



TUGAS AKHIR (WE40050)

ANALISIS VARIASI KUAT ARUS DAN DURASI *POST-FLOW*
GAS PELINDUNG PADA PENGELASAN GTAW CP TITANIUM
ASME SB338 GR 2 TERHADAP KUAT TARIK, NILAI
KEKERASAN, DAN STRUKTUR MIKRO

PRASETYA WIRA HARTONO
NRP. 0722040064

DOSEN PEMBIMBING:
HENDRI BUDI KURNIYANTO, S.ST., M.T.
IMMANUEL FREDDY AUGUSTINO, S.ST., M.T.

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



PPNS POLITEKNIK
PERKAPALAN
NEGERI SURABAYA

TUGAS AKHIR (WE40050)

ANALISIS VARIASI KUAT ARUS DAN DURASI *POST-FLOW* GAS PELINDUNG PADA PENGELASAN GTAW CP TITANIUM ASME SB338 GR 2 TERHADAP KUAT TARIK, NILAI KEKERASAN, DAN STRUKTUR MIKRO

PRASETYA WIRA HARTONO
NRP. 0722040064

DOSEN PEMBIMBING:

HENDRI BUDI KURNIYANTO, S.ST., M.T.
IMMANUEL FREDDY AUGUSTINO, S.ST., M.T.

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

(halaman ini sengaja dikosongkan)

HALAMAN PENGESAHAN

LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR

ANALISIS VARIASI KUAT ARUS DAN DURASI *POST-FLOW* GAS
PELINDUNG PADA PENGELASAN GTAW CP TITANIUM ASME SB338
Gr 2 TERHADAP KUAT TARIK, NILAI KEKERASAN, DAN STRUKTUR
MIKRO

Disusun oleh:
Prasetya Wira Hartono
0722040064

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/NUPTK	Tanda Tangan
1. Dika Anggara, S.ST., M.T.	(0017079001)	(.....)
2. Mohammad Thoriq Wahyudi, S.T., M.M.	(0003086001)	(.....)
3. Dr. Rikat Eka Prastyawan W, S.Pd., M.Pd.	(0729108702)	(.....)
4. Immanuel Freddy Augustino, S.ST., M.T.	(9648770671130312)	(.....)

Dosen Pembimbing	NIDN/NUPTK	Tanda Tangan
1. Hendri Budi Kurniyanto, S.ST., M.T.	(0007039003)	(.....)
2. Immanuel Freddy Augustino, S.ST., M.T.	(9648770671130312)	(.....)

Menyetujui
Ketua Jurusan,



Ir. Prayitno 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)

PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT

PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT

	PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT	No. F 0011 F 013 Date: 5 September 2025 Rev: 00 Page: 1 dari 1
---	---------------------------------	---

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Pratiya Wati Hartono
NRP : 07120109604
Jurusan Prodi : Teknik Bangunan Kapal/D4 Teknik Pengelasan

Dengan ini menyatakan dengan sesungguhnya bahwa :

Tugas Akhir yang akan saya kerjakan dengan judul :

**ANALISIS VARIASI KUAT ALIR DAN DURASI POST-FLOW GAS PELINDUNG PADA
PENGELASAN GTAW CP TITANIUM ASME SB33 GR 2 TERHADAP KUAT TARIK,
NILAI KEKERASAN, AND STRUKTUR MIKRO**

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
menanggung sanksi sesuai ketentuan peraturan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan penuh tanggung jawab.

Dibuatnya, 09 September 2025



(halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis ucapkan kepada Allah SWT Tuhan Semesta Alam yang senantiasa melimpahkan rahmat, karunia, dan hidayah-nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “Analisis Variasi Kuat Arus dan Durasi *Post-flow* Gas Pelindung pada Pengelasan GTAW CP Titanium ASME SB338 Gr 2 terhadap Kuat Tarik, Nilai Kekerasan, dan Struktur Mikro” Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih atas segala hal baik yang telah diberikan kepada penulis, khususnya kepada:

1. Kedua orang tua penulis Bapak Prio Hartono dan Ibu Nurul Aini Rizqon, serta keluarga penulis yang senantiasa memberikan doa, dukungan, motivasi, serta bantuan selama penulis menempuh pendidikan.
2. Nabiilah Fitriani Hartono selaku kakak kandung penulis yang menjadi motivasi dalam penempuhan studi Teknik Pengelasan.
3. Bapak Rachmad Tri Soelistijono, S.T, M.T. Selaku Direktur Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
4. Bapak Ir. Priyambodo Nur Ardi Nugroho, S.T., M.T., Ph.D. Selaku Ketua Jurusan Teknik Bangunan Kapal Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
5. Bapak Moh. Syaiful Amri, S.ST., M.T. Selaku Ketua Program Studi D4 Teknik Pengelasan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
6. Ibu Adristi Nisazarifa, S.T., M.T. Selaku koordinator Tugas Akhir Program Studi Teknik Pengelasan 2026.
7. Bapak Hendri Budi Kurniyanto, S.ST., M.T. Selaku Dosen Pembimbing satu yang telah membimbing, mengarahkan, dalam penulisan serta penempuhan Tugas Akhir.
8. Bapak Immanuel Freddy Augustino, S.ST., M.T. Selaku Dosen Pembimbing dua yang telah membimbing, mengarahkan, dalam penulisan serta penempuhan Tugas Akhir.
9. Pimpinan dan seluruh Staff PT. PAL Indonesia (PERSERO) dan PT. PINDAD (PERSERO) atas ilmu, serta membimbing dan mengarahkan penulis dalam menentukan topik serta mengerjakan Tugas Akhir.

10. Bapak Ibu Dosen dan Staff Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya yang telah memberikan ilmu dan wawasan kepada penulis selama masa perkuliahan.
11. Seluruh keluarga besar mahasiswa Program Studi D4 Teknik Pengelasan, khususnya angkatan 2022 yang telah berjuang bersama dalam menempuh perkuliahan hingga selesai.
12. Kepada Achmad Danu Rizky yang membuat perjalanan perkuliahan penulis menjadi lebih berarti dan mendorong penulis sehingga termotivasi untuk berkembang menjadi pribadi yang lebih baik dari hari ke hari.
13. Kepada Reza Auditore dan Anton Ladesh Gimank yang selalu menghibur penulis dikala penat sehingga Tugas Akhir ini dapat selesai.
14. Kepada diri sendiri Prasetya Wira Hartono yang sudah mampu berusaha, berjuang dalam melewati masa pendidikan perkuliahan di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
15. Dan kepada siapapun yang tidak bisa penulis sebut satu persatu yang telah banyak membantu dan mendoakan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini. Semoga Allah, Tuhan Semesta Alam, senantiasa melimpahkan kebaikan serta membalas setiap doa dan amal baik dengan balasan yang terbaik. Penulis menyadari bahwa laporan Tugas Akhir ini masih memiliki keterbatasan dan kekurangan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan sebagai bahan evaluasi dan penyempurnaan, serta menjadi masukan bagi penelitian selanjutnya. Penulis berharap laporan Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat dan menjadi salah satu referensi bagi pengembangan penelitian di masa mendatang, khususnya bagi penulis maupun pembaca.

Surabaya, 09 September 2026

Prasetya Wira Hartono

ANALISIS VARIASI KUAT ARUS DAN DURASI *POST-FLOW* GAS PELINDUNG PADA PENGELASAN GTAW CP TITANIUM ASME SB338 GR 2 TERHADAP KUAT TARIK, NILAI KEKERASAN, DAN STRUKTUR MIKRO

Prasetya Wira Hartono

ABSTRAK

Titanium Murni Komersial Kelas 2 banyak digunakan dalam industri kimia, minyak dan gas, kelautan, serta biomedis karena memiliki ketahanan korosi, kekuatan spesifik, dan biokompatibilitas yang baik. Namun, titanium memiliki afinitas tinggi terhadap oksigen, nitrogen, dan hidrogen pada suhu tinggi sehingga kualitas sambungan dipengaruhi oleh parameter pengelasan, khususnya arus las dan durasi *post-flow*. Penelitian ini bertujuan mengetahui pengaruh arus las dan durasi *post-flow* terhadap kekuatan tarik, kekerasan, dan mikrostruktur. Pengelasan dilakukan menggunakan dua variasi arus dan empat variasi durasi *post-flow*. Spesimen diuji melalui inspeksi visual, mikroskopi optik, pengujian kekerasan Vickers, dan pengujian tarik. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan durasi *post-flow* meningkatkan efektivitas perlindungan gas dan mengurangi oksidasi permukaan las. Logam las didominasi mikrostruktur Widmanstätten, sedangkan logam dasar mempertahankan struktur ekuaksial. Kekerasan tertinggi sebesar 303,12 HV dan kekuatan tarik tertinggi sebesar 475,88 MPa diperoleh pada arus 60 A dengan *post-flow* 0 detik. Nilai terendah, yaitu kekerasan 200,71 HV dan kekuatan tarik 411,61 MPa, diperoleh pada arus 40 A dengan *post-flow* 15 detik. Semakin lama durasi *post-flow*, kekerasan dan kekuatan tarik cenderung menurun. Hasil penelitian memberikan panduan dalam mengoptimalkan parameter GTAW untuk menghasilkan sambungan titanium berkualitas.

Kata kunci: CP Titanium Grade 2, GTAW, kuat arus, *post-flow*, *autogenous*

(halaman ini sengaja dikosongkan)

ANALYSIS OF VARIATION OF WELDING CURRENT AND SHIELDING GAS POST-FLOW DURATION IN GTAW WELDING OF CP TITANIUM ASME SB338 GR 2 ON TENSILE STRENGTH, HARDNESS, AND MICROSTRUCTURE

Prasetya Wira Hartono

ABSTRACT

Commercially pure titanium grade 2 is widely used in the chemical, oil and gas, marine, and biomedical industries due to its excellent corrosion resistance, high specific strength, and good biocompatibility. However, titanium exhibits a high affinity for oxygen, nitrogen, and hydrogen at elevated temperatures, making weld joint quality highly dependent on welding parameters, particularly welding current and post-flow duration. This study investigate the effects of welding current and post-flow duration on tensile strength, hardness, and microstructure. Welding was performed using two welding current variations and four post-flow duration variations. The welded specimens were evaluated through visual inspection, optical microscopy, Vickers hardness testing, and tensile testing. The results showed that increasing the post-flow duration improved shielding gas protection and reduced oxidation on the weld surface. The weld metal was predominantly characterized by a Widmanstätten microstructure, while the base metal retained an equiaxed structure. The highest hardness of 303.12 HV and tensile strength of 475.88 MPa were obtained at a welding current of 60 A with a post-flow duration of 0 seconds. The lowest hardness of 200.71 HV and tensile strength of 411.61 MPa were obtained at 40 A with a post-flow duration of 15 seconds. Longer post-flow durations tended to result in lower hardness and tensile strength. These findings provide practical guidance for optimizing GTAW parameters to produce high-quality titanium weld joints.

Keywords: CP Titanium Grade 2, GTAW, welding current, post-flow, autogenous.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN	iv
PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT	vi
ABSTRAK.....	x
ABSTRACT.....	xii
DAFTAR ISI	xiv
DAFTAR TABEL	xviii
DAFTAR GAMBAR	xx
DAFTAR LAMPIRAN	xxii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Tujuan Penelitian.....	3
1.4. Manfaat Penelitian.....	4
1.5. Batasan Masalah.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Commercially Pure Titanium	5
2.2 ASME SB338 <i>Grade 2</i>	6
2.3 Pengelasan	7
2.4 Pengelasan GTAW	8
2.5 <i>Autogenous Welding</i>	10
2.6 <i>Joint Design</i>	11
2.7 Arus Pengelasan	12
2.8 <i>Post-flow</i>	15
2.9 Sistem Perlindungan Gas Pada Pengelasan Titanium	17
2.9.1 <i>Shielding gas</i>	18

2.9.2	<i>Backing gas</i>	19
2.9.3	<i>Trailing gas</i>	19
2.10	Pengujian Visual	20
2.11	Penelitian Terdahulu	22
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		27
3.1	Diagram alir penelitian.....	27
3.2	Studi lapangan.....	28
3.3	Studi literatur.....	28
3.4	Proses pengelasan.....	28
3.4.1.	Persiapan material	28
3.4.2.	Persiapan peralatan.....	29
3.4.3.	Pemotongan.....	29
3.4.4.	<i>Surface preparation</i>	29
3.4.5.	Proses <i>fit-up</i>	30
3.4.6.	Pengaplikasian sistem perlindungan gas	31
3.4.7.	Perencanaan parameter.....	34
3.4.8.	Pengelasan.....	34
3.5	Pengujian.....	36
3.5.1	Pengujian visual	36
3.5.2	Pengujian tarik	37
3.5.3	Pengujian kekerasan.....	39
3.5.4	Pengujian mikro	40
3.5.5	Pengujian makro.....	41
3.6	Analisa dan pembahasan	41
3.7	Kesimpulan	42
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		43

4.1.	Hasil Pengujian Visual	43
4.2.	Hasil Pengujian Tarik	44
4.3.	Hasil dan Pembahasan Pengujian Hardness Vickers.....	48
4.4.	Hasil Pembahasan Pengujian Makro	51
4.5.	Hasil dan Pembahasan Pengujian Mikro	52
4.6.	Analisa Keseluruhan.....	61
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		65
5.1.	Kesimpulan.....	65
5.2.	Saran	66
DAFTAR PUSTAKA		67
LAMPIRAN		69
BIOGRAFI PENULIS.....		91

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 <i>Chemical Composition</i>	7
Tabel 2. 2 <i>Mechanical Properties</i>	7
Tabel 2. 3 <i>Surface Color in Titanium Welds</i>	22
Tabel 3. 1 Perencanaan Parameter	36
Tabel 4. 1 Data Uji Visual	44
Tabel 4. 2 Data Uji Tarik	45
Tabel 4. 3 Nilai pengujian kekerasan pada daerah weld metal	49
Tabel 4. 4 Nilai pengujian kekerasan pada daerah HAZ	49
Tabel 4. 5 Nilai pengujian kekerasan pada daerah base metal	49

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Proses Pengelasan GTAW	9
Gambar 2. 2 GTAW <i>Shielding Gas</i>	18
Gambar 2. 3 <i>Backing shield</i>	19
Gambar 2. 4 <i>Trailing Shield</i>	20
Gambar 2. 5 Warna Pada Sambungan Titanium	21
Gambar 3. 1 Diagram Alir	27
Gambar 3. 2 Material ASME SB338 Gr.2	28
Gambar 3. 3 Desain Sambungan	31
Gambar 4. 1 Hasil Pengujian Visual	44
Gambar 4. 2 Grafik Rata-Rata Pengujian Tarik	45
Gambar 4. 3 Spesimen Uji Tarik.....	47
Gambar 4. 4 Grafik Rata-Rata Nilai Kekerasan	50
Gambar 4. 5 Hasil Pengujian Makro	52
Gambar 4. 6 Struktur Mikro Daerah Base Metal	52
Gambar 4. 7 Struktur Mikro Daerah Weld Metal.....	55
Gambar 4. 8 Struktur Mikro Daerah HAZ	57

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A 1. <i>Material Inspeccion Certificate</i>	69
Lampiran A 2. <i>Material Inspection Report</i>	69
Lampiran A 3. <i>Heat Number Material</i>	70
Lampiran B 1. Pembuatan <i>Trailing</i>	70
Lampiran B 2. Pengaplikasian <i>Infused</i>	70
Lampiran B 3. Pengaplikasian Gas.....	70
Lampiran B 4. <i>Fit-up Material</i>	70
Lampiran C 1. Pengaturan <i>post-flow</i>	71
Lampiran C 2. Pengukuran Arus	71
Lampiran C 3. Proses Pengelasan	72
Lampiran D 1. Pengujian <i>Tensile</i>	72
Lampiran D 2. Pengujian <i>Hardness Vickers</i>	73
Lampiran D 3. Pengujian Metallography	73
Lampiran D 4. Hasil Pengujian Tarik Spesimen A1 (1)	74
Lampiran D 5. Hasil Pengujian Tarik Spesimen A1 (2)	75
Lampiran D 6. Hasil Pengujian Tarik Spesimen A2 (1)	76
Lampiran D 7. Hasil Pengujian Tarik Spesimen A2 (2)	77
Lampiran D 8. Hasil Pengujian Tarik Spesimen A3 (1)	78
Lampiran D 9. Hasil Pengujian Tarik Spesimen A3 (2)	79
Lampiran D 10. Hasil Pengujian Tarik Spesimen A4 (1).....	80
Lampiran D 11. Hasil Pengujian Tarik Spesimen A4 (2).....	81
Lampiran D 12. Hasil Pengujian Tarik Spesimen B1 (1).....	82
Lampiran D 13. Hasil Pengujian Tarik Spesimen B1 (2).....	83
Lampiran D 14. Hasil Pengujian Tarik Spesimen B2 (1).....	84
Lampiran D 15. Hasil Pengujian Tarik Spesimen B2 (2).....	85
Lampiran D 16. Hasil Pengujian Tarik Spesimen B3 (1).....	86
Lampiran D 17. Hasil Pengujian Tarik Spesimen B3 (2).....	87
Lampiran D 18. Hasil Pengujian Tarik Spesimen B4 (1).....	88
Lampiran D 19. Hasil Pengujian Tarik Spesimen B4 (2).....	89

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1.Latar Belakang

Perkembangan industri manufaktur modern, khususnya pada sektor energi, petrokimia, dirgantara, dan medis, menuntut penggunaan material yang memiliki kombinasi sifat mekanik yang baik, ketahanan korosi tinggi, serta rasio kekuatan terhadap berat yang unggul. Salah satu material yang banyak digunakan untuk memenuhi kebutuhan tersebut adalah titanium, khususnya *commercially pure* (CP) titanium ASME SB338 *Grade 2*. Material ini dikenal memiliki ketahanan korosi yang sangat baik, terutama pada lingkungan yang mengandung klorida dan bersifat reduktif, sehingga sering diaplikasikan dalam bentuk pipa dan tabung untuk sistem fluida bertekanan maupun lingkungan agresif.

Dalam aplikasinya, titanium sering memerlukan proses penyambungan, dan metode pengelasan yang paling umum digunakan adalah *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW). Proses GTAW dipilih karena mampu menghasilkan kualitas sambungan yang tinggi, kontrol panas yang baik, serta kebersihan logam las yang lebih terjaga. Namun demikian, pengelasan titanium memiliki tantangan tersendiri karena sifatnya yang sangat reaktif terhadap gas atmosfer seperti oksigen, nitrogen, dan hidrogen pada temperatur tinggi. Kontaminasi gas-gas tersebut dapat menyebabkan peningkatan kekerasan, penurunan keuletan, serta menurunnya kekuatan tarik sambungan las, bahkan berpotensi menimbulkan kegagalan dini pada komponen. (Karpagaraj *et al.*, 2015)

Salah satu parameter penting dalam pengelasan GTAW adalah kuat arus. Variasi kuat arus secara langsung memengaruhi besarnya heat input, ukuran kolam las, lebar *Heat Affected Zone* (HAZ), serta laju pendinginan. Pada material titanium berdinding tipis, perubahan kecil pada arus pengelasan dapat memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kualitas sambungan, baik dari segi sifat mekanik maupun struktur mikro. Menurut penelitian yang dilakukan oleh (Obloh, 2024) Arus yang terlalu rendah

berpotensi menyebabkan kurangnya penetrasi dan sambungan yang tidak sempurna, sedangkan arus yang terlalu tinggi dapat meningkatkan risiko oksidasi, pelebaran HAZ, serta penurunan sifat mekanik akibat kontaminasi gas atmosfer. Variabel kuat arus berperan sangat penting karena ia secara langsung mengontrol *heat input* ke dalam logam induk dan daerah yang terpengaruh panas (HAZ), yang selanjutnya memengaruhi sifat mekanik dan struktur mikro hasil las. Arus yang lebih tinggi cenderung meningkatkan *heat input*, sehingga menghasilkan kolam las yang lebih besar, pendinginan yang lebih lambat, dan pertumbuhan butir yang lebih kasar di zona las dan HAZ. kondisi ini umumnya menurunkan kekuatan mekanik seperti kekuatan tarik dan kekerasan jika tidak diatur dengan baik karena mikrostruktur yang lebih kasar kurang tahan terhadap deformasi plastis, sedangkan arus yang terlalu rendah dapat menyebabkan penetrasi kurang memadai dan nilai mekanik yang buruk sehingga struktur mikro tidak optimal dan kekuatan tarik berkurang. Penelitian komprehensif pada proses GTAW juga menunjukkan bahwa kombinasi nilai arus yang tidak tepat dapat menyebabkan perubahan ukuran butir dan karakteristik zona las sehingga memengaruhi secara keseluruhan, oleh karena itu variasi kuat arus yang digunakan dalam penelitian ini adalah 40 A dan 60 A.

