



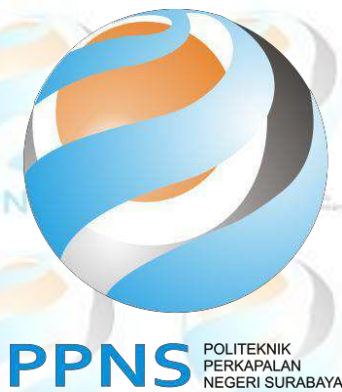
TUGAS AKHIR (WE40050)

**ANALISIS VARIASI *INTERPASS TEMPERATURE* PADA
PROSES PENGELASAN KOMBINASI GTAW-SMAW TERHADAP
KEKUATAN TARIK, KEKERASAN, STRUKTUR MIKRO, DAN
LAJU KOROSI PADA MATERIAL *STAINLESS STEEL SA-312
TP304***

Muhammad Ardiansyah
NRP. 0722040078

DOSEN PEMBIMBING :
IMAM KHOIRUL ROHMAT, S.ST., M.T.
MOHAMMAD KARIM AL AMIN, S.ST., M.T.

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



TUGAS AKHIR (WE40050)

**ANALISIS VARIASI *INTERPASS TEMPERATURE* PADA
PROSES PENGELASAN KOMBINASI GTAW-SMAW TERHADAP
KEKUATAN TARIK, KEKERASAN, STRUKTUR MIKRO, DAN
LAJU KOROSI PADA MATERIAL *STAINLESS STEEL SA-312*
TP304**

**Muhammad Ardiansyah
NRP. 0722040078**

**DOSEN PEMBIMBING :
IMAM KHOIRUL ROHMAT, S.ST., M.T.
MOCHAMMAD KARIM AL AMIN, S.ST., M.T.**

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

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

This page is intentionally left blank

**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

**ANALISIS VARIASI *INTERPASS TEMPERATURE* PADA PROSES
PENGELASAN KOMBINASI GTAW-SMAW TERHADAP KEKUATAN
TARIK, KEKERASAN, STRUKTUR MIKRO, DAN LAJU KOROSI PADA
MATERIAL *STAINLESS STEEL* SA-312 TP304**

**Disusun Oleh:
Muhammad Ardiansyah
0722040078**

**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 : 28 Juli 2026
Periode Wisuda : Oktober 2026**

Menyetujui,

Dosen Penguji	NIDN	Tanda Tangan
1. Hendri Budi Kurniyanto, S.ST., M.T.	(0007039003)	(.....)
2. Imah Luluk Kusminah, S.T., M.T.	(0707039201)	(.....)
3. Imam Khoirul Rohmat, S.ST., M.T.	(0002068802)	(.....)
4. Mochammad Karim Al Amin, S.ST., M.T.	(0017019103)	(.....)

Dosen Pembimbing	NIDN	Tanda Tangan
1. Imam Khoirul Rohmat, S.ST., M.T.	(0002068802)	(.....)
2. Mochammad Karim Al Amin, S.ST., M.T.	(0017019103)	(.....)

Menyetujui
Ketua Jurusan,



H. Bambang Nur Ardi N., S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 198103242014041001

Mengetahui
Koordinator Program Studi,


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

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

This page is intentionally left blank



PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT

No. : FWD I. 021
Date : 3 Nopember 2015
Rev. : 01
Page : 1 dari 1

Yang bertandatangan dibawah ini :

Nama : Muhammad Ardiansyah

NRP. : 0722040078

Jurusan/Prodi : Teknik Bangunan Kapal / D4 Teknik Pengelasan

Dengan ini menyatakan dengan sesungguhnya bahwa :

Tugas Akhir yang akan saya kerjakan dengan judul :

Analisis Variasi *Interpass Temperature* pada Proses Pengelasan Kombinasi GTAW-SMAW terhadap Kekuatan Tarik, Kekerasan, Struktur Mikro, dan Laju Korosi pada Material *Stainless Steel* SA-312 TP304.

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, 28 Juli 2026

Yang membuat pernyataan,

Muhammad Ardiansyah

NRP. 0722040078

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

This page is intentionally left blank

KATA PENGANTAR

Syukur Alhamdulillah penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas segala rahmat, ridho dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyusun dan menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “Analisis Variasi *Interpass Temperature* pada Proses Pengelasan Kombinasi GTAW-SMAW terhadap Kekuatan Tarik, Kekerasan, Struktur Mikro dan Laju Korosi pada Material *Stainless Steel* SA-312 TP304” sesuai dengan target maupun harapan penulis.

Tugas Akhir ini dilaksanakan untuk memenuhi salah satu syarat kelulusan sebagai Sarjana Terapan Teknik (S.Tr.T) pada Program Studi D4 - Teknik Pengelasan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya. Sebagai rasa syukur ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dan mendukung penyusunan laporan Tugas Akhir ini, khususnya kepada :

1. Allah SWT, yang tiada hentinya mencurahkan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis mendapatkan kemudahan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini dan dapat menyelesaikan dengan tepat waktu dan sesuai harapan.
2. Keluarga khususnya Bapak Beni Supriadiatna, Ibu Nur Hayati selaku orang tua yang telah membesarkan penulis, membiayai sekolah penulis, selalu memberikan banyak nasehat, semangat, doa, kasih sayang, dan materi yang tidak dapat penulis ucapkan satu persatu.
3. Bapak Rachmad Tri Soelistijono, S.T., M.T selaku Direktur Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
4. Bapak Ir. Priyambodo Nur Ardi N., S.T., M.T., Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Bangunan Kapal.
5. Bapak Moh. Syaiful Amri, S.ST., M.T. selaku Koordinator Program Studi Teknik Pengelasan.
6. Bapak Hendri Budi Kurniyanto, S.ST., M.T selaku Wali Kelas C yang telah mengarahkan dan membimbing penulis selama perkuliahan.
7. Bapak Imam Khoirul Rohmat, S.ST., M.T selaku Dosen Pembimbing I yang telah membimbing maupun mengarahkan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.
8. Bapak Moch. Karim Al Amin, S.ST., M.T selaku Dosen Pembimbing II yang telah membimbing maupun mengarahkan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.
9. Ibu Adristi Nisazarifa, S.T., M.T. selaku koordinator Tugas Akhir Program Studi Teknik Pengelasan.

10. Keluarga besar Mahasiswa Teknik Pengelasan 2022 yang kompak dan saling mendukung selama studi di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
11. Seluruh Staf Pengajar Program Studi Teknik Pengelasan yang telah memberikan banyak ilmunya kepada penulis selama masa perkuliahan di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
12. Kepada Beasiswa Kartu Indonesia Pintar (KIP-KULIAH) yang telah membiayai semua kebutuhan penulis selama perkuliahan dari awal hingga lulus.
13. Kepada Departemen Quality Control PT. ASUKA ENGINEERING INDONESIA yang telah membantu dan mendukung proses pengerjaan penulis dalam menyusun Tugas Akhir ini.
14. Teman-teman seperjuangan kelas C dan orang tersayang saya yang saling memberi dukungan dan semangat selama perkuliahan hingga pengerjaan Tugas Akhir.
15. Kepada Kos Bu Wahid, Pujasera KTT yang menjadi tempat penulis dalam proses pengerjaan Tugas Akhir ini.
16. Pihak-pihak lain terkait dan tidak dapat disebutkan satu per satu yang telah membantu kelancaran pengerjaan Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih memiliki kekurangan dan keterbatasan. Oleh karena itu, penulis membuka diri terhadap kritik dan saran yang membangun demi perbaikan di masa mendatang. Penulis berharap tugas akhir ini dapat memberikan manfaat sebagai referensi bagi penelitian atau pengembangan desain sejenis di masa yang akan datang.

Surabaya, 06 Juli 2026

Muhammad Ardiansyah

ANALISIS VARIASI *INTERPASS TEMPERATURE* PADA PROSES PENGELASAN KOMBINASI GTAW-SMAW TERHADAP KEKUATAN TARIK, KEKERASAN, STRUKTUR MIKRO, DAN LAJU KOROSI PADA MATERIAL *STAINLESS STEEL SA-312 TP304*

Muhammad Ardiansyah

ABSTRAK

SA-312 TP304 merupakan baja tahan karat austenitik yang banyak digunakan pada sistem perpipaan di industri minyak dan gas karena memiliki ketahanan korosi, sifat mekanik, dan kemampuan las yang sangat baik. *Interpass temperature* merupakan salah satu parameter penting dalam proses pengelasan yang memengaruhi laju pendinginan sehingga berpengaruh terhadap mikrostruktur, sifat mekanik, dan ketahanan korosi sambungan las. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi *interpass temperature* 150 °C, 250 °C, dan tanpa pengendalian *interpass temperature* pada proses pengelasan kombinasi *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) dan *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) terhadap kekuatan tarik, kekerasan, laju korosi, dan mikrostruktur baja tahan karat SA-312 TP304. Spesimen dengan *interpass temperature* 150 °C menghasilkan kekuatan tarik rata-rata tertinggi sebesar 561,765 MPa dan nilai kekerasan tertinggi sebesar 203,69 kgf/mm², sedangkan spesimen tanpa pengendalian *interpass temperature* menunjukkan laju korosi tertinggi sebesar 0,4981 mm/tahun dan nilai kekerasan terendah sebesar 183,80 kgf/mm². Hasil pengamatan mikrostruktur menunjukkan bahwa *base metal* didominasi oleh fasa austenit, *Heat Affected Zone* (HAZ) didominasi oleh fasa austenit dengan sedikit transformasi delta ferit, sedangkan *weld metal* didominasi oleh fasa delta ferit.

Kata kunci: *Stainless Steel SA-312 TP304, Interpass Temperature, Kekerasan, Laju Korosi, Struktur Mikro.*

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

This page is intentionally left blank

ANALYSIS OF INTERPASS TEMPERATURE VARIATIONS IN THE COMBINED GTAW-SMAW WELDING PROCESS ON THE TENSILE STRENGTH, HARDNESS, MICROSTRUCTURE, AND CORROSION RATE OF SA-312 TP304 STAINLESS STEEL

Muhammad Ardiansyah

ABSTRACT

SA-312 TP304 is an austenitic stainless steel widely used in piping systems in the oil and gas industry because of its excellent corrosion resistance, mechanical properties, and weldability. Interpass temperature is an important welding parameter that affects the cooling rate, thereby influencing the microstructure, mechanical properties, and corrosion resistance of welded joints. This study aimed to analyze the effect of interpass temperature variations of 150 °C, 250 °C, and without interpass temperature control in the combined Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) and Shielded Metal Arc Welding (SMAW) process on the tensile strength, hardness, corrosion rate, and microstructure of SA-312 TP304 stainless steel. The specimen welded with an interpass temperature of 150 °C exhibited the highest average tensile strength of 561.765 MPa and the highest hardness value of 203.69 kgf/mm². In contrast, the specimen welded without interpass temperature control showed the highest corrosion rate of 0.4981 mm/year and the lowest hardness value of 183.80 kgf/mm². Microstructural observations revealed that the base metal was predominantly composed of austenite; the Heat-Affected Zone (HAZ) was mainly composed of austenite with a small amount of delta ferrite; and the weld metal was predominantly composed of delta ferrite.

Keywords: *SA-312 TP304 stainless steel, interpass temperature, hardness, corrosion rate, microstructure*

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

This page is intentionally left blank

DAFTAR ISI

LEMBAR JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT	v
KATA PENGANTAR	vii
ABSTRAK	ix
<i>ABSTRACT</i>	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xix
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian.....	4
1.5 Batasan Masalah.....	5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Baja Tahan Karat	7
2.1.1 <i>Austenitic stainless steel</i>	9
2.1.2 <i>Stainless steel 304</i>	10
2.2 <i>Gas Tungsten Arc Welding</i>	11
2.2.1 Gas pelindung	12
2.2.2 <i>Filler metal ER308L</i>	13
2.3 <i>Shielded Metal Arc Welding</i>	14
2.3.1 Elektroda E308-16	15

2.4 Laju Korosi	16
2.4.1 Sensitasi.....	20
2.4.2 Korosi batas butir (<i>Intergranular Corrosion</i>)	21
2.4.3 Korosi sumuran (<i>Pitting corrosion</i>)	23
2.5 <i>Interpass Temperature</i>	23
2.6 Pengujian	27
2.6.1 Pengujian laju korosi	28
2.6.2 Pengujian tarik.....	30
2.6.3 Pengujian metalografi	32
2.6.4 Pengujian kekerasan.....	33
2.7 Peneliti Sebelumnya	35
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	40
3.1 Diagram Alir Penelitian	41
3.2 Identifikasi Masalah.....	42
3.3 Studi Literatur	43
3.4 Studi Lapangan	44
3.5 Pengumpulan Data	44
3.6 Persiapan Penelitian	44
3.6.1 Persiapan alat.....	44
3.6.2 Persiapan bahan.....	45
3.7 Parameter Pengelasan	47
3.9 <i>Cutting Plan</i>	50
3.10 Pengujian Spesimen.....	51
3.10.1 Pengujian visual	51
3.10.2 Pengujian metalografi	51
3.10.3 Pengujian tarik.....	54

3.10.4 Pengujian kekerasan	56
3.10.5 Pengujian laju korosi (Sel tiga elektroda).....	57
3.11 Analisis dan Pembahasan.....	60
3.12 Kesimpulan.....	60
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	61
4.1 Pengujian Visual.....	61
4.2 Pengujian Tarik.....	64
4.3 Pengujian Kekerasan	67
4.4 Pengujian Metalografi	69
4.5 Pengujian Korosi	75
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	83
5.1 Kesimpulan.....	83
5.2 saran.....	84
DAFTAR PUSTAKA.....	84
LAMPIRAN.....	87

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

This page is intentionally left blank

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Hasil Material Tersensitasi	3
Gambar 2. 1 Hasil Struktur Mikro <i>Weld Metal</i> AISI 304	9
Gambar 2. 2 Produk Pipa <i>Stainless Steel</i> SA-312 TP304	10
Gambar 2. 3 Proses Pengelasan GTAW	11
Gambar 2. 4 Polaritas Arus	12
Gambar 2. 5 Prinsip Kerja Las SMAW	14
Gambar 2. 6 Hasil Mikrosutruktur Variasi Interpass super <i>duplex Stainless Steel</i>	17
Gambar 2. 7 Hasil Mikro <i>Fusion Line Stainless Steel</i> 304	19
Gambar 2. 8 Daerah <i>Depleted</i> yang Berdekatan Dengan Presipitat	21
Gambar 2. 9 Daerah Terkena Sensitasi	21
Gambar 2. 10 Korosi Batas Butir	22
Gambar 2. 11 Grafik Uji Kekerasan.....	24
Gambar 2. 12 Grafik Uji Tarik	25
Gambar 2. 13 Grafik Uji Kekerasan	26
Gambar 2. 14 Sel Tiga Elektroda	29
Gambar 2. 15 <i>Schematic Wiring Diagram</i>	29
Gambar 2. 16 Mesin Uji Tarik	31
Gambar 2. 17 Prinsip Uji <i>Vickers</i>	35
Gambar 2. 18 Ketentuan Jarak Indentasi Minimal.....	35
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian.....	42
Gambar 3. 2 <i>Equipment Las</i>	45
Gambar 3. 3 <i>Filler Metal</i> ER308L, Elektroda E308-16, Spesimen <i>Stainless Steel</i> SA-312 TP304, dan <i>Argon High Purity</i> 99,98%.....	46
Gambar 3. 4 Kodefikasi Spesimen Uji.....	48
Gambar 3. 5 Pengecekan Dimensi	48
Gambar 3. 6 Join Desain <i>Grove</i> dan <i>Root</i>	49
Gambar 3. 7 Proses Pemasangan Spon untuk <i>Backing Gas</i>	49
Gambar 3. 8 <i>Root, Fill, dan Capping</i>	49

Gambar 3. 9 <i>Interpass Temperature 150 °C, Interpass Temperature 250 °C, Tanpa Interpass Temperature</i>	50
Gambar 3. 10 <i>Cutting Plan</i>	50
Gambar 3. 11 Spesimen Uji Metalografi	52
Gambar 3. 12 Proses Pemolesan Spesimen Uji	53
Gambar 3. 13 Pengamatan Mikro	53
Gambar 3. 14 Spesimen Uji Tarik dan Proses Pengujian Uji Tarik.....	54
Gambar 3. 15 <i>Rectangular Tension Test</i> Spesimen	55
Gambar 3. 16 Jarak Minimum Titik Indentasi.....	57
Gambar 3. 17 Titik Pengujian Kekerasan.....	57
Gambar 3. 18 Spesimen Uji Korosi.....	58
Gambar 3. 19 Pencampuran Larutan H ₂ SO ₄ dan <i>Aquadest</i>	59
Gambar 3. 20 Pengujian Korosi Sel Tiga Elektroda.....	59
Gambar 4. 1 Dokumentasi Hasil Tinggi Reinforcement	62
Gambar 4. 2 Hasil Pengujian Visual.....	63
Gambar 4. 3 Grafik hasil rata-rata pengujian kekuatan uji tarik maksimum	65
Gambar 4. 4 Grafik Hasil Pengujian <i>Hardness Vickers</i>	69
Gambar 4. 5 Hasil Mikro <i>Base Metal</i> Perbesaran 200x dan 500x	72
Gambar 4. 6 Hasil Mikro Daerah <i>Transition Zone</i> Perbesaran 200x dan 500x.....	73
Gambar 4. 7 Hasil Mikro <i>Weld Metal</i> SMAW Perbesaran 200x dan 500x	74
Gambar 4. 8 Hasil Mikro Pengelasan GTAW Perbesaran 200x dan 500x	75
Gambar 4. 9 Hasil Pengujian Korosi Tiga Sel Elektroda (Tafel)	80
Gambar 4. 10 Grafik Uji Laju Korosi Tiga Sel Elektroda.....	80

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Kodefikasi Baja Tahan Karat	7
Tabel 2. 2 Komposisi Kimia <i>Stainless Steel</i> SA-312 TP 304.....	10
Tabel 2. 3 Sifat Mekanik SA-312 TP 304	10
Tabel 2. 4 Tabel Gas Pelindung yang Digunakan Dalam Pengelasan.....	13
Tabel 2. 5 Komposisi Kimia <i>Filler Metal</i> ER308L.....	13
Tabel 2. 6 Komposisi Kimia Elektroda E308-16	15
Tabel 2. 7 Hasil Pengujian Korosi <i>Potentiodynamic</i> 3 Sel Elektroda.	17
Tabel 2. 8 Rekomendasi Suhu <i>Interpass Temperature</i>	23
Tabel 2. 9 Jurnal/ Tugas Akhir Peneliti Terdahulu	36
Tabel 3. 1 Parameter Pengelasan.....	47
Tabel 3. 2 Kodefikasi Spesimen Uji.....	48
Tabel 4. 1 Hasil Visual <i>Report</i>	63
Tabel 4. 2 Hasil Pengujian Tarik	65
Tabel 4. 3 Hasil Pengujian Kekerasan Spesimen A1	68
Tabel 4. 4 Hasil Pengujian Laju Korosi Tiga Sel Elektroda	80

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

This page is intentionally left blank

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Baja tahan karat austenitik (*Austenitic Stainless Steel/ASS*) merupakan salah satu kelompok *stainless steel* yang memiliki struktur mikro berbasis fasa austenit akibat kandungan nikel dan krom yang relatif tinggi. Jenis baja ini dikenal memiliki sifat ketangguhan, kemampuan bentuk, dan kemampuan las yang sangat baik, sehingga menjadi material yang paling banyak digunakan di berbagai sektor industri. *Austenitic stainless steel* seri 300 secara luas diaplikasikan pada industri kimia, makanan dan farmasi, minyak dan gas, serta industri pupuk karena ketahanan korosinya yang unggul dibandingkan dengan jenis martensitik maupun feritik (Cahya & Abdulah, 2019).

Teknologi pengelasan merupakan salah satu aspek fundamental dalam proses manufaktur, karena metode ini berperan signifikan dalam kegiatan perancangan, fabrikasi, hingga perbaikan berbagai komponen berbahan logam. Keberadaan proses pengelasan tidak dapat dipisahkan dari industri manufaktur modern mengingat pengelasan memungkinkan terbentuknya sambungan permanen dengan kekuatan tinggi, efisiensi produksi yang lebih baik, serta fleksibilitas dalam menangani berbagai jenis material. Di antara berbagai teknik pengelasan yang tersedia, beberapa metode yang paling sering diaplikasikan dalam industri adalah proses SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*) dan GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*), yang masing-masing dipilih berdasarkan karakteristik sambungan dan kebutuhan operasional pada proses manufaktur (Yuslih, 2021).

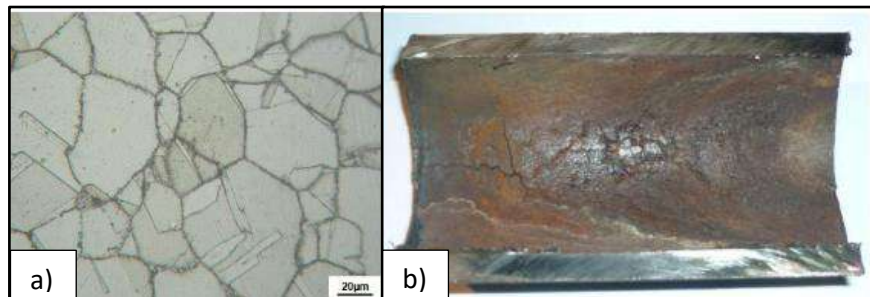
Pada proses pengelasan, *interpass temperature* memegang peranan penting karena berpengaruh langsung terhadap masukan panas, laju pendinginan, dan siklus termal material. *Interpass temperature* yang terlalu tinggi memperpanjang waktu material berada pada rentang suhu sensitisasi, sehingga mendorong presipitasi karbida krom di batas butir, menurunkan kadar krom bebas, dan meningkatkan risiko korosi pada sambungan las SA-312 TP304 (Kim et al., 2024). Sebaliknya,

interpass temperature yang terlalu rendah dapat menyebabkan laju pendinginan yang cepat, memicu timbulnya tegangan sisa serta perubahan mikrostruktur yang tidak diinginkan, seperti pembentukan *delta ferrite* berlebih, yang berpotensi menurunkan ketangguhan dan stabilitas fasa material. Oleh karena itu, pengendalian *interpass temperature* yang optimal diperlukan untuk menyeimbangkan masukan panas dan laju pendinginan, sehingga dapat membatasi perluasan HAZ, mengurangi sensitisasi, serta mempertahankan sifat mekanik dan ketahanan korosi sambungan las sesuai dengan tuntutan aplikasi industri (Mohammed et al., 2017).

Dalam proses pengelasan di PT. Asuka Engineering Indonesia, khususnya pada material *stainless steel*, pengendalian *interpass temperature* sering kali menjadi perhatian utama akibat dari tuntutan pekerjaan yang harus cepat selesai. Proses pengelasan dilakukan secara berkelanjutan tanpa pengukuran suhu antar lintasan las, sehingga temperatur *interpass* berpotensi melebihi batas yang direkomendasikan. Padahal, untuk material *stainless steel*, khususnya austenitik, *interpass temperature* umumnya disarankan tidak melebihi 150 °C untuk menjaga kestabilan sifat material dan kualitas sambungan las (Thompson, 2026). Pengabaian kontrol *interpass temperature* dapat memberikan dampak terhadap sifat mekanik sambungan las. Temperatur yang terlalu tinggi antar lintasan menyebabkan peningkatan masukan panas yang berlebihan, sehingga berpotensi menurunkan kekuatan tarik, kekerasan, serta meningkatkan risiko terjadinya *hot cracking*. Selain itu, pendinginan yang terlalu lambat akibat temperatur *interpass* yang tinggi dapat mempengaruhi distribusi tegangan sisa pada daerah las dan *heat affected zone* (HAZ).

Permasalahan ini terbukti pada kasus kerusakan *tube thermocouple* berbahan *stainless steel 304* pada reaktor *hydrocracking* di kilang pengolahan minyak. Hasil investigasi menunjukkan bahwa kerusakan berupa kebocoran diawali oleh terjadinya sensitisasi dan korosi batas butir pada permukaan dalam *tube*. Degradasi mikrostruktur tersebut selanjutnya memicu terbentuknya retak lelah (*fatigue crack*) yang menjalar hingga menembus dinding pipa. Kasus ini menunjukkan bahwa meskipun material memenuhi spesifikasi standar, kegagalan

tetap dapat terjadi akibat pengaruh siklus termal dan kondisi metalurgi yang tidak terkendali (Sunandrio, 2015). Terlihat pada Gambar 1.1 dibawah ini.



Gambar 1. 1 a) Hasil Struktur Mikro dan b) Material Tersensitasi (Sunandrio, 2015)

Dengan demikian, penelitian mengenai *Analisis Variasi Interpass Temperature Pada Proses Pengelasan Kombinasi GTAW–SMAW Terhadap Kekuatan Tarik, Kekerasan, Struktur Mikro dan Laju Korosi Pada Material Stainless Steel SA-312 TP304* menjadi sangat penting untuk memahami parameter pengelasan mempengaruhi sifat mekanik material dan laju korosi. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan dalam penetapan *interpass temperature* 150 °C, 250 °C, dan tanpa *interpass temperature* untuk mencegah kerentanan sifat mekanik dan laju korosi serta meningkatkan kualitas sambungan las pada aplikasi industri.

1.2 Rumusan Masalah

Dengan melihat latar belakang di atas, maka didapat beberapa rumusan masalah sebagai berikut :

1. Bagaimana hasil pengujian tarik pada sambungan las dengan variasi *interpass temperature* 150 °C, *interpass temperature* 250 °C, dan tanpa *interpass temperature* pada proses pengelasan kombinasi GTAW–SMAW material *stainless steel* SA-312 TP304?
2. Bagaimana hasil pengujian kekerasan pada sambungan las dengan variasi *interpass temperature* 150 °C, *interpass temperature* 250 °C, dan tanpa *interpass temperature* pada proses pengelasan kombinasi GTAW–SMAW material *stainless steel* SA-312 TP304?
3. Bagaimana hasil pengujian laju korosi pada sambungan las dengan variasi *interpass temperature* 150 °C, *interpass temperature* 250 °C, dan tanpa

interpass temperature pada proses pengelasan kombinasi GTAW–SMAW material *stainless steel* SA-312 TP304?

4. Bagaimana hasil pengamatan struktur mikro pada sambungan las dengan variasi *interpass temperature* 150 °C, *interpass temperature* 250 °C, dan tanpa *interpass temperature* pada proses pengelasan kombinasi GTAW–SMAW material *stainless steel* SA-312 TP304?

1.3 Tujuan Penelitian

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

1. Mengetahui hasil pengujian tarik pada sambungan las dengan variasi *interpass temperature* 150 °C, *interpass temperature* 250 °C, dan tanpa *interpass temperature* pada proses pengelasan kombinasi GTAW–SMAW material *stainless steel* SA-312 TP304.
2. Mengetahui hasil pengujian kekerasan pada sambungan las dengan variasi *interpass temperature* 150 °C, *interpass temperature* 250 °C, dan tanpa *interpass temperature* pada proses pengelasan kombinasi GTAW–SMAW material *stainless steel* SA-312 TP304.
3. Mengetahui hasil pengujian laju korosi pada sambungan las dengan variasi *interpass temperature* 150 °C, *interpass temperature* 250 °C, dan tanpa *interpass temperature* pada proses pengelasan kombinasi GTAW–SMAW material *stainless steel* SA-312 TP304.
4. Mengetahui hasil pengamatan struktur mikro pada sambungan las dengan variasi *interpass temperature* 150 °C, *interpass temperature* 250 °C, dan tanpa *interpass temperature* pada proses pengelasan kombinasi GTAW–SMAW material *stainless steel* SA-312 TP304.

1.4 Manfaat Penelitian

Dengan dilakukan penelitian ini maka dapat diambil manfaat sebagai berikut :

1. Manfaat bagi mahasiswa :

Sebagai sarana pengaplikasian teori pengelasan dan korosi yang pernah didapat di kampus serta sebagai referensi tugas akhir untuk angkatan selanjutnya.

2. Manfaat bagi instansi :

Memberikan informasi bahwa teori yang diajarkan dapat diaplikasikan dengan baik pada dunia industri.

3. Manfaat bagi Industri :

Memberikan informasi dan literatur pada industri tentang parameter pengelasan dan laju korosi pada material *stainless steel* SA-312 TP304 dengan proses pengelasan kombinasi GTAW SMAW terhadap kekuatan tarik, kekerasan, laju korosi dan metalografi.

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 pipa *stainless steel* SA-312 TP304 6" Sch. 40 dengan panjang 150 mm dan ketebalan 7,11 mm.
2. Proses las menggunakan kombinasi GTAW SMAW :
 - *Root* : GTAW
 - *Fill & capping* : SMAW
3. Posisi pengelasan 6G
4. Menggunakan *filler metal* ER308L diameter 2,4 mm dan elektroda E308-16 diameter 2,6 mm
5. *Shielding gas* Ar 99,98%
6. *Backing gas* Ar 99,98%
7. Menggunakan 3 spesimen uji dengan variasi *interpass temperature* 150 °C, *interpass temperature* 250 °C, dan tanpa *interpass temperature*.
8. Pengujian visual, pengujian tarik, pengujian kekerasan, pengujian laju korosi, dan metalografi .

