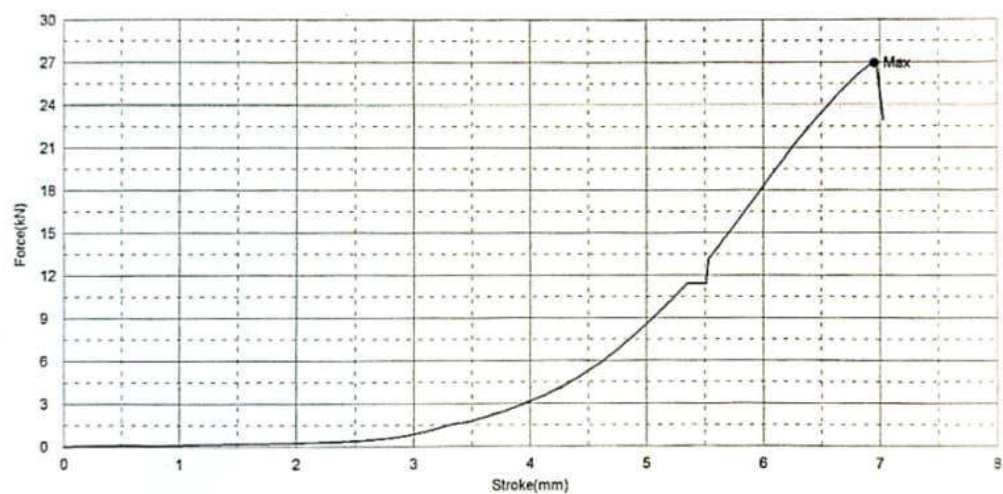

 (..... Ricky)
 (.....)

POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM UJI BAHAN

Shape: Plate

	Thickness	Width	Gauge Length
Units	mm	mm	mm
B3T2	6,0000	37,8800	0,0001

Name	Area	Yield Force	Max. Force	Yield Strength	Max. Strength
Parameter		0,1 %/FS		0,1 %/FS	
Units	mm ²	kN	kN	MPa	MPa
B3T2	227,28	-,-	26,95	-,-	118,57



Comment

Break at Weld Metal

SPK No. : 25-III/PL19/BJP/2026

Customer : Sdr. Aditya Kurnia Sandy NRP. 0722040102

Project: TUGAS AKHIR

Specimen : Plate

Material : Aluminium 6061

Weld. process/Position/Welder : GTAW / 1G / Adin

Test method: ASME E8/E8M

Reference code: AWS D1.2

Surabaya, June 02 2026


 (.....)

BIODATA PENULIS



ADITYA KURNIA SHANDY		
Tempat, Tanggal Lahir	Nama Panggilan	Jenis Kelamin
Pamekasan, 6 November 2003	Adit	Laki-Laki
Alamat	Kode Pos	Negara
Jl. Tanjung Sari GG Mawar No-30A, Kecamatan Sukomanunggal, Kota Surabaya, Jawa Timur	60187	Indonesia
Email	No.Telp	Agama
adityakurniashandy@gmail.com	085708827286	Islam
Riwayat Pendidikan		
Sekolah	Tahun	Jurusan
SDN Tandes Lor Surabaya	2010-2016	-
SMPN Pawiyatan	2016-2019	-
SMKN PAL Surabaya	2019-2022	TEKNIK PENGELASAN
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA	2022-2026	TEKNIK PENGELASAN