Selain kuat arus, efektivitas perlindungan gas pelindung juga menjadi faktor krusial dalam pengelasan titanium. Salah satu aspek penting dari sistem perlindungan gas adalah durasi *post-flow* gas pelindung, yaitu waktu aliran gas argon yang dipertahankan setelah busur las dimatikan. *Post-flow* berfungsi untuk melindungi logam las dan daerah sekitarnya yang masih berada pada temperatur tinggi dari paparan udara bebas. Menurut penelitian yang pernah dilakukan oleh (Karpagaraj *et al.*, 2018) menyebutkan bahwa durasi *post-flow* gas pelindung dan luas area perlindungan merupakan dua parameter utama yang secara langsung mengendalikan tingkat kontaminasi selama proses pengelasan. Apabila waktu aliran gas pelindung terlalu singkat, perlindungan gas dapat berhenti sebelum logam las mendingin hingga di bawah 400 °C, sehingga menyebabkan terjadinya kontaminasi pada hasil pengelasan *commercially*

pure titanium. Selain itu mengacu pada *American Welding Society* dikatakan bahwa durasi *post-flow* gas pelindung yang dikendalikan oleh pengatur waktu direkomendasikan untuk dipertahankan selama minimal 30 detik setelah busur las dipadamkan, dengan tujuan melindungi logam las yang baru membeku serta elektroda tungsten dari kontaminasi. Akan tetapi hal itu bergantung pada spesifikasi material dan parameter pengelasan, oleh karena itu pada penelitian ini akan meneliti durasi *post-flow* 0s, 5s, 10s, dan 15s.

Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh variasi kuat arus dan durasi *post-flow* gas pelindung pada proses pengelasan GTAW *commercially pure* titanium ASME SB338 *Grade 2* terhadap kuat tarik, nilai kekerasan, dan struktur mikro sambungan las. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah berupa pemahaman yang lebih mendalam mengenai pengaruh parameter pengelasan terhadap kualitas sambungan las titanium, serta menjadi acuan dalam penentuan parameter pengelasan yang optimal untuk aplikasi industri.

1.2.Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka didapat rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana hasil kuat arus dan *post-flow* pengelasan GTAW terhadap kuat tarik sambungan las ASME SB338 Gr 2?
2. Bagaimana hasil kuat arus dan *post-flow* pengelasan GTAW terhadap nilai kekerasan sambungan las ASME SB338 Gr 2?
3. Bagaimana hasil kuat arus dan *post-flow* pengelasan GTAW terhadap struktur mikro sambungan las ASME SB338 Gr 2?

1.3.Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah diatas maka diperoleh tujuan sebagai berikut:

1. Mengetahui hasil kuat arus dan durasi *post-flow* pengelasan GTAW ASME SB338 Gr 2 terhadap kuat tarik.
2. Mengetahui hasil kuat arus dan durasi *post-flow* pengelasan GTAW ASME SB338 Gr 2 terhadap nilai kekerasan.
3. Mengetahui hasil kuat arus dan durasi *post-flow* pengelasan GTAW ASME SB338 Gr 2 terhadap struktur mikro.

1.4. Manfaat Penelitian

Dengan dilakukannya penelitian ini maka dapat diambil manfaat sebagai berikut :

1. Manfaat bagi akademik, sebagai sarana penambah dan pengaplikasian ilmu pengetahuan yang pernah diperoleh.
2. Manfaat bagi Industri, dapat memberi informasi mengenai hasil pengelasan GTAW menggunakan material CP Titanium ASME SB338 Gr 2 dengan variasi kuat arus dan durasi *post-flow* gas pelindung terhadap kuat tarik, nilai kekerasan, dan struktur mikro.

1.5. Batasan Masalah

1. Material yang digunakan adalah CP Titanium ASME SB338 Gr 2.
2. Diameter luar material adalah 25,4 mm
3. Ketebalan material 0.889 mm.
4. Metode pengelasan yang digunakan adalah *gas tungsten arc welding* (GTAW).
5. Posisi pengelasan yang dilakukan adalah 1G.
6. Gas pelindung yang digunakan adalah argon.
7. Variasi kuat arus adalah 40 A dan 60 A.
8. Variasi durasi *post-flow* gas pelindung adalah 0s, 5s, 10s, 15s
9. Tipe sambungan adalah *square butt joint*.
10. Pengelasan tanpa menggunakan logam pengisi.
11. Pengujian yang dilakukan adalah kuat tarik, nilai kekerasan, dan struktur mikro

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Commercially Pure Titanium

Titanium merupakan salah satu logam dengan rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi serta ketahanan korosi yang sangat baik, sehingga banyak digunakan pada industri manufaktur seperti *aerospace*, medis, kimia, kelautan, dan pembangkit energi. Titanium memiliki titik leleh yang relatif tinggi dan stabilitas mekanik yang baik pada suhu tinggi, namun bersifat sangat reaktif terhadap unsur gas seperti oksigen, nitrogen, dan hidrogen pada temperatur di atas ± 500 °C. Sifat reaktivitas ini menjadi tantangan utama dalam proses pengelasan karena dapat menyebabkan penurunan sifat mekanik apabila tidak dikendalikan dengan perlindungan gas yang memadai. (Karpagaraj *et al.*, 2015)

Titanium diklasifikasikan menjadi beberapa jenis berdasarkan kemurnian, struktur fasa, dan paduan yang terkandung, yang memengaruhi sifat mekanik dan aplikasinya. Salah satu klasifikasi utama adalah *Commercially Pure Titanium* (CP-Ti), yaitu titanium murni dengan kandungan paduan sangat rendah ($\geq 99\%$), yang dibagi lagi menjadi *Grade 1* hingga *Grade 4* berdasarkan kadar oksigen. Semakin tinggi kadar oksigen, semakin besar kekuatan tarik dan kekerasan, tetapi keuletan dan formabilitasnya menurun.

Keunggulan lain dari titanium adalah biokompatibilitasnya yang sangat baik, yang menjadikan material ini banyak diaplikasikan dalam bidang medis. Meskipun memiliki berbagai keunggulan, *commercially pure titanium* (CP titanium) dikenal sebagai material yang relatif sulit untuk dilas. Namun demikian, dengan penerapan prosedur yang tepat, pengelasan titanium tetap dapat menghasilkan sambungan yang berkualitas. Faktor-faktor penting yang harus diperhatikan dalam pengelasan titanium meliputi

Selain itu, kemampuan las titanium sangat dipengaruhi oleh dua karakteristik utama, yaitu reaktivitas yang sangat tinggi terhadap oksigen

dan sensitivitasnya terhadap kontaminasi atmosfer. (Bendikiene *et al.*, 2018)

2.2 ASME SB338 Grade 2

ASME SB338 Grade 2 merupakan spesifikasi *material commercially pure titanium* (CP titanium) yang ditetapkan oleh *American Society of Mechanical Engineers* (ASME) untuk produk berbentuk pipa dan *tube* tanpa sambungan (*seamless dan welded*). Material ini banyak digunakan pada industri seperti industri kimia, petrokimia, pembangkit listrik, penukar panas (*heat exchanger*), serta aplikasi kelautan. Grade 2 dikenal sebagai CP titanium yang paling umum digunakan karena memiliki keseimbangan yang baik antara kekuatan mekanik, keuletan, dan ketahanan korosi.

Secara kimia, ASME SB338 Grade 2 diklasifikasikan sebagai titanium murni dengan kandungan unsur paduan yang sangat rendah. Kandungan unsur seperti oksigen, nitrogen, karbon, dan hidrogen dibatasi secara ketat karena unsur-unsur tersebut sangat berpengaruh terhadap sifat mekanik titanium. Kandungan oksigen yang lebih tinggi akan meningkatkan kekuatan dan kekerasan material, namun di sisi lain dapat menurunkan keuletannya.

Dari sisi sifat mekanik, ASME SB338 Grade 2 memiliki kekuatan tarik sedang dengan keuletan yang baik, sehingga material ini masih mudah dibentuk dan dilas dibandingkan titanium dengan kandungan oksigen lebih tinggi. Struktur mikro ASME SB338 Grade 2 pada kondisi awal umumnya didominasi oleh fase α (alpha) dengan ukuran butir relatif halus. Struktur ini memberikan kombinasi sifat mekanik yang stabil, namun juga membuat material sensitif terhadap perubahan mikrostruktur akibat *heat input* selama proses pengelasan. ASME SB338 Grade 2 memiliki *chemical composition* dan *mechanical properties* yang ditunjukkan pada Tabel 2.1 dan Tabel 2.2 sebagai berikut:

Tabel 2. 1 *Chemical Composition*

Steel Grade	Composition %							
	Nitrogen max	Carbon max	Hydrogen max	Iron max	Oxygen max	Residual max each	Residual max total	Ti
Gr.2	0.03	0.08	0.015	0.3	0.25	0.1	0.4	balance

Sumber: <https://www.ctstubes.com/product/titanium-tubes-asme-sb338-gr-2/>

Tabel 2. 2 *Mechanical Properties*

Grade	Tensile strength, min		Yield Strength, 0.2% Offset				Ti
	ksi	Mpa					in
	50	345					2 in. or 50mm
			min		max		min, %
Gr.2			ksi	Mpa	ksi	Mpa	`20
			40	275	65	450	

Sumber: <https://www.ctstubes.com/product/titanium-tubes-asme-sb338-gr-2/>

2.3 Pengelasan

Menurut pada *American Welding Society* (AWS), pengelasan didefinisikan sebagai suatu proses penyambungan material yang menghasilkan ikatan metalurgi melalui pemanasan hingga mencapai temperatur yang sesuai, dengan atau tanpa penambahan logam pengisi, serta dapat disertai atau tanpa pemberian tekanan. Proses ini bertujuan untuk menyatukan dua atau lebih material menjadi satu kesatuan yang bersifat permanen dan memiliki kekuatan struktural yang memadai.

Definisi tersebut menegaskan bahwa pengelasan tidak hanya bergantung pada pencairan material, tetapi juga pada terbentuknya ikatan metalurgi sebagai hasil dari interaksi termal selama proses berlangsung. Oleh karena itu, kualitas sambungan las sangat dipengaruhi oleh pengendalian parameter pengelasan, seperti sumber panas, waktu pemanasan, serta kondisi lingkungan di sekitar daerah las. Kesalahan dalam pengendalian parameter tersebut dapat menyebabkan cacat las atau penurunan sifat mekanik sambungan.

Dalam penerapannya, pengelasan menurut AWS mencakup berbagai metode dan teknik yang disesuaikan dengan jenis material dan kebutuhan aplikasi. Pada material yang bersifat reaktif seperti titanium, definisi ini menekankan pentingnya pengendalian atmosfer selama proses

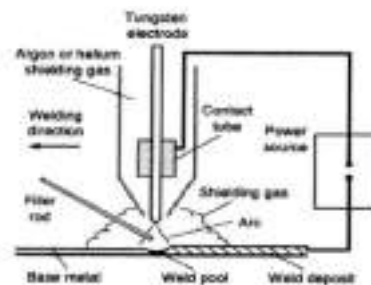
pengelasan agar tidak terjadi kontaminasi yang dapat mengganggu pembentukan ikatan metalurgi. Dengan demikian, pengelasan bukan hanya sekadar proses penyambungan, tetapi juga merupakan proses metalurgi yang memerlukan pengendalian yang cermat untuk menghasilkan sambungan berkualitas tinggi.

2.4 Pengelasan GTAW

Gas Tungsten Arc Welding (GTAW), juga dikenal sebagai *Tungsten Inert Gas welding*, adalah salah satu proses pengelasan busur listrik yang dikembangkan sejak akhir 1930-an untuk memenuhi kebutuhan pengelasan material yang sulit, seperti titanium. Pada proses ini, panas las dihasilkan oleh busur listrik yang terbentuk antara elektroda tungsten dan permukaan benda kerja, sedangkan gas berfungsi untuk mempertahankan busur serta melindungi logam cair dari kontaminasi oleh udara sekitar selama pengelasan. Gas pelindung yang umum digunakan termasuk argon, helium, atau campuran keduanya, yang dipilih berdasarkan karakter material dan kondisi pengelasan. GTAW dikenal luas karena kemampuannya menghasilkan sambungan las berkualitas tinggi. Proses ini memberikan kontrol panas yang sangat baik, sehingga cocok untuk pengelasan material tipis dan logam non-ferrous seperti titanium yang sangat sensitif terhadap perubahan panas. Kontrol input panas yang baik juga menghasilkan *heat affected zone* (HAZ) yang sempit, sehingga perubahan mikrostruktur di daerah HAZ dapat diminimalkan. (Wang *et al.*, 2017).

Parameter GTAW yang utama meliputi kuat arus las, tegangan busur, polaritas, laju alir gas pelindung, kecepatan las, serta konfigurasi elektroda. Setiap parameter memainkan peran penting dalam membentuk kualitas sambungan las. Sebagai contoh, variasi arus las akan mempengaruhi *heat input*, penetrasi las, dan ukuran HAZ, sedangkan variasi laju alir gas pelindung menentukan efektivitas perlindungan terhadap oksidasi dan kontaminasi udara. Pengaturan parameter-parameter ini harus dilakukan secara tepat untuk menghasilkan sambungan yang stabil dan bebas cacat. (Thakur *et al.*, 2016).

Proses *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) merupakan metode penyambungan yang paling umum digunakan untuk pengelasan titanium dan paduannya. Panas pengelasan dihasilkan oleh busur listrik yang terbentuk antara elektroda tungsten dan logam induk. Gas *inert* yang dialirkan melalui *torch* berfungsi untuk menjaga kestabilan busur serta melindungi elektroda tungsten dan kolam las dari kontaminasi atmosfer. Proses pengelasan dapat dilakukan tanpa logam pengisi (*autogenous welding*) maupun dengan penambahan kawat pengisi sesuai kebutuhan aplikasi. (AWS, 2021). Ditunjukkan pada Gambar 2. 1 sebagai berikut:



Gambar 2. 1 Proses Pengelasan GTAW
Sumber: (Thakur, Thakur and Chapgaon, 2016)

Kelebihan menggunakan proses GTAW:

1. Menghasilkan kualitas sambungan las yang tinggi, dengan permukaan las yang bersih dan bebas dari percikan (*spatter*).
2. Kontrol masukan panas (*heat input*) sangat baik.
3. Zona pengaruh panas (HAZ) relatif sempit.
4. Dapat digunakan untuk hampir semua jenis logam.
5. Memberikan pengendalian parameter yang presisi, seperti arus las, polaritas, dan aliran gas pelindung, sehingga sangat sesuai untuk keperluan penelitian dan analisis ilmiah.
6. Tidak menggunakan fluks, sehingga tidak meninggalkan terak dan mengurangi risiko cacat akibat inklusi.

Kekurangan menggunakan proses GTAW:

1. Laju logam pengisi relatif rendah.

2. Memerlukan keterampilan dan koordinasi operator yang tinggi, karena pengendalian elektroda, busur, dan logam pengisi dilakukan secara manual.
3. Biaya operasional relatif lebih tinggi, terutama akibat penggunaan gas *inert* dengan kemurnian tinggi dan peralatan yang lebih kompleks.
4. Kurang efisien untuk material dengan ketebalan besar, karena penetrasi dan laju pengelasan terbatas.
5. Khusus material titanium sangat sensitif terhadap perlindungan gas, khususnya pada pengelasan titanium, sehingga diperlukan pengaturan *shielding*, *backing*, dan *trailing* gas yang optimal.
6. Risiko penurunan sifat mekanik, seperti meningkatnya kekerasan dan menurunnya keuletan, apabila perlindungan gas tidak sempurna dan terjadi kontaminasi atmosfer.

2.5 Autogenous Welding

Autogenous welding adalah metode pengelasan di mana penyambungan logam dilakukan tanpa menggunakan logam pengisi. Sambungan terbentuk semata-mata dari peleburan dan penyatuan logam dasar akibat panas yang dihasilkan oleh sumber panas pengelasan. Dalam proses ini, kualitas sambungan sangat bergantung pada kemampuan logam dasar untuk melebur secara sempurna di sepanjang garis sambungan.

Pada praktiknya, *autogenous welding* banyak diterapkan pada material berdinding tipis, komponen presisi, serta sambungan dengan toleransi dimensi yang ketat. Ketiadaan logam pengisi memungkinkan kontrol yang lebih baik terhadap geometri sambungan dan meminimalkan risiko perubahan komposisi kimia daerah las. Namun demikian, karena tidak adanya logam pengisi, desain sambungan dan pengaturan parameter pengelasan menjadi faktor yang sangat kritis untuk memastikan penetrasi dan fusi yang memadai.

Dari sudut pandang metalurgi, *autogenous welding* menghasilkan struktur mikro sambungan yang sepenuhnya berasal dari logam dasar. Hal ini dapat menjadi keuntungan karena sifat mekanik sambungan cenderung mendekati sifat material induk. Di sisi lain, tidak adanya logam pengisi juga berarti tidak ada unsur paduan tambahan yang dapat digunakan untuk memperbaiki ketahanan retak atau menyesuaikan sifat mekanik sambungan.

Autogenous welding menuntut kontrol *heat input* yang lebih presisi dibandingkan pengelasan dengan logam pengisi. *Heat input* yang terlalu rendah dapat menyebabkan kurangnya penetrasi, sedangkan *heat input* yang berlebihan dapat memperbesar daerah terpengaruh panas (HAZ) dan memicu pertumbuhan butir yang berlebihan. Oleh karena itu, metode ini umumnya digunakan pada proses pengelasan dengan kontrol panas yang baik, seperti Gas Tungsten Arc Welding (GTAW).

2.6 Joint Design

Menurut *American Welding Society* (AWS), sambungan dapat didefinisikan sebagai, “Bagaimana material dapat disambung dengan yang lain”. yang berarti dalam proses pengelasan kekuatan pada sambungan las tidak hanya berasal dari logam pengisi dan api, melainkan keterlibatan pada sebuah sambungan las yang tepat. Penerapan pengelasan tidak terbatas dan pekerjaan yang berbeda memerlukan jenis las dan sambungan yang berbeda, mengacu pada cara potongan logam yang disatukan atau disejajarkan satu sama lain. Desain yang berbeda juga mempengaruhi kualitas dan weld deposit yang telah selesai.

Pada penelitian ini desain sambungan yang dipakai adalah *Square butt joint*, *square butt joint* merupakan jenis sambungan di mana dua ujung material disambungkan secara langsung tanpa dilakukan persiapan kampuh, sehingga permukaan tepi material tetap berbentuk persegi dan tegak lurus terhadap permukaan pelat atau pipa. Pada sambungan ini, penetrasi las dicapai melalui pengaturan parameter pengelasan yang tepat, seperti kuat arus dan *heat input*, sehingga *square butt joint* umumnya digunakan pada

material dengan ketebalan relatif tipis. Jenis sambungan ini banyak diaplikasikan pada pengelasan pipa atau tabung berdinding tipis karena memiliki bentuk yang sederhana, meminimalkan pengurangan material, serta mengurangi potensi kontaminasi selama proses pengelasan, khususnya pada pengelasan titanium menggunakan proses GTAW.

2.7 Arus Pengelasan

Arus las merupakan parameter utama dalam proses pengelasan untuk memengaruhi kualitas hasil las yang maksimal, dimana mempengaruhi penembusan dan kecepatan logam induk. Besarnya arus dalam pengelasan dinyatakan dalam satuan *ampere* (A). Arus sangat berpengaruh dalam proses pengelasan, besarnya arus pada proses pengelasan menyebabkan penetrasi yang sangat dalam, menimbulkan cacat las, dan menurunkan sambungan las. Sebaliknya jika arus las terlalu kecil akan menimbulkan busur las yang tidak stabil, pemilihan arus las yang tepat dapat mempengaruhi sambungan las yang berkualitas dan efisien.