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

This page is intentionally left blank

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Baja Tahan Karat

Baja tahan karat merupakan kelompok paduan logam berbasis besi yang ditambahkan unsur kromium dalam kadar mencukupi, pada umumnya tidak kurang dari sekitar 10–11%, sehingga mampu membentuk lapisan oksida kromium pasif (Cr_2O_3) yang bertugas melindungi permukaan material dari serangan korosif. Di samping kromium, baja tahan karat juga dipadukan dengan unsur-unsur seperti nikel, *molibdenum*, nitrogen, maupun karbon yang berfungsi mengontrol pembentukan dan stabilitas mikrostruktur, baik yang berfase austenitik, ferritik, martensitik, *duplex*, maupun *precipitation hardening*, sehingga karakteristik mekanik dan ketahanan korosinya dapat disesuaikan dengan kebutuhan aplikasi. Sifat pasivasi yang mampu memperbaiki diri secara alami, serta fleksibilitas komposisi dan kelas material, menjadikan baja tahan karat banyak diterapkan pada sektor industri proses, pangan, medis, energi, dan sistem perpipaan yang menuntut ketahanan korosi dan reliabilitas operasional yang tinggi (Covert and Tuthill, 2015).

Stainless steel diklasifikasikan berdasarkan kelas, komposisi, sifat mekanik, dan aplikasinya. Kombinasi luasnya sifat mekanik dengan ketahanan korosi yang baik membuat *stainless steel* berbeda dari pengkodean baja paduan lainnya; sistem pengkodean ini menggunakan tiga digit. Angka pertama menunjukkan grupnya, sementara angka kedua dan ketiga menunjukkan modifikasi paduannya. Pengkodean baja tahan karat ini dapat dilihat pada Tabel 2.1 dibawah ini.

Tabel 2. 1 Kodefikasi Baja Tahan Karat

Seri	Grup
2xx	<i>Chromium-Nikel Manganese, nonhardenable, austenitic, nonmagnetic</i>
3xx	<i>Chromium-Nikel, nonhardenable, austenitic, nonmagnetic</i>
4xx	<i>Chromium, nonhardenable, Martensitic, magnetic</i>
5xx	<i>Chromium, Non Chromium, Heat Resisting</i>

Sumber : (Rafi Nurdwi, 2019)

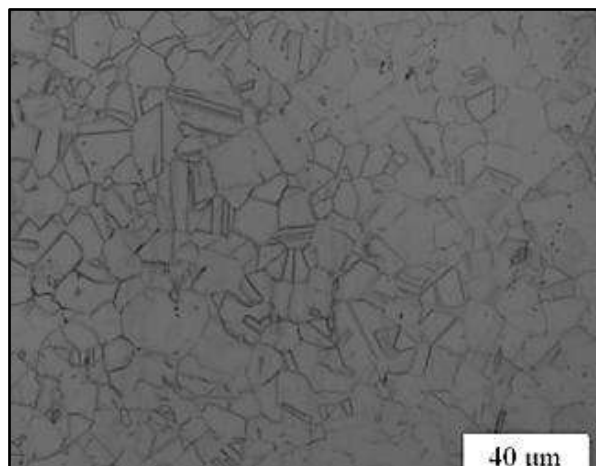
Stainless steel merupakan paduan logam berbasis besi yang mengandung sedikitnya 10,5% kromium, sehingga mampu membentuk lapisan pasif yang memberikan ketahanan tinggi terhadap proses korosi. Material ini disintesis melalui perpaduan unsur utama besi (Fe) dengan elemen paduan seperti nikel (Ni), krom (Cr), *molibdenum* (Mo), serta sejumlah kecil karbon (C). Kombinasi unsur-unsur tersebut menghasilkan baja tahan karat yang memiliki ketahanan unggul terhadap panas, oksidasi, dan abrasi, serta menawarkan kekuatan mekanik tinggi dengan massa relatif ringan. Selain itu, *stainless steel* memiliki kekerasan dan kelenturan yang baik, densitas tinggi, serta stabilitas pada rentang temperatur rendah maupun tinggi, menjadikannya material yang baik untuk aplikasi teknik (Romli, 2019).

Baja tahan karat atau *stainless steel* merupakan kelompok baja paduan berbasis besi yang dirancang untuk memiliki ketahanan korosi tinggi melalui penambahan unsur kromium dengan kadar minimum sekitar 10,5%. Unsur kromium tersebut bereaksi dengan oksigen di lingkungan sehingga membentuk lapisan pasif oksida krom (Cr_2O_3) yang stabil, tipis, dan melekat kuat pada permukaan logam, sehingga mampu menghambat proses oksidasi lanjutan yang dapat menyebabkan korosi. Selain kromium, *stainless steel* biasanya dipadukan dengan elemen lain seperti nikel, *molibdenum*, mangan, dan silikon untuk meningkatkan stabilitas mikrostruktur, kemampuan las, keuletan, serta daya tahan terhadap media korosif tertentu. Kandungan karbon yang relatif rendah juga berperan penting dalam mencegah pembentukan karbida krom yang dapat menurunkan ketahanan korosi, terutama pada kondisi pemanasan saat proses pengelasan. Berdasarkan komposisi kimia dan karakteristik mikrostrukturnya, *stainless steel* diklasifikasikan menjadi lima kelompok utama, yaitu austenitik, feritik, martensitik, *duplex*, dan *precipitation hardening*, di mana masing-masing kelas memiliki perilaku mekanik dan ketahanan korosi yang berbeda sesuai kebutuhan aplikasinya. Kombinasi sifat mekanik yang baik, ketahanan terhadap suhu tinggi, dan resistensi korosi yang unggul menjadikan *stainless steel* banyak digunakan pada industri proses, petrokimia, pembangkit energi, peralatan makanan, serta komponen teknik yang membutuhkan durabilitas tinggi.

2.1.1 *Austenitic stainless steel*

Austenitic Stainless steel mengandung sedikitnya 16% *Chrom* dan 6% *Nickel* (grade standar untuk 304), sampai ke grade Super *Austenitic Stainless steel* seperti 904L (dengan kadar *Chrom* dan *Nickel* lebih tinggi serta unsur tambahan *Mo* sampai 6%). *Molybdenum* (Mo), *Titanium* (Ti) atau *Copper* (Co) berfungsi untuk meningkatkan ketahanan terhadap temperatur serta korosi. *Austenitic* cocok juga untuk aplikasi temperatur rendah disebabkan unsur *Nickel* membuat *stainless steel* tidak menjadi rapuh pada temperatur rendah (Romli, 2019).

Baja tahan karat austenitik adalah baja yang mempunyai ketahanan korosi baik, sifat mampu bentuk, dan sifat mampu las serta bersifat non feromagnetik. Pada suhu rendah sering dimanfaatkan dalam aplikasi kriogenik. Baja tahan karat austenitik yang mengandung kromium dan nikel diberi nomor seri 300 dan seri 200 untuk kromium, nikel, dan mangan. Meskipun *stainless steel* merupakan baja tahan karat, tetapi masih dapat terserang korosi. Korosi yang terjadi dapat berupa korosi batas butir (*intergranular corrosion*), korosi lubang (*crevice corrosion*), korosi sumuran (*pitting corrosion*), dan korosi retak tegang (*stress corrosion cracking*) (Sinaga & Manurung, 2020). Berikut adalah Gambar 2.1 hasil foto struktur mikro material *Austenitic Stainless Steel 304*.



Gambar 2. 1 Hasil Struktur Mikro Weld Metal AISI 304
(Rudy et al., 2018)

2.1.2 *Stainless steel 304*

Stainless Steel AISI 304 adalah salah satu jenis *stainless steel* yang umum dipakai pada dunia industri karena memiliki sifat mekanik yang cukup kuat, tahan terhadap korosi, mampu mencegah kontaminasi dan mudah dibersihkan sehingga penggunaannya meningkat secara signifikan seperti alat kesehatan, kaleng pengemas makanan dan minuman, mesin produksi pengolah makanan dan minuman, bidangomotif serta peralatan rumah tangga bahkan fasilitas- fasilitas umum maupun bidang konstruksi (Rudy et al., 2018). Berikut komposisi kimia *Stainless steel 304* yang mengacu pada ASME *Section II Part A*, 2025 seperti yang tertera pada Tabel 2.2 dan 2.3 dibawah ini.

Tabel 2. 2 Komposisi Kimia *Stainless Steel SA-312 TP 304*

UNS SS30400							
Compotition	C	Cr	Ni	P	S	Si	Mn
Weight %	0.08	18.0 – 20.0	8.0 – 11.0	0.045	0.03	1.0	2.0

Sumber : (ASME *Section II Part A*, 2025)

Tabel 2. 3 Sifat Mekanik SA-312 TP 304

Tensile Strenght		Yield Strenght		Elongation in 2" (50 mm)
Ksi	Mpa	Ksi	Mpa	%
75	515	30	205	40

Sumber : (ASME *Section II Part A*, 2025)



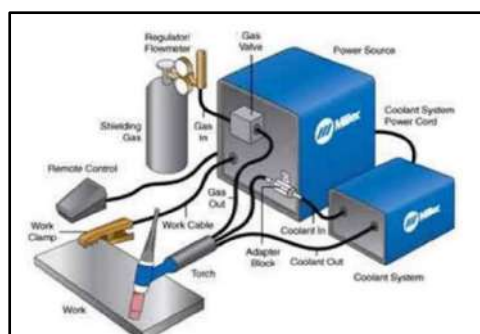
Gambar 2. 2 Produk Pipa *Stainless Steel SA-312 TP304*

Pada Gambar 2.2 diatas adalah baja tahan karat (*Austenitic Stainless Steel*) Seri 304, banyak digunakan di industri, terutama industri kimia, industri pengolahan makanan dan obat-obatan, industri minyak dan gas, dan industri pupuk. Hal ini disebabkan karena baja ini memiliki ketahanan korosi, sifat mampu bentuk dan mampu las yang lebih baik dibandingkan dengan *martensite stainless steel* dan

ferritic stainless steel. Namun demikian, baja ini dapat mengalami penurunan ketahanan korosi, apabila dilakukan proses pengelasan yang disebabkan oleh adanya fenomena sensitasi. Sensitasi adalah terbentuknya presipitasi karbida krom (Cr_{23}C_6) pada batas butir austenit akibat pendinginan lambat ($680\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $480\text{ }^{\circ}\text{C}$). Fenomena ini disebut *intergranular corrosion* (IGC), yaitu peristiwa terjadinya *chromium depletion* di area sekitar batas butir sehingga dapat menurunkan *passive protective layer* di area yang mengalami penurunan komposisi krom.

2.2 Gas Tungsten Arc Welding

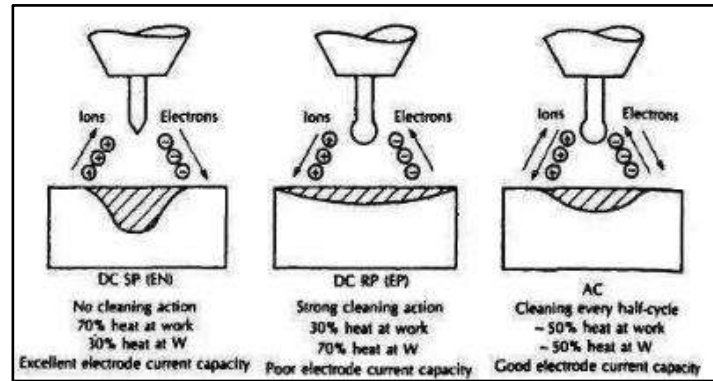
Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) adalah proses pengelasan yang memanfaatkan busur listrik yang terbentuk antara elektroda *tungsten* dan permukaan benda kerja yang disambungkan. Pemanasan dari busur listrik tersebut menyebabkan sebagian logam induk meleleh dan membentuk kolam las. Pada proses ini, logam pengisi (*filler metal*) berfungsi sebagai tambahan material las, sehingga komposisinya umumnya disesuaikan atau diserupakan dengan logam induknya. Selama pengelasan berlangsung, gas pelindung inert seperti argon atau helium dialirkan untuk melindungi elektroda dan kolam las dari kontaminasi atmosfer, serta membantu menstabilkan dan memperpanjang panjang busur (Cahya & Abdulah, 2019). Proses pengelasan GTAW dapat dilihat pada Gambar 2.3 berikut ini.



Gambar 2. 3 Proses Pengelasan GTAW (Budi & Karmiadiji, 2023)

Sumber listrik GTAW dapat menggunakan generator AC maupun DC. Ciri khas generator jenis AC yaitu merupakan kombinasi antara *cleaning* dengan penetrasi *medium* dan mencegah elektroda *tungsten overheating*. Penggunaan arus

DC dibedakan menjadi dua yaitu polaritas lurus (*Direct Current Straight Polarity*) dan polaritas balik (*Direct Current Reverse Polarity*). Gambar 2.4 berikut menunjukkan perbedaan penggunaan jenis arah aliran listrik yang digunakan dalam pengelasan.



Gambar 2. 4 Polaritas Arus (Fariz, 2024)

Penggunaan kombinasi arus pengelasan GTAW dan SMAW terbukti memberikan pengaruh positif terhadap pembentukan struktur mikro pada material stainless steel, khususnya pada daerah logam las. Variasi arus pada proses GTAW menunjukkan perubahan persentase fasa ferit yang lebih signifikan dibandingkan daerah HAZ, menandakan bahwa kontrol masukan panas pada proses GTAW berperan penting dalam menentukan keseimbangan fasa *ferit-austenit*. Pada arus GTAW yang lebih tinggi, terjadi peningkatan difusi panas yang memungkinkan transformasi fasa berlangsung lebih stabil, sehingga menghasilkan distribusi mikrostruktur yang lebih homogen (Amalia et al., 2023).

2.2.1 Gas pelindung

Gas pelindung (*shielding gas*) merupakan komponen penting dalam proses *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) karena berfungsi melindungi logam cair, elektroda *tungsten*, serta zona pengelasan dari kontaminasi atmosfer seperti oksigen, nitrogen, dan uap air. Kontaminasi tersebut dapat menyebabkan cacat las, oksidasi, porositas, dan penurunan sifat mekanik sambungan. Pemilihan jenis gas pelindung sangat berpengaruh terhadap karakteristik busur, distribusi panas, penetrasi, serta kualitas hasil las. Gas yang umum digunakan dalam GTAW meliputi argon, helium, serta campuran keduanya. Argon lebih banyak digunakan karena

memiliki kestabilan busur yang baik, sifat ionisasi rendah, serta menghasilkan penyalan busur yang mudah (Sari, 2015). Berikut komposisi gas pelindung pada Tabel 2.4 dibawah ini.

Tabel 2. 4 Tabel Gas Pelindung yang Digunakan Dalam Pengelasan

Gas	Chemical Symbol	Molecular Weight (g/mol)	Spesific Gravity with respect to Air at 1 atm and 0 °C	Density (g/L)	Ionization Potential (eV)
Argon	Ar	39.950	1.3800	1.784	15.7
Carbon Dioxide	CO ₂	44.010	1.5300	1.978	14.4
Helium	He	4.000	0.1368	0.178	24.5
Hydrogen	H ₂	2.016	0.0695	0.090	13.5
Nitrogen	N ₂	28.010	0.9670	1.250	14.5
Oxygen	O ₂	32.000	1.1050	1.430	13.2

Sumber: (Sari, 2015)

2.2.2 Filler metal ER308L

Filler metal adalah logam pengisi yang digunakan dalam proses pengelasan, dan pemilihannya harus disesuaikan dengan jenis *base metal* yang akan disambung. *Filler metal* yang digunakan harus memiliki kuat tarik yang sama atau lebih tinggi dari base metal, dan komposisi kimia antara logam las dan material harus sesuai dengan rentang yang ditentukan dalam ASME *Section II Part A*, karena hal ini mempengaruhi kualitas sambungan. Dalam penelitian ini, proses penyambungan material SA-312 TP304 menggunakan metode pengelasan GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) mengacu pada ASME *Section II Part C*, 2025 SFA 5.9/SFA 5.9M. *Filler metal* yang direkomendasikan adalah ER308L. Komposisi kimia *filler metal* ER308L menurut ASME *Section II Part C*, 2025 dapat dilihat pada Tabel 2.5 berikut.

Tabel 2. 5 Komposisi Kimia Filler Metal ER308L

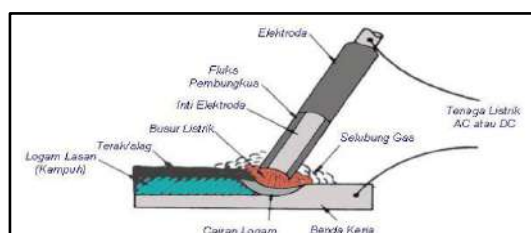
ER308L									
Weight %	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	Cu
	0.03	19.5-22.0	9.0-11.0	0.75	1.0-2.5	0.30-0.65	0.03	0.03	0.75

Sumber : ASME *Section II Part C*, 2025

2.3 Shielded Metal Arc Welding

Shielded Metal Arc Welding (SMAW) dikenal juga dengan istilah *Manual Metal Arc Welding* (MMAW) atau Las elektroda terbungkus adalah suatu proses penyambungan dua keping logam atau lebih, menjadi suatu sambungan yang tetap, dengan menggunakan sumber panas listrik dan bahan tambah/pengisi berupa elektroda terbungkus. Pada proses las elektroda terbungkus, busur api listrik yang terjadi antara ujung elektroda dan logam induk/benda kerja (*base metal*) akan menghasilkan panas. Bila digunakan arus listrik besar maka butiran logam cair yang terbawa menjadi halus dan sebaliknya bila arus kecil maka butirannya menjadi besar. Pola pemindahan logam cair sangat mempengaruhi sifat mampu las dari logam. Logam mempunyai sifat mampu las yang tinggi bila pemindahan terjadi dengan butiran yang halus (Muqsalmina et al., 2019).

Proses pemindahan logam cair sangat mempengaruhi sifat maupun las dari logam, dapat dikatakan bahwa butiran logam cair yang halus mempunyai sifat mampu las yang baik. Sedangkan proses pemindahan cairan, sangat dipengaruhi oleh besar kecilnya arus dan komposisi dari bahan fluks yang digunakan. Selama proses pengelasan, *fluks* yang digunakan untuk membungkus elektroda berguna sebagai zat pelindung yang sewaktu pengelasan ikut mencair. Tetapi, karena berat jenisnya lebih ringan dari bahan logam yang dicairkan, maka cairan *fluks* tersebut mengapung di atas cairan logam dan membentuk terak sebagai penghalang oksidasi (Sopan Ali, 2020). Prinsip kerja las SMAW terlihat pada Gambar 2.5 di bawah ini.



Gambar 2. 5 Prinsip Kerja Las SMAW (AWS Handbook, 2002)

Arus listrik yang mempunyai arus besar ini adalah menimbulkan bunga api pada elektroda las yang berhubungan dengan bagian yang akan disambung (dilas) sehingga terjadilah panas yang tinggi untuk melelehkan logam. Sumber arus pada mesin las listrik adalah arus bolak-balik (AC), arus searah (DC) atau juga bisa AC-DC (Muqsalmina et al., 2019).

2.3.1 Elektroda E308-16

Elektroda pengelasan SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*) merupakan batang logam berbalut *flux* yang berfungsi menghasilkan busur listrik sekaligus menyediakan logam pengisi dalam proses pengelasan. Inti elektroda akan mencair dan membentuk logam las, sedangkan lapisan *flux* berperan melindungi kolam las dari kontaminasi udara, menstabilkan busur, serta menghasilkan *slag* yang membantu pengendalian pendinginan dan kualitas sambungan. Pemilihan jenis elektroda ditentukan berdasarkan sifat mekanik yang dibutuhkan, jenis material, dan posisi pengelasan. Elektroda SMAW juga memiliki variasi penomoran standar, seperti E6010, E7018, atau E308-16, yang menunjukkan karakteristik kekuatan, jenis *flux*, dan aplikasi penggunaannya. Secara umum, elektroda SMAW dirancang untuk memberikan sambungan las yang kuat, stabil, dan tahan terhadap cacat las sehingga banyak digunakan dalam pekerjaan konstruksi, fabrikasi, dan perawatan industri (Sindo, 2021).

Elektroda E308-16 merupakan elektroda las jenis *austenitic stainless steel* yang umumnya digunakan untuk mengelas baja tahan karat seri 300, khususnya tipe 304 dan 304L. Elektroda ini memiliki komposisi kimia yang dirancang untuk menghasilkan logam las dengan struktur austenitik stabil, dengan kandungan kromium dan nikel yang sebanding dengan material dasar tipe 304. Selain itu, *coating* tipe *rutile* pada E308-16 memberikan karakteristik busur yang stabil, percikan minimal, serta kemudahan dalam pengelasan pada berbagai posisi, sehingga elektroda ini banyak digunakan dalam aplikasi fabrikasi maupun perbaikan komponen dari *stainless steel*. Mengacu dalam ASME *Section II Part C*, 2025 berikut ini adalah data komposisi kimia elektroda E308-16 pada Tabel 2.6 dibawah ini.

Tabel 2. 6 Komposisi Kimia Elektroda E308-16

UNS W30810									
Weight %	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	Cu
	0.08	18.0-21.0	9.0-11.0	0.75	0.5-2.5	1.00	0.04	0.03	0.75

Sumber : ASME *Section II Part C*, 2025

2.4 Laju Korosi

Korosi didefinisikan sebagai serangan merusak, karena reaksi dengan lingkungan sekitarnya yang merupakan reaksi elektrokimia, bersifat alamiah, berlangsung dengan sendirinya dan biasanya dimulai di permukaan. Proses korosi terjadi jika terdapat faktor-faktor yang terlibat dalam proses, yaitu : anoda, katoda, dan larutan elektrolit. Banyak kasus di mana ketahanan korosi *weld metal* lebih tinggi daripada *base metal*. Namun, ada kalanya juga *weld metal* rentan terhadap korosi (Cahya & Abdulah, 2019).

Laju korosi merupakan suatu besaran yang menyatakan cepat atau lambat suatu material bereaksi dengan lingkungannya dan mengalami korosi. Menurut Fontana (1978) dalam bukunya “*Corrosion Engineering*”, laju korosi dapat didefinisikan dalam berbagai macam, seperti persentase kehilangan massa, miligram per sentimeter persegi per hari dan gram per inci persegi per jam. Selain itu, juga digunakan *mils per year* (mpy) yang menyatakan laju penetrasi serangan korosi terhadap logam. Laju korosi berbanding lurus dengan sejumlah arus yang mengalir pada sel korosi *elektrokimia*. Jika arus dapat diukur, suatu perhitungan yang tepat dari kehilangan logam akibat korosi dapat ditentukan. Ini berarti bahwa suatu pengukuran dalam *ampere* atau *milliampere* secara matematis dihitung dalam kilogram (*pound*) per tahun. Suatu Amp/tahun adalah satu *Ampere* yang mengalir selama periode satu tahun (Sinaga & Manurung, 2020).

Salah satu metode untuk mengukur laju korosi adalah pengujian polarisasi linier. Metode ini menggunakan prinsip polarisasi, yaitu perubahan potensial dari kondisi setimbang. Pengujian ini mencakup dua jenis polarisasi: katodik, dimana elektron disuplai ke permukaan logam membuat potensial menjadi negatif, dan anodik, di mana elektron dilepas dari logam membuat potensial menjadi positif. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan potensiostat tiga elektroda (Fariz, 2024).

Potensiostat adalah perangkat elektronik yang mengukur densitas arus korosi (*I_{corr}*) dan potensial korosi (*E_{corr}*) dari suatu material dalam larutan elektrolit. Perangkat ini menggunakan tiga elektroda: elektroda kerja (material yang diuji), elektroda pembantu (penghantar arus), dan elektroda acuan (penyedia potensial konstan). *Potensiostat* mengukur perbedaan tegangan antara elektroda kerja dan

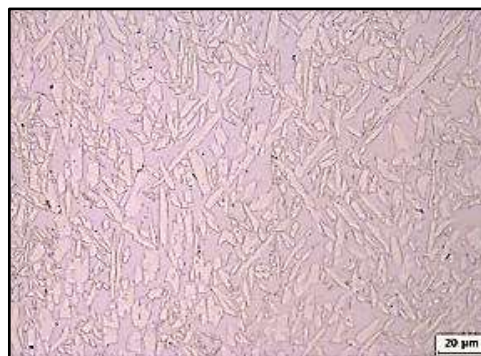
elektroda acuan serta densitas arus antara elektroda kerja dan pembantu, dengan bantuan perangkat lunak untuk analisis data (Fariz, 2024).

Hasil penelitian (Lee et al., 2015) pada *super duplex stainless steel* menunjukkan bahwa peningkatan *interpass temperature* dari 50 °C menjadi 150 °C dan 250 °C menyebabkan kenaikan nilai rapat arus korosi (I_{corr}) secara bertahap. Nilai I_{corr} yang lebih tinggi mengindikasikan meningkatnya laju korosi akibat menurunnya stabilitas lapisan pasif. Selain itu, kurva potensiodinamik memperlihatkan pergeseran potensial korosi (E_{corr}) ke arah yang lebih negatif serta penyempitan daerah pasivasi seiring dengan meningkatnya *interpass temperature*. Kondisi ini menandakan bahwa material menjadi lebih rentan terhadap terjadinya korosi lokal, khususnya korosi *pitting*. Ditunjukkan hasil pengujian korosi pada Tabel 2.7 dibawah ini.

Tabel 2. 7 Hasil Pengujian Korosi *Potentiodynamic* 3 Sel Elektroda

<i>Interpass</i>	E_{corr} (mV)	I_{corr} (nA)	I_{corr} (nA/cm ²)	b_c (V/dec)	b_a (V/dec)	E_{pit} (V)	I_{pit} (μ A)
50 °C	351.458	3.558	475.702	0.285	1.714	1.322	6.322
150 °C	285.996	6.465	414.522	0.255	1.25	1.316	5.731
250 °C	261.837	10.09	704.074	0.139	1.737	1.221	1.186

Sumber : (Lee et al., 2015)



Gambar 2. 6 Hasil Mikrosutruktur Variasi *Interpass super duplex Stainless Steel* (Lee et al., 2015)

Gambar 2.6 diatas menunjukkan citra mikrostruktur spesimen yang mengalami etsa elektrolitik dengan asam oksalat 10%, yang mengandung ferit abu-abu dan austenit putih. Seperti yang dapat dilihat dari gambar ini, seiring peningkatan suhu

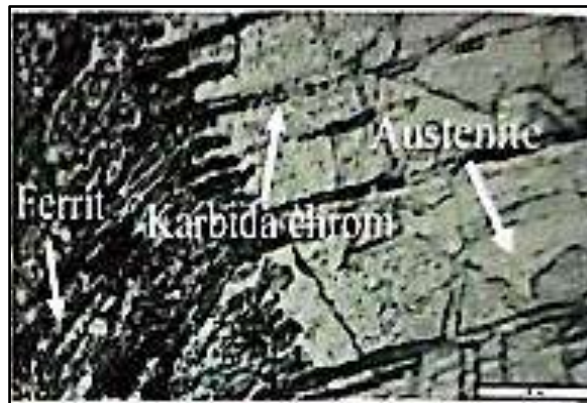
antar-lintasan, jumlah austenit dalam spesimen juga meningkat. Peningkatan ini disebabkan oleh fakta bahwa pada masukan panas tertentu, laju pendinginan sambungan las menurun, sehingga waktu yang dihabiskan dalam kondisi yang menguntungkan untuk pembentukan austenit meningkat. Hal ini kemudian menyebabkan peningkatan nukleasi/pertumbuhan austenit dalam ferit (Lee et al., 2015).

Peningkatan *interpass temperature* juga dikaitkan dengan terbentuknya presipitasi fasa sekunder, seperti fasa *sigma* (σ) dan *chi* (χ), akibat lamanya waktu paparan material pada rentang temperatur kritis presipitasi. Presipitasi fasa tersebut menyebabkan terjadinya daerah defisiensi krom (*Cr-depleted zone*) di sekitar batas butir, yang melemahkan lapisan pasif kromium oksida. Akibatnya, hasil pengujian potensi dinamik menunjukkan kenaikan nilai *Icorr* dan penurunan ketahanan korosi secara keseluruhan. Fenomena ini menegaskan bahwa kontrol *interpass temperature* merupakan faktor penting dalam menjaga ketahanan korosi sambungan las *stainless steel* (Lee et al., 2015).

Penelitian lain oleh (Linangkung, 2023) pada variasi *interpass temperature* 300 °C dan 450 °C, bahwa dari hasil pengamatan struktur mikro secara keseluruhan pada semua spesimen, fasa yang tampak jelas yaitu austenit (warna putih), karbida Cr (Krom) dengan butiran halus (bintik-bintik hitam), dan ferit (Gelap). Pada *interpass temperature* 450 °C ukuran butir cenderung lebih kecil dan rapat dibanding dengan suhu *interpass* di bawahnya. Hal ini berpengaruh pada nilai kekerasan pada *base metal* saat dilakukan uji *hardness*.

Pada daerah *fusion line* untuk sampel yang mengalami *interpass* dengan suhu lebih tinggi terlihat banyak karbida krom. *Presentase* karbida krom yang mengendap dapat dipengaruhi oleh *interpass temperature* yang digunakan, semakin cepat benda kerja melewati daerah *range temperature* sensitis (800 °C – 450 °C) akan memperkecil kemungkinan presipitasi karbida krom. Ketika material diberikan masukan panas dengan suhu awal *interpass temperature* yang tinggi berulang maka terjadi pendinginan lambat pada temperatur sensitisasi hal ini mengakibatkan penebalan pada daerah batas butir karena adanya endapan karbida

krom. Penebalan daerah batas butir di fusion line terlihat pada Gambar 2.7 dibawah ini.



Gambar 2. 7 Hasil Mikro *Fusion Line Stainless Steel 304*
(Linangkung, 2023)

Berdasarkan hasil penelitian (Lee et al., 2015) dan (Linangkung, 2023) dapat disimpulkan bahwa peningkatan *interpass temperature* memberikan pengaruh signifikan terhadap ketahanan korosi dan karakteristik mikrostruktur material *stainless steel*. Peningkatan *interpass temperature* secara konsisten menyebabkan kenaikan nilai rapat arus korosi (I_{corr}) dan pergeseran potensial korosi (E_{corr}) ke arah yang lebih negatif, yang menandakan menurunnya stabilitas lapisan pasif dan meningkatnya laju korosi. Selain itu, penyempitan daerah pasivasi serta penurunan nilai potensial *pitting* (E_{pit}) menunjukkan bahwa material menjadi lebih rentan terhadap korosi lokal, khususnya korosi *pitting*, pada *interpass temperature* yang lebih tinggi.

Dari sisi mikrostruktur, peningkatan *interpass temperature* mengakibatkan perubahan signifikan pada keseimbangan fasa, ditandai dengan meningkatnya fraksi austenit akibat menurunnya laju pendinginan dan bertambahnya waktu yang tersedia untuk proses nukleasi dan pertumbuhan austenit dalam ferit. Namun demikian, kondisi *interpass temperature* yang tinggi juga memperpanjang waktu paparan material pada rentang temperatur kritis presipitasi, sehingga memicu terbentuknya fasa sekunder seperti *sigma* (σ), *chi* (χ), dan presipitasi karbida krom pada batas butir, khususnya di daerah *fusion line*. Presipitasi ini menyebabkan

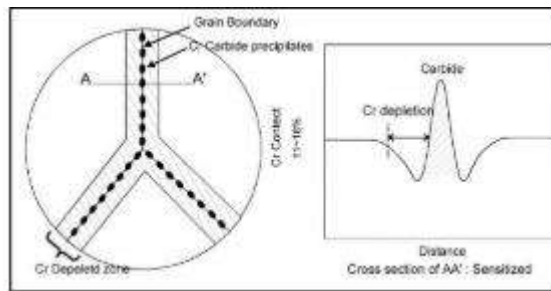
terbentuknya daerah defisiensi krom (*Cr-depleted zone*) yang melemahkan lapisan pasif kromium oksida dan berkontribusi terhadap penurunan ketahanan korosi.

Selain berdampak pada ketahanan korosi, perubahan mikrostruktur akibat variasi *interpass temperature* juga memengaruhi sifat mekanik material. Pada *interpass temperature* yang lebih tinggi, ukuran butir cenderung menjadi lebih kecil dan rapat, yang berkontribusi terhadap peningkatan nilai kekerasan, khususnya pada daerah *base metal*. Namun, peningkatan presipitasi karbida krom akibat pendinginan lambat pada rentang temperatur sensitisasi dapat memperburuk ketahanan korosi antar butir. Oleh karena itu, pengendalian *interpass temperature* menjadi faktor krusial dalam proses pengelasan *stainless steel* untuk memperoleh keseimbangan optimal antara sifat mekanik dan ketahanan korosi sambungan las.

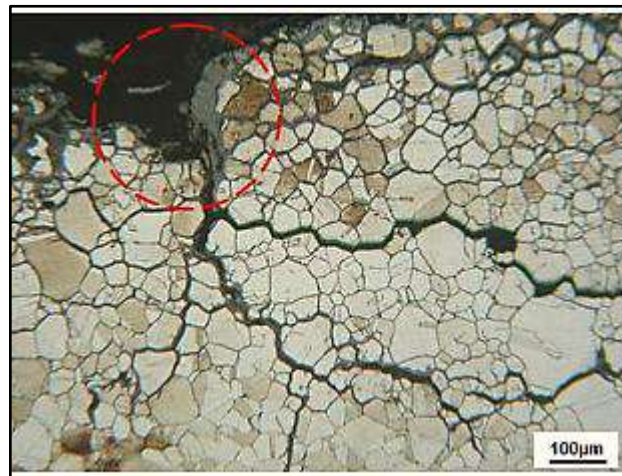
2.4.1 Sensitasi

Kerusakan batas butir (*Weld decay*) merupakan bentuk cacat atau kerusakan pada hasil pengelasan yang terjadi di area *Heat Affected Zone* (HAZ), di mana pada rentang temperatur sekitar 482 °C hingga 760 °C terbentuk presipitat kromium karbida (Cr_{23}C_6) di sepanjang batas butir austenit. Pembentukan presipitat ini menyebabkan penurunan kandungan kromium di sekitar batas butir, mengurangi ketahanan korosi, dan menghambat pembentukan lapisan pasif pelindung. Dalam kondisi tersebut, batas butir menjadi lebih anodik dibandingkan bagian dalam butir yang bersifat katodik, sehingga korosi lebih mudah terjadi di daerah tersebut. Kromium karbida terutama mengendap pada batas butir karena laju difusi atom kromium lebih tinggi di sepanjang batas butir yang kaya cacat kristal. Selama pemanasan atau perlakuan panas, difusi kromium dan karbon menuju batas butir membentuk presipitat halus yang menghasilkan zona deplesi kromium (*chromium depleted zone*) di area sekitarnya. Zona dengan kadar kromium rendah ini sangat rentan terhadap serangan korosi.

Sensitisasi terjadi akibat presipitasi kromium karbida tersebut, yang menimbulkan perbedaan potensial elektrokimia pada mikrostruktur dan mengakibatkan terjadinya korosi terlokalisasi pada batas butir (Cahya & Abdulah, 2019). Ditunjukkan pada Gambar 2.8 berikut ini.



Gambar 2. 8 Daerah *Depleted* yang Berdekatan Dengan Presipitat (Cahya and Abdulah, 2019)



Gambar 2. 9 Daerah Terkena Sensitasi (Sunandrio, 2015)

Ditunjukkan pada Gambar 2.9 di daerah yang dilingkari merah. Area tersebut memperlihatkan bahwa *tube* telah mengalami sensitisasi atau korosi batas butir (*intergranular corrosion*), Awal retak lelah (*initial fatigue crack*) diawali dari butiran yang terlepas dari ikatan strukturnya akibat telah mengalami sensitisasi, hingga membentuk retakan pada batas butir (*intergranular crackings*) dan menjalar hingga ketengah (Sunandrio, 2015).

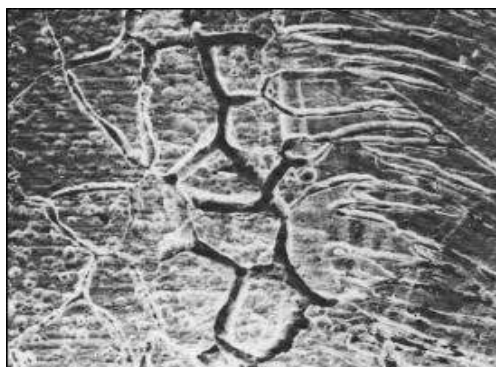
2.4.2 Korosi batas butir (*Intergranular Corrosion*)

Korosi *intergranular* merupakan bentuk korosi yang terjadi pada batas butir logam dan umumnya disebabkan oleh proses pendinginan yang berlangsung lambat dari temperatur sensitisasi, yaitu sekitar 500 °C hingga 850 °C. Pada rentang temperatur tersebut, terjadi pembentukan presipitat kromium karbida (Cr_{23}C_6) dalam ukuran halus di sepanjang batas butir. Presipitasi ini mengurangi kandungan

kromium di area sekitar batas butir sehingga kemampuan logam untuk membentuk lapisan pelindung menjadi menurun. Akibatnya, daerah tersebut menjadi jauh lebih rentan terhadap serangan korosi (Cahya & Abdulah, 2019).

Pembentukan karbida tersebut menurunkan kadar kromium di area sekitarnya sehingga daerah tersebut mengalami deplesi kromium dan kehilangan kemampuan membentuk lapisan pasif pelindung. Kondisi ini membuat batas butir menjadi lebih reaktif terhadap lingkungan korosif dibandingkan bagian dalam butir. Ketika terjadi perbedaan potensial antara batas butir yang bersifat lebih anodik dan bagian butir yang lebih katodik, proses korosi akan berlangsung selektif mengikuti jalur batas butir. Serangan korosi pada daerah ini dapat menyebabkan retakan *longitudinal*, penurunan kekuatan mekanik, serta berpotensi memicu kegagalan dini pada komponen yang bekerja di lingkungan agresif.

Dalam proses pengelasan, pengendalian *interpass temperature* dan kuat arus menjadi sangat penting untuk mencegah terjadinya sensitisasi yang memicu korosi *intergranular*. *Interpass temperature* yang terlalu tinggi memperpanjang waktu material berada dalam rentang temperatur sensitisasi, sehingga meningkatkan peluang pembentukan karbida di batas butir. Begitu pula dengan kuat arus yang terlalu besar dapat menghasilkan panas berlebih, memperluas *heat affected zone* (HAZ), serta mempercepat presipitasi karbida. Oleh karena itu, pengaturan *interpass temperature* yang tepat serta pemilihan kuat arus yang sesuai prosedur menjadi langkah krusial untuk membatasi input panas, menjaga stabilitas struktur mikro, dan meminimalkan risiko korosi *intergranular* pada sambungan las. Berikut adalah bentuk korosi batas butir pada Gambar 2.10 dibawah ini.



Gambar 2. 10 Korosi Batas Butir (Cahya and Abdulah, 2019)

2.4.3 Korosi sumuran (*Pitting corrosion*)

Korosi sumuran adalah korosi lokal yang terjadi pada permukaan yang terbuka akibat pecahnya lapisan pasif. Terjadinya korosi sumuran ini diawali dengan pembentukan lapisan pasif dipermukaannya, pada antarmuka lapisan pasif dan elektrolit terjadi penurunan pH, sehingga terjadi pelarutan lapisan pasif secara perlahan-lahan dan menyebabkan lapisan pasif pecah sehingga terjadi korosi sumuran. Korosi sumuran ini sangat berbahaya karena lokasi terjadinya sangat kecil tetapi dalam, sehingga dapat menyebabkan peralatan atau struktur patah mendadak.

2.5 *Interpass Temperature*

Interpass Temperature adalah proses mengontrol suhu logam las sebelum dilakukan pengelasan berikutnya pada logam las yang sebelumnya. Metode yang umum dilakukan adalah dengan memonitor suhu logam lasan serta memasang thermal blanket bila diperlukan (Muqsalmina, Syukran and Hanif, 2019). Pengontrolan *Interpass temperature* perlu dilakukan dengan tujuan sebagai berikut.

1. Melarutkan hidrogen yang terperangkap saat dilakukan proses pengelasan.
2. Menurunkan laju pendinginan.
3. Untuk mendapatkan ukuran butir yang lebih baik atau struktur mikro yang diharapkan.

Rekomendasi suhu *interpass temperature* untuk material *austenitic stainless steel* 304. Terdapat pada Tabel 2.8 dibawah ini.

Tabel 2. 8 Rekomendasi Suhu *Interpass Temperature*

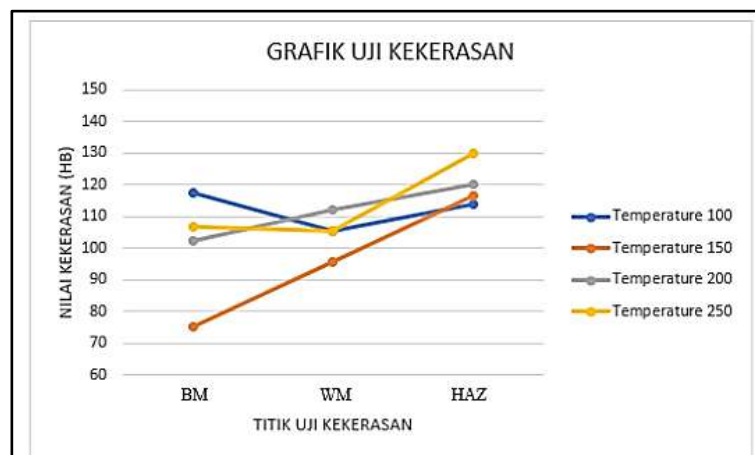
<i>Recomend Maximum Interpass Temperature</i>			
<i>Material Type</i>	<i>Example Alloy</i>	<i>Max Interpass Temperature</i>	<i>Reason for Limit</i>
<i>Austenitic Stainless Stell</i>	304, 316	150° C (300° F)	<i>Avoid sensitization and intergranular corrosion</i>

Sumber : (Canadia Fabricating & Welding, 2026)

Apabila *interpass temperature* tidak dikontrol dengan baik selama proses pengelasan, khususnya pada *stainless steel* austenitik seperti AISI 304 dan 316, maka dapat menimbulkan berbagai dampak negatif terhadap kualitas sambungan las. Peningkatan *interpass temperature* yang berlebihan menyebabkan akumulasi panas pada logam las dan daerah *heat affected zone* (HAZ), sehingga

memperpanjang waktu material berada pada rentang temperatur kritis. Kondisi ini berpotensi memicu sensitisasi, yaitu pengendapan karbida krom (Cr_{23}C_6) di batas butir, yang mengakibatkan penurunan kadar krom bebas di sekitar batas butir dan menurunkan ketahanan terhadap korosi antar-butir (*intergranular corrosion*). Beberapa penelitian dibawah menunjukkan hasil dengan variasi *interpass* yang meningkat dapat berpengaruh pada sifat mekanik dan struktur mikro.

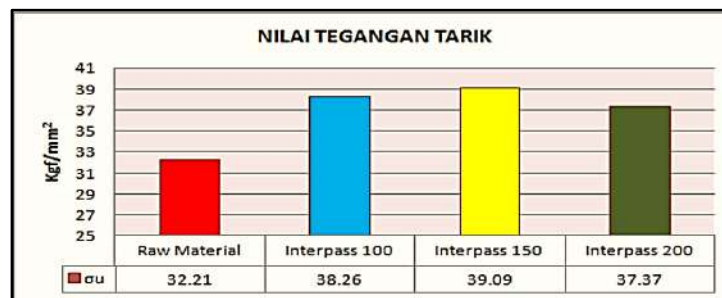
Pada penelitian (Rizki et al., 2023) hasil pengujian kekerasan pada nilai *interpass temperatur* 150 °C pada *base metal* mengalami kenaikan seperti grafik, pada *base metal* tersebut tidak mengalami peningkatan kekerasan karena tidak terkena pengaruh panas saat pengelasan berlangsung, meskipun dari hasil pengujian terlihat *base metal* mengalami peningkatan yang sangat signifikan, akan tetapi hasil penelitian diperoleh pada kekerasan material yang bagus pada *temperature* 150 °C dan paling rendah pada *temperature* 250 °C karena pada tingkat kekerasan pada *base metal* cenderung tidak ada perubahan dikarenakan posisi *base metal* ada di induk logam sedangkan pada 250 °C terdapat terjadi peningkatan pada HAZ yang terkena secara langsung pada proses pengelasan. Terlihat pada Gambar 2.11 dibawah ini.



Gambar 2. 11 Grafik Uji Kekerasan (Rizki et al., 2023)

Pada penelitian lain oleh (Muqsalmina et al., 2019) yang berjudul *Pengaruh interpass temperatur terhadap sifat mekanik proses pengelasan SMAW material carbon steel SS400*, Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi *temperatur interpass* dapat mempengaruhi nilai kekuatan tarik suatu material hasil lasan. Nilai

tegangan pada spesimen *interpass* 100 °C adalah sebesar 38,26 Kgf/mm². Nilai tegangan pada spesimen *interpass* 150 °C adalah sebesar 39,09 Kgf/mm². Nilai tegangan pada spesimen 200 °C adalah sebesar 37,37 Kgf/mm². Nilai tegangan tanpa perlakuan adalah sebesar 32,21 Kgf/mm². Terlihat pada Gambar 2.12 hasil tegangan tarik dibawah ini.

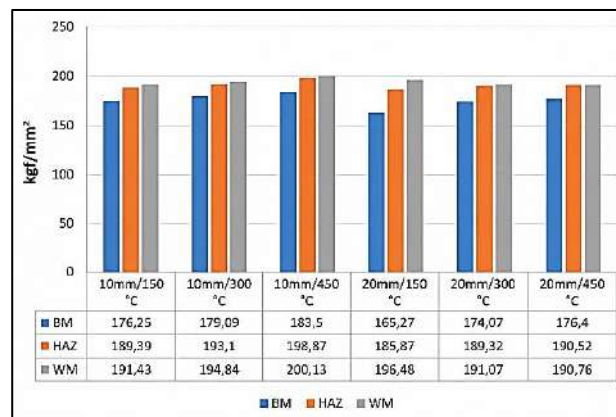


Gambar 2. 12 Grafik Uji Tarik (Muqsalmina et al., 2019)

Variasi *interpass temperature* akan mempengaruhi struktur pada logam las. Struktur yang semakin kasar menandakan tingkat kekuatan pada logam las akan semakin getas. Perbedaan yang signifikan dipengaruhi suhu *interpass temperatur*, semakin tinggi suhu *interpass temperatur* maka letak butir-butir *ferrite* semakin besar. Hal tersebut akan mengakibatkan tingkat kekuatan yang tinggi pada hasil lasan (Muqsalmina et al., 2019).

Penelitian lain oleh (Linangkung, 2023), dapat dilihat pada semua spesimen uji daerah *base metal* memiliki nilai kekerasan lebih kecil dibandingkan dengan daerah *weld metal* dan HAZ. Nilai kekerasan tertinggi pada daerah *base metal* 10 mm yaitu spesimen dengan *interpass temperature* 450 °C sebesar 184,57 kg/mm². Pada material dengan *thickness* 20 mm nilai kekerasan tertinggi pada daerah *base metal* dengan *interpass temperature* 450 °C sebesar 182,79 kg/mm². Nilai kekerasan tertinggi pada daerah HAZ pada material *thickness* 10 mm pada spesimen dengan *interpass temperature* 450 °C sebesar 198,87 kg/mm², juga pada material dengan *thickness* 20 mm nilai kekerasan HAZ tertinggi pada spesimen dengan *interpass temperature* 450 °C sebesar 190,52 kg/mm². Nilai kekerasan tertinggi pada daerah *weld metal* 10 mm adalah pada material dengan *interpass temperature* 450 °C dengan nilai 201,3 kg/mm². Pada material dengan *thickness* 20 mm kekerasan pada daerah *weld metal* juga terdapat pada *interpass temperature* 450 °C

dengan nilai 190,76 kg/mm². Nilai kekerasan semakin tinggi dipengaruhi oleh *interpass temperature* yang tinggi sehingga proses pendinginan menjadi lebih lambat. Hal ini mengakibatkan nilai kekerasan pada daerah *base metal*, HAZ maupun *weld metal* semakin tinggi. Kekerasan akan meningkat pada daerah HAZ, karena di daerah ini terjadi perubahan struktur mikro akibat pengaruh panas dari proses pengelasan. Ditunjukkan dengan Gambar 2.13 grafik hasil kekerasan dibawah berikut.



Gambar 2. 13 Grafik Uji Kekerasan (Linangkung, 2023)

Berdasarkan hasil kajian beberapa penelitian terdahulu, dapat disimpulkan bahwa variasi *interpass temperature* memiliki pengaruh terhadap struktur mikro, kekerasan, dan kekuatan tarik material hasil pengelasan. Dari sisi struktur mikro, daerah *weld metal* menunjukkan perubahan paling dominan akibat proses peleburan dan laju pendinginan yang relatif cepat, sedangkan daerah *heat affected zone* (HAZ) mengalami siklus termal tanpa peleburan yang menyebabkan perubahan fasa, seperti ferit dan perlit, serta pertumbuhan butir. Semakin tinggi panas dan *interpass temperature* yang diberikan, maka luasan HAZ meningkat dan struktur mikro cenderung menjadi lebih kasar, sementara *base metal* relatif mengalami perubahan paling kecil karena tidak terpapar panas secara langsung.

Dari hasil pengujian kekerasan, seluruh penelitian menunjukkan bahwa nilai kekerasan pada daerah *weld metal* dan HAZ lebih tinggi dibandingkan *base metal*. Peningkatan *interpass temperature* umumnya menyebabkan kenaikan nilai kekerasan, terutama pada temperatur tinggi seperti 450 °C, sebagaimana ditunjukkan oleh (Linangkung, 2023), akibat laju pendinginan yang lebih lambat dan perubahan struktur mikro yang lebih intens. Daerah HAZ mengalami

peningkatan kekerasan paling signifikan karena berada pada zona transisi yang sangat dipengaruhi oleh panas pengelasan. Namun demikian, beberapa penelitian juga menunjukkan bahwa *interpass temperature* menengah (sekitar 150 °C) dapat menghasilkan distribusi kekerasan yang lebih optimal dan stabil dibandingkan temperatur yang terlalu tinggi.

Sementara itu, hasil pengujian kekuatan tarik menunjukkan bahwa variasi *interpass temperature* berpengaruh langsung terhadap kemampuan material menahan beban tarik. Nilai kekuatan tarik tertinggi umumnya diperoleh pada *interpass temperature* menengah, sedangkan *interpass temperature* yang terlalu tinggi cenderung menyebabkan penurunan kekuatan tarik akibat struktur mikro yang semakin kasar dan meningkatnya kecenderungan sifat getas material. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa pengendalian *interpass temperature* merupakan parameter kunci dalam proses pengelasan, karena berperan dalam menentukan keseimbangan antara kekerasan, kekuatan tarik, dan kestabilan struktur mikro pada sambungan las.

2.6 Pengujian

Pada penelitian ini, pengujian sifat material dan performa hasil pengelasan dilakukan berdasarkan standar ASTM yang berlaku guna menjamin keakuratan dan keterulangan hasil pengujian. Pengujian laju korosi dilaksanakan mengacu pada ASTM G5-13 menggunakan metode *potentiodynamic polarization* untuk mengevaluasi perilaku elektrokimia material serta menentukan laju korosi secara kuantitatif. Pengujian tarik (*tensile test*) dilakukan berdasarkan ASTM E8, yang mengatur dimensi spesimen, metode pembebanan, serta prosedur pengujian untuk memperoleh nilai kekuatan tarik dan regangan material. Pengujian kekerasan dilakukan menggunakan metode *vickers* dengan mengacu pada ASTM E92 untuk mengetahui distribusi nilai kekerasan pada daerah *base metal*, *heat affected zone* (HAZ), dan *weld metal*. Selain itu, dilakukan pengujian mikrostruktur berdasarkan ASTM E407 untuk mengamati karakteristik mikro hasil pengelasan. Penerapan

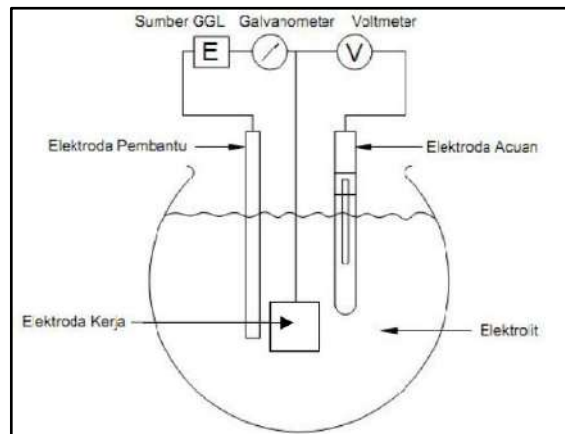
standar ASTM tersebut diharapkan menghasilkan data pengujian yang *valid*, konsisten, dan relevan terhadap kebutuhan aplikasi industri.

2.6.1 Pengujian laju korosi

Pengujian laju korosi dapat dilakukan dengan berbagai metode, termasuk metode elektrokimia seperti uji polarisasi potensiodinamik dan polarisasi elektrokimia. Metode ini mengukur arus dan potensial elektrokimia untuk mengevaluasi respons material terhadap korosi. Pengujian elektrokimia umumnya menggunakan metode sel tiga elektroda, yang merupakan perangkat standar untuk penelitian kuantitatif sifat bahan korosi. Sel tiga elektroda adalah pengembangan dari sel korosi basah, dan detail pengujiannya dapat mengacu pada standar ASTM G5, 2013 (Fariz, 2024).

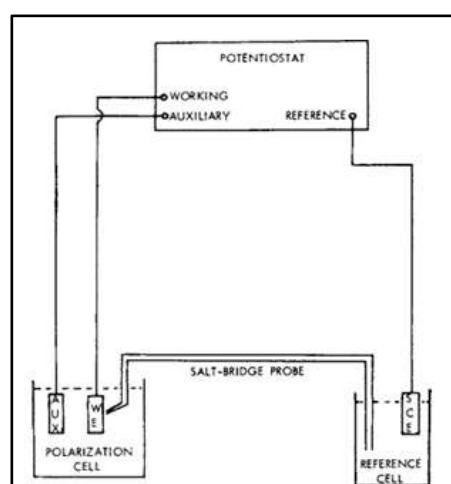
Sel tiga elektroda adalah alat laboratorium standar yang digunakan untuk melakukan pengujian korosi pada material yang didasarkan pada metode elektrolisis (Krisna, 2022). Konfigurasi sel tiga elektroda terdiri dari beberapa bagian dan Gambar 2.14 rangkain tiga sel elektroda ada dibawah berikut :

- a) Elektroda kerja, atau elektroda penelitian, atau anoda, yang dicelupkan pada fluida kerja.
- b) Elektroda bantu atau elektroda pendukung adalah elektroda yang tidak hanya memberikan potensial pada elektroda kerja tetapi juga mengangkut arus listrik yang dihasilkan oleh reaksi kimia.
- c) Elektroda acuan, juga dikenal sebagai elektroda referensi, berfungsi sebagai perbandingan antara potensial yang diberikan pada elektroda kerja dan elektroda bantu. Diusahakan agar arus yang mengalir melalui elektroda acuan ini menjadi sekecil mungkin sehingga tidak terlihat.
- d) Larutan elektrolit, juga dikenal sebagai larutan elektrolit, harus dibuat dengan hati-hati karena berfungsi sebagai penghantar arus ionik dalam reaksi korosi. Jumlah volume larutan elektrolit yang diperlukan adalah satu liter.



Gambar 2. 14 Sel Tiga Elektroda (Fecl, Anggretno and Rochani, 2012)

Variasi *interpass temperature* dan kuat arus pada proses pengelasan dapat menyebabkan perubahan mikrostruktur, seperti presipitasi karbida krom dan penurunan kandungan kromium di daerah batas butir. Perubahan tersebut berpotensi menurunkan kemampuan pasivasi material serta meningkatkan kecenderungan terjadinya korosi, khususnya korosi *intergranular*. ASTM G5 merupakan metode yang sangat sensitif terhadap perubahan mikrostruktur tersebut, sehingga mampu merekam pergeseran potensial korosi (E_{corr}), peningkatan kerapatan arus korosi (I_{corr}), perubahan *passive current density*, serta modifikasi kurva aktif-pasif sebagai akibat degradasi film pasif. Diagram rangkaian pengujian ini ditunjukkan pada Gambar 2.15 berikut ini.



Gambar 2. 15 Schematic Wiring Diagram (ASTM G-5, 2013)

Pada gambar diatas dapat dilihat pengaturan rangkaian kerja sel tiga elektroda. Arus dari *power supply* dialirkan menuju elektroda kerja (*working electrode*) melalui elektroda bantu (*auxiliary electrode*), sedangkan potensial dari elektroda kerja diukur dengan elektroda acuan (*reference elektroda*). Ketika kutub *negative* dari *power supply* dihubungkan dengan elektroda kerja maka elektroda itu akan terpolarisasi sebagai katoda. Mengacu pada (ASTM G-5, 2013) beberapa perangkat percobaan memiliki fungsi tersendiri yaitu :

1. Elektroda kerja: Elektroda ini adalah sampel yang diteliti dan dapat berupa spesimen kecil yang dipasang dalam resin pendingin. Permukaan spesimen harus digerinda dan diamplas agar rata dan halus.
2. Elektroda pembantu: Elektroda ini berfungsi untuk mengangkut arus dalam rangkaian penelitian. Biasanya terbuat dari bahan seperti batang karbon, platina, atau emas, dan tidak mempengaruhi pengukuran potensial.
3. Elektroda acuan: Elektroda ini memberikan titik referensi yang stabil untuk pengukuran potensial elektroda kerja. Kalomel jenuh adalah jenis elektroda acuan yang sering digunakan. Arus yang mengalir melalui elektroda ini harus minimal untuk menjaga konsistensi potensialnya.
4. Sumber potensial: Sumber ini memberikan tegangan yang diperlukan untuk menggerakkan elektroda kerja dan memungkinkan reaksi sel yang diinginkan. Potensiostat sering digunakan untuk mengatur potensial dan mengukur arus.
5. Alat pengukur potensial: Digunakan untuk mengukur potensial dengan ketelitian tinggi. Alat ukur digital modern dengan impedansi tinggi dapat digunakan untuk pengukuran ini.
6. Alat pengukur arus: Mengukur arus dengan rentang *miliampere* atau *mikroampere* untuk memastikan akurasi hasil percobaan.
7. Larutan elektrolit: Larutan ini, biasanya antara 1 hingga 2 liter, berfungsi sebagai medium untuk pengangkut arus ionik dan berperan penting dalam reaksi korosi.

2.6.2 Pengujian tarik

Uji tarik ialah salah satu uji stress-strain mekanik yang bertujuan untuk mengetahui kekuatan bahan terhadap gaya tarik. Dalam pengujiannya, bahan uji

ditarik sampai putus. Dari hasil pengujian tarik tersebut dapat diketahui pula sifat-sifat lain seperti kekuatan mulur, reduksi penampang, modulus elastis dan lain-lain (Dwi Anda, 2021).

Untuk mengetahui sifat-sifat suatu bahan, tertentu kita harus mengadakan pengujian terhadap bahan tersebut. ada empat jenis uji coba yang bisa dilakukan, yaitu uji tarik (*tensile test*), uji tekan (*compression test*), uji torsi (*torsion test*), dan uji gesek (*shear test*). Pengujian ini sangat sederhana, tidak mahal dan mendapatkan standarisasi seluruh dunia, misalnya di amerika dengan ASTM E8 dan jepang dengan JIS 2241. Dengan menarik suatu bahan kita akan segera mengetahui bagaimana bahan tersebut bereaksi terhadap tenaga tarikan dan mengetahui sejauh mana material tersebut bertambah panjang. Untuk mengetahui kekuatan tarik suatu bahan dalam pembebanan tarik, garis gaya harus berhimpit dengan garis sumbu bahan sehingga pembebanan terjadi beban tarik lurus. Tetapi jika gaya tarik sudut berhimpit maka yang terjadi adalah gaya lentur, bisa dilihat gambar dibawah ini alat uji tarik pada Gambar 2.16 dibawah ini.