Dalam proses *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW), kuat arus pengelasan merupakan parameter utama yang secara langsung mengendalikan besarnya energi panas (*heat input*) yang disuplai ke material selama pengelasan berlangsung. Arus listrik yang mengalir melalui elektroda tungsten membentuk busur listrik yang menjadi sumber panas utama untuk melelehkan logam induk dan membentuk kolam las. Besarnya arus yang digunakan akan menentukan stabilitas busur, intensitas panas, ukuran dan kedalaman kolam las, tingkat penetrasi, serta luas daerah terpengaruh panas *heat affected zone* (HAZ). Pada pengelasan material titanium, khususnya *commercially pure* titanium ASME SB338 Grade 2, pengaruh kuat arus menjadi sangat signifikan karena titanium memiliki konduktivitas termal yang relatif rendah dan titik leleh yang tinggi, sehingga perubahan kecil pada arus dapat menghasilkan perbedaan besar pada siklus termal dan karakteristik sambungan las.

Penggunaan arus pengelasan yang terlalu tinggi menyebabkan masukan panas yang berlebihan ke dalam material. Kondisi ini menghasilkan kolam las yang lebih besar dan penetrasi yang lebih dalam, disertai dengan laju pendinginan yang lebih lambat pada logam las dan HAZ. Pendinginan yang lambat memberikan waktu yang cukup bagi terjadinya pertumbuhan butir (*grain coarsening*) pada fase α -titanium, baik di daerah logam las maupun di HAZ. Pembesaran ukuran butir ini berdampak negatif terhadap sifat mekanik, sambungan las yang dihasilkan cenderung mengalami penurunan nilai kekerasan dan kuat tarik, serta berkurangnya keuletan dan ketangguhan material. Selain itu, arus yang terlalu tinggi juga menyebabkan HAZ menjadi lebih lebar, yang berarti area material yang mengalami perubahan sifat mekanik semakin luas. Dari sisi operasional, arus berlebih dapat meningkatkan risiko distorsi akibat penyusutan termal yang tidak merata, serta pada material berdinding tipis dapat memicu terjadinya cacat seperti *burn-through*. Temperatur tinggi yang bertahan lebih lama juga memperbesar potensi kontaminasi oleh oksigen dan nitrogen apabila sistem perlindungan gas tidak bekerja secara optimal.

Sebaliknya, arus pengelasan yang terlalu rendah menghasilkan masukan panas yang tidak mencukupi untuk melelehkan logam induk secara sempurna. Kondisi ini menyebabkan penetrasi yang dihasilkan tidak optimal. Akibatnya, sambungan las berisiko mengalami cacat, yang secara langsung menurunkan kualitas sambungan. Meskipun laju pendinginan pada arus rendah relatif lebih cepat dan secara teoritis dapat menghasilkan ukuran butir yang lebih halus, keuntungan mikrostruktur tersebut tidak dapat dimanfaatkan karena kegagalan sambungan lebih didominasi oleh cacat fusi. Dampak akhirnya adalah nilai kuat tarik sambungan las yang rendah, karena kegagalan terjadi pada daerah yang tidak terfusi sempurna. Selain itu, arus yang terlalu rendah juga dapat menyebabkan busur las menjadi kurang stabil, sehingga menghasilkan manik las yang tidak seragam dan variasi sifat mekanik lokal di sepanjang sambungan.

Oleh karena itu, penentuan arus pengelasan yang optimum merupakan aspek yang sangat penting dalam pengelasan GTAW titanium. Arus optimum berada pada rentang nilai yang cukup besar untuk menghasilkan peleburan dan penetrasi yang sempurna, namun tidak berlebihan sehingga menyebabkan masukan panas yang terlalu tinggi dan pertumbuhan butir yang kasar. Pada kondisi arus optimum, kolam las terbentuk secara stabil, HAZ relatif terkendali, dan siklus termal yang dialami material menghasilkan mikrostruktur yang lebih homogen dan seimbang. Kondisi ini memungkinkan tercapainya kombinasi sifat mekanik yang paling baik, yaitu kuat tarik yang tinggi, nilai kekerasan yang relatif stabil, serta keuletan yang masih memadai. Dengan demikian, variasi kuat arus dalam penelitian ini digunakan untuk mengkaji secara sistematis hubungan antara parameter proses pengelasan, perubahan struktur mikro, dan sifat mekanik hasil las, sehingga dapat ditentukan rentang arus yang paling sesuai untuk pengelasan *commercially pure* titanium ASME SB338 Grade 2 secara aman dan efektif.

Dalam penelitian pengelasan GTAW pada titanium, variabel kuat arus berperan sangat penting karena ia secara langsung mengontrol masukan panas (*heat input*) ke dalam logam induk dan daerah yang terpengaruh panas (HAZ), yang selanjutnya memengaruhi sifat mekanik dan struktur mikro hasil las. Arus yang lebih tinggi cenderung meningkatkan *heat input*, sehingga menghasilkan kolam las yang lebih besar, pendinginan yang lebih lambat, dan pertumbuhan butir yang lebih kasar di zona las dan HAZ, kondisi ini umumnya menurunkan kekuatan mekanik seperti kekuatan tarik dan kekerasan jika tidak diatur dengan baik karena mikrostruktur yang lebih kasar kurang tahan terhadap deformasi plastis, sedangkan arus yang terlalu rendah dapat menyebabkan penetrasi kurang memadai dan nilai mekanik yang buruk sehingga struktur mikro tidak optimal dan kekuatan tarik berkurang. Penelitian komprehensif pada proses GTAW juga menunjukkan bahwa kombinasi nilai arus yang tidak tepat dapat menyebabkan perubahan

ukuran butir dan karakteristik zona las sehingga memengaruhi hubungan secara keseluruhan. (Obloh, 2024)

2.8 *Post-flow*

Post-flow adalah aliran gas pelindung yang terus berlangsung setelah busur las dimatikan, dengan tujuan utama melindungi area las yang masih panas dari udara dan kontaminan seperti oksigen dan nitrogen sampai logam las cukup dingin sehingga tidak lagi reaktif terhadap udara. Karena temperatur logam yang baru dilas masih tinggi bahkan setelah busur padam, jika aliran gas pelindung berhenti tepat saat busur mati, permukaan las dan elektroda bisa teroksidasi atau terkontaminasi yang menurunkan kualitas sambungan dan mempercepat keausan elektroda, dengan mengatur *post-flow* yang cukup, bagian yang panas *terlindungi* sampai suhu turun ke tingkat yang aman.

Cara kerja *Post-flow* adalah dengan mempertahankan aliran gas pelindung dari torch pengelasan setelah busur listrik pada proses GTAW dipadamkan. Fungsi utama *post-flow* adalah melindungi logam las, daerah terpengaruh panas (*heat affected zone* (HAZ), serta elektroda tungsten dari paparan udara selama tahap pendinginan awal. Pada saat busur dipadamkan, meskipun proses peleburan telah berhenti, logam las masih berada pada temperatur tinggi dan berada dalam kondisi metalurgi yang sangat reaktif. Kondisi ini sangat kritis pada material titanium, khususnya *commercially pure* titanium ASME SB338 Grade 2, karena titanium memiliki afinitas yang sangat tinggi terhadap unsur gas interstisial seperti oksigen, nitrogen, dan hidrogen pada temperatur di atas ± 400 °C. Oleh karena itu, *post-flow* berperan penting dalam mempertahankan atmosfer inert hingga temperatur logam turun ke tingkat yang aman.

Apabila durasi *post-flow* terlalu singkat, aliran gas pelindung akan berhenti sebelum logam las dan HAZ mendingin di bawah temperatur reaktif tersebut. Akibatnya, permukaan logam las akan langsung terpapar udara, sehingga terjadi proses oksidasi dan nitridasi. Fenomena ini ditandai

dengan perubahan warna pada permukaan las, seperti warna biru, ungu, atau abu-abu, yang menunjukkan tingkat kontaminasi tertentu. Secara metalurgi, masuknya oksigen dan nitrogen ke dalam kisi kristal titanium menyebabkan peningkatan kekerasan akibat penguatan larutan padat (*solid solution strengthening*), namun diikuti oleh penurunan keuletan dan ketangguhan. Kondisi ini membuat sambungan las menjadi lebih rapuh, meningkatkan risiko retak, serta menurunkan nilai kuat tarik hasil pengelasan. Selain itu, kontaminasi juga dapat menyebabkan ketidakseragaman sifat mekanik antara logam las, HAZ, dan logam induk, yang berdampak negatif terhadap performa sambungan secara keseluruhan. Waktu aliran gas pelindung secara langsung mengendalikan terjadinya kontaminasi selama proses pengelasan. Apabila waktu aliran gas terlalu singkat, maka aliran gas akan berhenti sepenuhnya sebelum daerah las mendingin hingga di bawah 400 °C. Akibatnya, kontaminasi akan terjadi pada sambungan las

Sebaliknya, apabila durasi *post-flow* terlalu lama, pada penelitian yang dilakukan oleh (Huang, 2009) disimpulkan bahwa walaupun *post-flow* berkaitan dengan waktu aliran gas setelah busur padam, prinsip penggunaan gas yang tidak tepat serupa dengan ketika laju alir terlalu tinggi. Dalam beberapa kondisi, aliran gas yang sangat kuat atau berkepanjangan dapat menciptakan turbulensi di sekitar area las, yang justru dapat menarik udara sekitar masuk ke zona pelindung atau mengganggu lapisan gas yang ideal di sekitar sambungan las. Hal ini dapat menurunkan efektivitas perlindungan meskipun gas masih dialirkan. Selain itu, durasi *post-flow* yang berlebihan tidak memberikan peningkatan kualitas sambungan yang signifikan dibandingkan dengan durasi *post-flow* yang optimal.

Dalam penelitian yang dilakukan oleh (Karpagaraj *et al.*, 2018), didapatkan bahwa durasi *post-flow* memiliki keterkaitan terhadap *heat input*, pada penelitian tersebut penulis melakukan penelitian menggunakan metode *bead on plate* (BoP) yang menghasilkan warna pada permukaan las dan *geometry bead* yang nantinya digunakan untuk metode selanjutnya yakni simulasi numerik menggunakan *Goldak double ellipsoidal heat*

source model menggunakan *software comsol* dengan tujuan untuk mengetahui distribusi temperatur dan menentukan berapa lama logam turun di bawah 400 °C. Dari hal tersebut durasi *post-flow* dapat ditentukan. Dari penelitian tersebut diperoleh Semakin besar heat input, maka waktu pendinginan yang diperlukan semakin lama dan *post-flow* time harus lebih Panjang.

Berdasarkan hasil penelitian pada penelitian tersebut, durasi *post-flow shielding gas* harus dipertahankan hingga temperatur logam las dan daerah sekitarnya turun di bawah 400 °C untuk mencegah terjadinya kontaminasi pada CP titanium. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa peningkatan *heat input* akan memperpanjang waktu pendinginan material, sehingga durasi *post-flow* gas pelindung harus disesuaikan dengan besarnya heat input yang dihasilkan. Pada penelitian ini, didapatkan nilai *heat input* sebesar 0,0357 kJ/mm pada arus 40 A memungkinkan penggunaan *post-flow* yang relatif singkat, yaitu sekitar 6–8 detik. Sementara itu, pada arus 60 A dengan *heat input* 0,0833 kJ/mm, diperlukan durasi *post-flow* yang lebih lama, yaitu sekitar 10–12 detik, guna memastikan perlindungan material hingga temperatur turun di bawah batas kritis dan mencegah reaksi titanium dengan atmosfer. Oleh karena itu penelitian ini akan menggunakan variable *post-flow* 0s, 5s, 10s, dan 15s

2.9 Sistem Perlindungan Gas Pada Pengelasan Titanium

Sistem perlindungan gas pada pengelasan titanium umumnya terdiri dari tiga zona utama, yaitu *shielding gas*, *backing gas*, dan *trailing shielding gas*. Ketiga sistem ini bekerja secara simultan untuk melindungi kolam las, daerah akar las, serta logam las dan HAZ yang masih berada pada temperatur reaktif. Penggunaan sistem perlindungan gas menyeluruh menjadi faktor kunci dalam menentukan kualitas sambungan las titanium.

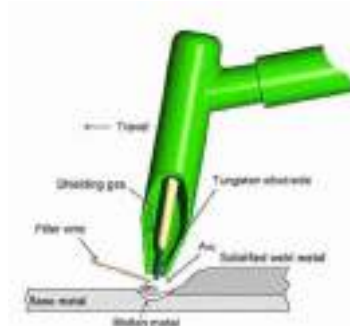
Gas argon murni dengan kemurnian minimal 99,99% umumnya digunakan sebagai *shielding gas* utama pada pengelasan TIG titanium. Selain pelindungan pada daerah busur, sering diterapkan pelindungan

tambahan berupa *back shielding* dan *trailing shielding* untuk melindungi bagian akar las dan daerah pendinginan dari oksidasi. Keberhasilan pelindungan gas pada pengelasan titanium dapat diidentifikasi melalui warna permukaan las, di mana warna perak cerah menunjukkan perlindungan yang optimal. (Rogalski *et al.*, 2015).

2.9.1 *Shielding gas*

Primary shielding gas merupakan gas pelindung utama yang dialirkan melalui *torch* pada proses GTAW. Fungsi utama gas ini adalah melindungi busur las dan kolam las dari kontak langsung dengan udara selama proses pengelasan berlangsung. Gas yang paling umum digunakan adalah argon murni dengan tingkat kemurnian tinggi, karena mampu menghasilkan busur yang stabil dan perlindungan yang efektif. Perlindungan yang tidak optimal pada zona ini dapat menyebabkan oksidasi logam las, porositas, serta penurunan sifat mekanik sambungan.

Secara umum, seluruh proses fusion welding memerlukan penggunaan gas pelindung untuk mencegah terjadinya oksidasi pada logam cair selama proses pengelasan. Pada proses pengelasan GTAW, gas argon murni digunakan sebagai gas pelindung karena mampu meminimalkan terjadinya percikan las serta menjaga kestabilan busur listrik selama pengelasan berlangsung. (Huang, 2009). Ditunjukkan pada Gambar 2.2 sebagai berikut :



Gambar 2. 2 GTAW *Shielding Gas*
Sumber: (<https://weldguru.com/tig-equipment/>)

2.9.2 *Backing gas*

Backing gas, yang juga dikenal sebagai *purge gas* atau *root shielding gas*, digunakan untuk melindungi sisi belakang sambungan las, khususnya pada pengelasan pipa atau pelat dengan sambungan tembus. Pada pengelasan titanium, *backing gas* sangat penting untuk mencegah oksidasi pada daerah akar las yang dapat menyebabkan perubahan warna, peningkatan kekerasan, dan penurunan keuletan. Argon murni umumnya digunakan sebagai *backing gas* karena sifatnya yang *inert* dan stabil. Proses *purging* harus dilakukan hingga kandungan oksigen pada area terlindungi berada pada tingkat yang sangat rendah sebelum pengelasan dimulai. Ditunjukkan pada Gambar 2.3 sebagai berikut :



Gambar 2. 3 *Backing shield*

Sumber: (<https://mymagnoliasmile.com/>)

2.9.3 *Trailing gas*

Trailing shielding gas merupakan gas pelindung tambahan yang diarahkan ke area di belakang torch untuk melindungi logam las dan HAZ setelah busur las padam. Perlindungan ini diperlukan karena logam las titanium masih berada pada temperatur reaktif meskipun proses pengelasan telah selesai. *Trailing shielding gas* berperan penting dalam mencegah penyerapan oksigen, nitrogen, dan hidrogen selama proses pendinginan, yang dapat mempengaruhi mikrostruktur dan meningkatkan kekerasan sambungan las.

Badan *trailing shield* sebaiknya dibuat dari bahan aluminium, tembaga, atau baja tahan karat, yang disolder atau dilas sehingga membentuk konstruksi yang rapat dan kompak. Penyaluran gas dilakukan menggunakan pipa tembaga atau baja tahan karat. Media difusi gas dapat berupa wol tembaga atau baja

tahan karat kasar yang telah dibersihkan dari kontaminan. Trailing shield akan bekerja paling efektif apabila bentuk shield menyesuaikan bentuk bahan uji (AWS, 2021). Ditunjukkan pada Gambar 2.4 sebagai berikut :



Gambar 2. 4 *Trailing Shield*

Sumber: (<https://huntingdonfusion.com/blogs/weld-trailing-shields/>)

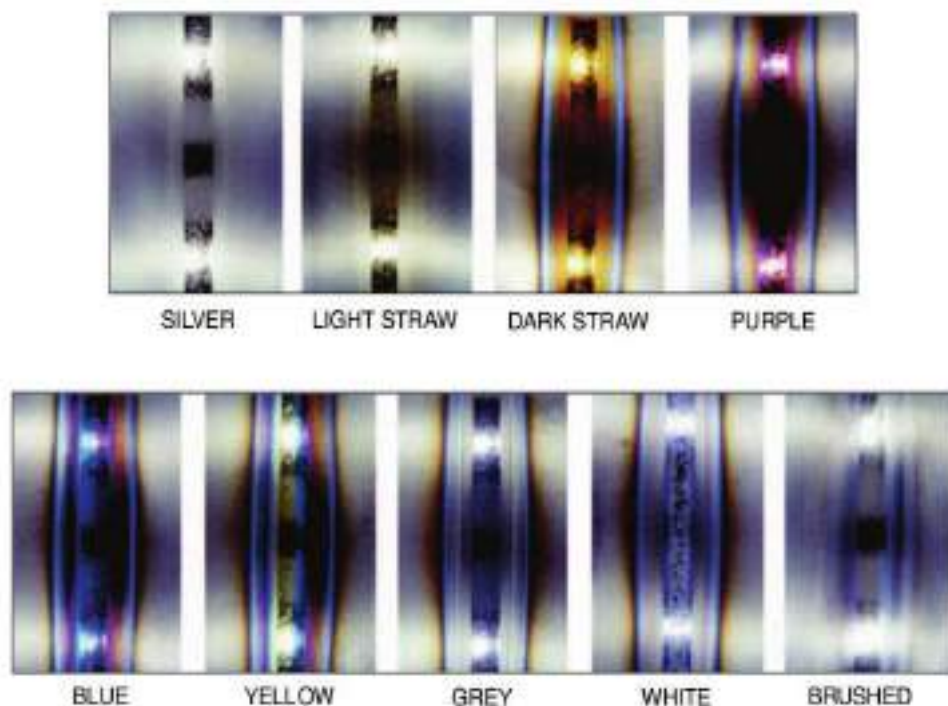
2.10 Pengujian Visual

Sebagian besar aspek inspeksi visual pada sambungan las titanium pada dasarnya serupa dengan inspeksi visual pada logam lainnya, meliputi evaluasi bentuk manik las, adanya *undercut*, tingkat penetrasi, serta *reinforcement*. Meskipun metode inspeksi visual hanya mampu menilai kondisi permukaan, teknik ini tetap memiliki peran penting dalam mengevaluasi efektivitas perlindungan gas *inert* dan secara tidak langsung mencerminkan kualitas hasil pengelasan titanium. Sambungan las yang terlindungi dengan baik umumnya menunjukkan permukaan berwarna perak cerah dan mengkilap. Sebaliknya, kontaminasi atmosfer selama proses pengelasan akan menyebabkan perubahan warna permukaan las, mulai dari warna perak menjadi jerami, ungu, biru tua, biru muda, kuning, abu-abu kusam, hingga putih berdebu, seiring dengan meningkatnya tingkat kontaminasi.