Gambar 2. 16 Mesin Uji Tarik (Munir, 2019)

Pengujian tarik dilakukan untuk mendapatkan nilai dari beberapa sifat mekanik baja, terdapat pada persamaan dibawah ini.

- Tegangan tarik maksimum (σ)

Tegangan tarik maksimum adalah tegangan maksimum yang dapat ditanggung oleh material sebelum patah.

$$\sigma = \frac{P}{A_o} \quad (2.1)$$

Dimana :

- σ : adalah tegangan tarik maksimum (Mpa)
- P : adalah beban maksimum (N)
- A_o : adalah luas penampang awal (mm²)

▪ Regangan Maksimum (e)

Regangan didefinisikan sebagai perbandingan antara panjang pertambahan panjang dengan panjang awal.

$$e = \frac{\Delta L}{L_o} \times 100 \% \quad (2.2)$$

Dimana :

- ΔL : adalah perubahan panjang pada spesimen
- L_o : adalah panjang spesimen awal
- e : adalah regangan (%)

Pada pengujian tarik tersebut, gaya tarik yang didapat kan secara perlahan-lahan dimulai dari nol dan berhenti ditegangan maksimum (*Maximum Stress*) dari logam material yang bersangkutan. *Maximum stress* adalah titik batas maksimum material yang mengalami gaya tarik dari luar hingga mengalami *fracture* (patah), sedangkan *Yield Stress* merupakan batas kemampuan maksimum material untuk mengalami pertambahan panjang (melar) sebelum material tersebut mengalami *fracture* mengikuti hukum *hooke*.

2.6.3 Pengujian metalografi

Metalografi merupakan bidang ilmu material yang mempelajari struktur mikro dan makro suatu material menggunakan mikroskop optik atau elektron. Hasil pengamatan struktur ini melalui proses metalografi dapat mengungkapkan karakteristik material, termasuk sifat fisik dan mekaniknya. Beberapa aspek yang dapat dianalisis meliputi bentuk dan ukuran butir, fasa material, tingkat homogenitas kimia, sebaran fasa, struktur elongasi, serta cacat material seperti dislokasi. Dalam pengujian metalografi, keberhasilan pengamatan struktur mikro

sangat bergantung pada persiapan spesimen uji. Spesimen yang akan diuji harus bersifat rata, bebas dari goresan, dan memiliki permukaan seperti cermin (mengkilap). Semakin sempurna preparasi benda uji, semakin jelas gambar struktur yang diperoleh, sehingga pengamatan menjadi lebih dipercaya (Rafi Nurdwi, 2019). Tahapan persiapan benda uji metalografi secara umum, sebagai berikut:

1. Pemotongan (*cutting*)

Pemotongan pada sampel yang dilakukan secara hati-hati dengan tujuan agar struktur mikro material tidak rusak akibat oleh gesekan alat potong dengan sampel. Pencegahan terjadinya deformasi akibat panas pada struktur mikro material dapat menggunakan air sebagai media pendingin.

2. *Mounting*

Tahap ini dilakukan pada benda uji yang berukuran kecil dan tipis sehingga memudahkan pemegangan (*handling*) benda uji. Tahapan dilakukan dengan melapisi sampel dengan zat organik seperti bakelit, resin, dan sebagainya.

3. Pemolesan (*polishing*)

Tahap ini dilakukan pada permukaan yang hendak diamati, menggunakan ampelas berukuran grid kecil (kasar) sampai dengan ukuran grid sangat besar (sangat halus), dengan posisi tegak lurus setiap melakukan peningkatan penggunaan ukuran *grid* dari ampelas.

4. Etsa (*etching*)

Proses untuk mengikis daerah batas butir dengan larutan etsa sehingga butir lebih terlihat jelas saat diamati di bawah mikroskop optik. Jenis larutan etsa bergantung pada material yang ingin diamati.

2.6.4 Pengujian kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui sebaran nilai kekerasan pada tiga area utama, yaitu logam induk (*Base Metal*), daerah terpengaruh panas (*Heat Affected Zone/HAZ*), dan logam las (*Weld Metal*). Pengujian ini bertujuan memperoleh nilai kekerasan pada setiap area tersebut serta nilai kekerasan rata-rata dari keseluruhan benda uji. Alat yang digunakan adalah *Macro Rockwell Hardness Tester* (Rudy et al., 2018). Nilai kekerasan dapat

menyatakan kekuatan suatu material dengan *valid*, sehingga material tersebut dapat digolongkan kedalam material getas atau ulet (Fariz, 2024). Terdapat 3 metode pengujian kekerasan yang dapat digunakan untuk mengukur nilai kekerasan suatu material, yaitu:

1. Pengujian kekerasan *brinell*
2. Pengujian kekerasan *rockwell*
3. Pengujian kekerasan *vickers*
4. Pengujian kekerasan *knoop*

Untuk memahami perbedaan prinsip dan aplikasi dari masing-masing metode uji kekerasan, diperlukan perbandingan mengenai jenis indenter, bentuk jejak indentasi, serta formulasi penilaian kekerasan. Prinsip dasar pengujian *vickers* sama dengan uji *brinell*, perbedaannya penggunaan indenter intan yang berbentuk piramid beralas bujur sangkar dan sudut puncak antara dua sisi yang berhadapan 136° . Pengukuran diagonal segi empat lebih akurat dibandingkan pengukuran pada lingkaran. Pengujian ini dapat dilakukan untuk spesimen tipis hingga 0,006 inci. Nilai kekerasan yang diperoleh akurat hingga nilai 1300 (setara dengan *Brinell* 850). Indenter relatif tidak menjadi rata seperti pada *Brinell*. Beban yang digunakan pada uji *vickers* antara 1 hingga 120 kgf. Penggunaan beban yang berbeda akan tetap menghasilkan nilai kekerasan yang sama untuk material yang sama. Nilai kekerasan *vickers* dapat dihitung dengan persamaan:

$$HV = 2P \sin(\alpha/2)/d^2 = 1.8544P/d^2 \quad (2.3)$$

Dimana:

HV= *Hardness Vickers*.

P = Beban (kgf).

α = Sudut 2 sisi yang berhadapan pada indenter.

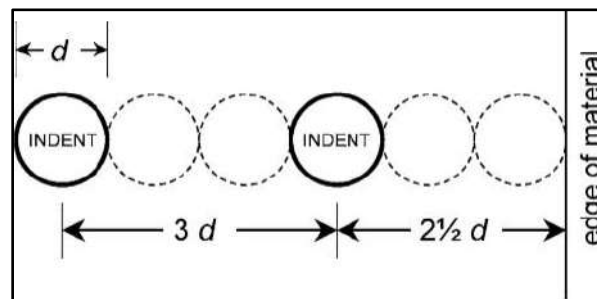
d^2 = Diagonal indentasi rata-rata (mm).

Berikut adalah prinsip kerja pengujian kekerasan metode *vickers* terdapat pada Gambar 2.17 berikut ini.



Gambar 2. 17 Prinsip Uji Vickers (Munir, 2019)

Jarak minimal antar indentasi pada permukaan benda uji minimal 3x diameter atau diagonal tapak tekan, sedangkan jarak minimum indentasi dengan tepi benda uji adalah 2,5 kali diameter atau diagonal tapak tekan. secara skematik dapat dilihat pada Gambar 2.18 di bawah ini.



Gambar 2. 18 Ketentuan Jarak Indentasi Minimal (Munir, 2019)

2.7 Peneliti Sebelumnya

Pada penelitian tugas akhir ini, dilakukan kajian dan pelaksanaan penelitian yang berfokus pada pengaruh *interpass temperature* dalam proses pengelasan, khususnya pada material *stainless steel* yang banyak digunakan dalam aplikasi industri. *Interpass temperature* merupakan salah satu parameter penting dalam pengelasan *multipass* karena berpengaruh langsung terhadap sifat mekanik, struktur mikro, serta ketahanan korosi dari sambungan las yang dihasilkan. Pengendalian *interpass temperature* yang tidak tepat dapat menyebabkan berbagai permasalahan, seperti perubahan mikrostruktur yang tidak diinginkan, penurunan sifat mekanik, hingga meningkatnya kecenderungan terjadinya sensitisasi dan korosi antar-butir.

Oleh karena itu, untuk memperkuat landasan teori dan arah penelitian, diperlukan telaah terhadap jurnal ilmiah dan tugas akhir terdahulu yang telah membahas topik serupa. Studi-studi sebelumnya memberikan gambaran mengenai

variasi *interpass temperature* yang digunakan, metode pengelasan yang diterapkan, serta hasil pengujian yang dilakukan untuk mengevaluasi kualitas sambungan las. Selain itu, hasil penelitian terdahulu juga menjadi acuan dalam menentukan batasan parameter penelitian, metode pengujian yang relevan, serta pendekatan analisis data yang digunakan dalam penelitian ini. Berikut adalah jurnal / tugas akhir yang relevan untuk penelitian ini, pada Tabel 2.9 dibawah ini.

Tabel 2. 9 Jurnal/ Tugas Akhir Peneliti Terdahulu

No	Nama	Judul	Hasil/Kesimpulan
1.	(Prayoga, Sandy Firdausi, 2021)	Analisis Variasi <i>Interpass Temperature</i> Pada Pengelasan Material <i>Bisplate 400</i> Dengan Proses Smaw Terhadap Struktur Mikro Dan Sifat Mekanik.	Hasil pengujian kekerasan pada variasi <i>interpass temperature</i> 70 °C sampai 200 °C, menunjukkan semakin tinggi <i>interpass</i> maka nilai kekerasan semakin menurun. Hal tersebut berbanding terbalik dengan hasil pengujian ketangguhan . Hasil pengujian mikro menunjukkan semakin tinggi <i>interpass temperature</i> yang digunakan maka menghasilkan struktur yang lebih merata pada hasil pengelasan.
2.	(Saputra, Hadimen, 2020)	Analisis Variasi <i>Interpass Temperature</i> Pengelasan Material <i>Heavy Plates S460</i> Dengan Proses Pengelasan Smaw Terhadap Kekerasan.	Hasil nilai kekerasan tertinggi didapat di suhu 150 °C dengan nilai rata-rata yaitu 217.23 HVN di <i>Fusion Line</i> , dan 233.84 HVN di <i>Weld Metal</i> . Temperatur <i>interpass</i> yang semakin tinggi memiliki laju pendinginan yang lebih rendah dibandingkan dengan temperatur <i>interpass</i> yang lebih rendah, dimana temperatur <i>interpass</i> yang lebih besar akan memungkinkan lebih banyak waktu bagi spesimen untuk mendingin ke suhu yang diperlukan untuk pengelasan berikutnya.

3.	(Linangkung, 2023)	Analisis Perbandingan <i>Interpass Temperature</i> <i>Stainless Steel</i> 304 Dengan Proses Las FCAW terhadap pembuatan kurva DAC dan Nilai Kekerasan	berdasarkan hasil penelitian dengan variasi <i>interpass temperature</i> , pengamatan struktur mikro menunjukkan bahwa peningkatan <i>interpass temperature</i> menyebabkan terbentuknya presipitasi karbida krom pada daerah <i>Heat Affected Zone</i> (HAZ). Kondisi ini terjadi akibat akumulasi panas dan waktu tinggal material yang lebih lama pada rentang suhu sensitisasi, sehingga memungkinkan difusi atom karbon dan krom untuk membentuk senyawa $Cr_{23}C_6$ di sepanjang batas butir. Keberadaan presipitasi karbida krom tersebut mengindikasikan terjadinya fenomena sensitisasi yang berpotensi menurunkan kualitas metalurgi daerah HAZ.
4.	(Pangestu,Kandaga Wigung, 2023)	Analisis Pengaruh Variasi Arus Dan <i>Interpass</i> Pengelasan Gtaw Terhadap <i>Hardness,Mettalography</i> , Dan <i>Ferite Content</i> Pada Material <i>Stainless Steel Pipe</i> Type 06cr19ni10.	Pada daerah <i>weld metal</i> terjadi kenaikan secara signifikan dengan nilai kekerasan dengan <i>interpass</i> lebih tinggi untuk spesimen dengan arus 86A dan <i>interpass</i> 450 °C memiliki nilai tertinggi sebesar 209,1 HVN dan nilai terendah pada variasi arus 75A dan <i>interpass</i> 150 °C sebesar 196,8 HVN namun untuk besar nilai kenaikan kekerasan yang didapat tidak terlalu jauh antar spesimen. Pengujian <i>mettalogprahy</i> di dapat untuk macro tidak adanya terjadi cacat seperti cacat <i>slag inclusion, incomplete penetration, incomplete fusion</i> atau cacat yang bisa ditemukan pada daerah pengelasan dan terlihat untuk

			pengelasan memiliki fusi dan penetrasi yang baik. Pada <i>micro</i> pada daerah <i>base metal</i> dan HAZ untuk variasi arus yang lebih tinggi terjadi pemuaihan dan pengkasaran butir yang ini di sebabkan perbedaan besar arus yang digunakan. Pada daerah HAZ terjadi penebalan pada batas butir yang pada variasi interpass 450 °C yang dikarenakan presepitasi karbida krom pada suhu 450 °C.
5.	(Ridlo,Muchammad Bustomi Irsyadur 2020)	Analisis Variasi <i>Interpass Temperature</i> Pada Pengelasan <i>Armor Steel Bisplate 500</i> Menggunakan Proses Pengelasan Gmaw.	Menunjukan semakin tinggi interpass maka nilai kekerasan semakin menurun, hal tersebut berbanding terbalik dengan hasil pengujian ketangguhan. Hasil pengujian mikro menunjukan semakin tinggi <i>interpass temperature</i> yang digunakan maka menghasilkan struktur <i>acicular ferrite</i> yang lebih merata pada hasil pengelasan, sedangkan pada daerah fusion line menunjukan pertumbuhan butir kasar seiring dengan bertambahnya <i>temperature interpass</i> .
7.	(Muqsalmina et al., 2019)	Pengaruh interpass temperatur terhadap sifat mekanik proses pengelasan SMAW material <i>carbon steel SS400</i>	Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi temperatur interpas dapat mempengaruhi nilai kekuatan tarik suatu material hasil lasan. Nilai tegangan pada spesimen interpas 100 °C adalah sebesar 38,26 Kgf/mm ² . Nilai tegangan pada spesimen interpas 150 °C adalah sebesar 39,09 Kgf/mm ² . Nilai tegangan pada spesimen 200 °C adalah sebesar 37,37 Kgf/mm ² . Nilai tegangan tanpa perlakuan adalah sebesar 32,21 Kgf/mm ² .

8.	(Lee et al., 2015)	<i>Intergranular Corrosion Characteristics of Super Duplex Stainless Steel at various Interpass Temperatures</i>	Peningkatan <i>interpass temperature</i> juga dikaitkan dengan terbentuknya presipitasi fasa sekunder, seperti fasa sigma (σ) dan chi (χ), akibat lamanya waktu paparan material pada rentang temperatur kritis presipitasi. Presipitasi fasa tersebut menyebabkan terjadinya daerah defisiensi krom (<i>Cr-depleted zone</i>) di sekitar batas butir, yang melemahkan lapisan pasif kromium oksida. Akibatnya, hasil pengujian potensiodinamik menunjukkan kenaikan nilai <i>I_{corr}</i> dan penurunan ketahanan korosi secara keseluruhan. Fenomena ini menegaskan bahwa kontrol <i>interpass temperature</i> merupakan faktor penting dalam menjaga ketahanan korosi sambungan las <i>stainless steel</i>.
----	--------------------	--	---

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

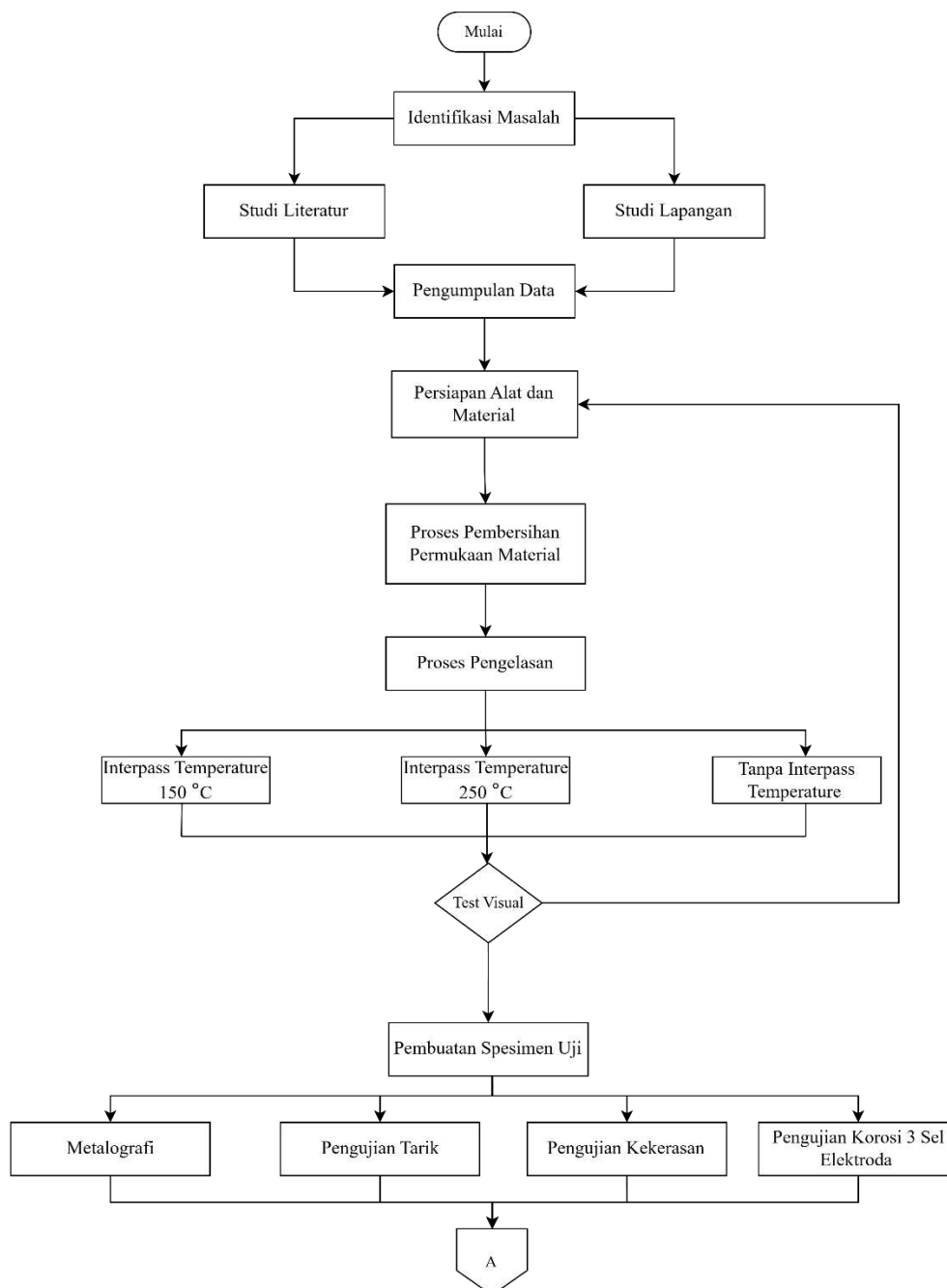
This page is intentionally left blank

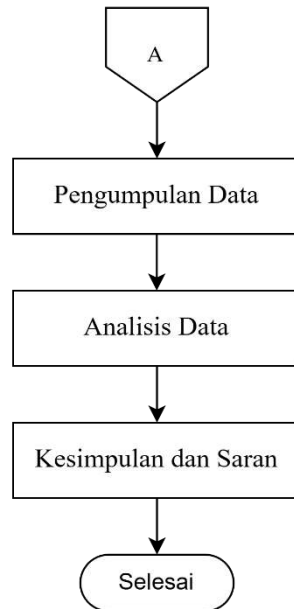
BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Proses penelitian tugas akhir ini dapat ditinjau dari diagram alir seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.1:





Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Identifikasi Masalah

Pengelasan kombinasi GTAW–SMAW pada material *stainless steel* SA-312 TP304 melibatkan siklus termal berulang yang sangat dipengaruhi oleh parameter proses, khususnya *interpass temperature*. *Interpass temperature* yang tidak terkontrol dapat menyebabkan akumulasi panas pada daerah logam las dan *Heat Affected Zone* (HAZ), sehingga memperlambat laju pendinginan dan memicu perubahan struktur mikro. Kondisi ini berpotensi menimbulkan pertumbuhan butir austenit serta presipitasi karbida krom (Cr_{23}C_6) pada batas butir, yang dikenal sebagai fenomena sensitisasi dan dapat menurunkan ketahanan korosi material *stainless steel* 304.

Selain itu, variasi *interpass temperature* juga berpengaruh terhadap perubahan struktur mikro, kekuatan tarik, dan distribusi kekerasan sambungan las. *Interpass temperature* yang tidak dikontrol dapat meningkatkan laju korosi dan menjadi titik awal terjadinya retak lelah akibat dari sensitasi, sebagaimana yang ditemukan pada kasus kegagalan pipa *stainless steel* 304 di lingkungan industri.

Oleh karena itu, diperlukan kajian eksperimental untuk menganalisis pengaruh variasi interpass temperature terhadap sifat mekanik, laju korosi, dan struktur mikro sambungan las SA-312 TP304.

3.3 Studi Literatur

Studi Literatur mencakup pencarian dan pengumpulan referensi dari standar, jurnal, *handbook*, dan sumber lainnya untuk dijadikan acuan dalam penelitian. Penulis Juga meneliti teori-teori pendukung yang relevan dengan penelitian, memastikan bahwa penelitian ini didasarkan pada referensi yang ada. *Interpass temperature* merupakan parameter penting dalam proses pengelasan karena berpengaruh langsung terhadap masukan panas, laju pendinginan, serta siklus termal yang dialami material. *Interpass temperature* yang terlalu tinggi dapat memperpanjang waktu material berada pada rentang suhu sensitisasi (450–900 °C), sehingga meningkatkan risiko presipitasi karbida krom (Cr_{23}C_6) di batas butir yang menyebabkan penurunan ketahanan korosi antarbutir pada *stainless steel* austenitik seperti SA-312 TP304 (Mohammed et al., 2017; Kim et al., 2024). Sebaliknya, *interpass temperature* yang terlalu rendah dapat menyebabkan laju pendinginan yang cepat, memicu timbulnya tegangan sisa serta perubahan mikrostruktur yang tidak diinginkan, yang pada akhirnya dapat menurunkan ketangguhan dan kualitas sambungan las. Oleh karena itu, pengendalian *interpass temperature* umumnya tidak melebihi 150 °C diperlukan untuk menjaga kestabilan mikrostruktur, sifat mekanik, dan ketahanan korosi hasil pengelasan.

Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan bahwa variasi *interpass temperature* berpengaruh terhadap sifat mekanik dan mikrostruktur hasil las. (Prayoga Sandy Firdausi, 2021) melaporkan bahwa peningkatan *interpass temperature* menyebabkan penurunan nilai kekerasan namun menghasilkan struktur mikro yang lebih merata dan ketangguhan yang lebih baik. (Muqsalmina et al., 2019) menunjukkan bahwa *interpass temperature* 150 °C menghasilkan kekuatan tarik tertinggi dibandingkan variasi lainnya, sedangkan *interpass temperature* yang lebih tinggi cenderung menurunkan nilai kekuatan tarik. Sementara itu, (Linangkung, 2023) menemukan bahwa peningkatan *interpass*

temperature menyebabkan terbentuknya presipitasi karbida krom pada daerah HAZ akibat akumulasi panas yang berlebihan, yang menjadi indikator terjadinya sensitisasi. Temuan ini diperkuat oleh kasus kegagalan *tube stainless steel 304* akibat korosi batas butir yang dipicu oleh siklus termal pengelasan yang tidak terkendali (Sunandrio, 2015).

3.4 Studi Lapangan

Studi lapangan dilakukan melalui pengamatan, wawancara, dan pencarian informasi terkait masalah yang ada. Dalam penelitian ini, fokusnya adalah proses pengelasan dilapangan dengan masalah *interpass temperature* yang tidak dijaga pada saat proses pengelasan material *stainless steel* akibat tuntutan pekerjaan yang harus cepat selesai.

3.5 Pengumpulan Data

Studi Pengumpulan data meliputi kebutuhan data seperti WPS (*Welding Procedure Specification*), sertifikat material (*Mill Certificate*), dan dasar teori yang didapat di jurnal penelitian, standar dan *code*, serta dasar teori lain yang digunakan sebagai acuan dalam penelitian.

3.6 Persiapan Penelitian

Persiapan untuk melaksanakan penelitian ini meliputi hal-hal yang diperlukan dalam pelaksanaan penelitian ini, yang bertujuan untuk memudahkan peneliti dalam melaksanakan penelitian. Adapun alat dan bahan yang dibutuhkan sebagai berikut:

3.6.1 Persiapan alat

Dalam penelitian ini membutuhkan alat yang mendukung dalam proses pengerjaan agar mendapatkan hasil yang diharapkan. Peralatan yang digunakan antara lain :

1. *Equipment* las SMAW - GTAW. Ditunjukkan pada Gambar 3.2 berikut ini.



Gambar 3. 2 *Equipment* Las a) Mesin GTAW-SMAW dan b) Tabung Gas Argon

2. Peralatan ukur
 - a. *Welding gauge*
 - b. *Digital waterpass*
3. Peralatan pendukung
 - a. *Tang ampere*
 - b. *Thermogun*
 - c. Sikat Baja
 - d. Mata gerinda *stainless steel*
 - e. *Brush*
4. Alat pelindung diri
 - a. Apron
 - b. Sarung tangan las
 - c. Topeng Las
 - d. Sepatu *safety*

3.6.2 Persiapan bahan

Pada penelitian ini dijabarkan bahan yang akan digunakan dalam proses penelitian meliputi material, *filler metal*, serta gas pelindung. Adapun spesifikasi serta dimensi bahan yang digunakan seperti Gambar 3.3 dan penjelasan dibawah berikut :



Gambar 3. 3 a). *Filler Metal* ER308L, b). Elektroda E308-16, c). Spesimen *Stainless Steel* SA-312 TP304, dan d). *Argon High Purity* 99,98%

1. Material

Berikut spesifikasi material yang digunakan dalam penelitian ini, dijelaskan dibawah ini.

- Material : SA-312 TP304
- Bentuk : Pipa
- Dimensi : 6" Sch.40, (L= 150 mm, *per piece*)
- Ketebalan : 7,11 mm
- Jumlah : 3 *test piece*

2. *Filler metal*

Berikut spesifikasi *filler metal* yang digunakan dalam penelitian ini, ditunjukkan spesifikasi dibawah ini.

- Tipe ; ER308L
- SFA *Spec.* : 5,9
- Diameter : 2,4 mm

3. Elektroda

Berikut spesifikasi elektroda yang digunakan dalam penelitian ini, ditunjukkan spesifikasi dibawah ini.

- Tipe : E308-16
- SFA Spec. : 5,4
- Diameter : 2,6 mm

4. Gas pelindung

Berikut *shielding gas* dan *backing gas* argon yang digunakan dalam proses pengelasan *Gas Tungsten Arc Welding*, dijelaskan dibawah ini.

- *Shielding gas* : Argon 99,98%
- *Backing gas* : Argon 99,98%

3.7 Parameter Pengelasan

Parameter pengelasan yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada prosedur pengelasan yang ada. Dari proses pengelasan yang dilakukan, didapatkan data parameter pengelasan seperti yang dapat dilihat pada Tabel 3.1 berikut ini.

Tabel 3. 1 Parameter Pengelasan

<i>Weld Layer</i>	<i>Class</i>	<i>Diameter (mm)</i>	<i>Ampare (A)</i>	<i>Voltage (V)</i>	<i>Travel speed (mm/min)</i>	<i>Heat Input (Kj/mm)</i>
1 (<i>Root</i>)	ER308L	2,4	110-180	12-14	65 min	1.27
2 (<i>Fill</i>)	E308-16	2,6	70-100	22-27	75 min	1.54
3 (<i>Capping</i>)	E308-16	2,6	70-100	22-27	75 min	1.77

3.8 Proses Pengelasan

Setelah mempersiapkan alat dan bahan yang diperlukan. Tahap selanjutnya adalah proses pengelasan. Proses pengelasan dilakukan dengan menggunakan proses las GTAW kombinasi SMAW. Proses ini mengacu pada WPS yang digunakan. Berikut langkah-langkah yang dilakukan dalam proses pengelasan.

1. Menyiapkan spesimen yang akan dilas.
2. Penandaan spesimen, dilakukan agar saat proses pengelasan prosedur yang digunakan sesuai tujuan awal, untuk menghindari kesalahan memasukkan variasi pada material. Dengan itu untuk *variasi interpass* 150 °C diberi kode A1, untuk *variasi interpass temperature* 250 °C diberi kode A2, dan untuk

variasi tanpa *interpass temperature* diberi kode A3 seperti pada Tabel 3.2 dan Gambar 3.4 kodefikasi spesimen uji dibawah ini.



Gambar 3. 4 Kodefikasi Spesimen Uji

Tabel 3. 2 Kodefikasi Spesimen Uji

Spesimen	Variasi <i>Interpass Temperature</i>
A1	<i>Interpass Temperature 150 °C</i>
A2	<i>Interpass Temperature 250 °C</i>
A3	Tanpa <i>Interpass Temperature</i>

3. Menyiapkan *equipment* las GTAW dan mengatur parameter sesuai dengan WPS yang digunakan yang ada pada Tabel 3.1 diatas.
4. Melakukan pembersihan dan pengecekan dimensi material sebelum dilakukan proses pengelasan. Terlihat pada Gambar 3.5 dibawah ini.



Gambar 3. 5 Pengecekan Dimensi

5. Melakukan *tack weld* sesuai dengan Gambar 3.6 *Joint Design* yang telah ditentukan.



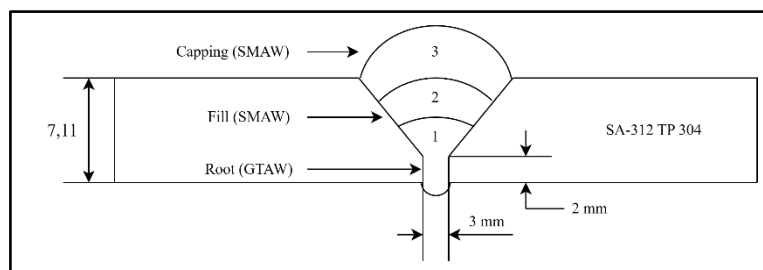
Gambar 3. 6 Join Desain *Grove* dan *Root*

6. Memasang *backing gas* ke dalam rongga pipa dan menutupnya dengan spon dan solasi kertas seperti Gambar 3.7 dibawah ini.



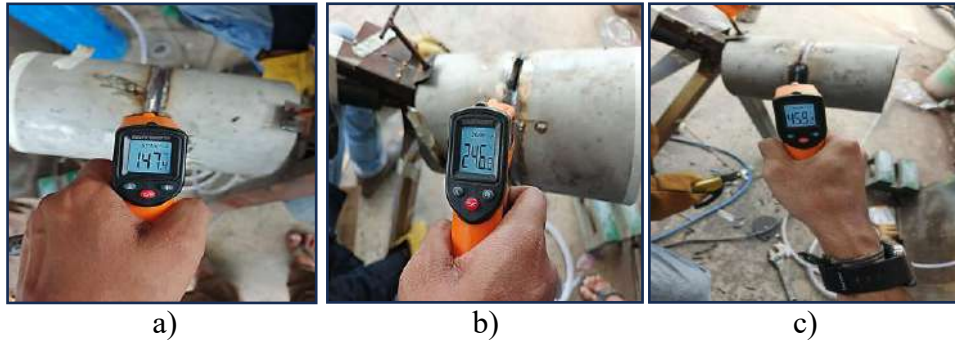
Gambar 3. 7 Proses Pemasangan Spon untuk *Backing Gas*

7. Menyiapkan *filler metal* ER308L diameter 2,4 mm untuk akar las dan elektroda E308-16 diameter 2,6 untuk *root*, *fill*, dan *capping*. Berikut Gambar 3.8 dibawah ini.



Gambar 3. 8 *Root*, *Fill*, dan *Capping*

8. Melakukan proses pengelasan sesuai parameter pengelasan.
9. Pengecekan *interpass Temperature* sesuai kodefikasi spesimen uji terlihat pada Gambar 3.9 dibawah berikut.

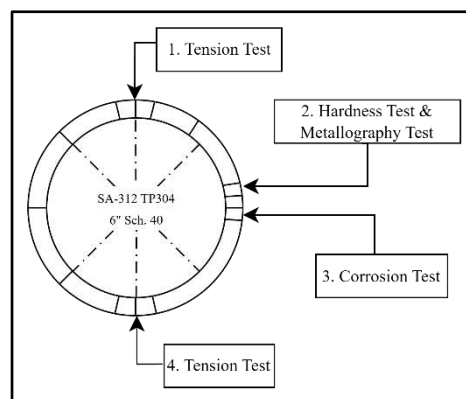


Gambar 3. 9 a). *Interpass Temperature* 150 °C, b) *Interpass Temperature* 250 °C, c). Tanpa *Interpass Temperature* (Sumber : Dokumen Pribadi)

10. Lakukan pembersihan material dan cek visual pengelasan dibagian *root*, *fill* maupun *capping* sesuai ketentuan ASME *Section IX*. Ulangi proses hingga semua specimen tersambung.

3.9 Cutting Plan

Setelah proses pengelasan dan pengecekan visual selesai maka dilakukan tahap selanjutnya adalah persiapan pembentukan spesimen uji sesuai dengan kebutuhan masing-masing pengujian, yaitu *tensile test*, analisis metalografi, dan pengujian laju korosi. Adapun pengambilan dan penentuan *cutting plan* spesimen uji mengacu pada Gambar 3.10 sesuai dengan standar (*ASME Boiler and Pressure Vessel Code: Section IX*, 2025).



Gambar 3. 10 *Cutting Plan*

3.10 Pengujian Spesimen

Proses pengujian yang dilakukan meliputi pengujian tidak merusak (*Nondestructive Test/NDT*) dan pengujian merusak (*Destructive Testing/DT*) untuk mengetahui sifat mekanik dari hasil pengelasan serta material dasar (*base material*). Sebelum dilakukan pengujian DT, rencana pemotongan (*cutting plan*) harus ditentukan terlebih dahulu sebagai acuan, agar material dapat dipotong dengan ukuran spesimen uji yang sesuai dengan standar yang digunakan. Adapun pengujian yang dilakukan :

1. Uji Visual
2. Uji Metalografi
3. Uji Tarik
4. Uji Kekerasan *vickers*
5. Uji Laju Korosi Metode Potensiotat Tiga Sel Elektroda (Tafel)

3.10.1 Pengujian visual

Visual test dilakukan untuk mengidentifikasi cacat terbuka pada permukaan suatu pengelasan. Cacat yang sering terjadi dipermukaan antara lain *porosity*, *undercut*, *underfil*, *crack*, dan sebagainya. Pengujian visual pada setiap standar memiliki standar keberterimaan yang berbeda. Pada penelitian ini standar keberterimaan yang di aplikasikan untuk uji visual mengacu pada standard (ASME *SECTION IX*, 2025) menurut ASME *Section IX QW-194*, hasil uji visual pada kupon uji kualifikasi las dinyatakan diterima apabila:

1. Tidak terdapat retak,
2. Sambungan menunjukkan penetrasi penuh (*complete joint penetration*),
3. Terjadi peleburan sempurna antara *weld metal* dan *base metal* serta antar lapisan las.

Apabila salah satu dari ketentuan tersebut tidak terpenuhi, maka hasil uji visual dinyatakan tidak diterima.

3.10.2 Pengujian metalografi

Pengujian metalografi dilakukan untuk menganalisis perubahan struktur makro dan mikro setelah proses pengelasan untuk mengetahui kedalaman penetrasi

dan perubahan struktur mikro setelah dilakukan variasi *interpass temperature*. Akan tetapi pengujian kali ini menggunakan pengujian mikro saja sebanyak 3 spesimen uji yang identik digunakan secara bergantian untuk pengujian. Spesimen kemudian diuji secara mikro menggunakan mikroskop dengan perbesaran 200x dan 500x. Adapun proses pengujian metalografi alat dan bahan yang digunakan sebagai berikut:

1. Spesimen uji
2. Perlengkapan uji :
 - a. Mesin poles
 - b. Kertas gosok
 - c. Kain bludru
 - d. Serbuk alumina
 - e. Pengering (*dryer*)
 - f. Mikroskop
3. Perlengkapan etsa:
 - a. HCL
 - b. HNO₃
 - c. Alkohol

Langkah-langkah dalam pengujian metalografi adalah sebagai berikut:

1. Pemotongan spesimen uji

Setelah proses pengelasan, spesimen dipotong menggunakan gergaji, bukan gerinda potong untuk menghindari masukan panas yang tidak diinginkan. Dimensi spesimen yang dipotong adalah 40 x 30 x 7,11 mm. Berikut spesimen metalografi pada Gambar 3.11 dibawah ini.



Gambar 3. 11 Spesimen Uji Metalografi
(Sumber : Dokumen Pribadi)

2. *Polishing*

Proses *polishing* bertujuan meratakan permukaan spesimen untuk kejelasan pengamatan mikro. Amplas spesimen dari grit 80 (kasar) hingga grit 2000 (halus), lalu poles menggunakan kain bludru dengan serbuk alumina. Bersihkan spesimen dengan alkohol untuk menghilangkan kotoran. Seperti Gambar 3.12 dibawah ini.



Gambar 3. 12 Proses Pemolesan Spesimen Uji
(Sumber : Dokumen Pribadi)

3. *Oxalid acid etching*

Proses etching dilakukan untuk membedakan *weld metal*, HAZ, dan *base metal*. Gunakan campuran HNO_3 dan HCL dengan konsentrasi 2:1 untuk larutannya sesuai standar.

4. Pengamatan mikro

Amati spesimen dengan mikroskop pada perbesaran 200x dan 500x untuk bagian *weld metal*, TZ, dan *base metal*. Sesuaikan cahaya dan fokus mikroskop, dan dokumentasikan sesuai Gambar 3.13 dibawah ini.



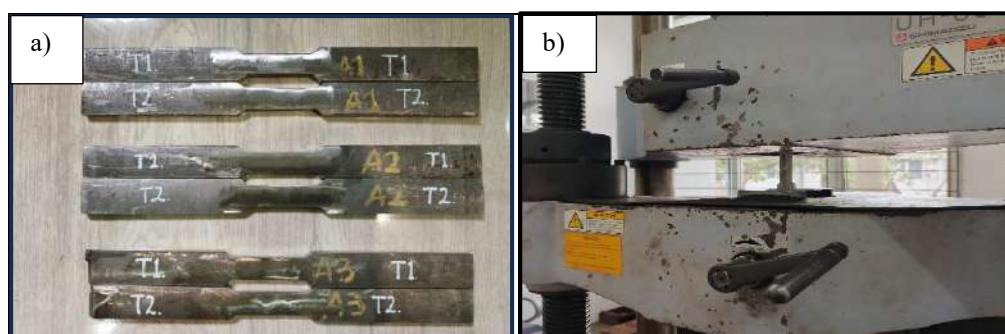
Gambar 3. 13 Pengamatan Mikro (Sumber : Dokumen Pribadi)

3.10.3 Pengujian tarik

Tensile test memberikan informasi mengenai kekuatan dan keuletan material ketika dikenai tegangan tarik satu arah (*uniaxial tensile stress*). Informasi yang diperoleh dari pengujian ini dapat dimanfaatkan untuk perbandingan antar material, pengembangan paduan, pengendalian mutu (*quality control*), serta perancangan teknik dalam kondisi tertentu. Namun demikian, hasil *Tensile test* yang diperoleh dari spesimen yang dimesin dengan dimensi standar dan diambil dari bagian tertentu suatu komponen atau material tidak selalu sepenuhnya merepresentasikan sifat kekuatan dan keuletan dari produk akhir secara keseluruhan, maupun perilaku material tersebut saat digunakan dalam berbagai kondisi lingkungan layanan (*in-service conditions*).

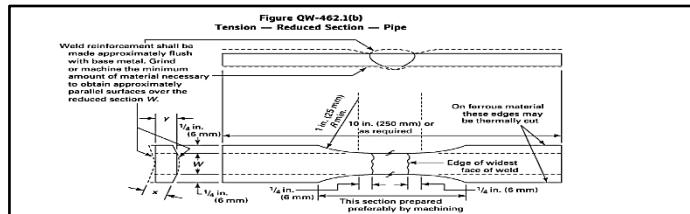
Meskipun demikian, metode *tensile test* ini dinilai memadai dan dapat diterima sebagai uji penerimaan (*acceptance test*) untuk pengiriman komersial. Metode pengujian ini telah digunakan secara luas dalam praktik industri dan perdagangan untuk tujuan tersebut (ASTM E8, 2025). Berikut merupakan langkah-langkah dalam melakukan dan pengambilan data *tensile test*:

1. Menentukan tujuan pengujian tarik untuk kualifikasi WPS atau kualifikasi juru las sesuai ASME BPVC: *Section IX*, 2025.
2. Menyiapkan kupon uji las yang telah dilas sesuai variabel esensial pada WPS yang akan dikualifikasi.
3. Melakukan pemeriksaan visual awal pada kupon las untuk memastikan tidak terdapat cacat permukaan yang signifikan.
4. Memotong kupon las menjadi spesimen uji tarik sesuai jumlah dan orientasi yang dipersyaratkan ASME BPVC: *Section IX*, 2025 (*longitudinal* atau *transverse*) seperti Gambar 3.14 dibawah ini.



Gambar 3. 14 a). Spesimen Uji Tarik dan b). Proses Pengujian Uji Tarik
(Sumber : Dokumen Pribadi)

5. Membentuk spesimen uji tarik dengan mesin frais atau mesin bubut tanpa merusak daerah las, HAZ, dan *base metal*. Bentuk spesimen pada Gambar 3.15 sesuai standard ASME IX dibawah ini.



Gambar 3. 15 *Rectangular Tension Test Spesimen* (ASME Section IX)

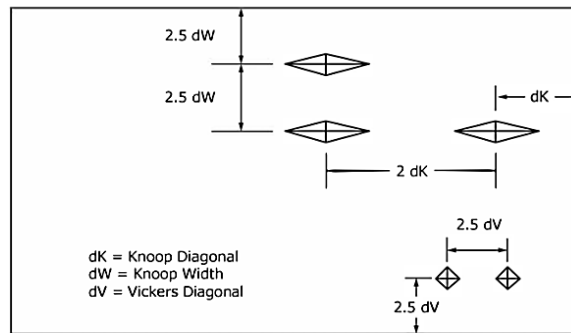
6. Memastikan permukaan spesimen halus dan bebas dari takikan, goresan dalam, atau cacat akibat pemesinan.
7. Mengukur dan mencatat dimensi awal spesimen (lebar, tebal, dan luas penampang) untuk perhitungan tegangan tarik.
8. Memasang spesimen uji tarik pada mesin uji tarik dengan penjepitan yang lurus dan sejajar sumbu pembebanan.
9. Memberikan beban tarik secara kontinu dan bertahap sampai spesimen mengalami patah.
10. Mencatat nilai beban maksimum yang tercapai selama pengujian.
11. Menghitung nilai *tensile strength* berdasarkan beban maksimum dan luas penampang awal spesimen.
12. Mengamati dan mencatat lokasi patah spesimen (*weld metal*, HAZ, atau *base metal*).
13. Membandingkan nilai *tensile strength* hasil pengujian dengan nilai minimum *tensile strength base metal* yang dipersyaratkan.
14. Menentukan hasil pengujian lulus apabila nilai *tensile strength* memenuhi atau melebihi persyaratan dan patahan tidak disebabkan oleh cacat las yang tidak dapat diterima.
15. Mendokumentasikan seluruh hasil pengujian tarik sebagai bagian dari laporan.

3.10.4 Pengujian kekerasan

Kekerasan merupakan istilah yang sulit didefinisikan secara tepat, setiap bidang ilmu dapat memberikan definisinya sendiri-sendiri sesuai dengan persepsi dan keperluannya. Oleh karena itu pengujian kekerasan ada bermacam-macam tergantung konsep yang dianut. Dalam engineering yang menyangkut logam kekerasan dinyatakan sebagai kemampuan untuk menahan indentasi/penetrasi/abrasi atau dengan definisi lain adalah ketahanan logam terhadap deformasi plastis. Ada beberapa cara pengujian kekerasan yang standar untuk menguji kekerasan logam yaitu: pengujian *Brinell*, *Rockwell*, *Vickers*, dll. Pada dasarnya pengujian kekerasan dilakukan dengan menekan sebuah indenter yang lebih keras sifatnya dari bahan uji dengan beban dan jangka waktu tertentu (10-15 detik), bekas tapak tekan pada permukaan benda uji diukur untuk menentukan nilai kekerasan dengan cara gaya tekan dibagi luas tapak tekan. Ada pengujian yang nilai kekerasan langsung dapat dilihat pada dial indicator. Pada penelitian ini, pengujian kekerasan dilakukan menggunakan metode *vickers* dengan prosedur yang mengacu pada standar (ASTM E92, 2023). Metode ini menggunakan gaya tekan antara 1 kgf hingga 120 kgf. Berikut adalah prosedur pengujian kekerasan *vickers* berdasarkan (ASTM E92, 2023).

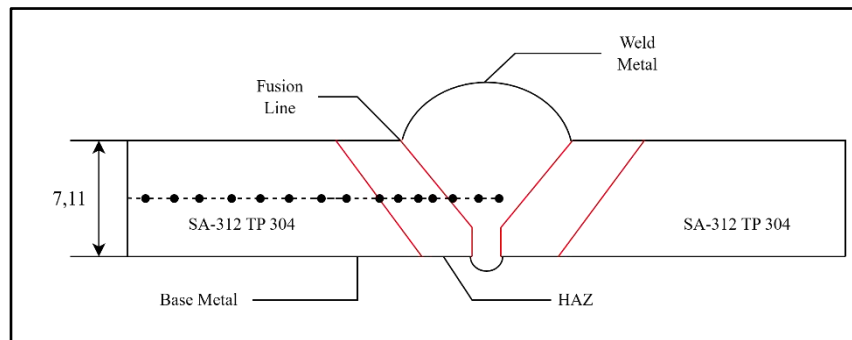
- a. *Magnitude of test force*, besarnya gaya yang dikenakan pada spesimen yang biasanya digunakan berkisar 1 kgf sampai dengan 120 kgf, tergantung dari *requirement* pengujian.
- b. *Application of test force*, pemberhentian gaya yang dikenakan pada specimen benda uji harus lembut tanpa ada getaran yang tiba tiba. Dan waktu pemberhentian *force* harus sampai 15 detik. Kecuali tergantung dari *specification hardness test*.

- c. *Spacing of indentation*, center dari jejak sebuah penekanan indenter piramida intan dengan besar sudut antar permukaan piramida intan yang saling berhadapan adalah 136° , untuk jarak minimum titik indentasi dapat dilihat pada Gambar 3.16 dibawah berikut.



Gambar 3. 16 Jarak Minimum Titik Indentasi
(Munir,2019)

Pengujian kekerasan dilakukan di Laboratorium Uji Bahan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya. Pengambilan titik untuk pengujian kekerasan dapat dilihat pada Gambar 3.17 dibawah ini.



Gambar 3. 17 Titik Pengujian Kekerasan

3.10.5 Pengujian laju korosi (Sel tiga elektroda)

Pada penelitian ini juga menggunakan pengujian laju korosi dengan tujuan untuk mengetahui besaran laju korosi pada material pipa *stainless steel* 304 yang mengalami pemanasan akibat *heat input* yang berlebih pada perbedaan ukuran gap dan arus pengelasan. Metode yang dilakukan pada uji korosi ini adalah sel 3 elektroda. Sel tiga elektroda adalah versi penyempurnaan dari sel korosi basah. Pengujian korosi dengan metode sel tiga elektroda sebelumnya spesimen harus

benar-benar bersih permukaannya. Pengujian korosi sel tiga elektroda mengacu pada standar (ASTM G5, 2013). Untuk larutan cairan menggunakan H_2SO_4 dengan konsentrasi 0,1 M. Hal ini dikarenakan *environment* benda uji rentan terpapar asam sulfat. Adapun alat dan bahan yang dibutuhkan dalam pengujian sel tiga elektroda sebagai berikut:

1. Sampel logam (komposisi kimia dan *density* diketahui)
2. Elektroda acuan *clomel* jenuh (Ag/AgCl)
3. Gelas kaca pengujian
4. Larutan H_2SO_4 98% dan *aquades*
5. Elektroda bantu (platina)

Adapun langkah-langkah kerja dari pengujian sel tiga elektroda dijelaskan sebagai berikut:

1. Persiapan spesimen

Menyiapkan material dengan dimensi $20 \times 30 \times 5$ mm ketentuan Lab. Lakukan pemolesan material dari grit 240 hingga 600 sesuai dengan ketentuan standar (ASTM G5, 2013). Pemolesan dilakukan untuk menghilangkan kotoran dan meratakan material. Berikut Gambar 3.18 spesimen uji yang sudah dipotong sesuai ketentuan lab.



Gambar 3. 18 Spesimen Uji Korosi (Sumber :Pribadi)

2. Membuat Larutan

Konsentrasi larutan mengacu pada standar (ASTM G5, 2013). Dengan perbandingan yang lebih kecil yaitu 0,1 M. Prosesnya mencampurkan 1 ml H_2SO_4 98% dan 100 ml *aquadest*. Ditunjukkan pada Gambar 3.19 berikut.



Gambar 3. 19 Pencampuran Larutan H_2SO_4 dan *Aquadest* (sumber : Pribadi)

3. Mengatur rangkaian kerja

Arus *Power supply* dialirkan menuju elektroda kerja, melalui elektroda bantu. Dimana elektroda kerja adalah sampel uji sedangkan elektroda bantu berupa platina.

4. Mengatur rangkaian uji

Pengukuran potensial dari elektroda kerja menggunakan elektroda acuan $Ag/AgCl$ yang dihubungkan dengan peralatan *potentiostat galvanostat autolab* (*CorrTest CS310*) melalui seperangkat komputer dengan *Nova Software*. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.20 berikut ini.



Gambar 3. 20 Pengujian Korosi Sel Tiga Elektroda (Fariz, 2024)

5. Pengujian

Masukan input potensial awal pada *NOVA software* kemudian *scan rate* sampai pada potensial akhir, dimana prinsipnya kutub negatif dari *power supply* dihubungkan dengan elektroda kerja, maka elektroda itu akan terpolarisasi sebagai katoda dan elektroda bantu pada kutub positif akan terpolarisasi sebagai anoda.

6. Hasil dan analisis

Terdapat hasil berupa kurva polarisasi dan data *corrosion rate* dari *Nova Software*. Hasil nilai *Icorr* (laju korosi) diperoleh melalui analisis grafik polarisasi *linier* menggunakan metode *ekstrapolasi tafel*. Metode ini mengukur laju korosi dengan menarik garis lurus pada daerah *linier* kurva polarisasi katodik (sisi kanan grafik) dan kurva polarisasi anodik (sisi kiri grafik). Titik perpotongan kedua garis tersebut menunjukkan nilai *Icorr*. Sedangkan nilai *Ecorr* (potensial korosi) diperoleh dari nilai potensial pada titik pertemuan garis garis lurus tersebut.

3.11 Analisis dan Pembahasan

Setelah mengumpulkan dan mengelompokkan semua data, langkah selanjutnya adalah melakukan analisis dengan membandingkan data tersebut dengan kriteria penerimaan yang sesuai dengan standar yang berlaku. Selain itu, juga akan dilakukan pembahasan mengenai dampak yang timbul akibat penerapan parameter pengujian, serta perbandingan terhadap perlakuan parameter yang digunakan dalam penelitian ini.

3.12 Kesimpulan

Pada tahap ini hasil yang diperoleh dari evaluasi yang telah dilakukan dan pada tahapan ini menjawab tujuan yang ingin dicapai dari penelitian yang telah direncanakan. Jika terdapat kelemahan atau keterbatasan yang mempengaruhi hasil penelitian, maka akan diberikan saran untuk meningkatkan kesesuaian dengan tujuan yang diharapkan.

BAB 4

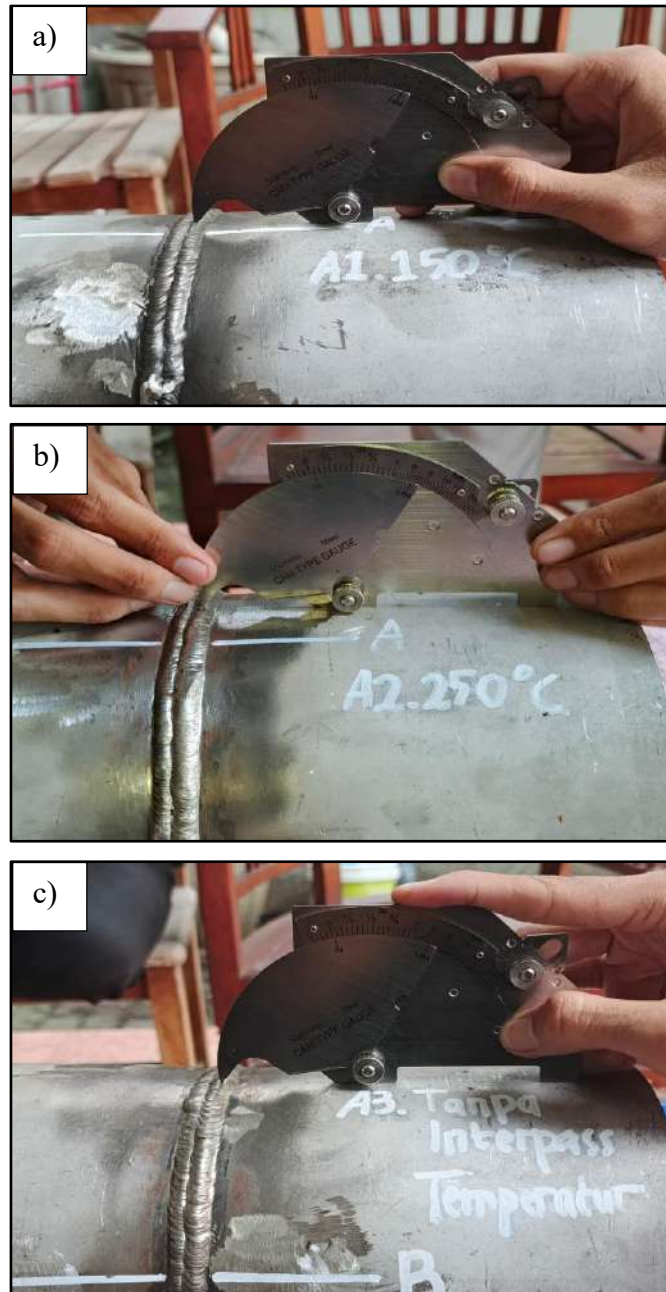
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian Visual

Pengujian visual merupakan salah satu metode *Non-Destructive Testing* (NDT) yang digunakan untuk mengidentifikasi cacat permukaan pada hasil pengelasan secara langsung tanpa merusak benda uji. Inspeksi visual umumnya menjadi tahapan awal dalam pemeriksaan kualitas sambungan las untuk memastikan bahwa hasil pengelasan telah memenuhi standar yang dipersyaratkan sebelum dilanjutkan ke pengujian lainnya. Metode ini mampu mendeteksi berbagai cacat permukaan seperti *undercut*, porositas, retak (*crack*), *incomplete fusion*, serta bentuk *weld bead* yang tidak seragam. Selain itu, inspeksi visual juga digunakan untuk mengevaluasi dimensi dan penampilan hasil las sebagai dasar penentuan apakah sambungan las memenuhi kriteria penerimaan (*acceptance criteria*). *Visual inspection* merupakan metode pemeriksaan yang paling umum digunakan dalam teknologi pengelasan karena mampu mengidentifikasi penyimpangan pada permukaan las, mengevaluasi dimensi hasil las, serta menjadi tahap awal untuk memastikan kualitas sambungan sebelum dilakukan pengujian lanjutan (Sulistiyono, 2025). Senada dengan hal tersebut peneliti terdahulu menyatakan bahwa *visual inspection* merupakan bagian dari pengujian NDT yang dilakukan dengan mengamati hasil las secara langsung menggunakan mata atau alat bantu sederhana sehingga menjadi metode inspeksi yang cepat, mudah, ekonomis, dan banyak diterapkan untuk mengevaluasi kualitas permukaan sambungan las sebelum dilakukan pengujian lainnya (Fajrin, 2024).

Pada penelitian ini, pengujian visual dilakukan terhadap sambungan las material *Stainless Steel* SA-312 TP304 dengan tiga variasi *interpass temperature*, yaitu tanpa *interpass temperature*, *interpass temperature* 150 °C, dan *interpass temperature* 250 °C. Pemeriksaan dilakukan secara langsung dengan pencahayaan yang memadai untuk mengamati kondisi permukaan hasil las serta mengidentifikasi

adanya indikasi cacat permukaan. Hasil pengujian visual pada proses pengelasan kombinasi GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*)–SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*) dengan variasi *interpass temperature* tersebut ditunjukkan pada Gambar 4.1 dibawah ini.



Gambar 4. 1 Dokumentasi Hasil Tinggi Reinforcement a). Spesimen A1. *Interpass Temperature* 150 °C , b). Spesimen A2. *Interpass Temperature* 250 °C , dan c). Spesimen A3. Tanpa *Interpass Temperature*

Tabel 4. 1 Hasil Visual Report

Visual Report								
Material Stamp	Surface	Tinggi Reinforcement (mm)	Lebar (mm)	Defect				Result
				Crack	Porosity	Incomplate Fusion	Undercut	
A1	Capping	1,20	14	-	-	-	-	Acc
A2	Capping	1,25	14	-	-	-	-	Acc
A3	Capping	1,12	14	-	-	-	-	Acc

Sumber : Dokumen Pribadi



a). Interpass Temperature 150 °C



b). Interpass Temperature 250 °C



c). Tanpa Interpass Temperature

Gambar 4. 2 Hasil Pengujian Visual a). Spesimen A1, b). Spesimen A2, dan c). Spesimen A3

Pada Tabel 4.1 dan Gambar 4.2 pengujian visual yang dilakukan pada penelitian ini tidak terdapat indikasi cacat secara visual dari *specimens* dengan variabel *interpass temperature* 150 °C, *interpass temperature* 250 °C, dan tanpa *interpass temperature*. Hasil pengamatan visual dari variasi interpass 150 °C memiliki tinggi *reinforcement* sebesar 1,20 mm, *interpass temperature* 250 °C memiliki tinggi *reinforcement* sebesar 1,25 mm, dan tanpa *interpass temperature*

memiliki tinggi *reinforcement* sebesar 1,12 mm. Maka dari itu untuk pengujian visual yang mengacu pada standart ASME *Section 9* dengan hasil yang menunjukkan pada ketiga spesimen tidak ditemukan adanya retak (*Crack*), penetrasi tidak penuh, dan peleburan yang tidak sempurna antara *weld metal* dan *base metal* maka uji visual menurut ASME *Section IX QW-194*, hasil uji visual pada kupon uji las dinyatakan diterima atau *accepted* dan dilanjutkan pengujian *destructive test*.