Inspeksi visual harus dilakukan pada kondisi hasil las sebagaimana terbentuk, tanpa dilakukannya pembersihan, penyikatan, atau proses penghilangan material lainnya. Upaya menutup warna kontaminasi dengan melakukan pengelasan ulang tanpa menghilangkan lapisan oksida terlebih dahulu justru akan menyebabkan oksida terfusi ke dalam logam las, yang berpotensi meningkatkan kekerasan serta memicu permasalahan lanjutan seperti retak. Kandungan oksigen yang tinggi pada kondisi tersebut akan

memperburuk kualitas sambungan, meskipun permukaan las tampak bersih atau mengkilap

Setiap lintasan las wajib diperiksa secara menyeluruh, termasuk bagian akar las dan area logam di sekitarnya. Inspeksi dapat dilakukan oleh personel *quality assurance* atau oleh juru las yang telah mendapatkan pelatihan khusus. Panduan interpretasi warna permukaan las digunakan sebagai acuan dalam menentukan tingkat kontaminasi dan tindakan perbaikan yang diperlukan. Warna perak cerah menunjukkan bahwa perlindungan gas telah memadai dan tidak diperlukan tindakan korektif. Warna jerami pada permukaan akhir las umumnya masih dapat diterima. Namun, perubahan warna yang lebih gelap dari jerami, seperti ungu atau lebih gelap, menandakan tingkat kontaminasi yang tinggi sehingga sambungan las beserta material di sekitarnya harus dihilangkan sepenuhnya sebelum dilakukan pengelasan ulang. (AWS, 2021). Klasifikasi warna dan penjelasan ditunjukkan pada Gambar 2.5 dan Tabel 2.3 sebagai berikut :



Gambar 2. 5 Warna Pada Sambungan Titanium
Sumber: (AWS, 2021)

Tabel 2. 3 Surface Color in Titanium Welds

<i>Colour</i>	<i>Interpretation</i>	<i>Action</i>
<i>Silver</i>	<i>Correct shielding</i>	<i>None</i>
<i>Light straw to dark straw</i>	<i>surface contamination</i>	<i>acceptable Remove surface oxide by brushing, correct shielding</i>
<i>Purple Moderate</i>	<i>surface contamination</i>	<i>Unacceptable, remove weld bead by grinding, correct shielding</i>
<i>Dark blue to light blue</i>	<i>Heavy contamination</i>	<i>unacceptable Remove weld bead</i>
<i>Yellow to gray to white</i>	<i>Very heavy contamination</i>	<i>unacceptable Remove weld bead and 1/32 in [0.8 mm] to 1/4 in [6 mm] of the material beneath</i>

Sumber: (AWS G2.4)

2.11 Penelitian Terdahulu

No.	Peneliti	Judul Penelitian	Kesimpulan
1.	Winarto, Muhammad Anis, M. Laili Solichin (2009)	<i>Influence of Shielding Gas on the Mechanical Properties and Visual Surface of the Welded CP Titanium</i>	Penelitian ini mengkaji pengaruh gas pelindung terhadap sifat mekanik dan kondisi permukaan visual hasil pengelasan paduan titanium. Gas pelindung memiliki pengaruh yang signifikan terhadap permukaan las titanium, terutama dalam pembentukan lapisan oksida, karbida, dan nitrida titanium. Penggunaan gas filter pada nozzle mampu menghasilkan aliran gas yang bersifat laminar. Tingginya reaksi antara logam las dan kontaminan gas atmosfer menyebabkan peningkatan kekerasan pada daerah las, sehingga struktur menjadi lebih getas. Penerapan sistem perlindungan gas secara menyeluruh (<i>full shielding gas</i>) dengan filter pada spesimen C menghasilkan tingkat penyerapan kontaminan gas yang sangat rendah pada permukaan las, sehingga diperoleh sambungan las dengan kualitas tinggi, penampilan

			yang baik, serta sifat mekanik yang optimal pada pengelasan titanium murni komersial.
2.	Szwajka, Joanna Zielinska, Tomasz Trzecieński (2024)	<i>The Influence of the Shielding-Gas Flow Rate on the Mechanical Properties of TIG-Welded Butt Joints of Commercially Pure Grade 1 Titanium</i>	Hasil pengamatan menunjukkan nilai kekuatan tarik maksimum pada penggunaan laju aliran gas pelindung sebesar 18 dm ³ /menit. Sebaliknya, kekuatan tarik terendah diperoleh ketika kolam las tidak terlindungi secara memadai selama proses pengelasan. Nilai mikrokekerasan terendah pada daerah las dicapai pada kondisi perlindungan gas yang lebih baik. Pada laju aliran gas pelindung terendah, terjadi peningkatan signifikan kekerasan las. Sebaliknya, tingkat porositas tertinggi pada logam las diamati pada laju aliran gas yang rendah. Perlindungan yang lebih baik pada sisi akar las selama pengelasan TIG dapat mencegah terbentuknya gelembung gas serta meningkatkan kekuatan sambungan las. Oleh karena itu, laju aliran gas pelindung dari sisi akar las sebesar 12 dm ³ /menit dinyatakan sebagai kondisi optimal untuk pengelasan TIG titanium murni Grade 1, karena mampu melindungi sambungan las dari oksidasi.

3.	Dewi Puspita Sari, Amir Arifin, Gunawan, Dendy Adanta, Ihsan Asura, Imam Syofii (2021)	<i>Flow Rate Effects on Microstructure and Mechanical Properties for Titanium Weld Joint</i>	Berdasarkan hasil pengujian, laju aliran gas argon berpengaruh signifikan terhadap hasil pengelasan. Laju aliran argon UHP yang tinggi mampu melindungi daerah las dari kontaminasi oksigen sehingga peningkatan nilai kekerasan tidak terlalu tinggi dibandingkan dengan laju aliran gas yang rendah. Selain itu, peningkatan kekerasan cenderung diikuti dengan penurunan kekuatan material dan keuletan saat mengalami patah. Hasil pengujian menunjukkan bahwa spesimen C yang dilas menggunakan proses TIG dengan laju aliran argon 60 L/menit mengalami peningkatan kekerasan terendah, yaitu sebesar 144 VHN. Sebaliknya, spesimen B mengalami peningkatan kekerasan rata-rata tertinggi, yaitu sebesar 162 VHN pada laju aliran argon 25 L/menit, sedangkan spesimen A memiliki nilai kekerasan sebesar 146 VHN pada laju aliran argon 15 L/menit. Berdasarkan hasil uji tarik, spesimen C menunjukkan kekuatan tarik tertinggi, yaitu sebesar 26,2865 kg/mm ² , sedangkan kekuatan tarik terendah diperoleh pada spesimen B, yaitu sebesar 23,5485 kg/mm ² . Berdasarkan hasil pengujian metalografi, daerah logam induk (base metal) pada <i>commercially pure</i> titanium memiliki ukuran butir yang seragam dengan struktur kristal <i>hexagonal close-packed</i> (HCP). Sementara itu, pada daerah HAZ dan logam las, bentuk butir mengalami
----	--	--	--

			perubahan menjadi memanjang menyerupai jerami, yang dikenal sebagai struktur platelet dan <i>acicular alpha</i> .
4	(Karpagaraj et al., 2018)	<i>Experimental investigations and numerical prediction on the effect of shielding area and post flow time in the GTAW of CP Ti sheets</i>	Material titanium memiliki harga yang relatif mahal dan proses penyambungannya tergolong menantang. Untuk menekan biaya fabrikasi produk titanium, para peneliti banyak mengembangkan penggunaan proses GTAW. Namun, dalam proses GTAW, pencegahan kontaminasi serta penyediaan sistem perlindungan gas yang memadai pada saat pengelasan titanium merupakan hal yang sulit dilakukan. Oleh karena itu, dilakukan penelitian melalui pendekatan eksperimental dan simulasi. Profil manik las (<i>bead profile</i>) dan distribusi temperatur diukur dan dianalisis. Luas area perlindungan dan waktu post-flow dihitung berdasarkan profil manik las dan riwayat temperatur yang dihasilkan oleh sumber panas bergerak. Permasalahan praktis yang muncul selama pengelasan dapat diatasi dengan mengacu pada hasil simulasi. Hasil dan pembahasan ini membantu peneliti memperoleh pemahaman yang lebih jelas mengenai pengaturan sistem perlindungan gas untuk pengelasan titanium tanpa kontaminasi. Model ini tidak hanya dapat diterapkan pada proses

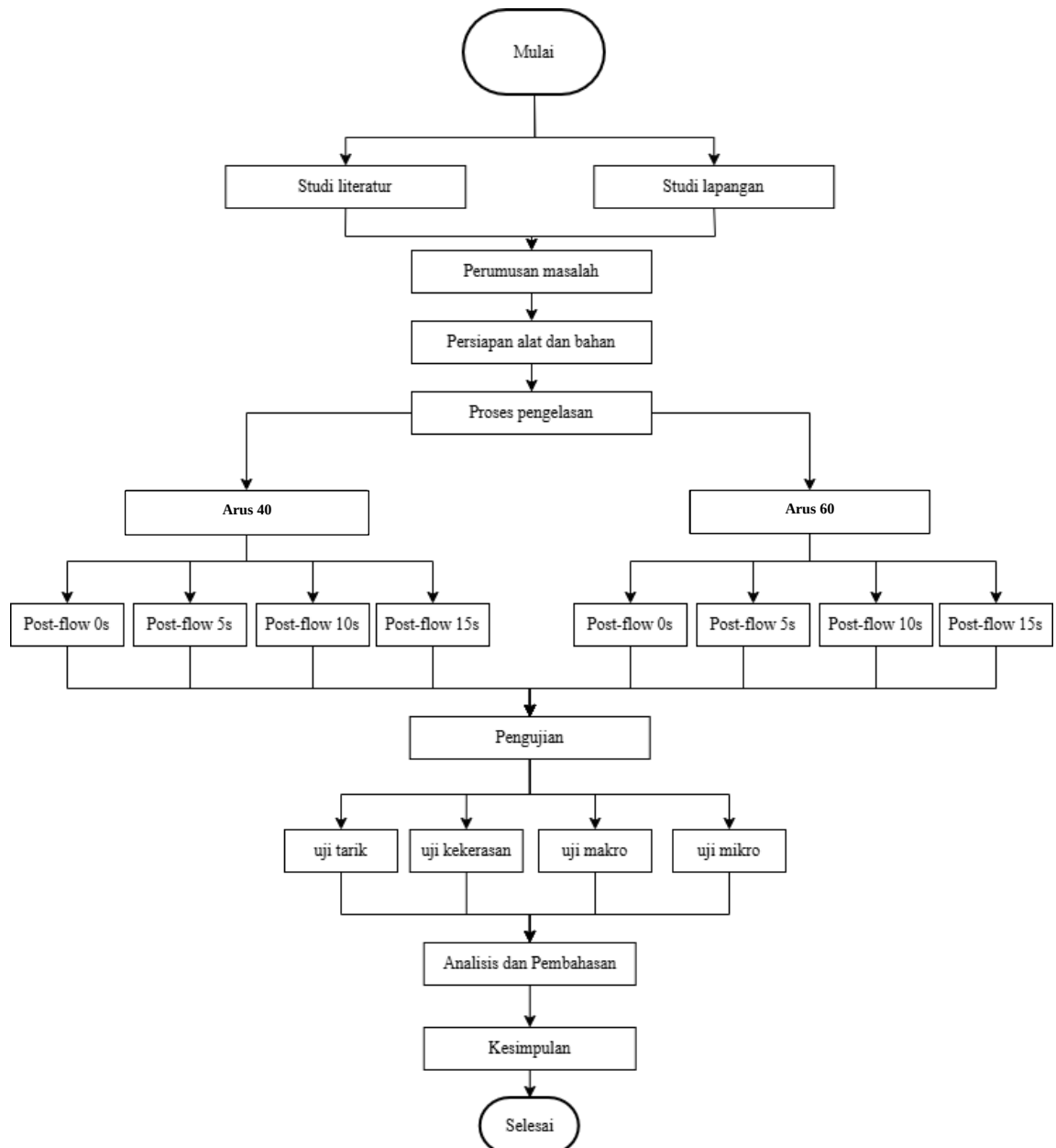
			pengelasan, tetapi juga pada proses modifikasi permukaan seperti <i>remelting</i> dan <i>cladding</i> pada material titanium. Karena titanium termasuk material yang sangat rentan terhadap oksidasi, pengaturan perlindungan ini dapat diterapkan untuk seluruh kategori material titanium, sehingga dapat menghemat waktu dan material dalam proses pengelasan titanium secara berhasil.
--	--	--	---

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram alir penelitian

Diagram alir yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.1 sebagai berikut:



Gambar 3. 1 Diagram Alir

3.2 Studi lapangan

Studi lapangan dilakukan untuk memperoleh gambaran umum mengenai praktik pengelasan yang diterapkan pada material titanium di lingkungan industri. Kegiatan ini mencakup observasi terhadap jenis material, proses pengelasan yang digunakan, serta tahapan pemeriksaan kualitas sambungan las. Hasil studi lapangan menunjukkan bahwa proses pengelasan telah berjalan sesuai dengan prosedur yang berlaku, namun pengaturan parameter tertentu umumnya didasarkan pada praktik dan pengalaman operator.

3.3 Studi literatur

Studi literatur dilakukan untuk mengumpulkan berbagai informasi, pemilihan jurnal harus disesuaikan dengan topik utama tugas akhir agar penelitian dapat berjalan dengan efektif, sebaiknya jurnal memiliki kesesuaian topik dengan tugas akhir akan memudahkan dalam memperoleh referensi.

3.4 Proses pengelasan

Dalam penelitian ini penulis memerlukan material serta alat-alat pendukung dalam proses pembentukan dan pengelasan spesimen uji , untuk mendapatkan hasil yang sesuai dengan kondisi aktual di lapangan. Adapun proses pengelasan sebagai berikut :

3.4.1. Persiapan material

Material yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.2 sebagai berikut :



Gambar 3. 2 Material ASME SB338 Gr.2

3.4.2. Persiapan peralatan

Persiapan peralatan yang akan digunakan dalam penelitian pada saat sebelum dan sesudah proses pengelasan GTAW titanium adalah sebagai berikut:

1. Mesin las GTAW.
2. Aseton
3. *Flow meter*.
4. *Back purging*.
5. Peralatan ukur meliputi jangka sorong, penggaris.
6. Peralatan bantu meliputi gerinda, sikat, kamera, jig penjepit, dan *marker*.
7. Kain bebas serat.
8. Alat pelindung diri.

3.4.3. Pemotongan

Spesimen pipa titanium dipotong sesuai panjang yang ditentukan, proses pemotongan dilakukan untuk memperoleh spesimen dengan dimensi yang sesuai serta ujung pipa yang rata dan presisi, sehingga mendukung proses *fit-up* dan pengelasan yang baik. Pemotongan yang tidak presisi dapat menyebabkan celah berlebih, ketidaksejajaran sambungan, dan peningkatan heat input saat pengelasan.

3.4.4. *Surface preparation*

Dalam proses pengelasan titanium, kebersihan benda uji adalah hal yang harus diperhatikan. kontaminan pada permukaan akan berpengaruh terhadap peningkatan kekerasan yang tidak diinginkan, penurunan keuletan, serta munculnya cacat las seperti porositas dan retak, yang pada akhirnya menurunkan kualitas sambungan dan mempengaruhi sifat mekanik hasil pengelasan. Untuk itu proses persiapan permukaan adalah sebagai berikut:

1. Persiapan pelarut dan alat, aseton yang digunakan harus memiliki tingkat kemurnian tinggi dan bebas kontaminan. Kain lap yang digunakan berupa kain bersih bebas serat untuk mencegah tertinggalnya partikel pada permukaan material.
2. Aplikasi aseton pada permukaan material, aseton dituangkan secukupnya pada kain lap, kemudian permukaan titanium, khususnya area sambungan las dan daerah di sekitarnya, dibersihkan dengan cara mengusap satu arah. Proses ini bertujuan untuk membersihkan minyak, lemak, dan sisa oli permesinan yang menempel pada permukaan material.
3. Penggantian kain lap secara berkala, kain lap harus diganti secara berkala apabila telah terlihat kotor untuk mencegah kontaminan terdistribusi kembali ke permukaan material.
4. Pengeringan alami, setelah pembersihan, permukaan material dibiarkan mengering secara alami pada suhu ruang. Aseton akan menguap dengan cepat tanpa meninggalkan residu apabila digunakan dengan benar.
5. Pencegahan kontaminasi ulang, setelah proses pembersihan menggunakan aseton selesai, permukaan material tidak boleh disentuh langsung dengan tangan dan harus segera dilakukan proses *fit-up* serta pengelasan untuk menjaga kebersihan permukaan.

3.4.5. Proses *fit-up*

Desain sambungan pada penelitian ini menggunakan *square butt joint* yang tertera seperti Gambar 3.3 sebagai berikut:



Gambar 3. 3 Desain Sambungan



Gambar 3. 4 Fit Up Material

3.4.6. Pengaplikasian sistem perlindungan gas

Setelah dilakukannya *fit-up* pada benda uji, maka proses selanjutnya adalah pengaplikasian sistem perlindungan gas, prosesnya adalah sebagai berikut :

,



Gambar 3.5 Sistem Perlindungan Gas

A. *Shielding Gas*

1. Menyiapkan sumber gas pelindung, gas argon dengan kemurnian 99,99% dipasang pada mesin las GTAW dan dihubungkan ke *torch* melalui regulator dan *flow meter*.
2. Pemeriksaan sistem aliran gas, seluruh selang, sambungan, dan regulator diperiksa untuk memastikan tidak terdapat kebocoran yang dapat menyebabkan masuknya udara ke zona las.
3. Pengaturan laju aliran *shielding gas*, laju aliran gas diatur pada kisaran 15 L/menit dengan menggunakan *gas cup* berdiameter besar untuk memperluas area perlindungan.
4. Pengaturan *pre-flow* gas, gas dialirkan beberapa detik sebelum busur dinyalakan untuk mengeluarkan udara dari area sekitar elektroda dan sambungan las.

B. *Backing shield*

1. Penutupan dan pemasangan saluran *backing gas*, salah satu ujung pipa ditutup, sedangkan ujung lainnya dipasang saluran masuk gas argon untuk proses *purging* bagian dalam pipa.

2. Pengaturan laju aliran *backing shield*, gas argon dialirkan ke bagian dalam pipa dengan laju 10 L/menit.
3. Proses *purging*, gas dialirkan selama 1–3 menit sebelum pengelasan dimulai untuk memastikan udara di dalam pipa telah tergantikan sepenuhnya oleh gas *inert*.
4. Perlindungan akar las selama pengelasan, *backing shield* dipertahankan selama proses pengelasan untuk mencegah oksidasi dan cacat pada akar sambungan las.



Gambar 3. 6 *Backing Shield*

C. *Trailing shield*

1. *Trailing shield* dipasang di belakang torch las sehingga gas pelindung dapat mengalir ke daerah logam las dan HAZ setelah busur berpindah.
2. Pengaturan laju aliran *trailing gas*, laju aliran gas diatur sesuai parameter.
3. Perlindungan daerah panas setelah pengelasan, *Trailing gas* melindungi logam las dan HAZ yang berada di belakang busur



Gambar 3. 7 *Trailing Shield*

3.4.7. Perencanaan parameter

Perencanaan parameter yang dilakukan pada penelitian ini ditunjukkan dalam Tabel 3.2 sebagai berikut :

Tabel 3. 1 Perencanaan Parameter

<i>Weld pass</i>	1
<i>Welding process</i>	GTAW
<i>Current</i>	40 A & 60 A
<i>Voltage</i>	10 Volt
<i>Electrode diameter</i>	1.0 mm
<i>Torch gas flow rate</i>	15 L/min
<i>Trailing gas flow rate</i>	30 L/min
<i>Backing gas flow rate</i>	10 L/min
<i>Travel speed</i>	1,4 mm/s

Sumber : AWS G.24

3.4.8. Pengelasan

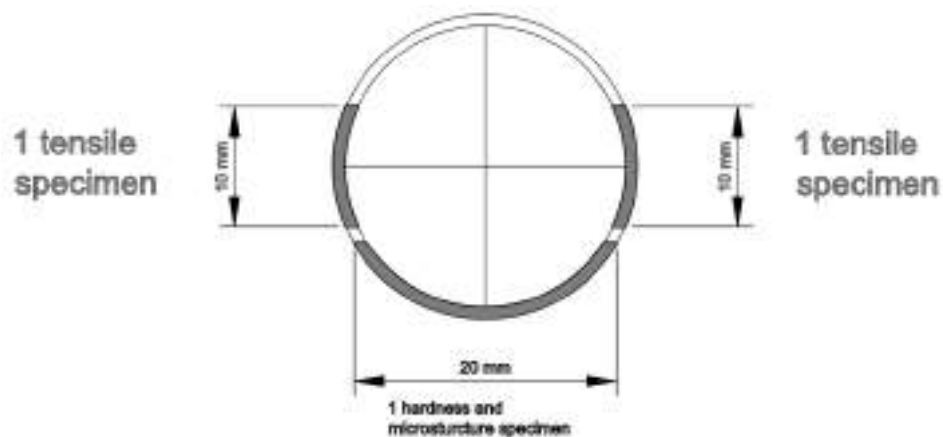
Proses pengelasan titanium dilakukan menggunakan metode *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) dengan arus searah polaritas DCEN. Mesin las diatur sesuai parameter penelitian, meliputi arus pengelasan, *pre-flow*, *post-flow*, dan *flow rate* gas argon. Sebelum pengelasan dimulai, gas argon dialirkan selama waktu *pre-flow* untuk mengusir udara di sekitar sambungan, kemudian busur listrik dinyalakan dan proses pengelasan dilakukan secara kontinu sepanjang sambungan dengan menjaga jarak busur dan kecepatan las tetap konstan. Setelah busur dimatikan, gas pelindung tetap dialirkan selama waktu *post-flow* hingga suhu logam las dan daerah HAZ turun ke tingkat aman

guna mencegah terjadinya oksidasi. Spesimen yang telah dilas kemudian didinginkan di bawah perlindungan gas sebelum dilakukan pemeriksaan visual dan pengujian mekanik serta struktur mikro. Proses pengelasan dilakukan dengan variasi kuat arus dan durasi *post-flow* gas pelindung dengan jumlah 8 *test piece* dibawah ini :

1. 1 join spesimen dengan kuat arus 40 A dengan durasi *post-flow* selama 0 s posisi pengelasan 1G diberi kode A1.
2. 1 join spesimen dengan kuat arus 40 A dengan durasi *post-flow* selama 5 s posisi pengelasan 1G diberi kode A2.
3. 1 join spesimen dengan kuat arus 40 A dengan durasi *post-flow* selama 10 s posisi pengelasan 1G diberi kode A3.
4. 1 join spesimen dengan kuat arus 40 A dengan durasi *post-flow* selama 15 s posisi pengelasan 1G diberi kode A4.
5. 1 join spesimen dengan kuat arus 60 A dengan durasi *post-flow* selama 0 s posisi pengelasan 1G diberi kode B1.
6. 1 join spesimen dengan kuat arus 60 A dengan durasi *post-flow* selama 5 s posisi pengelasan 1G diberi kode B2.
7. 1 join spesimen dengan kuat arus 60 A dengan durasi *post-flow* selama 10 s posisi pengelasan 1G diberi kode B3.
8. 1 join spesimen dengan kuat arus 60 A dengan durasi *post-flow* selama 15 s posisi pengelasan 1G diberi kode B4.

3.5 Pengujian

Dalam penelitian ini dilakukan serangkaian pengujian untuk mengevaluasi hasil pengelasan dengan variasi kuat arus dan *post-flow* gas pelindung pada pengelasan material ASME SB338 Gr 2 terhadap sifat mekanik material, sebelum itu terlebih dulu dilakukan uji visual untuk memastikan apakah terdapat cacat pada daerah las, spesimen kemudian menjalani proses persiapan, meliputi pemotongan dan *machining*. Berikut merupakan *cutting plan* pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.8 sebagai berikut :



Gambar 3.8 *Cutting Plan*

3.5.1 Pengujian visual

Sebagian besar aspek inspeksi visual pada sambungan las titanium pada dasarnya serupa dengan inspeksi visual pada logam lainnya, meliputi evaluasi bentuk manik las, adanya *undercut*, tingkat penetrasi, serta *reinforcement*. Meskipun metode inspeksi visual hanya mampu menilai kondisi permukaan, teknik ini tetap memiliki peran penting dalam mengevaluasi efektivitas perlindungan gas dan secara tidak langsung mencerminkan kualitas hasil pengelasan titanium. Sambungan las yang terlindungi dengan baik umumnya menunjukkan permukaan berwarna perak cerah dan mengkilap. Sebaliknya, kontaminasi atmosfer selama proses pengelasan akan menyebabkan perubahan warna permukaan las, mulai dari warna perak menjadi jerami, ungu, biru tua, biru muda,

kuning, abu-abu kusam, hingga putih berdebu, seiring dengan meningkatnya tingkat kontaminasi, berikut langkah- langkah pengujian :

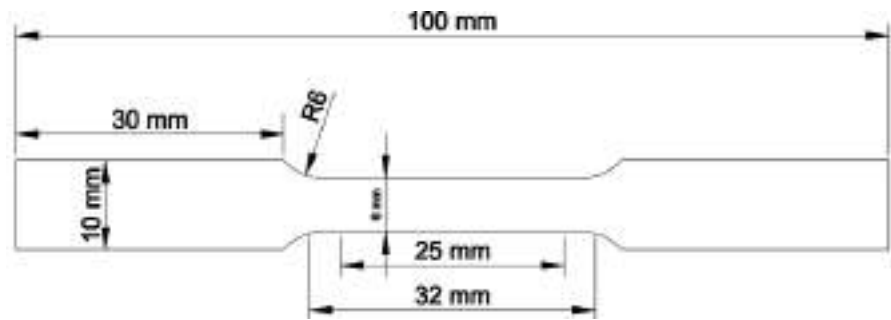
1. Persiapan area dan permukaan las.
2. Pastikan pencahayaan yang memadai.
3. Terapkan posisi inspeksi yang benar.
4. Lakukan pemeriksaan menyeluruh.
5. Gunakan alat uji visual las yang wajib dimiliki *inspector*:
 - a. *Welding gauge*.
 - b. Jangka sorong.
 - c. Lensa pembesar.
 - d. Senter.
 - e. Cermin inspeksi (opsional).

3.5.2 Pengujian tarik

Pengujian tarik bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan spesimen hasil pengelasan dalam menahan beban tarik, yang merupakan salah satu sifat mekanik utama dalam perancangan konstruksi dan kegiatan manufaktur. Pengujian dilakukan dengan memberikan pembebanan secara bertahap pada spesimen uji hingga terjadi pemanjangan seiring dengan meningkatnya gaya yang bekerja, sampai akhirnya spesimen mengalami patah. Setelah proses pengujian selesai, mesin uji tarik akan menghasilkan data dan kurva hasil pengujian yang menggambarkan karakteristik kekuatan tarik material. Melalui pengujian ini, dapat dianalisis kekuatan tarik sambungan las, batas luluh, sifat elastis, serta tingkat keuletan material hasil pengelasan. Pada penelitian ini *acceptance criteria* minimum kuat tarik material ASME SB338 Gr 2 adalah 345 MPa sehingga *weld metal* harus memiliki minimal nilai kuat tarik tersebut. Selanjutnya, disusun tahapan persiapan yang diperlukan sebelum pelaksanaan pengujian tarik :

1. Persiapan area dan permukaan las.
2. Spesimen uji tarik disiapkan sesuai standar ASTM E8/E8M, dengan daerah ukur (*gauge length*) berada pada bagian yang akan diuji dan permukaan spesimen dalam kondisi bersih serta bebas cacat.
3. Panjang ukur, lebar atau diameter, serta luas penampang awal spesimen diukur dan dicatat sebagai data awal sebelum pengujian.
4. Spesimen dijepit pada rahang mesin uji tarik secara lurus dan simetris agar gaya tarik bekerja secara aksial tanpa menimbulkan pembebanan tambahan.
5. Mesin uji tarik diatur sesuai standar pengujian, khususnya kecepatan penarikan (*strain rate*) yang konstan dan sesuai untuk material titanium.
6. Beban tarik diberikan secara bertahap dan kontinu hingga spesimen mengalami deformasi plastis dan akhirnya patah.
7. Selama pengujian berlangsung, data gaya dan pertambahan panjang direkam secara otomatis untuk menghasilkan kurva tegangan–regangan.
8. Setelah pengujian selesai, panjang akhir spesimen dan penyempitan penampang di daerah patah diukur untuk menentukan nilai elongasi dan *reduction of area*.
9. Hasil pengujian digunakan untuk menentukan nilai tegangan luluh, kekuatan tarik maksimum, elongasi, serta untuk mengidentifikasi patahan spesimen.

Berikut merupakan gambaran spesimen uji tarik pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.9 sebagai berikut :



Gambar 3.9 Dimensi Pengujian Tarik

3.5.3 Pengujian kekerasan

Pengujian kekerasan pada dasarnya melibatkan penekanan indenter yang memiliki sifat lebih keras daripada material uji dengan beban dan durasi tertentu (10-15 detik). Bekas indentasi pada permukaan spesimen diukur selanjutnya untuk menghitung nilai kekerasan, yaitu dengan membagi gaya tekan terhadap 21 luas tapak tekan. Pada beberapa metode pengujian, nilai kekerasan dapat dibaca secara langsung melalui indikator dial (Munir, 2023).

Untuk pengujian penelitian menggunakan Hardness Vickers, Pengujian kekerasan Vickers didasarkan pada penggunaan indenter berbentuk piramida berbasis persegi dari bahan intan, dengan sudut apikal sebesar 136° antara dua sisi yang saling berhadapan. Pengukuran panjang diagonal pada bekas indentasi berbentuk segi empat memberikan akurasi lebih tinggi dibandingkan pengukuran diameter lingkaran. Pengujian ini dapat dilakukan untuk spesimen tipis hingga ketebalan 0,006 inci, dengan nilai kekerasan yang dapat diukur secara akurat hingga 1300 (setara dengan 850 pada skala Brinell).

Berikut merupakan langkah-langkah dalam melakukan pengujian kekerasan:

1. Benda uji identifikasi
2. Permukaan benda uji diratakan dan permukaan dipoles hingga halus menggunakan mesin poles.

3. Jika benda uji berupa sambungan las, dilakukan proses etsa untuk menampilkan daerah las, HAZ dan base metal.
4. Indenter dipasang sesuai untuk metode tertentu pada mesin uji universal, atau pastikan mesin uji khusus untuk untuk metode tertentu sudah terpasang indenter permanennya.
5. Beban yang akan digunakan diatur sesuai dengan metode uji.
6. Durasi waktu pembebanan diatur pada menu, atau gunakan stopwatch jika menggunakan mesin uji universal manual.
7. Benda uji diletakkan diatas anvil/landasan/ragum penjepit benda.
8. Anvil dinaikkan hingga permukaan benda uji menyentuh ujung indenter.
9. Tuas beban ditarik ke posisi awal dan anvil diturunkan.
10. Posisi indenter diganti dengan lensa untuk melihat dan mengukur bekas tapak tekan.
11. Nilai kekerasan dihitung.
12. Lembar kerja diisi sesuai yang telah disediakan.
13. Semua peralatan dibersihkan setelah digunakan.

Berikut Gambar 3.10 merupakan lokasi titik pengujian pada spesimen, meliputi area base metal, HAZ, dan weld metal :



Gambar 3.10 Titik Pengujian *Hardness*

3.5.4 Pengujian mikro

1. Spesimen diberi identifikasi.
2. Spesimen uji dipotong dengan *base metal*, HAZ dan *weld metal* masih dalam cakupan.
3. *Mounting* spesimen dilakukan jika diperlukan atau jika ukuran spesimen terlalu kecil

4. Permukaan spesimen yang akan diamati dipoles menggunakan mesin poles dan kertas gosok mulai dari grit 120, 240, 320 hingga grit 1200.
5. Pemolesan akhir dilakukan menggunakan kain yang diberi serbuk alumina.
6. Proses etsa dilakukan untuk menampilkan secara jelas daerah *base metal*, HAZ, dan *weld metal*.
7. Gambar diambil dengan menggunakan mikroskop optik
8. Laporan pengujian disusun.

3.5.5 Pengujian makro

1. Spesimen diberi identifikasi
2. Spesimen uji dipotong dengan ukuran kecil, base metal, HAZ dan weld metal masih dalam cakupan.
3. Mounting spesimen dilakukan jika diperlukan atau jika ukuran spesimen terlalu kecil.
4. Permukaan specimen yang akan diamati dipoles menggunakan mesin poles dan kertas gosok mulai dari grit 120, 240, 320 hingga grit 400.
5. Proses etsa dilakukan untuk menampilkan secara jelas daerah *base metal*, HAZ, dan *weld metal*.
6. Gambar diambil dengan menggunakan kamera lensa makro.
7. Laporan pengujian disusun.

3.6 Analisa 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 terhadap hasil yang diperoleh dari penerapan parameter pengujian yang digunakan pada penelitian ini.

3.7 Kesimpulan

Setelah dilaksanakan Analisa terhadap beberapa pustaka atau jurnal yang telah dikumpulkan maka didapatkan hasil dari pustaka dan jurnal tersebut. Dari hasil yang sudah terkumpul maka kemudian dilakukan perbandingan antara pustaka dan jurnal satu dengan yang lain, sehingga setelah semua pustaka atau jurnal tersebut dilakukan perbandingan maka hasil akhir dari penelitian ini sudah tercapai yaitu penarikan kesimpulan.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Pengujian Visual

Hasil pengujian visual dilakukan untuk mengetahui hasil dari pengelasan, satndart berketerimaan mengacu pada AWS G2.4/G2.4M, berikut adalah hasil *surface colour* dari pengelasan pada Gambar 4.1:



A1. 40A 0s



A2. 40A 5s



A3. 40A 10s



A4. 40A 15s



B1. 60A 0s



B2. 60A 5s



B3. 60A 10s



B4. 60A 15s

Gambar 4. 1 Hasil Pengujian Visual

Dari hasil pengelasan *test coupon* tersebut, dilakukan pengamatan secara visual untuk menentukan hasil pengelasan dengan AWS G2.4/G2.4M, berikut data uji visual sebagai berikut:

Tabel 4. 1 Data Uji Visual

VISUAL REPORT				
SPESEMEN	KUAT ARUS	POST-FLOW	COLOUR	HASIL
A1	40	0s	GREY	<i>unacceptable</i>
A2		5s	GREY	<i>unacceptable</i>
A3		10s	GREY	<i>unacceptable</i>
A4		15s	GREY	<i>unacceptable</i>
B1	60	0s	GREY	<i>unacceptable</i>
B2		5s	GREY	<i>unacceptable</i>
B3		10s	GREY	<i>unacceptable</i>
B4		15s	GREY	<i>unacceptable</i>

Hasil pengamatan Visual pada penelitian ini adalah terdapat perubahan warna permukaan menjadi *grey* (abu-abu) pada daerah logam las. Mengacu pada standar AWS G2.4/G2.4M Perubahan warna tersebut mengindikasikan terjadinya *discoloration* akibat durasi *post-flow* yang terlalu singkat. Warna *grey* pada sambungan las menunjukkan bahwa tingkat kontaminasi atmosfer yang tinggi pada hasil penelitian ini maka hasil visual pada penelitian ini dinyatakan tidak memenuhi syarat atau *unacceptable*

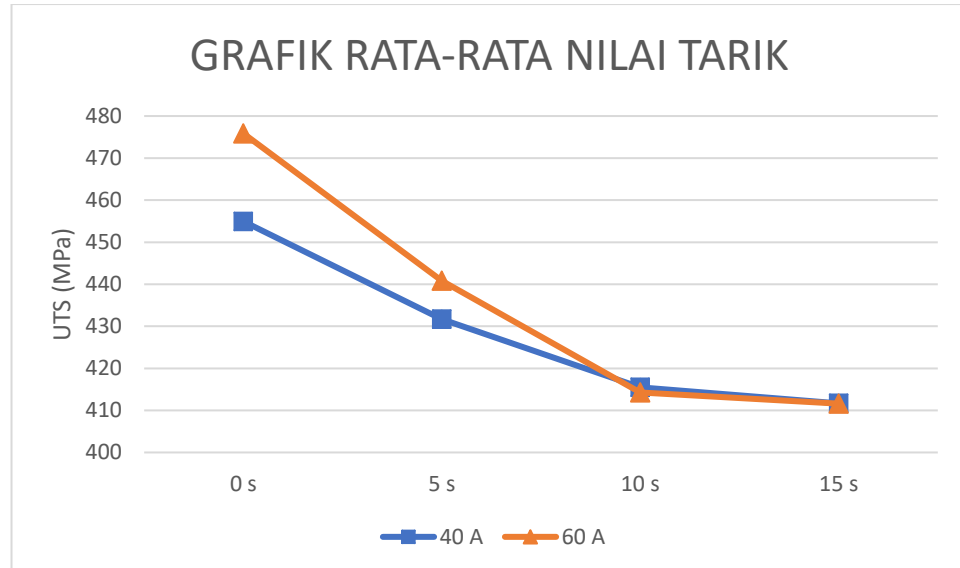
4.2. Hasil Pengujian Tarik

tarik adalah pengujian mekanik untuk mengetahui kemampuan suatu material menahan beban tarik sampai mengalami deformasi dan

akhirnya patah, berikut nilai tarik ditunjukkan pada Tabel dan Gambar 4. 2 sebagai berikut :

Tabel 4. 2 Data Uji Tarik

				Max Strenght	Rata-rata	Lokasi Patah
Spesimen	Kuat Arus	Durasi Post-flow	Jumlah	(Mpa)		
A1	40	0s	TS1	447,4	454,950	WELD
			TS2	462,5		WELD
A2		5s	TS1	443,17	431,680	BASE
			TS2	420,19		BASE
A3		10s	TS1	421,7	415,475	BASE
			TS2	409,25		BASE
A4		15s	TS1	369,82	411,680	BASE
			TS2	453,54		BASE
B1	60	0s	TS1	474,16	475,875	WELD
			TS2	477,59		WELD
B2		5s	TS1	461,93	440,810	BASE
			TS2	419,69		BASE
B3		10s	TS1	407,23	414,275	BASE
			TS2	421,32		BASE
B4		15s	TS1	412,36	411,605	BASE
			TS2	410,85		BASE



Gambar 4. 2 Grafik Rata-Rata Pengujian Tarik



A1. 40A 0s



A2. 40A 5s



A3. 40A 10s



A4. 40A 15s



B1. 60A 0s



B2. 60A 5s



B3. 60A 10s



B4. 60A 15s

Gambar 4. 3 Spesimen Uji Tarik

Dari hasil uji tarik pada tabel, dapat diketahui bahwa semua spesimen pengujian tarik didapatkan nilai rata-rata *ultimate tensile strength* pada semua variasi uji melampaui kekuatan minimum dari material CP Titanium Grade 2 yaitu sebesar 345 Mpa untuk spesimen yang patah pada *weld metal* dan 330 Mpa untuk spesimen yang patah pada *base metal*.

Meskipun pada AWS D1.9/D1.9M hanya menyaratkan ketentuan keberterimaan nilai Tarik minimum akan tetapi peningkatan nilai tarik pada penelitian ini tidak serta-merta menunjukkan bahwa kualitas sambungan las menjadi lebih baik. Pada pengelasan titanium, perlindungan gas yang kurang optimal dapat menyebabkan masuknya unsur *interstisial*, terutama oksigen, ke dalam logam las selama proses pendinginan. Oksigen yang terlarut dalam matriks α -titanium berperan sebagai penguat larutan padat (*solid solution strengthening*), sehingga meningkatkan hambatan terhadap pergerakan dislokasi dan menyebabkan peningkatan kekuatan tarik. Oleh karena itu, kenaikan UTS pada penelitian ini lebih tepat dikaitkan dengan mekanisme penguatan akibat kontaminasi oksigen dalam batas tertentu. Dengan demikian, seluruh hasil uji Tarik pada penelitian ini dinyatakan *unacceptable*

4.3. Hasil dan Pembahasan Pengujian Hardness Vickers

Uji kekerasan atau *hardness Test* merupakan salah satu jenis pengujian merusak atau DT (*Destructive Test*) yang memiliki tujuan untuk mengetahui nilai kekerasan suatu material karena akibat dari suatu proses pengelasan dan perlakuan lainnya. Uji kekerasan dilakukan untuk mengevaluasi ketahanan material terhadap deformasi plastis lokal akibat penetrasi indenter pada beban tertentu. Nilai kekerasan yang diperoleh dipengaruhi oleh karakteristik struktur mikro karena struktur mikro mengendalikan mekanisme pergerakan dislokasi di dalam material. Pada sambungan las CP Titanium Grade 2. *Hardness Test* pada penelitian ini dilakukan dengan metode Vickers (HVN) yang menggunakan pembebanan 200 gf/mm² dan waktu penahanan beban 15 detik. Pengambilan titik hardness dilakukan sebanyak 9 titik pada tiap variasi, yaitu 3 titik di daerah *base metal*, 3 titik di daerah *weld metal*, 3 titik di daerah haz. Adapun nilai yang didapat pada tiap spesimen, berikut nilai kekerasan dapat dilihat pada Tabel 4.3 sampai 4.5 sebagai berikut:

Tabel 4. 3 Nilai pengujian kekerasan pada daerah weld metal

Hardness Daerah Weld Metal						
Spesimen	Kuat Arus	Durasi <i>Post-Flow</i>	Nilai Kekerasan			Rata-Rata KGF/mm ²
			1	2	3	
A1	40A	0s	276,64	277,86	278,49	277,66
A2		5s	222,20	225,82	222,90	223,64
A3		10s	217,82	217,36	217,29	217,49
A4		15s	200,74	199,51	201,89	200,71
B1	60 A	0s	300,30	302,76	306,30	303,12
B2		5s	287,05	287,83	288,45	287,78
B3		10s	223,86	223,97	225,00	224,28
B4		15s	216,97	217,13	218,09	217,40