4.2 Hasil Pengujian Tarik

Pengujian tarik dilakukan untuk mengetahui dan mengevaluasi kemampuan sambungan las dalam menahan beban tarik hingga mencapai titik kegagalan serta untuk menilai kualitas hasil pengelasan berdasarkan sifat mekaniknya. Pada penelitian ini, pengujian tarik dilakukan terhadap sambungan las hasil proses pengelasan GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) kombinasi SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*) pada material *stainless steel* SA-312 TP 304 dengan variasi *interpass temperature*, yaitu 150 °C, 250 °C, dan tanpa *interpass temperature* sebagai pembanding. Variasi *interpass temperature* dipilih karena berpengaruh terhadap siklus termal selama proses pengelasan yang dapat memengaruhi laju pendinginan, pertumbuhan butir, distribusi tegangan sisa, serta perubahan mikrostruktur pada daerah logam las (*weld metal*), daerah terpengaruh panas (*Heat Affected Zone/HAZ*), dan logam induk (*base metal*). Perubahan mikrostruktur tersebut pada akhirnya akan memengaruhi sifat mekanik sambungan las, khususnya nilai kekuatan tarik yang dihasilkan. Parameter utama yang diamati dalam pengujian ini adalah nilai kekuatan tarik maksimum atau *Ultimate Tensile Strength* (UTS), yaitu tegangan maksimum yang mampu ditahan spesimen sebelum mengalami patah. Hasil pengujian tarik untuk masing-masing variasi *interpass temperature* kemudian dibandingkan untuk mengetahui pengaruh *interpass temperature* terhadap kualitas dan performa mekanik sambungan las serta menentukan kondisi pengelasan yang menghasilkan kekuatan tarik paling optimal. Data hasil pengujian tarik pada sambungan las GTAW kombinasi SMAW dengan variasi *interpass temperature* 150 °C, 250 °C, dan tanpa *interpass temperature*

selanjutnya disajikan pada Tabel 4.2 sebagai dasar analisis pengaruh *interpass temperature* terhadap sifat mekanik material *stainless steel* SA-312 TP 304.

Tabel 4. 2 Hasil Pengujian Tarik

Spesiemen Uji Tarik			Yield Strength (Mpa)	Max. Strength (MPa)	Rata – rata (MPa)	Lokasi Patah
Nama Material	Interpass Temperature	Jumlah				
Stainless Steel SA-312 TP304	150 °C	T1	305,50	567,15	561,765	BM
		T2	288,63	556,38		BM
Stainless Steel SA-312 TP304	250 °C	T1	300,05	548,07	555,885	BM
		T2	306,83	563,70		BM
Stainless Steel SA-312 TP304	Tanpa Interpass Temperature	T1	297,98	556,82	556,78	BM
		T2	294,94	556,74		BM

Sumber : Dokumen Pribadi



Gambar 4. 3 Grafik hasil rata-rata pengujian kekuatan uji tarik maksimum pada proses pengelasan GTAW-SMAW dengan variasi *interpass temperature*, A1. *interpass temperature* 150 °C, A2. *interpass temperature* 250 °C dan A3. tanpa *interpass temperature* (Dokumen Pribadi)

Berdasarkan hasil pengujian dapat ditunjukkan pada Gambar 4.3 diketahui berdasarkan hasil pengujian tarik pada material *Stainless Steel* SA-312 TP 304 yang dilas menggunakan proses pengelasan GTAW-SMAW, dapat diketahui bahwa variasi *interpass temperature* memberikan hasil terhadap kekuatan tarik sambungan las. Pada penelitian ini digunakan tiga variasi, yaitu 150 °C, 250 °C, dan tanpa *interpass temperature*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa ketiga spesimen mendapatkan hasil diatas minimum kekuatan tarik material *stainless steel* yaitu 515 Mpa. Untuk *interpass temperature* 150 °C menghasilkan nilai kekuatan tarik rata-rata tertinggi, yaitu 561,765 MPa. Seluruh spesimen pada variasi ini mengalami

patah di *base metal* (BM), yang menunjukkan bahwa daerah las dan *Heat Affected Zone* (HAZ) memiliki kekuatan yang lebih tinggi dibandingkan logam induk.

Pada *interpass temperature* 250 °C, diperoleh kekuatan tarik rata-rata sebesar 555,885 MPa, yang merupakan nilai terendah. Penurunan kekuatan tarik ini disebabkan oleh laju pendinginan yang lebih lambat akibat suhu antar lapisan yang lebih tinggi. Kondisi tersebut meningkatkan akumulasi panas selama proses pengelasan sehingga tegangan sisa pada sambungan las menjadi lebih besar, yang berdampak pada penurunan kekuatan tarik. Sementara itu, spesimen tanpa *interpass temperature* memiliki kekuatan tarik rata-rata sebesar 556,780 MPa. Nilai ini masih lebih tinggi dibandingkan variasi 250 °C, namun tetap lebih rendah dibandingkan *interpass temperature* 150 °C. Hal ini menunjukkan bahwa pengendalian suhu antar lapisan las pada 150 °C mampu menghasilkan laju pendinginan yang lebih sesuai sehingga memberikan sifat mekanik yang lebih baik.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian terdahulu yang menunjukkan bahwa penggunaan *interpass temperature* 150 °C menghasilkan kekuatan tarik tertinggi dibandingkan variasi suhu *interpass* lainnya. Penelitian tersebut menjelaskan bahwa peningkatan *interpass temperature* menyebabkan laju pendinginan menjadi lebih lambat dan meningkatkan akumulasi panas selama proses pengelasan, sehingga kekuatan tarik sambungan las cenderung menurun. Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa *interpass temperature* 150 °C merupakan kondisi yang optimal karena menghasilkan kekuatan tarik tertinggi. Muqsalmina et al. (2019).

Hasil tersebut juga didukung oleh penelitian (Paulraj, 2015), yang menyatakan bahwa peningkatan *interpass temperature* dari 120 °C menjadi 160 °C menyebabkan penurunan kekuatan tarik sambungan las. Penurunan tersebut terjadi karena laju pendinginan yang lebih lambat memperpanjang waktu material berada pada temperatur tinggi, sehingga menghasilkan laju pendinginan yang lambat menghasilkan distribusi tegangan sisa (*residual stress*) yang berbeda dibandingkan pendinginan yang lebih cepat. Sebaliknya, penggunaan *interpass temperature* yang lebih rendah menghasilkan laju pendinginan yang lebih cepat sehingga transformasi

fasa berlangsung lebih terkendali dan pembentukan tegangan sisa pada sambungan las menjadi lebih rendah, sehingga kekuatan tarik yang diperoleh lebih tinggi.

Hasil tersebut memiliki kecenderungan yang sama dengan penelitian ini, di mana variasi *interpass temperature* 150 °C menghasilkan kekuatan tarik rata-rata tertinggi sebesar 561,765 MPa, sedangkan pada *interpass temperature* 250 °C terjadi penurunan menjadi 555,885 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa pengendalian *interpass temperature* pada 150 °C mampu menjaga keseimbangan antara masukan panas dan laju pendinginan sehingga transformasi fasa selama pengelasan berlangsung lebih stabil serta distribusi tegangan sisa pada sambungan las lebih terkendali. Oleh karena itu, *interpass temperature* 150 °C merupakan kondisi yang paling optimal pada penelitian ini karena menghasilkan kekuatan tarik tertinggi dibandingkan variasi lainnya.

4.3 Hasil Pengujian Kekerasan

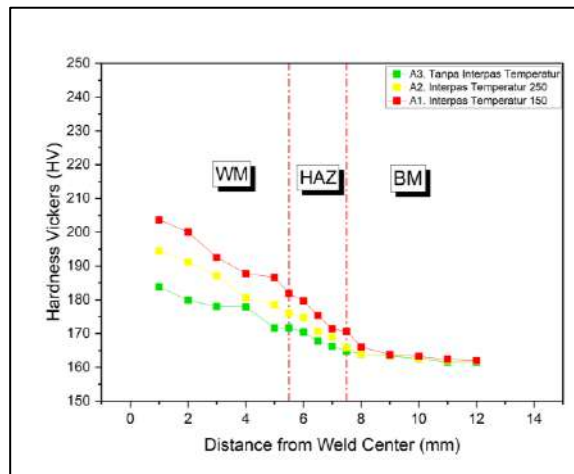
Selanjutnya akan dilakukan analisis hasil pengujian kekerasan vickers, dimana pengujian kekerasan ini dilakukan untuk mengetahui nilai kekerasan pada material di *base metal*, HAZ, dan *weld metal* dari proses pengelasan dan perlakuannya. Penelitian ini dilakukan pengujian kekerasan untuk mengetahui perbandingan nilai kekerasan pada spesimen uji variasi *interpass temperature* 150 °C, *interpass temperature* 250 °C, dan tanpa *interpass temperature*. Pada umumnya, beban yang digunakan pada uji *vickers* antara 1 hingga 120 kgf. Perubahan beban relatif tidak mempengaruhi hasil pengujian, penggunaan beban yang berbeda akan tetap menghasilkan nilai kekerasan yang sama untuk material yang sama. Pengujian kekerasan metode *vickers* dengan menggunakan indenter piramida intan dengan 10 kgf dalam waktu indentasi 15 detik. Pengujian kekerasan dilakukan pada seluruh daerah dengan total 15 titik indentasi dengan jarak indentasi pada *base metal*, HAZ, *weld metal* adalah 1 mm. Berikut adalah nilai dari pengujian kekerasan dari spesimen uji variasi *interpass temperature* 150 °C, *interpass temperature* 250 °C, dan tanpa *interpass temperature* ditunjukkan pada Tabel 4.3 dibawah ini.

Tabel 4. 3 Hasil Pengujian *Hardness Vickers*

Variasi	Daerah	Nilai Kekerasan				
		1	2	3	4	5
150 °C	<i>Base Metal</i>	162,00	162,38	163,25	163,78	164,08
250 °C		161,88	161,95	162,74	163,54	163,98
Tanpa Interpas Temperatur		161,59	161,61	162,67	163,39	163,95
Variasi	Daerah	Nilai Kekerasan				
150 °C	<i>HAZ</i>	170,71	171,4	175,42	179,80	181,91
250 °C		168,25	168,91	170,70	174,72	175,96
Tanpa Interpas Temperatur		164,81	166,24	167,75	170,45	171,70
Variasi	Daerah	Nilai Kekerasan				
150 °C	<i>Weld Metal</i>	186,67	187,80	192,55	200,55	203,69
250 °C		178,59	180,60	187,09	191,25	194,49
Tanpa Interpas Temperatur		171,65	177,87	177,98	179,93	183,80

Sumber : Dokumen Pribadi

Dari hasil pengujian kekerasan pada Tabel 4.3 nilai kekerasan pada spesimen A1 *interpass temperature* 150 °C memiliki nilai kekerasan paling tinggi dibanding spesimen *interpass temperature* 250 °C dan tanpa *interpass temperature*. Peningkatan *interpass temperature* disebabkan oleh pendinginan yang cepat menyebabkan material mengeras lebih cepat, meningkatkan nilai kekerasan (Fariz, 2024). Sebaliknya pada spesimen A3 tanpa *interpass temperature* menunjukkan nilai kekerasan yang rendah. Dalam hal ini, masukan panas yang tinggi menyebabkan pendinginan yang lambat, sehingga struktur mikro mencapai suhu yang lebih tinggi, mengakibatkan kekerasan yang lebih rendah (Fariz, 2024). Berikut adalah grafik hasil pengujian kekerasan *interpass temperature* 150 °C, *interpass temperature* 250 °C, dan tanpa *interpass temperature* pada Gambar 4.4 berikut ini.



Gambar 4. 4 Grafik Hasil Pengujian *Hardness Vickers* (Sumber : Pribadi)

Hasil pengujian kekerasan pada Gambar 4.4 menunjukkan bahwa variasi *interpass temperature* 150 °C menghasilkan nilai kekerasan tertinggi, sedangkan spesimen tanpa pengendalian *interpass temperature* menghasilkan nilai kekerasan terendah. Perbedaan nilai kekerasan pada daerah HAZ juga tidak terlihat terlalu besar karena daerah tersebut mengalami pemanasan selama proses pengelasan. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pengendalian *interpass temperature* pada 150 °C menghasilkan laju pendinginan yang lebih cepat, sehingga transformasi fasa austenit (γ) dan delta *ferrite* (δ) berlangsung secara optimal. Sebaliknya, pada *interpass temperature* 250 °C, laju pendinginan menjadi lebih lambat akibat temperatur antar lintasan yang lebih tinggi. Pada spesimen tanpa pengendalian *interpass temperature*, temperatur antar lintasan mencapai sekitar 450–500 °C, sehingga terjadi akumulasi panas yang lebih besar dan laju pendinginan menjadi paling lambat. Kondisi tersebut menyebabkan transformasi fasa berlangsung lebih lama sehingga nilai kekerasan yang diperoleh lebih rendah dibandingkan spesimen dengan *interpass temperature* 150 °C.

Stainless steel SA-312 TP304 merupakan baja tahan karat austenitik yang bersifat *non-heat treatable*, sehingga sifat mekaniknya tidak dapat ditingkatkan melalui perlakuan panas konvensional seperti proses quenching dan tempering. Perubahan sifat mekanik pada material ini lebih dipengaruhi oleh kondisi siklus termal selama pengelasan yang memengaruhi keseimbangan pembentukan fasa austenit dan delta *ferrite*, dibandingkan oleh mekanisme pengerasan akibat

perlakuan panas. Pada buku (Lippold et al., 2015), yang menyatakan bahwa pada pengelasan *stainless steel* austenitik, variasi siklus termal terutama memengaruhi keseimbangan fasa austenit–delta *ferrite* dan karakteristik logam las, bukan menghasilkan efek pengerasan seperti yang terjadi pada baja yang dapat diberi perlakuan panas.

Hasil penelitian ini didukung oleh (Paulraj, 2015), yang melaporkan bahwa peningkatan *interpass temperature* menyebabkan penurunan nilai kekerasan sambungan las. Penelitian tersebut menjelaskan bahwa laju pendinginan yang lebih lambat akibat meningkatnya masukan panas menyebabkan perubahan mikrostruktur dan pembentukan fasa sekunder, sehingga nilai kekerasan mengalami penurunan. Selain itu, pada bagian kesimpulan penelitian dinyatakan bahwa sifat mekanik yang lebih baik diperoleh pada kondisi *low interpass temperature*. Hasil penelitian ini juga sejalan dengan (Siewert, 1993) *ASM Handbook Volume 6: Welding, Brazing, and Soldering* yang menjelaskan bahwa peningkatan *interpass temperature* akan meningkatkan akumulasi panas dan memperlambat laju pendinginan, sehingga memengaruhi evolusi mikrostruktur serta sifat mekanik sambungan las. Hasil penelitian ini sejalan dengan (Mohammed et al., 2017) yang menyatakan bahwa *interpass temperature* pada pengelasan *stainless steel* berpengaruh terhadap siklus termal, laju pendinginan, perkembangan mikrostruktur, dan sifat mekanik sambungan las. Selain itu, (Sindo, 2021) juga menjelaskan bahwa pengendalian siklus termal selama proses pengelasan merupakan faktor penting dalam memperoleh keseimbangan fasa yang baik sehingga sifat mekanik sambungan las dapat dicapai secara optimum.

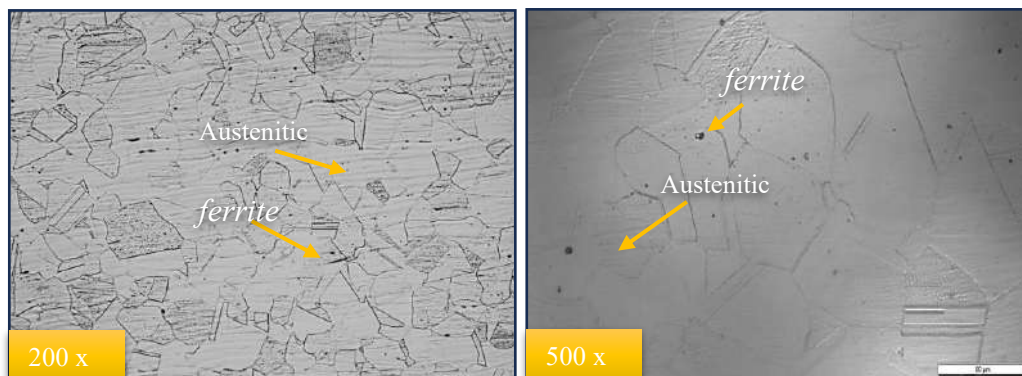
4.4 Hasil Pengujian Metalografi

Pengujian struktur mikro dilakukan untuk mengetahui perubahan morfologi dan karakteristik struktur mikro pada sambungan las hasil proses pengelasan kombinasi GTAW-SMAW dengan variasi *interpass temperature*. Pengujian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh temperatur antar lintasan terhadap struktur mikro yang terbentuk pada sambungan las. Pengujian struktur mikro dilaksanakan di Laboratorium Uji Bahan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya (PPNS) menggunakan tiga

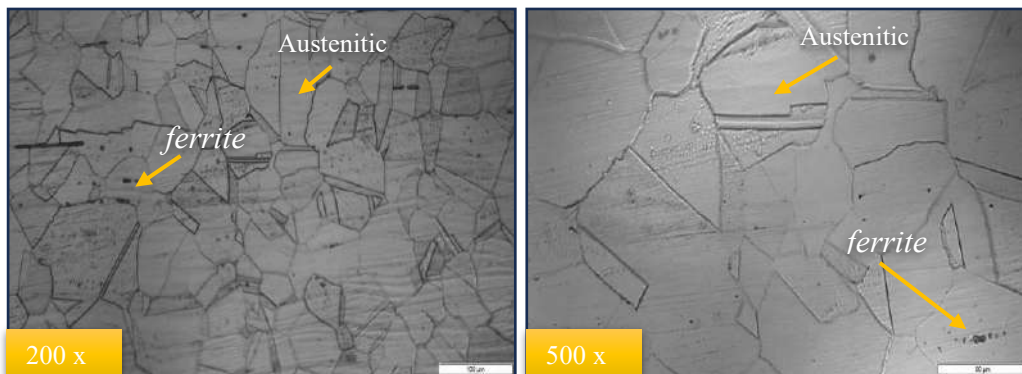
spesimen, yaitu spesimen tanpa pengaturan *interpass temperature*, spesimen dengan *interpass temperature* 150 °C, dan spesimen dengan *interpass temperature* 250 °C. Pengamatan dilakukan pada tiga daerah utama, yaitu *base metal* (BM), Transisi Zone (TZ) sebagai daerah transisi antara logam induk dan logam las, serta *weld metal* (WM). Sebelum dilakukan pengamatan menggunakan mikroskop optik, setiap spesimen dipersiapkan melalui proses preparasi metalografi yang meliputi pengamplasan (*grinding*) secara bertahap menggunakan kertas amplas mulai dari grit 60 hingga grit 2000, kemudian dilanjutkan dengan proses pemolesan (*polishing*) menggunakan kain beludru hingga diperoleh permukaan spesimen yang halus dan bebas goresan. Setelah itu dilakukan proses etsa untuk memperjelas batas butir dan struktur mikro sehingga fasa-fasa yang terbentuk dapat diamati dengan jelas.

Variasi *interpass temperature* memengaruhi siklus termal dan laju pendinginan selama proses pengelasan sehingga berpengaruh terhadap ukuran butir, morfologi mikrostruktur, serta distribusi fasa austenit dan *ferrite* pada daerah *base metal*, *Transition Zone*, dan *weld metal*. Perubahan karakteristik mikrostruktur tersebut selanjutnya memengaruhi sifat mekanik sambungan las, khususnya nilai kekerasan dan kekuatan tarik. Oleh karena itu, pengamatan struktur mikro dilakukan untuk menganalisis perubahan karakteristik mikrostruktur akibat variasi *interpass temperature* serta mengkorelasikannya dengan hasil pengujian mekanik. Pada material *austenitic stainless steel* SA-312 TP304, struktur mikro logam induk umumnya didominasi oleh fasa austenit, sedangkan pada daerah logam las dapat terbentuk fasa ferrite sebagai akibat dari proses solidifikasi selama pengelasan.

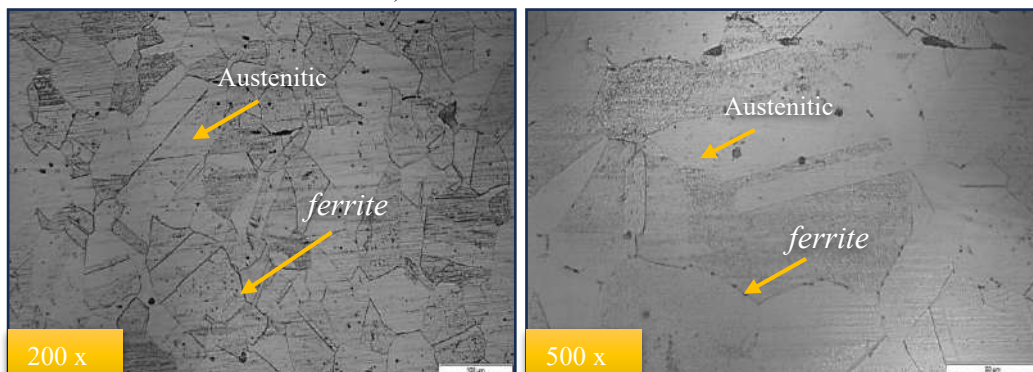
Keberadaan ferrite pada logam las berfungsi meningkatkan stabilitas proses pengelasan dan mengurangi kecenderungan terjadinya retak panas (*hot cracking*), sedangkan austenit memberikan sifat keuletan (*ductility*) dan ketangguhan yang baik. Oleh karena itu, perubahan proporsi kedua fasa tersebut akibat variasi *interpass temperature* akan memberikan pengaruh terhadap karakteristik sambungan las



a). A1 BM 200x dan 500x

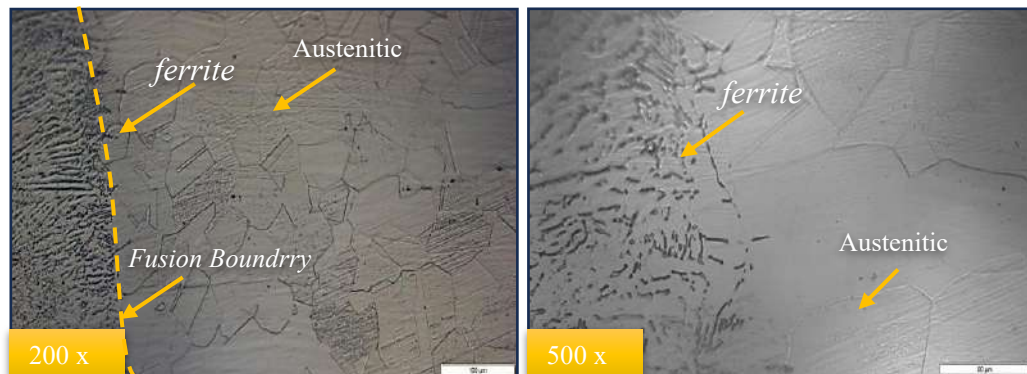


b). A2 BM 200x dan 500x

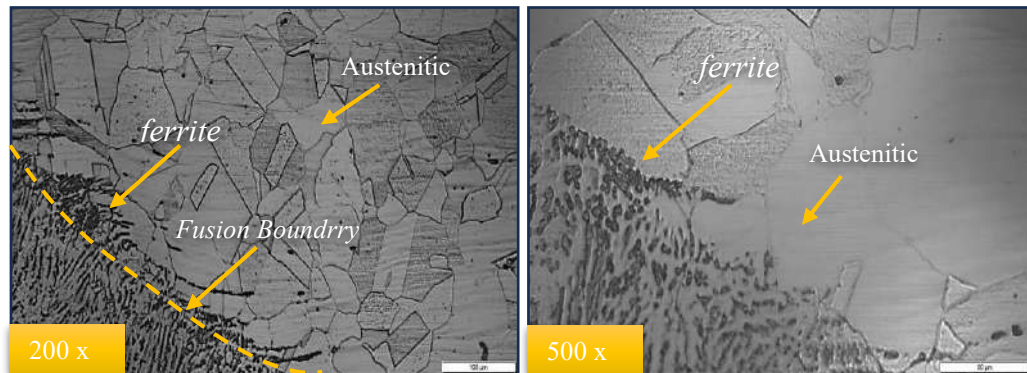


c). A3 BM 200x dan 500x

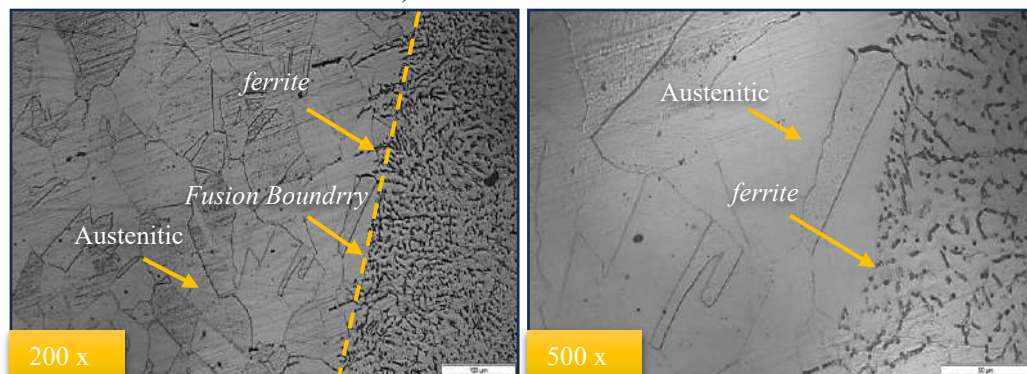
Gambar 4. 5 Hasil Mikro Base Metal Perbesaran 200x dan 500x a). Interpass Temperature 150 °C, b). Interpass Temperature 250 °C dan c). Tanpa Interpass Temperature



a). A1 TZ 200x dan 500x

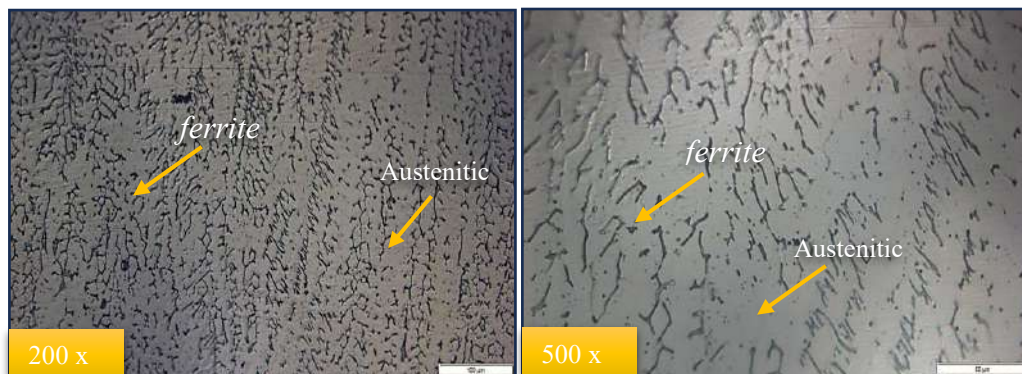


b). A2 TZ 200x dan 500x

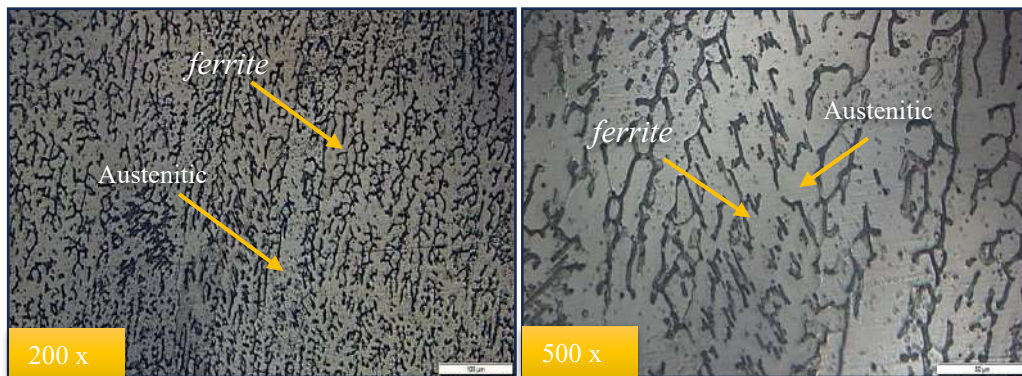


c). A3 TZ 200x dan 500x

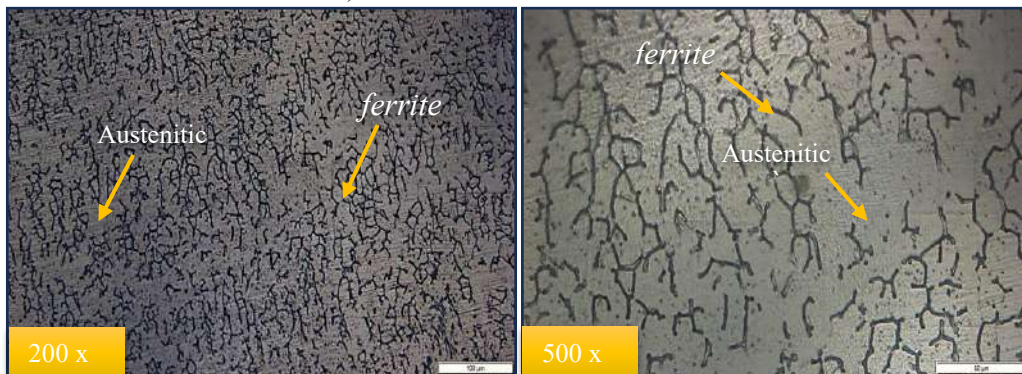
Gambar 4. 6 Hasil Mikro Daerah Transition Zone Perbesaran 200x dan 500x a). Interpass Temperature 150 °C b). Interpass Temperature 250 °C dan c). Tanpa Interpass Temperature