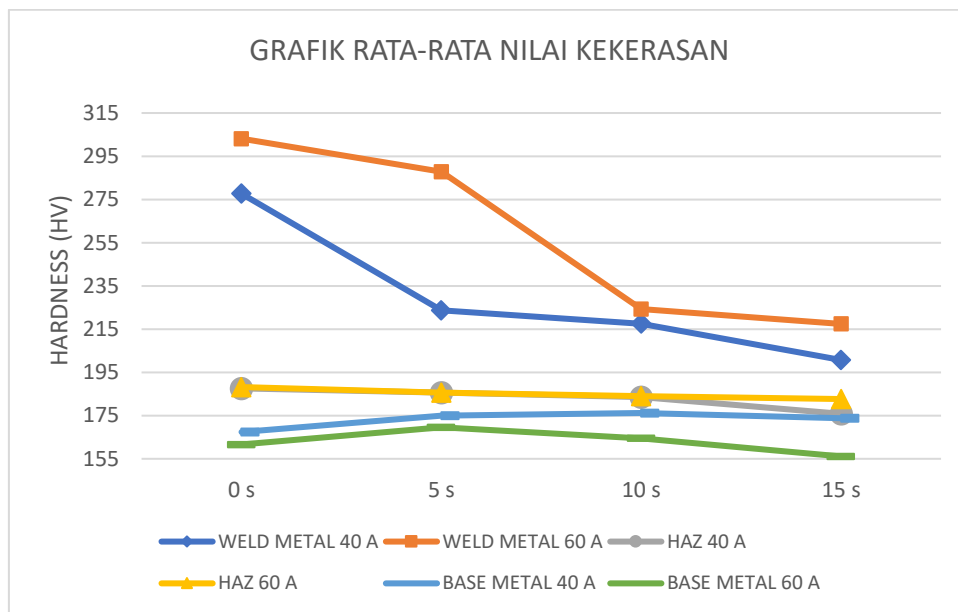
Tabel 4. 4 Nilai pengujian kekerasan pada daerah HAZ

Hardness Daerah Haz						
Spesimen	Kuat Arus	Durasi <i>Post-Flow</i>	Nilai Kekerasan			Rata-Rata KGF/Mm ²
			1	2	3	
A1	40 A	0s	187,32	187,02	188,35	187,56
A2		5s	185,98	185,84	185,11	185,64
A3		10s	185,22	179,12	186,49	183,61
A4		15s	175,87	175,90	175,70	175,82
B1	60 A	0s	186,66	188,57	189,33	188,19
B2		5s	184,79	185,72	186,56	185,69
B3		10s	182,42	183,64	185,86	183,97
B4		15s	182,21	182,62	183,11	182,65

Tabel 4. 5 Nilai pengujian kekerasan pada daerah base metal

Hardness Daerah Base Metal						
Spesimen	Kuat Arus	Durasi <i>Post-Flow</i>	Nilai Kekerasan			Rata-Rata KGF/Mm ²
			1	2	3	
A1	40 A	0s	167,55	167,42	167,17	167,38
A2		5s	172,51	179,87	172,59	174,99
A3		10s	172,78	176,56	179,22	176,19
A4		15s	169,00	175,21	177,05	173,75
B1	60 A	0s	160,32	162,98	161,46	161,59
B2		5s	169,52	169,37	169,79	169,56
B3		10s	163,61	163,87	165,89	164,46
B4		15s	150,9	157,36	160,03	156,10

Grafik rata-rata kekerasan daerah Base metal, Haz, dan Weld Metal dapat dilihat pada Gambar 4. 4 sebagai berikut :



Gambar 4. 4 Grafik Rata-Rata Nilai Kekerasan

Berdasarkan hasil pengujian kekerasan pada daerah *weld metal*, terlihat bahwa variasi arus pengelasan dan durasi *post-flow* memberikan pengaruh yang cukup jelas terhadap nilai kekerasan sambungan las CP Titanium ASTM SB338 Grade 2. Pada spesimen dengan arus 40 A, nilai kekerasan rata-rata *weld metal* mengalami kenaikan seiring berkurangnya durasi *post-flow*, yaitu dari 277,66 HV pada spesimen A1 menjadi 223,64 HV pada spesimen A2, kemudian turun lagi menjadi 217,49 HV pada spesimen A3, dan 200,71 HV pada spesimen A4. Kecenderungan yang sama juga terlihat pada spesimen dengan arus 60 A, di mana nilai kekerasan tertinggi diperoleh pada spesimen B1 sebesar 303,12 HV, kemudian menurun menjadi 287,78 HV pada spesimen B2, 224,28 HV pada spesimen B3, dan 217,40 HV pada spesimen B4. Pola ini menunjukkan bahwa semakin singkat durasi *post-flow* yang diberikan maka semakin tinggi nilai kekerasannya.

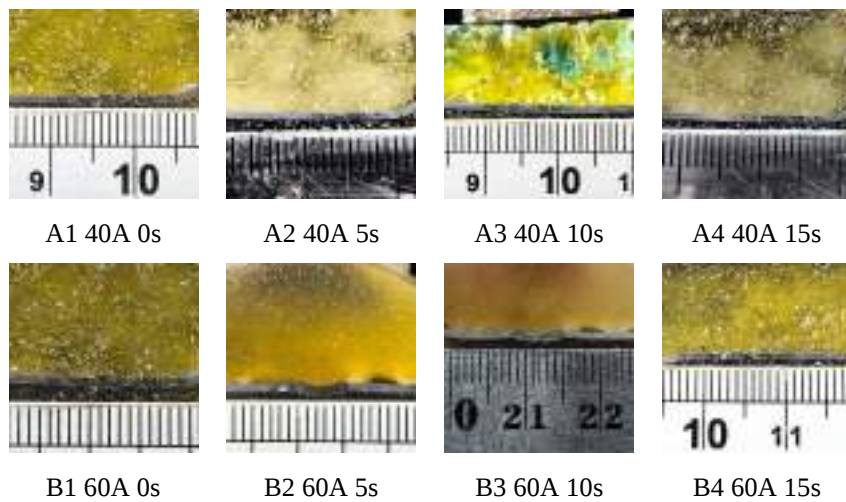
Berdasarkan hasil pengujian kekerasan, daerah *heat affected zone* (HAZ) menunjukkan nilai kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan *base metal*. Peningkatan ini dapat dijelaskan oleh adanya perubahan mikrostruktur akibat siklus termal pengelasan serta kemungkinan terjadinya penguatan larutan padat interstisial (*interstitial solid solution strengthening*)

oleh unsur oksigen yang berdifusi ke dalam titanium selama proses pengelasan. Oksigen merupakan unsur interstisial yang memiliki kelarutan tinggi pada fase α -titanium dan mampu menimbulkan distorsi kisi sehingga menghambat pergerakan dislokasi. Akibatnya, kekerasan material meningkat meskipun perubahan morfologi mikrostruktur tidak terlalu besar. Namun demikian, nilai kekerasan HAZ pada seluruh variasi kuat arus dan durasi *post-flow* cenderung relatif seragam.

Berdasarkan AWS G2.4/G2.4M Pengujian kekerasan merupakan salah satu metode yang dapat memberikan indikasi langsung terhadap terjadinya kontaminasi atmosfer pada sambungan las. Sambungan las yang mengalami kontaminasi umumnya menunjukkan peningkatan nilai kekerasan dibandingkan dengan sambungan yang tidak terkontaminasi. Selain itu, pengujian kekerasan juga mampu mengidentifikasi kontaminasi yang disebabkan oleh perlindungan gas yang tidak memadai, meskipun secara visual sambungan las masih memperlihatkan warna permukaan yang memenuhi kriteria penerimaan, kekerasan CP Titanium pada kondisi yang belum terkena proses thermal adalah 88 Rockwell B atau setara dengan 170 HVN, hal ini sejalan dengan hasil pengujian kekerasan pada penelitian ini dimana rata-rata nilai kekerasan pada variasi dengan durasi *post-flow* yang lebih singkat menunjukan nilai kekerasan tertinggi dan menurun seiring bertambahnya durasi *post-flow*

4.4. Hasil Pembahasan Pengujian Makro

Pengambilan struktur makro dilakukan dengan mengambil sample pada daerah pengelasan. Pengujian ini bertujuan untuk melihat fusi dari logam las dari hasil proses pengelasan. Sebelum dilakukan uji makro, material harus dipoles terlebih dahulu hingga rata dan mengkilap dengan kertas gosok mulai dari grid yang kasar hingga grid yang halus. Lalu dilakukan proses etsa permukaan logam yang sudah diratakan atau dipoles yang bertujuan untuk menampilkan daerah HAZ dari proses oksidasi dengan larutan etsa yaitu menggunakan larutan HF dan HNO₃, gambar 4.5 berikut :



Gambar 4. 5 Hasil Pengujian Makro

Berdasarkan gambar diatas didapatkan bahwa seiring bertambahnya kuat arus maka semakin besar HAZ yang didapatkan dan membuat daerah semakin lebar

4.5. Hasil dan Pembahasan Pengujian Mikro

Pengujian mikro etsa dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui bentuk struktur mikro setelah dilakukan proses pengelasan. Pengujian struktur mikro ini dilakukan di daerah base metal, HAZ, dan weld metal dengan perbesaran 200x dan 500x untuk melihat secara lebih detail struktur mikro dari 8 variasi spesimen yang diteliti. Sebelum dilakukan pengujian struktur mikro, spesimen di etsa menggunakan larutan kroll's dengan komposisi 3 ml HF + 6 ml HNO₃ + 91 ml air distilasi. Berikut detail struktur mikro pada daerah *base metal* dengan perbesaran 200x dapat dilihat pada gambar 4.6 sebagai berikut :

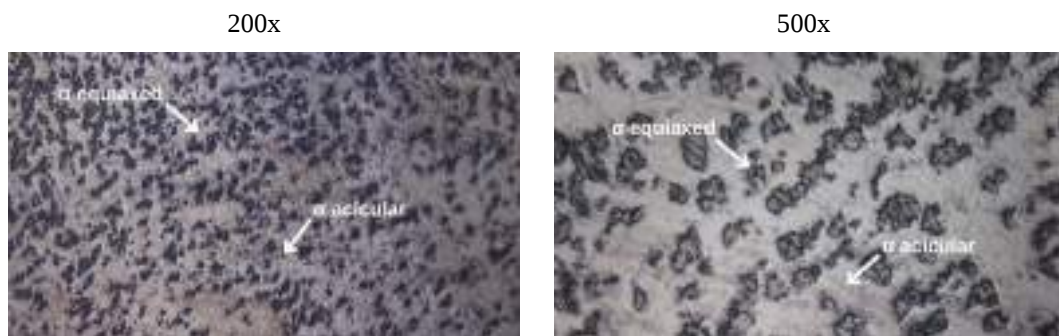


Gambar 4. 6 Struktur Mikro Daerah Base Metal

Hasil pengamatan struktur mikro pada daerah *base metal* menunjukkan bahwa mikrostruktur oleh fase α primer (primary α) berbentuk *equiaxed* yang tampak sebagai butiran berwarna lebih gelap dengan bentuk relatif membulat hingga poligonal dan tersebar merata di seluruh bidang pengamatan.

Keberadaan fase α *equiaxed* menunjukkan bahwa mikrostruktur base metal masih mempertahankan kondisi awal material hasil proses manufaktur dan belum mengalami transformasi mikrostruktur akibat siklus termal pengelasan.

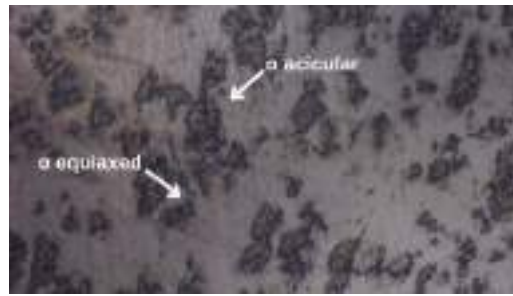
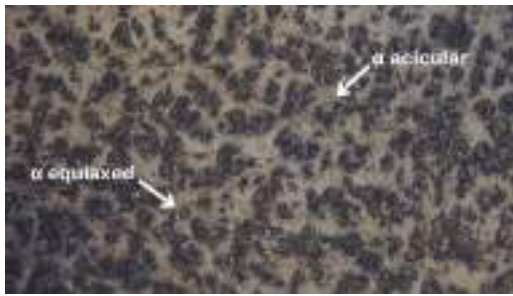
Selanjutnya pengujian struktur mikro pada daerah *weld metal* Pada penelitian ini juga dilakukan pengujian struktur mikro pada daerah weld metal sebagaimana dapat dilihat pada gambar 4.7 sebagai berikut :



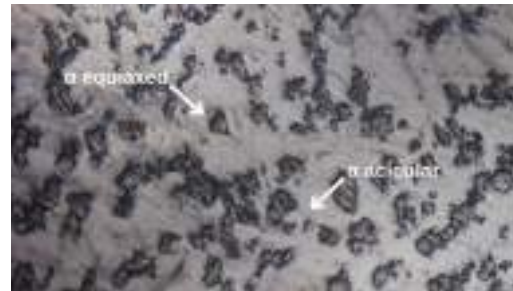
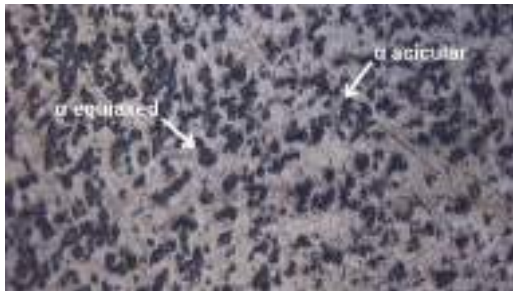
A1. 40A *post-flow* 0s



A2. 40A *post-flow* 5s



A3. 40A *post-flow* 10s



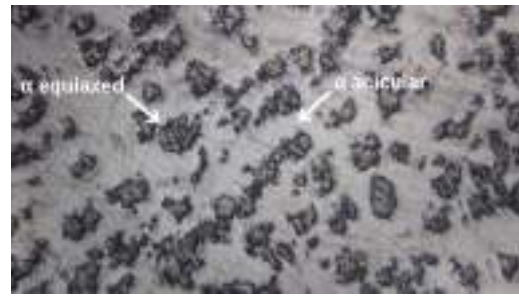
A4. 40A *post-flow* 15s



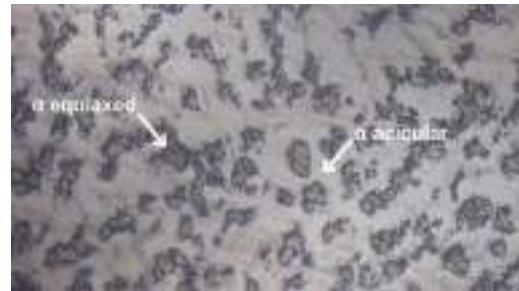
B1. 60A *post-flow* 0s



B2. 60A *post-flow* 5s



B3. 60A *post-flow* 10s



B4. 60A *post-flow* 15s

Gambar 4. 7 Struktur Mikro Daerah Weld Metal

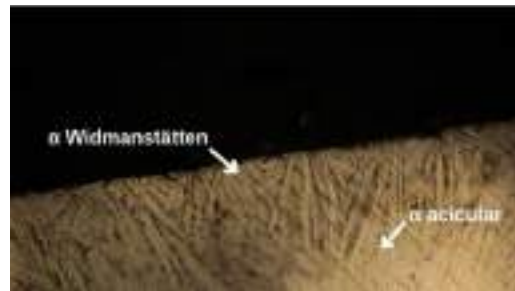
Berdasarkan hasil pengamatan struktur mikro pada daerah *weld metal* terlihat bahwa mikrostruktur tersusun atas fase α *Widmanstätten*, fase α *equiaxed* yang tersebar merata dan disertai dengan fase α *acicular* yang tumbuh di antara butir-butir α tersebut. Fase α *equiaxed* tampak sebagai butiran berwarna lebih gelap dengan bentuk relatif membulat atau poligonal, sedangkan α *acicular* terlihat sebagai struktur berbentuk jarum halus yang menyebar pada matriks, serta terlihat juga adanya koloni α *Widmanstätten* pada variasi dengan *post-flow* 0 detik yang berkembang secara dominan sehingga menunjukkan bahwa transformasi dari fase β selama pendinginan berlangsung dengan pembentukan struktur lamelar kasar. Kondisi ini mengindikasikan bahwa laju pendinginan selama proses pengelasan tidak cukup cepat sehingga menghasilkan transformasi β menjadi α *Widmanstätten* dan α *acicular*, namun masih mempertahankan sebagian fase α primer (α *equiaxed*) yang tidak seluruhnya mengalami transformasi.

Selanjutnya pengujian struktur mikro pada HAZ dapat dilihat pada Gambar 4. 8 sebagai berikut:

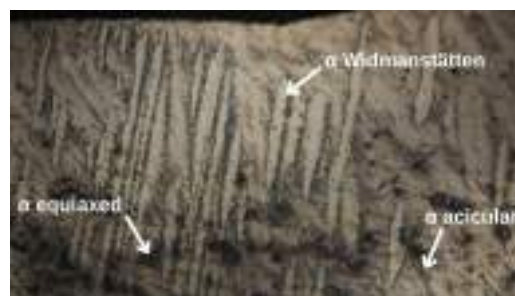
200x



500x



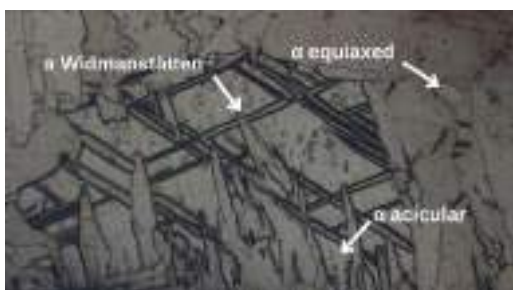
A1. 40A post-flow 0s



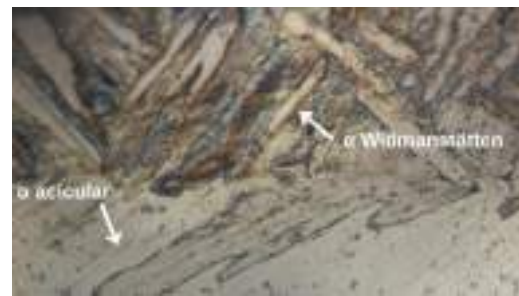
A2. 40A post-flow 5s



A3. 40A post-flow 10s



A4. 40A post-flow 15s



B1. 60A *post-flow* 0s



B2. 60A *post-flow* 5s



B3. 60A *post-flow* 10s



B4. 60A *post-flow* 15s

Gambar 4. 8 Struktur Mikro Daerah HAZ

Hasil pengamatan struktur mikro pada daerah HAZ yang ditunjukkan pada Gambar 4.8 memperlihatkan bahwa mikrostruktur

didominasi oleh α *Widmanstätten* dengan morfologi berupa lamela-lamela α yang tersusun sejajar dalam satu koloni, namun memiliki orientasi yang berbeda antar koloni. Selain itu, terlihat pula keberadaan α *acicular* yang berbentuk jarum-jarum halus di antara lamela *Widmanstätten*, sedangkan sebagian kecil α *equiaxed* masih dapat diamati pada beberapa area. Mikrostruktur tersebut menunjukkan bahwa selama proses pengelasan logam mengalami pemanasan hingga memasuki daerah fasa β (β -transus), kemudian mengalami transformasi kembali menjadi fasa α selama proses pendinginan.

Dominasi struktur α *Widmanstätten* mengindikasikan bahwa laju pendinginan setelah pengelasan berada pada kategori lambat sehingga memberikan waktu yang cukup bagi pertumbuhan lamela α dari batas butir β . Di sisi lain, terbentuknya α *acicular* menunjukkan bahwa sebagian transformasi berlangsung dengan laju pendinginan yang lebih tinggi sehingga nukleasi fasa α terjadi di dalam butir β dan menghasilkan morfologi berbentuk jarum yang lebih halus. Keberadaan α *acicular* berkaitan terhadap peningkatan kekuatan tarik dan kekerasan melalui mekanisme penghalangan pergerakan dislokasi, sedangkan struktur *Widmanstätten* memberikan kombinasi kekuatan dan ketahanan terhadap perambatan retak yang baik, meskipun umumnya diikuti penurunan keuletan dibandingkan mikrostruktur *equiaxed*. (Tamimi et al., 2025), mikrostruktur pada daerah HAZ menunjukkan bahwa proses pengelasan menghasilkan transformasi mikrostruktur yang khas pada titanium murni komersial. Koloni-koloni α *Widmanstätten* yang mendominasi bidang pengamatan disertai α *acicular* yang lebih halus menunjukkan adanya siklus pemanasan hingga di atas temperatur transformasi β diikuti pendinginan yang relatif lambat.

Secara keseluruhan khususnya *Commercially Pure Titanium Grade 2*, fasa yang stabil pada suhu ruang adalah fasa α (alpha) yang memiliki struktur kristal *Hexagonal Close Packed* (HCP). Meskipun hanya terdapat satu jenis fasa α secara kristalografi, fasa tersebut dapat muncul dalam berbagai morfologi sebagai akibat dari perbedaan siklus termal selama

proses manufaktur, perlakuan panas, maupun pengelasan. Morfologi tersebut meliputi *equiaxed* alpha, *acicular* alpha, *Widmanstätten* alpha, *basketweave* alpha. Perbedaan morfologi ini bukan menunjukkan perbedaan jenis fasa, melainkan variasi bentuk dan orientasi pertumbuhan fasa α yang terbentuk dari transformasi fasa β selama proses pendinginan. Morfologi yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh laju pendinginan, temperatur pemanasan, waktu penahanan, serta riwayat deformasi material. perubahan morfologi fasa α tersebut merupakan faktor utama yang mengendalikan sifat mekanik titanium (*Engineering Materials and Processes*, 2007.)

Equiaxed alpha merupakan morfologi yang paling umum dijumpai pada logam induk CP Titanium Grade 2. Morfologi ini ditandai oleh butiran berbentuk hampir bulat atau poligonal dengan dimensi yang relatif sama ke segala arah dan terbentuk melalui proses rekristalisasi atau perlakuan panas pada temperatur di bawah β -transus. Oleh karena itu, struktur ini memberikan kombinasi yang baik antara kekuatan, keuletan, dan ketangguhan

Ketika CP Titanium Grade 2 mengalami proses pengelasan, daerah logam las akan dipanaskan hingga melewati temperatur β -transus sehingga seluruh mikrostruktur berubah menjadi fasa β . Selama proses pendinginan, fasa β akan bertransformasi kembali menjadi fasa α dengan morfologi yang bergantung pada laju pendinginan. Apabila pendinginan berlangsung relatif cepat, akan terbentuk *acicular* alpha, yaitu morfologi fasa α yang berbentuk jarum (*needle-like*) atau lath tipis yang tumbuh ke dalam butir β . Struktur *acicular* memiliki ukuran yang lebih halus dibandingkan *equiaxed* sehingga meningkatkan hambatan terhadap pergerakan dislokasi dan menghasilkan nilai kekerasan serta kekuatan tarik yang lebih tinggi. Namun demikian, peningkatan kekuatan tersebut umumnya diikuti oleh penurunan keuletan apabila morfologi *acicular* berkembang secara dominan

Pada laju pendinginan yang lebih lambat, transformasi fasa β menghasilkan *Widmanstätten* alpha, yaitu morfologi berupa pelat-pelat α (*plate-like alpha*) yang tumbuh dari batas butir β menuju bagian dalam butir dengan orientasi kristalografi tertentu. Pelat-pelat α yang memiliki orientasi

sama akan membentuk suatu koloni alpha, sedangkan beberapa koloni dengan orientasi berbeda yang saling berpotongan akan menghasilkan struktur *basketweave* alpha. Struktur *basketweave* dikenal memiliki ketahanan terhadap perambatan retak yang lebih baik karena arah propagasi retak menjadi lebih kompleks akibat perubahan orientasi antar koloni. Oleh karena itu, morfologi *Widmanstätten* alpha banyak dijumpai pada sambungan las titanium yang mengalami pendinginan dengan laju sedang hingga lambat dan sering dikaitkan dengan kekuatan tarik yang baik

Menurut penelitian yang dilakukan oleh (Gardner et al., 2021) masuknya unsur atmosfer ke dalam paduan titanium memberikan pengaruh yang sangat signifikan terhadap perubahan sifat mikromekanik material, terutama kekerasan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada daerah dengan kandungan oksigen yang rendah, variasi kekerasan masih dipengaruhi oleh faktor mikrostruktur dan orientasi kristal. Namun, seiring meningkatnya konsentrasi atmosfer seperti oksigen, mekanisme *interstitial solid solution hardening* menjadi faktor yang paling dominan dalam meningkatkan kekerasan, bahkan pengaruhnya jauh lebih besar dibandingkan pengaruh morfologi mikrostruktur maupun orientasi kristal. Hal ini menunjukkan bahwa atom atmosfer yang berdifusi ke dalam kisi kristal α -titanium menghasilkan distorsi kisi yang meningkatkan hambatan terhadap pergerakan dislokasi, sehingga deformasi plastis menjadi semakin sulit terjadi dan nilai kekerasan meningkat secara signifikan.

Penelitian tersebut memiliki keterkaitan dengan hasil penelitian ini, dimana spesimen yang menggunakan durasi *post-flow* lebih singkat menunjukkan nilai kekerasan yang lebih tinggi. Berkurangnya waktu perlindungan gas argon setelah busur dipadamkan meningkatkan peluang terjadinya difusi unsur atmosfer selama tahap awal pendinginan karena logam las masih berada pada temperatur yang cukup tinggi untuk bereaksi dengan atmosfer. Atom atmosfer seperti oksigen, hidrogen, dan nitrogen yang masuk ke dalam matriks α -titanium kemudian menempati posisi interstisial dan menghasilkan mekanisme *interstitial solid solution strengthening*, yaitu mekanisme penguatan akibat distorsi kisi kristal yang

menghambat pergerakan dislokasi. Dengan semakin terbatasnya mobilitas dislokasi, material memerlukan tegangan yang lebih besar untuk mengalami deformasi plastis sehingga nilai kekerasan meningkat. Oleh karena itu, kenaikan kekerasan pada spesimen dengan *post-flow* yang lebih singkat dalam penelitian ini diduga berkaitan dengan meningkatnya penyerapan unsur atmosfer selama proses pendinginan awal, yang memperkuat material melalui mekanisme penguatan larutan padat interstisial.

4.6. Analisa Keseluruhan

Berdasarkan hasil pengujian visual, seluruh spesimen menunjukkan tingkat perubahan warna yang tidak jauh berbeda sesuai dengan variasi *post-flow*. Semakin lama durasi *post-flow*, perlindungan gas terhadap logam las selama pendinginan menjadi semakin efektif sehingga oksidasi permukaan dapat diminimalkan. Sebaliknya, pada *post-flow* yang lebih singkat, logam las yang masih berada pada temperatur tinggi lebih lama terpapar atmosfer sehingga peluang terjadinya kontaminasi oksigen meningkat. Meskipun semua spesimen tidak memenuhi kriteria warna yang dapat diterima, kondisi tersebut mencerminkan bahwa logam las terkontaminasi, sehingga diperlukan pengujian mekanik sebagai verifikasi tambahan.

Hasil pengamatan struktur mikro menunjukkan bahwa daerah *base metal* tetap didominasi oleh struktur α -equiaxed khas CP Titanium Grade 2. Pada daerah HAZ terjadi perubahan morfologi akibat siklus termal selama pengelasan, sedangkan *weld metal* memperlihatkan struktur α Widmanstätten atau α acicular yang terbentuk selama proses pembekuan dan transformasi fasa. Perbedaan morfologi ini merupakan konsekuensi langsung dari distribusi temperatur dan laju pendinginan selama pengelasan.

Perubahan struktur mikro tersebut berkorelasi dengan hasil pengujian kekerasan. Daerah *weld metal* secara umum menunjukkan nilai kekerasan lebih tinggi dibandingkan HAZ maupun *base metal*. Kondisi ini menunjukkan bahwa struktur lamelar pada *weld metal* memberikan

hambatan yang lebih besar terhadap pergerakan dislokasi dibandingkan struktur α -equiaxed pada *base metal*. Selain itu, pada variasi *post-flow* yang lebih singkat, perlindungan gas yang kurang optimal memungkinkan difusi oksigen ke dalam logam las yang masih panas. Sebagai unsur interstisial, oksigen menyebabkan *solid solution strengthening* melalui distorsi kisi kristal sehingga pergerakan dislokasi menjadi semakin sulit. Akibatnya, ketahanan material terhadap deformasi plastis lokal meningkat dan menghasilkan nilai kekerasan yang lebih tinggi.

Pada AWS G2.4/G2.4M juga menjelaskan bahwa Pengujian kekerasan merupakan salah satu metode yang dapat memberikan indikasi langsung terhadap terjadinya kontaminasi atmosfer pada sambungan las. Sambungan las yang mengalami kontaminasi umumnya menunjukkan peningkatan nilai kekerasan dibandingkan dengan sambungan yang tidak terkontaminasi. Hal ini sejalan dengan penelitian ini dimana variasi dengan *post-flow* yang lebih singkat cenderung memiliki kekerasan yang lebih tinggi dibanding variasi dengan *post-flow* yang lebih lama

Hasil pengujian tarik menunjukkan kecenderungan yang serupa dengan hasil pengujian kekerasan. Variasi *post-flow* yang lebih singkat menghasilkan nilai *ultimate tensile strength* (UTS) yang lebih tinggi dibandingkan *post-flow* yang lebih lama. Peningkatan UTS ini kemungkinan merupakan hasil kombinasi antara penguatan akibat struktur α Widmanstätten dan efek *solid solution strengthening* oleh oksigen. Meskipun demikian, peningkatan kekuatan tersebut tidak selalu menunjukkan kualitas sambungan yang lebih baik, karena penguatan akibat kontaminasi oksigen umumnya diikuti oleh penurunan keuletan. Hal ini sejalan dengan karakteristik titanium, di mana unsur interstisial meningkatkan kekuatan dan kekerasan, tetapi mengurangi kemampuan deformasi plastis material.

Variasi kuat arus juga memberikan pengaruh terhadap karakteristik sambungan las karena menentukan besarnya *heat input*. Perubahan *heat input* memengaruhi ukuran kolom las, waktu logam berada pada temperatur tinggi, serta laju pendinginan setelah pengelasan. Perbedaan kondisi termal

tersebut berkontribusi terhadap variasi struktur mikro yang terbentuk, meskipun dalam penelitian ini pengaruh durasi *post-flow* terhadap efektivitas perlindungan gas tampak lebih dominan dalam memengaruhi sifat mekanik dibandingkan perubahan kuat arus.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan adanya hubungan yang konsisten antara parameter pengelasan, struktur mikro, dan sifat mekanik. Durasi *post-flow* yang lebih lama memberikan perlindungan gas yang lebih efektif sehingga mengurangi risiko kontaminasi atmosfer, menghasilkan struktur mikro yang lebih mendekati kondisi ideal, serta mempertahankan keseimbangan antara kekuatan dan keuletan. Sebaliknya, *post-flow* yang lebih singkat memang meningkatkan nilai kekerasan dan UTS, namun peningkatan tersebut kemungkinan berasal dari kontaminasi oksigen dan bukan semata-mata akibat perbaikan struktur mikro. Oleh karena itu, peningkatan nilai kekerasan dan kekuatan tarik pada kondisi tersebut tidak dapat langsung diinterpretasikan sebagai peningkatan kualitas sambungan las.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis pada penelitian mengenai variasi kuat arus dan durasi *post-flow* gas pelindung pada material CP Titanium ASME SB338 Gr2, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Variasi kuat arus dan durasi *post-flow* menghasilkan sifat mekanik sambungan las CP Titanium Grade 2. Peningkatan kuat arus dari 40 A menjadi 60 A menghasilkan kecenderungan peningkatan kuat tarik pada kondisi *post-flow* yang sama. Peningkatan tersebut berkaitan dengan perubahan masukan panas dan siklus termal selama proses pengelasan yang memengaruhi perkembangan mikrostruktur daerah las. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa durasi *post-flow* 0, 5, 10, 15 Detik belum cukup untuk melindungi logam las saat proses pengelasan, hal ini diduga disebabkan oleh kontaminasi atmosfer saat proses pendinginan terjadi.
2. Variasi kuat arus dan durasi *post-flow* menghasilkan sifat mekanik sambungan las CP Titanium Grade 2. Peningkatan kuat arus dari 40 A menjadi 60 A menghasilkan kecenderungan peningkatan nilai kekerasan pada kondisi *post-flow* yang sama. Peningkatan tersebut berkaitan dengan perubahan masukan panas dan siklus termal selama proses pengelasan yang memengaruhi perkembangan mikrostruktur daerah las. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa durasi *post-flow* 0, 5, 10, 15 Detik belum cukup untuk melindungi logam las saat proses pengelasan, sehingga terjadinya kenaikan nilai kekerasan pada kuat arus yang lebih tinggi yang disebabkan oleh kontaminasi atmosfer yang lebih lama saat proses pendinginan.
3. Variasi kuat arus dan durasi *post-flow* menghasilkan perbedaan karakteristik struktur makro dan mikro pada sambungan las. Pada struktur makro, peningkatan kuat arus menyebabkan daerah HAZ semakin lebar akibat meningkatnya masukan panas yang masuk kedalam material saat proses pengelasan. Pada struktur mikro, variasi kuat arus dan durasi *post-*

flow menyebabkan oksidasi yang lebih parah pada kuat arus yang lebih tinggi.

5.2. Saran

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

1. Perlu dilakukan penambahan dan pelebaran jarak durasi *post-flow* sebesar 30, 60, 90, 120 Detik
2. Perlu dilakukan pengujian laju korosi untuk mengetahui efek korosifitas pada hasil pengelasan.
3. Perlu dilakukan karakterisasi mikrostruktur menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) untuk mengidentifikasi ukuran butir serta identifikasi fasa α *equiaxed*, α *Widmanstätten*, dan α *acicular* dapat dilakukan dengan akurat.

DAFTAR PUSTAKA

- Anis, M., & Solichin, M. L. (n.d.). *Influence of Shielding Gas on the Mechanical Properties and Visual Surface of the Welded CP Titanium*. 2–5.
- AWS. (2014). Guide for the Fusion Welding of Titanium and Titanium Alloys. *Aws, G2.4-G2.4M*.
- AWS D1.9/D1.9M. (n.d.).
- Bendikiene, R., Baskutis, S., Baskutiene, J., Ciuplys, A., & Kacinskas, T. (2018). Comparative study of TIG welded commercially pure titanium. *Journal of Manufacturing Processes*, 36, 155–163. <https://doi.org/10.1016/J.JMAPRO.2018.10.007>
- Engineering Materials and Processes*. (n.d.).
- Gardner, H. M., Gopon, P., Magazzeni, C. M., Radecka, A., Fox, K., Rugg, D., Wade, J., Armstrong, D. E. J., Moody, M. P., & Bagot, P. A. J. (2021). Quantifying the effect of oxygen on micro - mechanical properties of a near - alpha titanium alloy. *Journal of Materials Research*, 36(12), 2529–2544. <https://doi.org/10.1557/s43578-020-00006-3>
- Huang, H. Y. (2009). Effects of shielding gas composition and activating flux on GTAW weldments. *Materials & Design*, 30(7), 2404–2409. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2008.10.024>
- Karpagaraj, A., Shanmugam, N. S., & Sankaranarayananasamy, K. (2018). *Experimental investigations and numerical prediction on the effect of shielding area and post flow time in the GTAW of CP Ti sheets*.
- Karpagaraj, A., Siva shanmugam, N., & Sankaranarayananasamy, K. (2015). Some studies on mechanical properties and microstructural characterization of automated TIG welding of thin commercially pure titanium sheets. *Materials Science and Engineering: A*, 640, 180–189. <https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2015.05.056>
- Munir, M. M. (2023). *Pengujian DT dan NDT*.

- Oboh, A. E. (2024). *Comprehensive Study on the Effects of TIG Welding Parameters on the Microstructure and Mechanical Properties of Titanium Alloys : A Review*. 1(1), 53–70.
- Rogalski, G., Fydrych, D., Landowski, M., & Łabanowski, J. (2015). Spawalność tytanu grade 2 na przykładzie płaszczowo-rurowego wymiennika ciepła. Weldability of titanium Grade 2 on example of shell and tube heat exchanger. *Przegląd Spawalnictwa*, 87(10), 1–6.
- Sari, D. P., Arifin, A., Gunawan, G., Adanta, D., Asura, I., & Syofii, I. (2021). Flow Rate Effects on Microstructure and Mechanical Properties for Titanium Weld Joint. *Journal of Energy, Mechanical, Material, and Manufacturing Engineering*, 6(3), 189–196. <https://doi.org/10.22219/jemmme.v6i3.19082>
- Szwajka, K. (2024). *The Influence of the Shielding-Gas Flow Rate on the Mechanical Properties of TIG-Welded Butt Joints of Commercially Pure*.
- Tamimi, A. Al, Thekkuden, D. T., & Mourad, A. I. (2025). *Investigation of mechanical and metallurgical properties of commercially pure titanium grade 2 tube-to-tubesheet joints*. 1–26.
- Thakur, P., Thakur, P. P., & Chapgaon, A. N. (2016). A Review on Effects of GTAW Process Parameters on weld. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, 4(1), 136–140. www.ijraset.com
- Wang, Y., Qi, B., Cong, B., & Yang, M. (2017). Optimization of hybrid ultrasonic frequency pulsed VP-GTAW process parameters on tensile properties of AA 5456 alloy. *Applied Sciences (Switzerland)*, 7(5). <https://doi.org/10.3390/app7050485>
- Yu, Q., Qi, L., Tsuru, T., Traylor, R., & Rugg, D. (2014). *Origin of dramatic oxygen solute strengthening effect in titanium*. December.

LAMPIRAN

Lampiran A. Material CP Titanium ASME SB338 Gr 2

Lampiran A 1. Material Inspeccion Certificate

INSPECTION CERTIFICATE
ISO 9001:2015

INSPECTION CERTIFICATE
ISO 9001:2015
NO. 123456789
DATE: 2023-10-26

Client: PT. ABC
Product: Titanium CP Titanium ASME SB338 Gr 2
Specification: ASME SB338 Gr 2
Material: CP Titanium
Quantity: 1000 kg

Inspector: Mr. ABC
Inspector's Signature: _____
Date of Issue: 2023-10-26

Lot No.	Material	Size	Weight	Mechanical Properties (%)										Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of Area (%)	Impact (J)
				UTS	YS	EL	RA	IMP										
001	CP Titanium	1000 kg	1000 kg	900	800	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
002	CP Titanium	1000 kg	1000 kg	900	800	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
003	CP Titanium	1000 kg	1000 kg	900	800	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
004	CP Titanium	1000 kg	1000 kg	900	800	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
005	CP Titanium	1000 kg	1000 kg	900	800	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
006	CP Titanium	1000 kg	1000 kg	900	800	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
007	CP Titanium	1000 kg	1000 kg	900	800	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
008	CP Titanium	1000 kg	1000 kg	900	800	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
009	CP Titanium	1000 kg	1000 kg	900	800	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
010	CP Titanium	1000 kg	1000 kg	900	800	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	

Inspector's Signature: _____
Date of Issue: 2023-10-26

Lampiran A 2. Material Inspection Report

INSPECTION REPORT
POSITIVE AND NEGATIVE IDENTIFICATION

Inspector: Mr. ABC
Inspector's Signature: _____
Date of Issue: 2023-10-26

Client: PT. ABC
Product: Titanium CP Titanium ASME SB338 Gr 2
Specification: ASME SB338 Gr 2
Material: CP Titanium
Quantity: 1000 kg

Inspector: Mr. ABC
Inspector's Signature: _____
Date of Issue: 2023-10-26

Lot No.	Material	Size	Weight	Mechanical Properties (%)										Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of Area (%)	Impact (J)
				UTS	YS	EL	RA	IMP										
001	CP Titanium	1000 kg	1000 kg	900	800	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
002	CP Titanium	1000 kg	1000 kg	900	800	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
003	CP Titanium	1000 kg	1000 kg	900	800	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
004	CP Titanium	1000 kg	1000 kg	900	800	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
005	CP Titanium	1000 kg	1000 kg	900	800	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
006	CP Titanium	1000 kg	1000 kg	900	800	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
007	CP Titanium	1000 kg	1000 kg	900	800	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
008	CP Titanium	1000 kg	1000 kg	900	800	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
009	CP Titanium	1000 kg	1000 kg	900	800	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
010	CP Titanium	1000 kg	1000 kg	900	800	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	