a). A1 WM SMAW 200x dan 500x

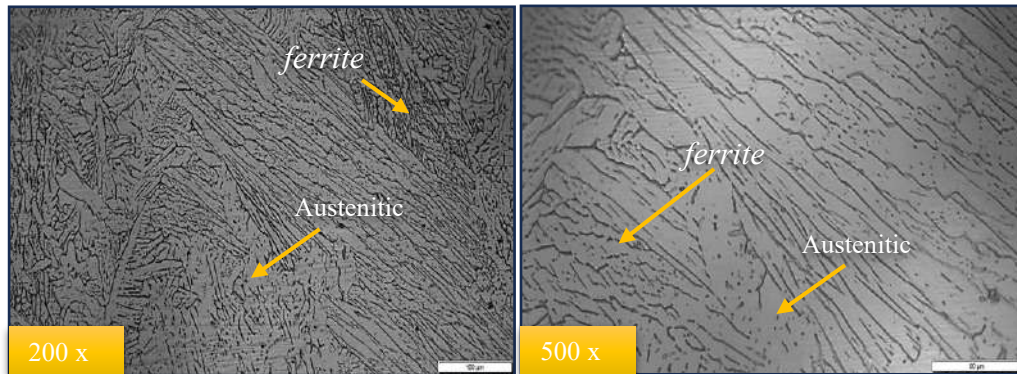


b). A2 WM SMAW 200x dan 500x

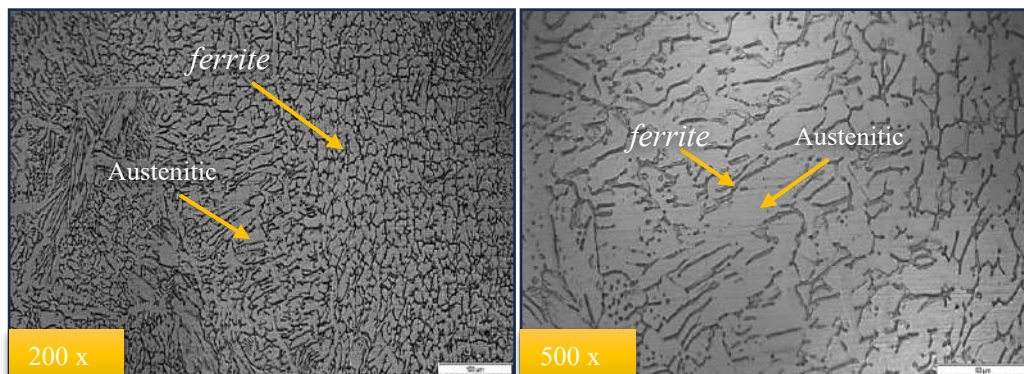


c). A3 WM SMAW 200x dan 500x

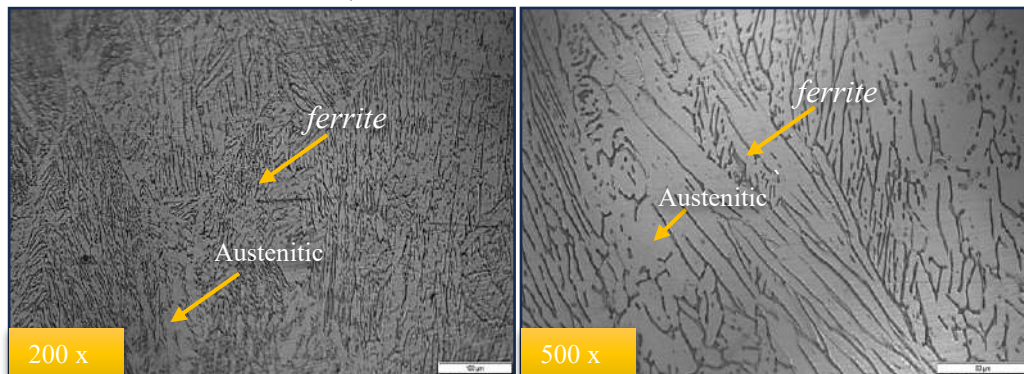
Gambar 4. 7 Hasil Mikro Weld Metal SMAW Elektroda E308-16 Perbesaran 200x dan 500x a). Interpass Temperature 150 °C b). Interpass Temperature 250 °C dan c). Tanpa Interpass Temperature



a). A1 WM GTAW 200x dan 500x



b). A2 WM GTAW 200x dan 500x



c). A3 WM GTAW 200x dan 500x

Gambar 4. 8 Hasil Mikro Pengelasan GTAW Filler ER308L Perbesaran 200x dan 500x a). Interpass Temperature 150 °C b). Interpass Temperature 250 °C dan c). Tanpa Interpass Temperature

Berdasarkan hasil pengamatan struktur mikro pada Gambar 4.5 sampai Gambar 4.8 diatas seluruh spesimen, terlihat bahwa struktur mikro sambungan las tersusun atas dua fasa utama, yaitu austenit (γ) yang tampak berwarna terang (putih) dan *ferrite* (δ) yang tampak berwarna lebih gelap. Distribusi kedua fasa tersebut berbeda pada setiap daerah sambungan las, yaitu *base metal*, *transition zone* (HAZ),

dan *weld metal*. Perbedaan karakteristik mikrostruktur pada setiap variasi *interpass temperature* menunjukkan bahwa pengendalian temperatur antar lintasan memengaruhi siklus termal selama proses pengelasan, sehingga berdampak pada ukuran butir, homogenitas mikrostruktur, dan distribusi fasa yang terbentuk. Menurut (Lippold et al., 2015) proses pengelasan menyebabkan perubahan mikrostruktur yang signifikan pada *weld metal* dan *heat-affected zone* akibat perubahan keseimbangan fasa, pertumbuhan butir, segregasi unsur paduan, serta laju pemanasan dan pendinginan selama siklus termal.

Pada daerah *base metal*, struktur mikro didominasi oleh fasa austenit (γ) yang merupakan karakteristik utama stainless steel SA-312 TP304. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa spesimen dengan *interpass temperature* 150 °C, 250 °C, maupun tanpa pengendalian *interpass temperature* memiliki struktur mikro yang relatif serupa, dengan dominasi fasa austenit (γ) disertai sejumlah kecil delta ferrite (δ). Hal ini menunjukkan bahwa variasi *interpass temperature* tidak memberikan perubahan yang berarti terhadap struktur mikro pada daerah *base metal*. Kondisi tersebut disebabkan karena daerah *base metal* tidak mengalami siklus termal pengelasan secara langsung, serta stainless steel SA-312 TP304 termasuk baja tahan karat austenitik yang bersifat *non-heat treatable*, sehingga tidak mengalami transformasi fasa akibat pemanasan selama proses pengelasan. Dengan demikian, fasa austenit (γ) tetap menjadi fasa dominan pada seluruh spesimen dan tidak mengalami perubahan yang signifikan akibat variasi *interpass temperature* (Lippold et al., 2015).

Pada daerah *transition zone* (TZ), struktur mikro terdiri atas campuran fasa austenit dan ferrite. Daerah ini mengalami pemanasan akibat proses pengelasan tanpa mengalami pencairan sehingga terjadi perubahan mikrostruktur dibandingkan logam induk. Siklus termal menyebabkan sebagian mikrostruktur mengalami transformasi sehingga terbentuk distribusi *ferrite* pada matriks austenit. Menurut (Lippold et al., 2015), daerah HAZ pada *stainless steel* austenitik mengalami perubahan mikrostruktur sebagai akibat dari paparan panas pengelasan, redistribusi *ferrite*, serta kemungkinan terjadinya presipitasi pada batas butir. Besarnya perubahan tersebut ditentukan oleh siklus termal yang diterima material, terutama

temperatur puncak dan laju pendinginan selama proses pengelasan. Perubahan mikrostruktur tersebut menyebabkan karakteristik HAZ berbeda dengan logam induk maupun logam las. Oleh karena itu, campuran fasa austenit dan ferrite yang terbentuk pada daerah *transition zone* menghasilkan keseimbangan antara kekuatan dan keuletan sehingga nilai kekerasan pada daerah ini lebih tinggi dibandingkan *base metal*.

Pada daerah *weld metal*, struktur mikro didominasi oleh fasa ferrite yang terbentuk selama proses solidifikasi logam las. Dominasi ferrite merupakan karakteristik umum logam las pada stainless steel austenitik karena ferrite terbentuk terlebih dahulu selama proses pembekuan sebelum sebagian bertransformasi menjadi austenit. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa spesimen dengan *interpass temperature* 150 °C memiliki distribusi fasa ferrite dan austenit yang lebih homogen dibandingkan variasi lainnya. Kondisi tersebut menghasilkan keseimbangan fasa yang lebih baik sehingga memberikan nilai kekerasan tertinggi. Sebaliknya, spesimen tanpa *interpass temperature* menunjukkan distribusi fasa ferrite dan austenit yang kurang homogen sehingga menghasilkan nilai kekerasan yang lebih rendah. Hasil tersebut sejalan dengan penelitian (Marhoon, 2025), yang menunjukkan bahwa peningkatan *interpass temperature* menyebabkan penurunan laju pendinginan sehingga kandungan δ -ferrite pada logam las berkurang dan nilai kekerasan menurun. Penelitian tersebut juga menjelaskan bahwa *interpass temperature* berbanding lurus dengan lebar HAZ akibat akumulasi panas selama proses pengelasan *multipass*. Oleh karena itu, pengendalian *interpass temperature* menghasilkan siklus termal yang lebih optimum sehingga distribusi fasa ferrite dan austenit menjadi lebih seimbang serta kualitas sambungan las menjadi lebih baik.

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa spesimen dengan *interpass temperature* 150 °C memiliki distribusi fasa ferrite dan austenit yang lebih homogen dibandingkan variasi lainnya. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa siklus termal selama proses pengelasan berlangsung lebih stabil sehingga proses transformasi sebagian ferrite menjadi austenit dapat berlangsung dengan lebih seimbang. Distribusi fasa yang lebih merata ini berkorelasi dengan nilai kekerasan

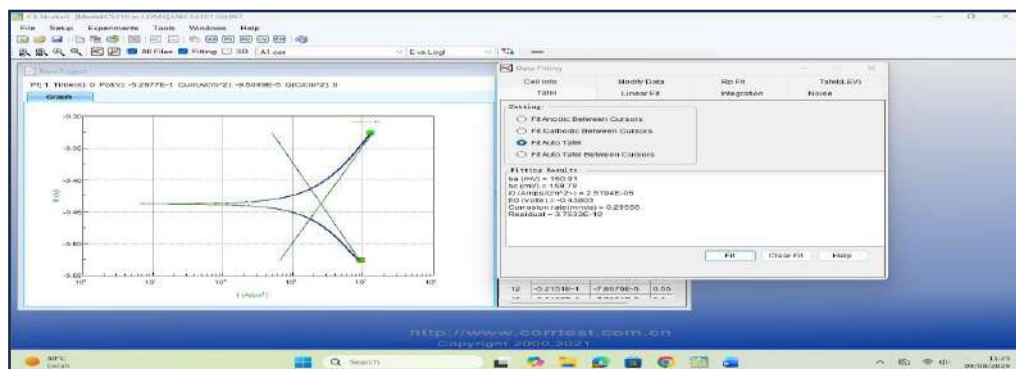
dan kekuatan tarik tertinggi. Sebaliknya, spesimen tanpa *interpass temperature* menunjukkan distribusi fasa ferrite dan austenit yang kurang homogen akibat siklus termal yang tidak terkendali selama proses pengelasan. Hasil tersebut berkorelasi dengan nilai kekerasan dan kekuatan tarik yang lebih rendah. Temuan ini sejalan dengan (Marhoon, 2025), yang menjelaskan bahwa peningkatan *interpass temperature* menyebabkan laju pendinginan menjadi lebih lambat sehingga transformasi fasa selama proses solidifikasi berubah, kandungan δ -ferrite pada logam las berkurang, serta lebar HAZ meningkat akibat akumulasi panas selama proses pengelasan *multipass*. Oleh karena itu, pengendalian *interpass temperature* menghasilkan siklus termal yang lebih optimum sehingga distribusi fasa ferrite dan austenit menjadi lebih seimbang serta kualitas sambungan las menjadi lebih baik.

Secara keseluruhan, hasil pengamatan struktur mikro menunjukkan bahwa setiap variasi *interpass temperature* menghasilkan karakteristik distribusi fasa austenit dan ferrite yang berbeda pada sambungan las. Spesimen dengan *interpass temperature* 150 °C menunjukkan distribusi kedua fasa yang lebih homogen sehingga berkorelasi dengan nilai kekerasan tertinggi. Sebaliknya, spesimen tanpa *interpass temperature* menunjukkan distribusi fasa yang kurang homogen sehingga menghasilkan sifat mekanik yang lebih rendah. Hasil penelitian ini sejalan dengan (Mohammed et al., 2017), yang menyatakan bahwa pengendalian siklus termal selama proses pengelasan berkaitan dengan perkembangan mikrostruktur dan sifat mekanik sambungan las. Selain itu, Kou (2021) menjelaskan bahwa laju pendinginan selama proses pengelasan menentukan proses transformasi ferrite menjadi austenit, sehingga keseimbangan kedua fasa tersebut menjadi faktor penting dalam memperoleh sambungan las stainless steel dengan sifat mekanik yang optimum.

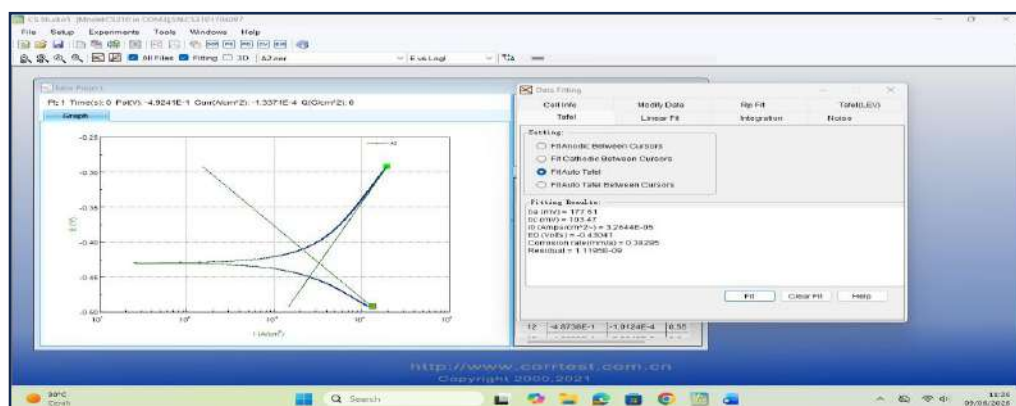
4.5 Hasil Pengujian Korosi

Pengujian korosi dilakukan di Labolatorium Korosi dan Kegagalan Material, ITS, menggunakan sel tiga elektroda (Tafel). Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengukur laju korosi pada material *stainless steel* SA-312 TP304 yang telah mengalami masukan panas akibat dari *interpass temperature* yang

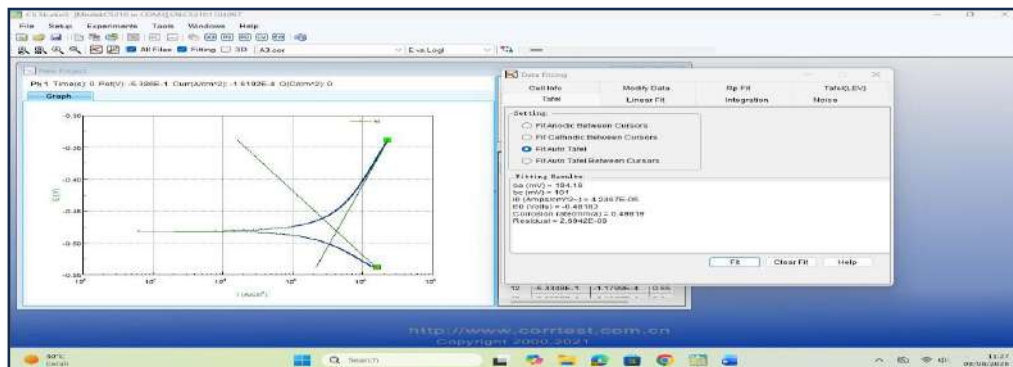
dikontrol dan tidak dikontrol. Prosedur yang digunakan mengikuti standar ASTM G5. Prosedur dimulai dengan mencelupkan setiap spesimen ke dalam larutan pengkorosif H_2SO_4 0,1 M, disertai dengan penggunaan elektroda bantu dari platina dan elektroda acuan Ag/AgCl. Setelah spesimen ditempatkan dalam larutan, dilakukan pengeplotan diagram polarisasi untuk menentukan nilai I_{cor} (arus korosi) dan E_{cor} (potensial korosi). Hasil perhitungan laju korosi didapat dari analisis grafik polarisasi yang ditunjukkan pada Gambar 4.9 dan Tabel 4.6 dibawah ini.



a). Hasil Uji Korosi Spesimen A1



b). Hasil Uji Korosi Spesimen A2



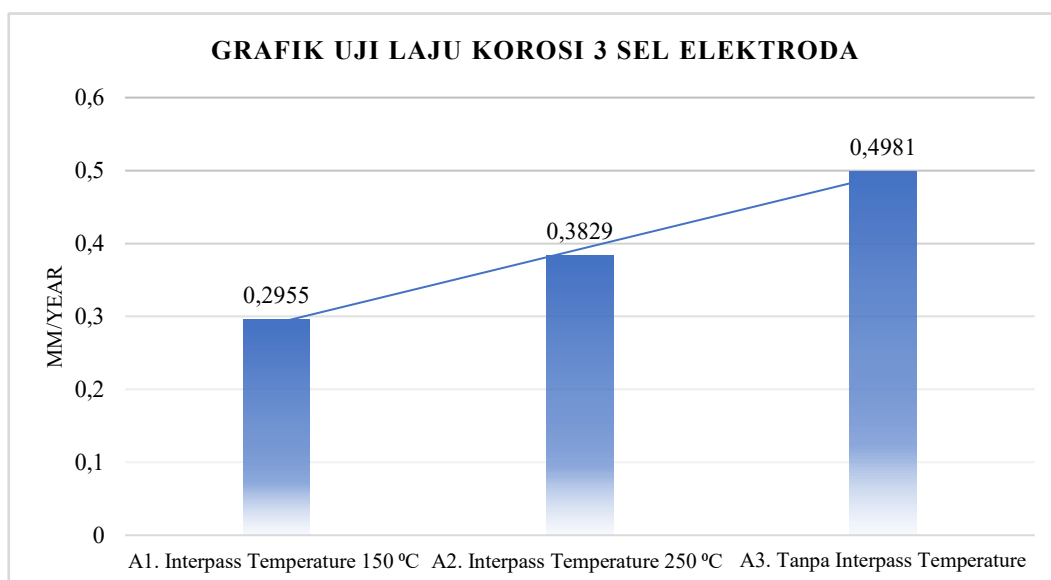
c). Hasil Uji Korosi Spesimen A3

Gambar 4. 9 Hasil Pengujian Korosi Tiga Sel Elektroda (*Tafel*) a). *Interpass Temperature* 150 °C, b). *Interpass Temperature* 250 °C, dan c).Tanpa *Interpass Temperature*

Tabel 4. 4 Hasil Pengujian Laju Korosi Tiga Sel Elektroda

Variasi	Corrosion Rate (mm/year)
A1. <i>Interpass Temperature</i> 150 °C	0,2955
A2. <i>Interpass Temperature</i> 250 °C	0,3829
A3. Tanpa <i>Interpass Temperature</i>	0,4981

Sumber : Dokumen Pribadi



Gambar 4. 10 Grafik Uji Laju Korosi Tiga Sel Elektroda (Sumber Pribadi)

Berdasarkan hasil pada Gambar 4.10 untuk pengujian laju korosi menggunakan metode tiga sel elektroda pada material *Stainless Steel* SA-312 TP 304 hasil pengelasan GTAW-SMAW, diperoleh bahwa variasi *interpass temperature* memberikan pengaruh terhadap laju korosi sambungan las. Nilai laju korosi masing-masing variasi yaitu A1 (150 °C) sebesar 0,2955 mm/tahun, A2 (250 °C) sebesar 0,3829 mm/tahun, dan A3 (tanpa *interpass temperature*) sebesar 0,4981 mm/tahun. Dari hasil tersebut dapat diketahui bahwa spesimen A1 dengan *interpass temperature* 150 °C memiliki laju korosi paling rendah, sehingga menunjukkan ketahanan korosi yang paling baik. Sebaliknya, spesimen A3 tanpa pengaturan *interpass temperature* memiliki laju korosi paling tinggi, yang menandakan bahwa ketahanan korosinya paling rendah. Sementara itu, spesimen A2 (250 °C) memiliki nilai laju korosi yang berada di antara kedua variasi tersebut.

Rendahnya laju korosi pada variasi 150 °C menunjukkan bahwa pengendalian suhu antar lapisan las mampu menghasilkan struktur mikro yang lebih stabil dan menjaga lapisan pasif kromium oksida (Cr_2O_3) pada permukaan *stainless steel*. Lapisan pasif tersebut berfungsi sebagai pelindung utama material terhadap serangan korosi. Dengan *interpass temperature* yang terkontrol, proses pendinginan berlangsung lebih seimbang sehingga pembentukan struktur mikro menjadi lebih homogen dan daerah yang rentan terhadap korosi dapat diminimalkan. Sebaliknya, peningkatan *interpass temperature* hingga 250 °C menyebabkan laju korosi meningkat. Kondisi ini terjadi karena pendinginan logam menjadi lebih lambat sehingga material berada lebih lama pada rentang temperatur yang memungkinkan terjadinya perubahan struktur mikro.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian (Linangkung, 2023), yang menunjukkan bahwa variasi *interpass temperature* memengaruhi struktur mikro logam las. Pada *interpass temperature* 250 °C dan 450 °C ditemukan fasa austenit, ferit, dan karbida kromium (*Cr-carbide*) pada daerah *transiton zone* atau HAZ. Perubahan struktur mikro tersebut memengaruhi sifat material dan ketahanan korosi. Kehadiran presipitasi karbida kromium dapat mengurangi kandungan kromium di sekitar batas butir sehingga lapisan pasif menjadi kurang efektif dalam

melindungi material dari serangan korosi. Semakin lama material berada pada rentang suhu sensitasi atau semakin tinggi akumulasi panas selama proses pengelasan, peluang terbentuknya presipitasi karbida kromium akan semakin besar sehingga ketahanan korosi sambungan las cenderung menurun.

Meskipun demikian, hasil pengujian laju korosi pada penelitian ini yang berkisar antara 0,2955–0,4981 mm/tahun masih menunjukkan bahwa material *stainless steel* SA-312 TP304 tetap mempertahankan ketahanan korosi yang baik pada media H_2SO_4 0,1 M. Hal ini ditunjukkan oleh masih terbentuknya lapisan pasif yang kaya kromium (Cr_2O_3) pada permukaan material sehingga mampu menghambat laju pelarutan logam. Bahwa untuk material *stainless steel* 304 tetap mengalami proses pasivasi dalam larutan H_2SO_4 , meskipun peningkatan konsentrasi H_2SO_4 menyebabkan kenaikan nilai I_{corr} dan laju korosi akibat rusaknya lapisan pasif (Abdelfatah, 2022). Penelitian tersebut juga menjelaskan bahwa unsur kromium berperan penting dalam membentuk lapisan oksida Cr_2O_3 yang stabil sehingga memberikan perlindungan terhadap korosi, sedangkan ion sulfat (SO_4^{2-}) dapat mempercepat kerusakan lapisan pasif apabila media menjadi semakin agresif. Oleh karena itu, nilai laju korosi yang diperoleh pada penelitian ini masih mencerminkan perilaku korosi yang sesuai dengan karakteristik baja tahan karat austenitik 304 pada lingkungan asam berkonsentrasi rendah, di mana lapisan pasif masih mampu memberikan perlindungan terhadap permukaan logam. Berdasarkan hasil pengujian dan penelitian terdahulu, dapat disimpulkan bahwa pengendalian *interpass temperature* terdapat kecenderungan terhadap ketahanan korosi sambungan las *stainless steel* SA-312 TP 304. Variasi *interpass temperature* 150 °C menghasilkan laju korosi paling rendah sebesar 0,2955 mm/tahun, sedangkan tanpa pengaturan *interpass temperature* menghasilkan laju korosi tertinggi sebesar 0,4981 mm/tahun. Dengan demikian, penggunaan *interpass temperature* yang tepat tidak hanya mampu meningkatkan sifat mekanik sambungan las, tetapi juga menjaga struktur mikro dan lapisan pasif sehingga ketahanan korosi material menjadi lebih baik.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan yaitu, analisis variasi *interpass temperature* pada proses pengelasan kombinasi GTAW – SMAW terhadap kekuatan tarik, kekerasan, struktur mikro dan laju korosi pada material *stainless steel* SA-312 TP304 dapat ditarik beberapa kesimpulan berdasarkan hasil dari pengujian yang telah dilakukan antara lain sebagai berikut:

1. Hasil pengujian tarik menunjukkan bahwa variasi *interpass temperature* 150 °C menghasilkan nilai kekuatan tarik rata-rata tertinggi sebesar 561,765 MPa, sedangkan variasi *interpass temperature* 250 °C menghasilkan nilai kekuatan tarik rata-rata sebesar 555,885 MPa dan tanpa *interpass temperature* menghasilkan nilai kekuatan tarik rata-rata sebesar 556,780 MPa. Meskipun terdapat perbedaan nilai kekuatan tarik, selisih yang diperoleh relatif kecil sehingga variasi *interpass temperature* tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kekuatan tarik sambungan las. Hal ini diperkuat dengan hasil pengujian yang menunjukkan bahwa seluruh spesimen mengalami patah pada daerah *base metal*, dengan demikian, variasi *interpass temperature* yang digunakan pada penelitian ini tidak menyebabkan perubahan yang berarti terhadap kekuatan tarik sambungan las *Stainless Steel* SA-312 TP 304.
2. Pada pengujian kekerasan menunjukkan bahwa hasil nilai kekerasan pada setiap spesimen sangat dipengaruhi oleh laju pendinginan yang diterima. Pada spesimen A1, dengan variasi *interpass temperature* 150 °C, terukur nilai kekerasan tertinggi, yaitu 203,69 kgf/mm². Sebaliknya, spesimen A3 dengan variasi tanpa *interpass temperature* menunjukkan nilai kekerasan terendah, yaitu 183,80 kgf/mm². Hal ini disebabkan oleh spesimen A3 yang mengalami laju pendinginan lambat akibat tidak dikontrolnya *interpass temperature*.

3. Pada pengujian laju korosi menunjukkan bahwa laju korosi cenderung meningkat seiring bertambahnya masukan panas pada material. Spesimen A3 tanpa *interpass temperature*, menunjukkan laju korosi tertinggi, yaitu 0,4981 mm/year. Sebaliknya A1, dengan variasi *interpass temperature* 150 °C memiliki laju korosi yang lebih rendah, yakni 0,2955 mm/year. Penelitian ini menegaskan bahwa semakin tinggi masukan panas yang diterima oleh material, semakin tinggi pula laju korosi yang terjadi.
4. Pada pengujian struktur mikro menunjukkan bahwa variasi *interpass temperature* memengaruhi distribusi dan morfologi fasa pada sambungan las. Daerah *base metal* didominasi oleh fasa austenit (γ). Pada *transition zone* atau daerah transisi, struktur mikro didominasi oleh fasa austenit dengan sedikit fasa delta *ferrite* (δ) yang mulai terbentuk di sekitar *fusion line*. Sementara itu, pada *weld metal* struktur mikro didominasi oleh fasa delta *ferrite* (δ). Distribusi fasa yang terbentuk pada spesimen dengan *interpass temperature* 150 °C menunjukkan keseimbangan fasa yang lebih baik dibandingkan variasi lainnya, sehingga berkorelasi dengan hasil kekerasan dan kekuatan tarik yang lebih tinggi, sedangkan spesimen tanpa pengendalian *interpass temperature* menunjukkan distribusi fasa yang kurang merata sehingga menghasilkan sifat mekanik yang relatif lebih rendah.

5.2 Saran

Dalam pengerjaan tugas akhir ini masih terdapat kekurangan, sehingga nantinya dapat menjadi bahan evaluasi dan dapat dikembangkan lebih baik lagi. Beberapa saran yang perlu diperhatikan untuk dapat mencapai hasil yang lebih maksimal antara lain :

1. Menambahkan pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM) untuk mengamati perubahan struktur mikro secara lebih detail dan mengidentifikasi pengaruh variasi *interpass temperature* terhadap karakteristik mikrostruktur hasil pengelasan.
2. Penelitian tugas akhir ini dapat dikembangkan dengan melakukan pengujian korosi *intergranular*.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdelfatah, A. (2022). Corrosion Characteristics Of 304 Stainless Steel In Sodium Chloride And Sulfuric Acid Solutions. *International Journal Of Electrochemical Science*, 17(4), 220417. <https://doi.org/10.20964/2022.04.29>
- Amalia, L., Sinambela, M. L., Tanjung, R. A., & Awali, J. (2023). Analysis Of Welding Current Variation Of SMAW And GTAW Combination Welding With Double V Groove On The Mechanical Properties And Microstructure Of SS304 Stainless Steel. *SPECTA Journal Of Technology*, 7(1), 427–433. <https://doi.org/10.35718/Specta.V7i1.663>
- ASME Boiler And Pressure Vessel Code: Section IX. (2025). ASME Boiler And Pressure Vessel Code: Section IX. 91–97. <https://doi.org/10.1017/Cbo9780511978371.011>
- ASME, S. (2025). Section II Part A Ferrous Material Specifications.
- ASTM 292. (2023). Standard Test Methods For Metallic, Vickers Hardness And Knoop Hardness Of Materials. ASM International, 82(February). <https://doi.org/10.1520/E0092-23.2>
- ASTM E8. (2025). Standard Test Methods For Tension Testing Of Metallic Materials. I. <https://doi.org/10.1520/E0008>
- ASTM G-5. (2013). Test Method For Making Potentiostatic And Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements. ASTM International, 1–8. <https://doi.org/10.1520/G0005-13.2>
- AWS, H. (2002). Welding Handbook. 1.
- Budi, S. S., & Karmiadi. (2023). Analisis Variasi Pengelasan GTAW Dan SMAW Dengan Parameter Kuat Arus Listrik Pada Fabrikasi Pipa Flowline 4 Inch SCH 80. 12(2), 91–99.
- Cahya, M. R., & Abdulah, A. (2019). Akibat Proses Pengelasan Gtaw Pada Material Austenitic Stainless Steel Aisi A304.
- Covert, R. A., & Tuthill, A. H. (2000). Stainless Steels : An Introduction To Their Metallurgy And Corrosion Resistance. *Dairy, Food And Environmental Sanitation*, 20(7), 506–517.
- Dwi Anda, Y. (2021). Analysis Of Smaw Welding Joints On Astm A36 Steel Material With Variation Of Current And Welding.
- Fajrin, A. Et. A. (2024). NDT Testing With Visual Testing Method In The Inside Upper Frame 6015 Area With GMAW Welding Based On 1E0099. <https://doi.org/10.31284/J.Jmesi.2024.V4i1.5125>

- Fariz, N. G. (2024). Analisis Variasi Jumlah Perlakuan Heat Straightening Dan Travel Speed Menggunakan Torch GTAW Pada Hasil Pengelasan Material Pipa Stainless Steel 304 Terhadap Nilai Kekerasan, Struktur Mikro, Dan Laju Korosi.
- Kim, G., Lee, J. (2024). Evaluation Of Sensitization Behaviors On The Heat - Affected Zone Of Austenitic Stainless Steel Weld By Thermal Cycles Of Actual Multi - Pass Welding. *Metals And Materials International*, 30(10), 2655–2667. <https://doi.org/10.1007/S12540-024-01679-9>
- Krisna, Y. (2022). Analisa Laju Korosi Dalam Air Menggunakan Elektroda Lapisan Resin Pada Baja API 5L X65.
- Lee, B., Lee, H., & Shin, Y. (2015). Intergranular Corrosion Characteristics Of Super Duplex Stainless Steel At Various Interpass Temperatures. 10, 7535–7547.
- Linangkung, K. (2023). Analisis Perbandingan Interpass Temperature Stainless Steel 304 Dengan Proses Las FCAW Terhadap Pembuatan Kurva DAC Dan Nilai Kekerasan.
- Lippold, J. (2015). *Welding Metallurgy And Weldability Of Stainless Steel Handbook*.
- Marhoon, I. (2025). Analysis Of Interpass Temperature Effects On Microstructure And Mechanical Properties In 316L Stainless Steel Multipass Welding. 43(4), 1243–1255.
- Mohammed, G. R., Ishak, M., Aqida, S. N., & Abdulhadi, H. A. (2017). Effects Of Heat Input On Microstructure , Corrosion And Mechanical Characteristics Of Welded Austenitic And Duplex Stainless Steels : A Review. <https://doi.org/10.3390/Met7020039>
- Munir, M. M. (2019). Modul Praktik DT-NDT.
- Muqsalmina, Syukran, & Hanif. (2019). Pengaruh Interpass Temperatur Terhadap Sifat Mekanik Proses Pengelasan SMAW Material Carbon Steel SS400 (Effect Of Temperature Interpasses On Mechanical Properties Welding Process Of SMAW SS400 Carbon Steel Material). *Journal Of Welding Technology*, 1(1), 17–21.
- Paulraj, P. (2015). Effect Of Welding Parameters On Mechanical Properties Of GTAW Of UNS S31803 And UNS S32750 Weldments. <https://doi.org/10.1051/Mfreview/2015032>
- Rafi Nurdwi, R. (2019). Pengaruh Perlakuan Panas Quenching-Tempering Dengan Variasi Temperatur Dan Waktu Tahan Tempering Terhadap Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro Baja Tahan Karat Thin Foil 304 Untuk Aplikasi Stent. *Gastronomía Ecuatoriana Y Turismo Local.*, 1(69), 5–24.
- Rizki, D., Gerald, A., & Pohan, A. (2023). Pengaruh Perlakuan Temperatur Interpass Terhadap Kekerasan Material Ketangguhan Material Struktur Micro

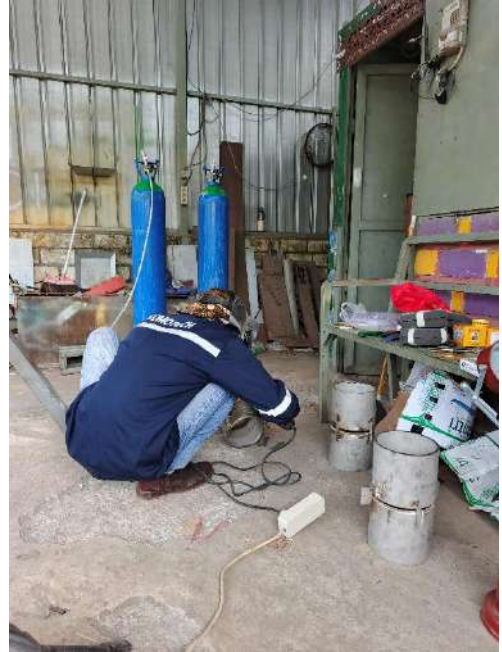
- Plate AISI 1037 Yang Disambung Dengan Metode Pengelasan Smaw Butt Joint. 12(1), 1–6.
- Romli. (2019). Analisis Sifat Mekanis Pengaruh Proses Pengelasan Baja Tahan Karat. *Austenit*, 5(1), 21–34.
- Rudy, T. O., Hendronursito, Y., & S, D. A. (2018). Analisis Pengaruh Parameter Pengelasan Gtaw Pada Stainless Steel Aisi 304 Terhadap Sifat Mekanis Dan Struktur Mikro. *Poros*, 15(1), 53. <https://doi.org/10.24912/poros.v15i1.1255>
- Sari, Y. (2015). Analisis Produk Hasil Kombinasi Proses Pengelasan Dan Perlakuan Panas Aluminium 6061. *Jurnal Konversi Energi Dan Manufaktur*, 2(2), 100–104. <https://doi.org/10.21009/jkem.2.2.7>
- Siewert, T. A. (1993). *Asm Handbook Vol.6 Welding, Brazing, And Soldering*.
- Sinaga, A. J., & Manurung, C. (2020). Analisa Laju Korosi Dan Kekerasan Pada Stainless Steel 316 L Dalam Larutan 10 % Nacl Dengan Variasi Waktu Perendaman. *Sprocket Journal Of Mechanical Engineering*, 1(2), 92–99. <https://doi.org/10.36655/sprocket.v1i2.186>
- Sindo, K. (2021). *Welding Metallurgy Third Edition Handbook*.
- Sopan Ali, A. (2020). Pengaruh Variasi Arus Pengelasan Terhadap Kekuatan Las SMAW Baja Karbon Rendah ST 37.
- Sulistiyono, F. (2025). *Jurnal E-Komtek Visual Inspection Of Welding Joints : Analysis Of The Causes Of Welding Defects And Solutions For Repair*. 9(1), 198–206.
- Sunandrio, H. (2015). Analisis Kerusakan Tube Thermocouple Pada Reaktor Hadi Sunandrio S / D 1200 ° C). *Hydrocracking Di Kilang Pengolahan Tahan Karat Tipe 304 Adalah Ketika Terserang Korosi Batas Butir Ketika*.
- Thompson, J. (2026). *Canadia Fabricating & Welding Handbook*. January.
- Yuslih, L. (2021). Analisa Hasil Pengelasan SMAW (Shielded Metal Arc Welding) Dan GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) Dengan Variasi Media Pendinginan Terhadap Kekerasan Stainless Steel AISI 304. 167–186.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

This page is intentionally left blank

LAMPIRAN

Lampiran 1. Proses Pengelasan



90

Lampiran 3. Welding Procedure Specification



ASUKA
ENGINEERING INDONESIA, PT

Page No : 1 of 2

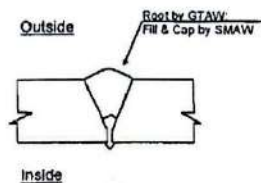
WELDING PROCEDURE SPECIFICATION

Section IX, ASME Boiler and Pressure Vessels

WPS No. : S-ITM-02 Date : October 6, 2014 Supporting PQR No. : R-ITM-002
Welding Process : GTAW + SMAW Type : Manual

JOINTS (QW-402)

Joint Design : See detail joint in drawing
Backing : Yes Backing Material (type) : Weld Metal
Retainers : None
Detail weld edge preparation shall be as per applicable drawing



BASE METALS (QW-403)

P No. 8 Group No. 1 to P No. 8 Group No. 1 or
Specification Type and Grade : Pipe SA 312 TP 304 to
to Specification Type and Grade : Pipe SA 312 TP 304
Thickness Range :
Base Metal (mm) : - Groove : Min. 1,5 mm (if impact test is not a requirement) or
Min. --- mm (if impact test is a requirement)
Max. 15,24 mm
- Fillet : NA
Other : maximum thickness each pass 13 mm for single or multiple pass

FILLER METALS (QW-404)

	GTAW	SMAW
SFA Spec. :	5,9	3,4
AWS Class :	ER 308L	E308-16
Filler Metal F No. :	6	5
Weld Metal Analysis A No. :	8	8
Size of Filler Metal (mm) :	ø 2,0 or 2,4 mm	ø 2,6 mm
Weld Metal Thickness (mm) : - Groove :	2-3 mm	4,62 mm (max)
- Fillet :	NA	NA
Flux / Wire Class. :	NA	NA
Flux / Wire Trade Name :	NA	NA
Supplemental :	NA	NA
Flux type :	NA	NA
Recrushed Slag :	NA	NA
Other :	---	---



POSITIONS (QW-405)

Position of Groove : 6G
Welding Progression : Uphill for vertical
Position of Fillet : NA
Other : --

PREHEAT (QW-406)

Preheat & Interpass Temp. (min, °C) : 10
Interpass Temp. (max, °C) : 177
Preheat Maintenance : NA
Other :

LF/A/08/1

Lampiran 4. Data Argon High Purity 99,98%

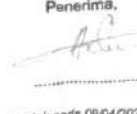
PT ASUKA SOLUSI GASINDO
 GRAHA ASUKA MANYAR RAYA RESORT BLOK A.2 NO.3
 RT000/RW000, SUKOMULYO, MANYAR, KAB. GRESIK, JAWA TIMUR,
 61151

SURAT JALAN

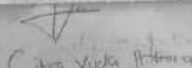
No. SJ : DO.2026.04.00026
 Tanggal : 10 Apr 2026
 Kepada : Ardiansyah
 Plumbungan, RT 005, RW 002, Plumbungan Sukodono

No. PO :
 No. Pol :
 Gudang : Gudang - Terisi
 Keterangan : Pengambilan oleh Customer (Roomo)

No	Kode	Nama Barang	Jumlah	Sat.	No. Tabung
1	ARHP	ARGON HIGH PURITY - 6M3	2	BTL	UEB06185, UEB18083

Hormat Kami, 
 Gudang, 
 Pengirim, 
 Penerima, 

Dicetak pada 09/04/2026, 14:38

Tgl. 
 Tgl. 
 Tgl. 

Lampiran 5. Proses Pengerjaan Metalografi



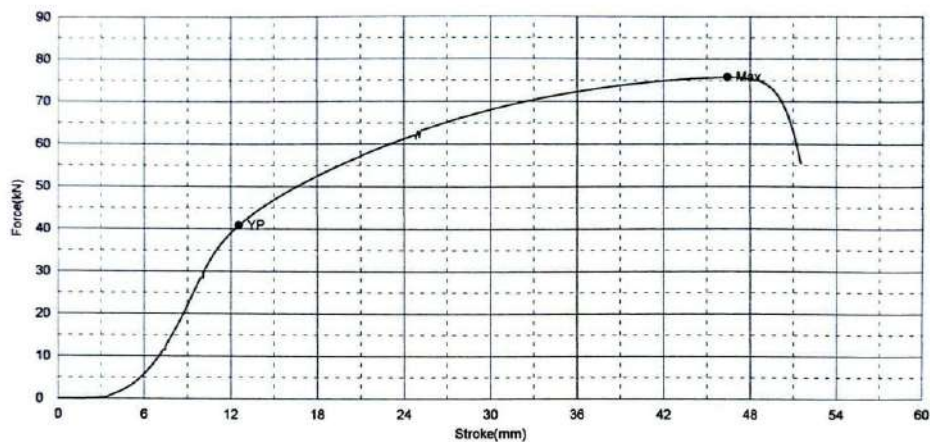
Lampiran 6. Hasil Pengujian Tensile Strenght A1-T1

POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA LABORATORIUM UJI BAHAN

Shape: Plate

	Thickness	Width	Gauge Length
Units	mm	mm	mm
A1	7,1100	18,8000	1,0000

Name	Area	Yield Force	Max. Force	Yield Strength	Max. Strength
Parameter		0,1 %/FS		0,1 %/FS	
Units	mm ²	kN	kN	MPa	MPa
A1	133,67	40,84	75,81	305,50	567,15



Comment

Putus di base metal

SPK No. : 40-IV/PL19/BJP/2026

Customer : Muhammad Ardiansyah NRP. 0722040078 /TL

Project: TUGAS AKHIR

Specimen : Pipa Sch 40 Thick 7.11mm

Material : SA 312 TP 304

Weld. process/Position/Welder : GTAW-SMAW / 6G / Tamam

Test method: ASTM E8/E8M

Reference code: ASME IX

Surabaya, May 22, 2026

[Signature]
(.....)

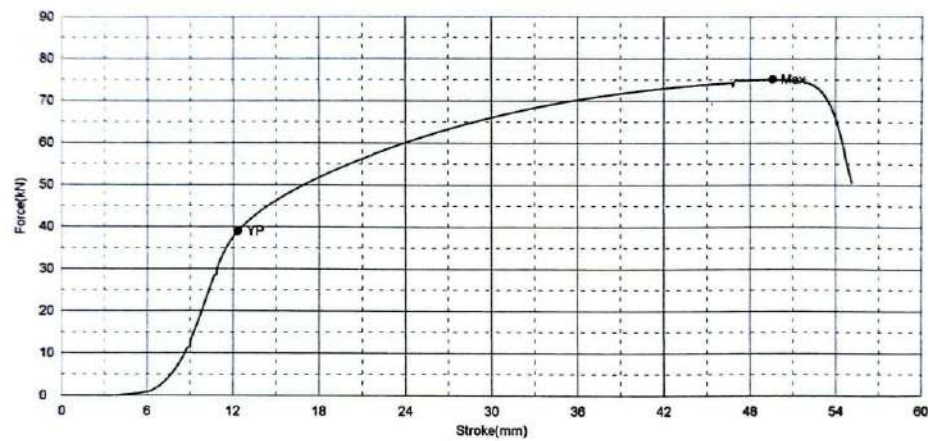
Lampiran 6. Lanjutan Hasil Pengujian Tensile Strenght A1-T2

POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA LABORATORIUM UJI BAHAN

Shape: Plate

	Thickness	Width	Gauge Length
Units	mm	mm	mm
A2	7,1100	19,0000	1,0000

Name	Area	Yield Force	Max. Force	Yield Strength	Max. Strength
Parameter		0,1 %/FS		0,1 %/FS	
Units	mm ²	kN	kN	MPa	MPa
A2	135,09	38,99	75,18	288,83	556,38



Comment

Putus di base metal

SPK No. : 40-IV/PL19/BJP/2026

Customer : Muhammad Ardiansyah NRP. 0722040078 /TL

Project: TUGAS AKHIR

Specimen : Pipa Sch 40 Thick 7.11mm

Material : SA 312 TP 304

Weld. process/Position/Welder : GTAW-SMAW / 6G / Tamam

Test method: ASTM E8/E8M

Reference code: ASME IX

Surabaya, May 22, 2026

(Signature)
(Nun Widyadipri)

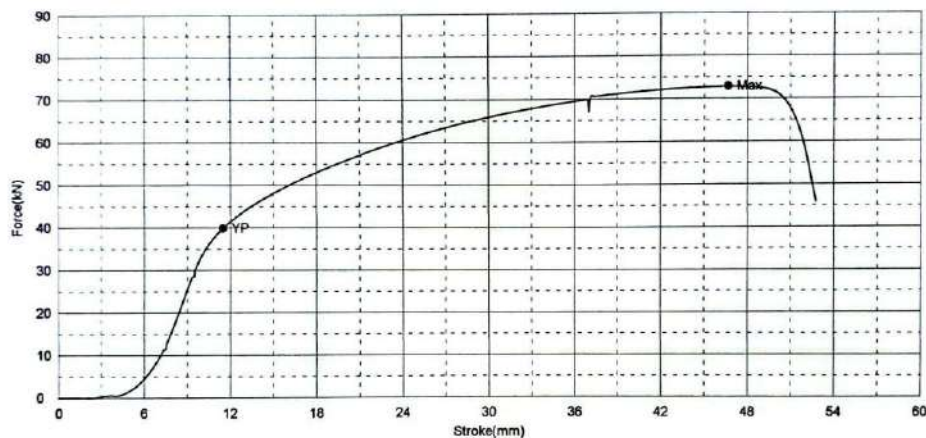
Lampiran 6. Lanjutan Hasil Pengujian Tensile Strenght A2-T1

**POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM UJI BAHAN**

Shape: Plate

	Thickness	Width	Gauge Length
Units	mm	mm	mm
B1	7,1100	18,7000	1,0000

Name	Area	Yield Force	Max. Force	Yield Strength	Max. Strength
Parameter		0,1 %/FS		0,1 %/FS	
Units	mm ²	kN	kN	MPa	MPa
B1	132,96	39,89	72,87	300,05	548,07



Comment

Putus di base metal

SPK No. : 40-IV/PL19/BJP/2026

Customer : Muhammad Ardiansyah NRP. 0722040078 /TL

Project: TUGAS AKHIR

Specimen : Pipa Sch 40 Thick 7.11mm

Material : SA 312 TP 304

Weld. process/Position/Welder : GTAW-SMAW / 6G / Tamam

Test method: ASTM E8/E8M

Reference code: ASME IX

Surabaya, May 22, 2026

Handwritten signature
(.....)

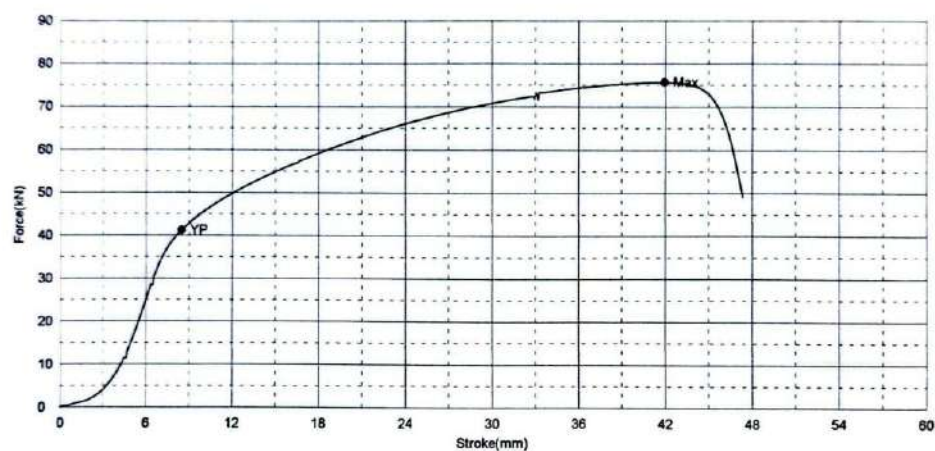
Lampiran 6. Lanjutan Hasil Pengujian Tensile Strenght A2-T2

POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA LABORATORIUM UJI BAHAN

Shape: Plate

	Thickness	Width	Gauge Length
Units	mm	mm	mm
B2	7,1100	18,9000	1,0000

Name	Area	Yield Force	Max. Force	Yield Strength	Max. Strength
Parameter		0,1 %/FS		0,1 %/FS	
Units	mm ²	kN	kN	MPa	MPa
B2	134,38	41,23	75,75	306,83	563,70



Comment

Putus di base metal

SPK No. : 40-IV/PL19/BJP/2026
Customer : Muhammad Ardiansyah NRP. 0722040078 /TL
Project: TUGAS AKHIR
Specimen : Pipa Sch 40 Thick 7.11mm
Material : SA 312 TP 304
Weld. process/Position/Welder : GTAW-SMAW / 6G / Tamam
Test method: ASTM E8/E8M
Reference code: ASME IX

Surabaya, May 22, 2026

[Signature]
(Muhammad Ardiansyah)

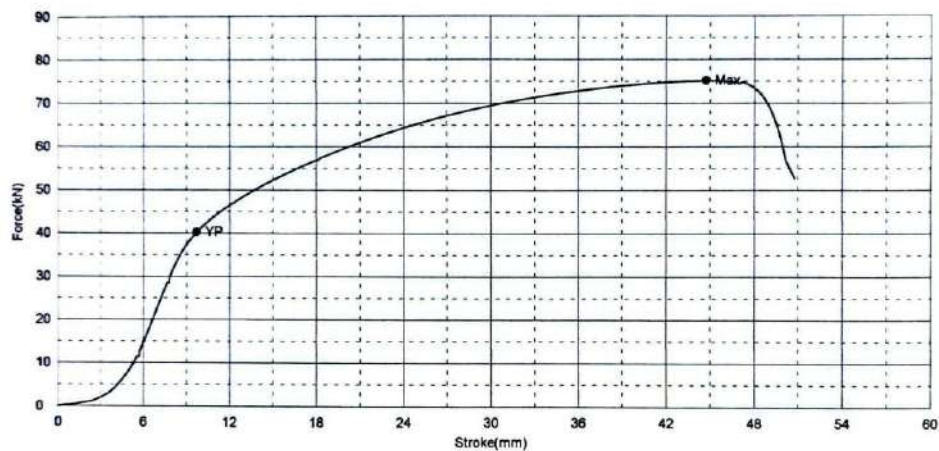
Lampiran 6. Lanjutan Hasil Pengujian Tensile Strenght A3-T1

**POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM UJI BAHAN**

Shape: Plate

	Thickness	Width	Gauge Length
Units	mm	mm	mm
C1	7,1100	19,0000	1,0000

Name	Area	Yield Force	Max. Force	Yield Strength	Max. Strength
Parameter		0,1 %/FS		0,1 %/FS	
Units	mm ²	kN	kN	MPa	MPa
C1	135,09	40,25	75,22	297,98	556,82



Comment

Putus di base metal

SPK No. : 40-IV/PL19/BJP/2026

Customer : Muhammad Ardiansyah NRP. 0722040078 /TL

Project : TUGAS AKHIR

Specimen : Pipa Sch 40 Thick 7.11mm

Material : SA 312 TP 304

Weld. process/Position/Welder : GTAW-SMAW / 6G / Tamam

Test method: ASTM E8/E8M

Reference code: ASME IX

Surabaya, May 22, 2026

(Signature)
(.....)

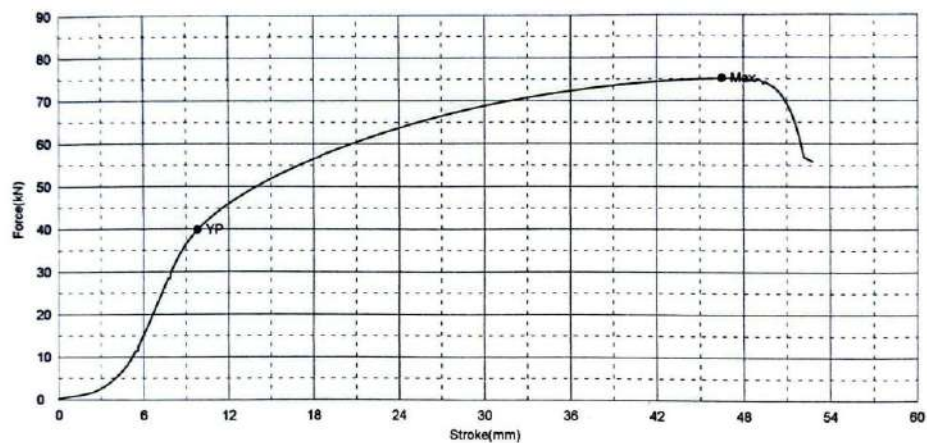
Lampiran 6. Lanjutan Hasil Pengujian Tensile Strenght A3-T2

**POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM UJI BAHAN**

Shape: Plate

	Thickness	Width	Gauge Length
Units	mm	mm	mm
C2	7,1100	19,0000	1,0000

Name	Area	Yield Force	Max. Force	Yield Strength	Max. Strength
Parameter		0,1 %/FS		0,1 %/FS	
Units	mm ²	kN	kN	MPa	MPa
C2	135,09	39,84	75,21	294,94	556,74



Comment

Putus di base metal

SPK No. : 40-IV/PL19/BJP/2026
Customer : Muhammad Ardiansyah NRP. 0722040078 /TL
Project: TUGAS AKHIR
Specimen : Pipa Sch 40 Thick 7.11mm
Material : SA 312 TP 304
Weld. process/Position/Welder : GTAW-SMAW / 6G / Tamam
Test method: ASTM E8/E8M
Reference code: ASME IX

Surabaya, May 22, 2026

[Signature]
(Muhammad Ardiansyah)

Lampiran 7. Spesimen Sebelum Uji Tarik



Lampiran 7. Lanjutan Spesimen Sesudah Uji Tarik



Lampiran 8. Hasil Pengujian Kekerasan A1



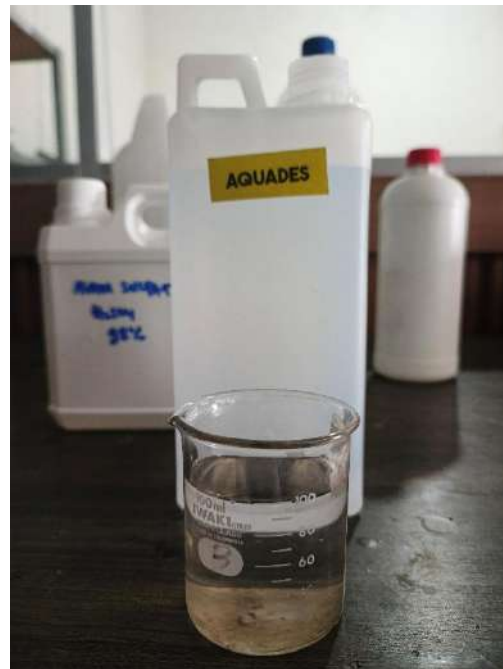
Lampiran 8. Lanjutan Hasil Pengujian Kekerasan A2



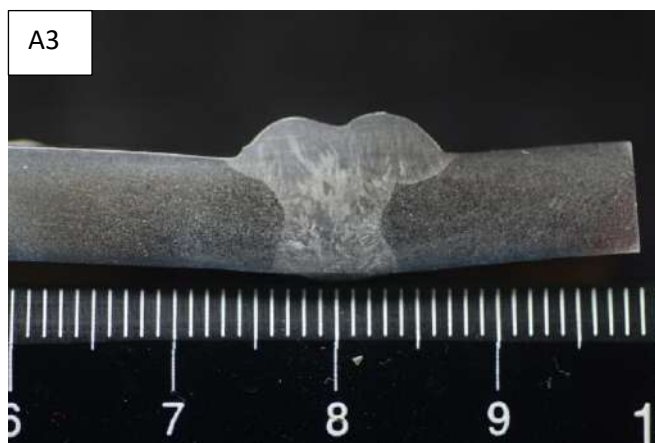
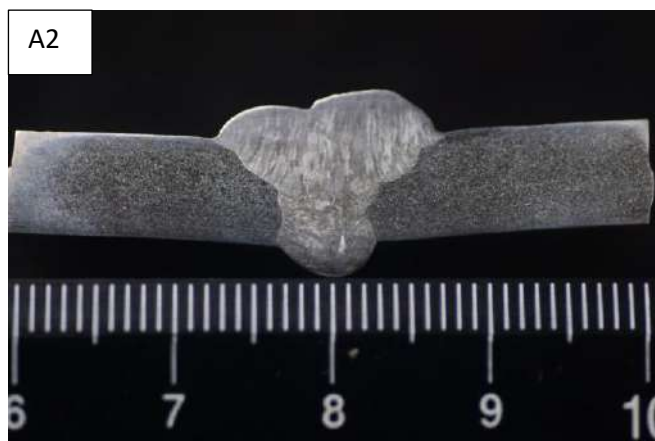
Lampiran 8. Lanjutan Hasil Pengujian Kekerasan A3



Lampiran 9. Pengujian Korosi



Lampiran 10. Hasil Uji Makro



Lampiran 11. Biodata Penulis

BIODATA PENULIS



MUHAMMAD ARDIANSYAH		
Tempat, Tanggal Lahir	Nama Panggilan	Jenis Kelamin
Sidoarjo, 21 Oktober 2003	Ardi	Laki Laki
Alamat	Kode Pos	Negara
Ds. Plumbungan RT.05 RW.02, Kec. Sukodono, Kab. Sidoarjo	61258	Indonesia
Email	No. Telp	Agama
muhammadardiansyah@student.ppns.ac.id	0881026886827	Islam
Riwayat Pendidikan		
Sekolah	Tahun	Jurusan
MI AL-HIDAYAH PLUMBUNGAN	2010 – 2016	-
SMPN 2 SUKODONO	2016 – 2019	-
SMKN 3 BUDURAN	2019 – 2022	PERMESINAN
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA (PPNS)	2022 – 2026	TEKNIK PENGELASAN