Inspector's Signature: _____
Date of Issue: 2023-10-26

Lampiran A 3. *Heat Number Material*



Lampiran B. *Preparation*

Lampiran B 1. *Pembuatan Trailing*



Lampiran B 2. *Pengaplikasian Infused*



Lampiran B 3. *Pengaplikasian Gas*



Lampiran B 4. *Fit-up Material*



Lampiran C. Welding Process

Lampiran C 1. Pengaturan *post-flow*



Lampiran C 2. Pengukuran Arus



Lampiran C 3. Proses Pengelasan



Lampiran D. Pengujian

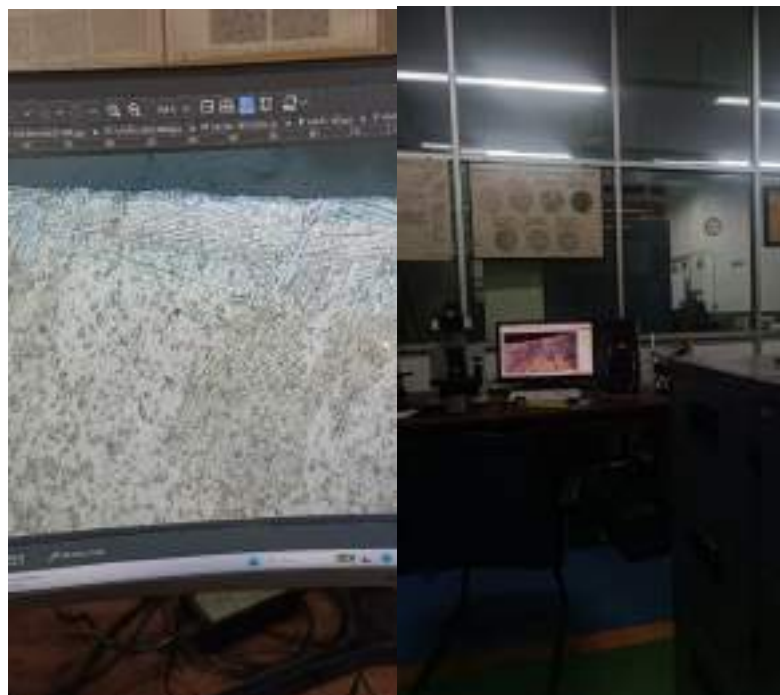
Lampiran D 1. Pengujian *Tensile*



Lampiran D 2. Pengujian *Hardness Vickers*



Lampiran D 3. Pengujian Metallography



Lampiran D 4. Hasil Pengujian Tarik Spesimen A1 (1)



Print date: 27.07.26

Parameters table:

Heading : TENSILE TEST REPORT Material : ASME SB338 GRADE 2
 Customer : PRASETYA WIRA HARTONO Specimen type : AS WELDED
 Test standard : ASTM E8/E8M

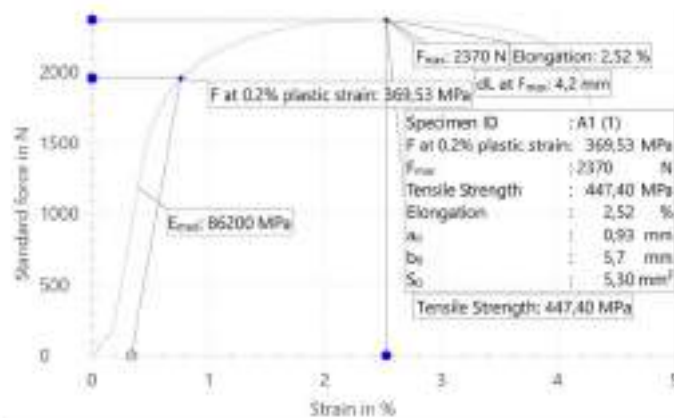
Pre-load : 5 N Speed, yield point : 5 mm/min
 Speed, Young's modulus : 5 mm/min Test speed : 5 mm/min

Results table:

Legend	No.	Specimen ID	F at 0.2% plastic strain MPa	F _{max} N	Tensile Strength MPa	Elongation %	a ₀ mm
1	1	A1 (1)	369,53	2370	447,40	2,52	0,93

Legend	No.	b ₀ mm	S ₀ mm ²
1	1	5,7	5,30

Curve graph:



Lampiran D 5.Hasil Pengujian Tarik Spesimen A1 (2)



Print date: 27.07.26

Parameters table:

Heading : TENSILE TEST REPORT Material : ASME SB338 GRADE 2
 Customer : PRASETYA WIRA HARTONO Specimen type : AS WELDED
 Test standard : ASTM E8/E8M

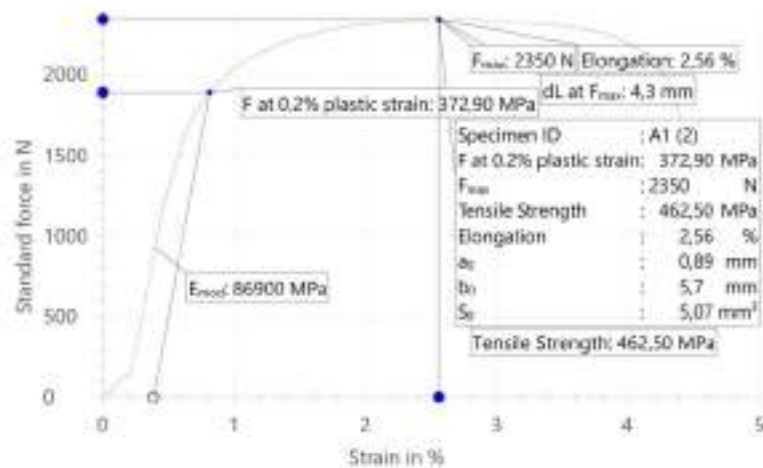
Pre-load : 5 N Speed, yield point : 5 mm/min
 Speed, Young's modulus : 5 mm/min Test speed : 5 mm/min

Results table:

Legend	No.	Specimen ID	F at 0.2% plastic strain MPa	F _{max} N	Tensile Strength MPa	Elongation %	a ₀ mm
●	2	A1 (2)	372.90	2350	462.50	2.56	0.89

Legend	No.	b ₀ mm	S ₀ mm ²
●	2	5,7	5,07

Curve graph:



Lampiran D 6. Hasil Pengujian Tarik Spesimen A2 (1)



Print date: 27.07.26

Parameters table:

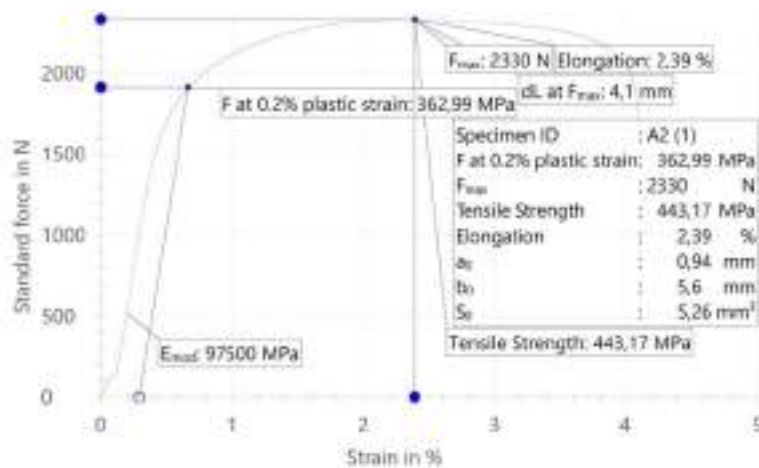
Heading : TENSILE TEST REPORT Material : ASME SB338 GRADE 2
 Customer : PRASETYA WIRA HARTONO Specimen type : AS WELDED
 Test standard : ASTM E8/E8M
 Pre-load : 5 N Speed, yield point : 5 mm/min
 Speed, Young's modulus : 5 mm/min Test speed : 5 mm/min

Results table:

Legend	No.	Specimen ID	F at 0.2% plastic strain MPa	F _{max} N	Tensile Strength MPa	Elongation %	a ₀ mm
	3	A2 (1)	362,99	2330	443,17	2,39	0,94

Legend	No.	b ₀ mm	S ₀ mm ²
	3	5,6	5,26

Curve graph:



Lampiran D 7. Hasil Pengujian Tarik Spesimen A2 (2)



Print date: 27.07.26

Parameters table:

Heading : TENSILE TEST REPORT Material : ASME SB338 GRADE 2
 Customer : PRASETYA WIRA HARTONO Specimen type : AS WELDED
 Test standard : ASTM E8/E8M

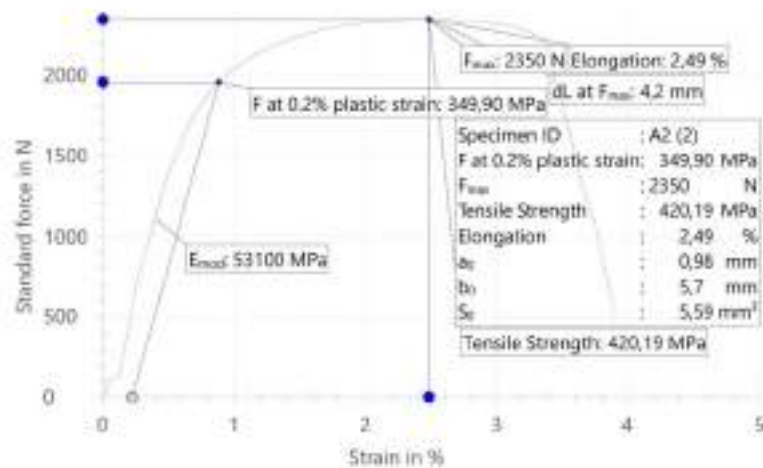
Pre-load : 5 N Speed, yield point : 5 mm/min
 Speed, Young's modulus : 5 mm/min Test speed : 5 mm/min

Results table:

Legend	No.	Specimen ID	F at 0.2% plastic strain MPa	F _{max} N	Tensile Strength MPa	Elongation %	a ₀ mm
●	4	A2 (2)	349,90	2350	420,19	2,49	0,98

Legend	No.	b ₀ mm	S ₀ mm ²
●	4	5,7	5,59

Curve graph:



Lampiran D 8. Hasil Pengujian Tarik Spesimen A3 (1)



Print date: 27.07.26

Parameters table:

Heading : TENSILE TEST REPORT Material : ASME SB338 GRADE 2
 Customer : PRASETYA WIRA HARTONO Specimen type : AS WELDED
 Test standard : ASTM E8/E8M

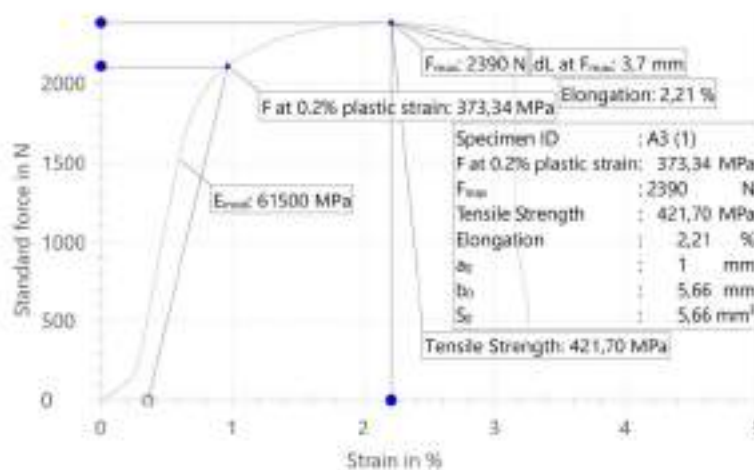
Pre-load : 5 N Speed, yield point : 5 mm/min
 Speed, Young's modulus : 5 mm/min Test speed : 5 mm/min

Results table:

Legend	No.	Specimen ID	F at 0.2% plastic strain MPa	F _{max} N	Tensile Strength MPa	Elongation %	a ₀ mm
	5	A3 (1)	373,34	2390	421,70	2,21	1

Legend	No.	b ₀ mm	S ₀ mm ²
	5	5,66	5,66

Curve graph:



Lampiran D 9 .Hasil Pengujian Tarik Spesimen A3 (2)



Print date: 27.07.26

Parameters table:

Heading : TENSILE TEST REPORT Material : ASME SB338 GRADE 2
 Customer : PRASETYA WIRA HARTONO Specimen type : AS WELDED
 Test standard : ASTM E8/E8M

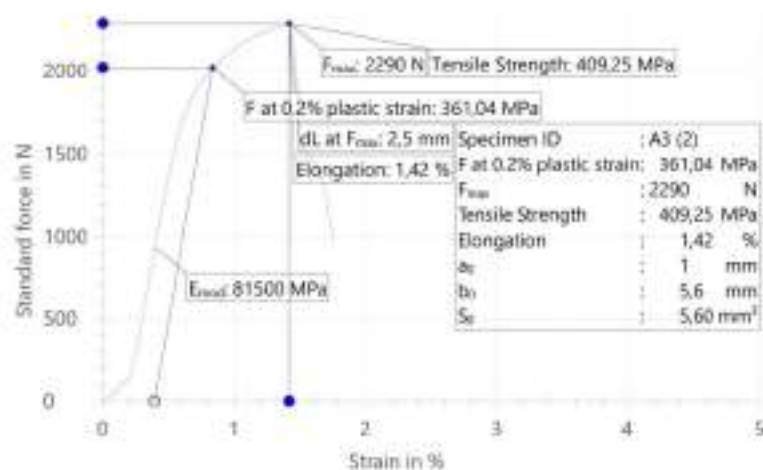
Pre-load : 5 N Speed, yield point : 5 mm/min
 Speed, Young's modulus : 5 mm/min Test speed : 5 mm/min

Results table:

Legend	No.	Specimen ID	F at 0.2% plastic strain MPa	F _{max} N	Tensile Strength MPa	Elongation %	a ₀ mm
	6	A3 (2)	361,04	2290	409,25	1,42	1

Legend	No.	b ₀ mm	S ₀ mm ²
	6	5,6	5,60

Curve graph:



Lampiran D 10. Hasil Pengujian Tarik Spesimen A4 (1)

Parameters table:

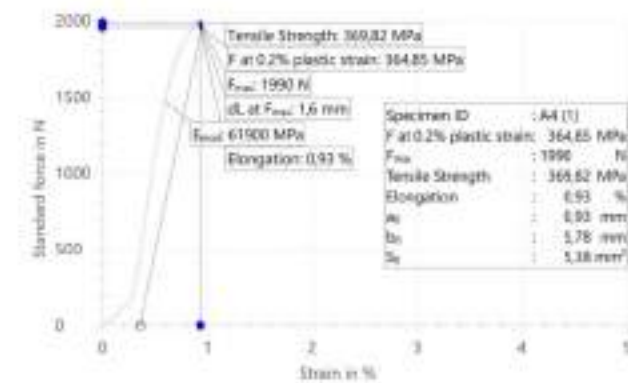
Heading	: TENSILE TEST REPORT	Material	: ASME SB338 GRADE 2
Customer	: PRASETYA WIRA HARTONO	Specimen type	: AS WELDED
Test standard	: ASTM E8/E8M		
Pre-load	: 5 N	Speed, yield point	: 5 mm/min
Speed, Young's modulus	: 5 mm/min	Test speed	: 5 mm/min

Results table:

Legend	No.	Specimen ID	F at 0.2% plastic strain MPa	F _{max} N	Tensile Strength MPa	Elongation %	a) mm
●	7	A4 (T)	364.85	1990	369.82	0.93	0.93

Legend	No.	b) mm	S ₀ mm ²
●	7	5.78	5.38

Curve graph:



Lampiran D 11. Hasil Pengujian Tarik Spesimen A4 (2)

Parameters table:

Heading : TENSILE TEST REPORT Material : ASME SB338 GRADE 2
 Customer : PRASETYA WIRA HARTONO Specimen type : AS WELDED
 Test standard : ASTM E8/E8M

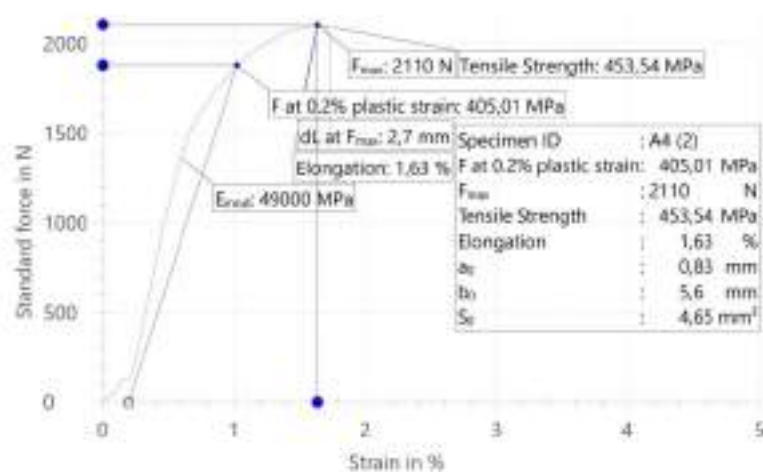
Pre-load : 5 N Speed, yield point : 5 mm/min
 Speed, Young's modulus : 5 mm/min Test speed : 5 mm/min

Results table:

Legend	No.	Specimen ID	F at 0.2% plastic strain MPa	F _{max} N	Tensile Strength MPa	Elongation %	a ₀ mm
	8	A4 (2)	405,01	2110	453,54	1,63	0,83

Legend	No.	b ₀ mm	S ₀ mm ²
	8	5,6	4,65

Curve graph:



Lampiran D 12. Hasil Pengujian Tarik Spesimen B1 (1)



Print date: 27.07.26

Parameters table:

Heading : TENSILE TEST REPORT Material : ASME SB338 GRADE 2
 Customer : PRASETYA WIRA HARTONO Specimen type : AS WELDED
 Test standard : ASTM E8/E8M

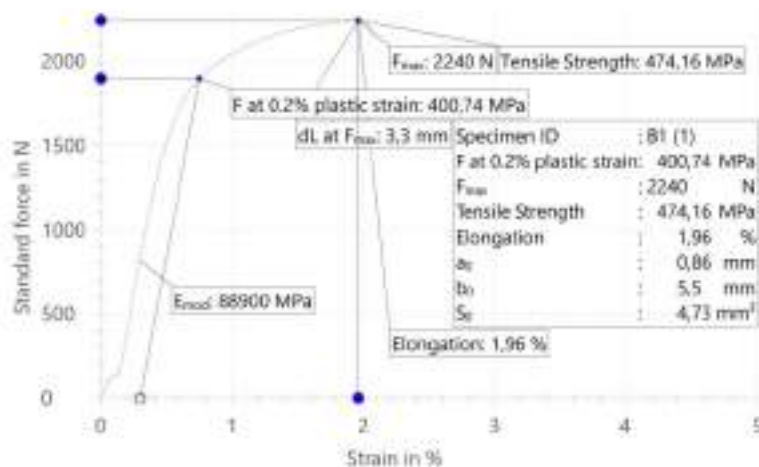
Pre-load : 5 N Speed, yield point : 5 mm/min
 Speed, Young's modulus : 5 mm/min Test speed : 5 mm/min

Results table:

Legend	No.	Specimen ID	F at 0.2% plastic strain MPa	F _{max} N	Tensile Strength MPa	Elongation %	a ₀ mm
	9	B1 (1)	400,74	2240	474,16	1,96	0,86

Legend	No.	b ₀ mm	S _s mm ²
	9	5,5	4,73

Curve graph:



Lampiran D 13. Hasil Pengujian Tarik Spesimen B1 (2)

Parameters table:

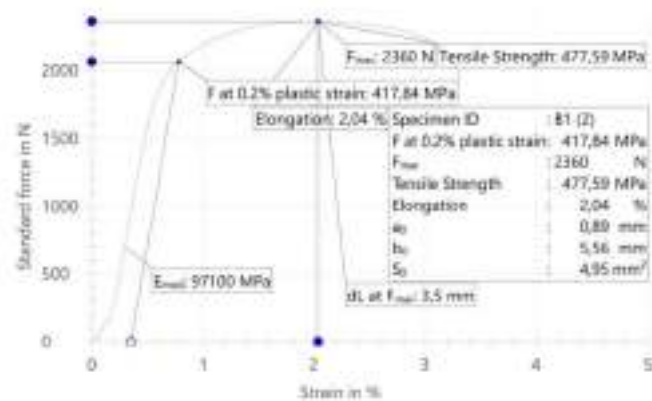
Heading	: TENSILE TEST REPORT	Material	: ASME SB338 GRADE 2
Customer	: PRASETYA WIRA HARTONO	Specimen type	: AS WELDED
Test standard	: ASTM E8/E8M		
Pre-load	: 5 N	Speed, yield point	: 5 mm/min
Speed, Young's modulus	: 5 mm/min	Test speed	: 5 mm/min

Results table:

Legend	No.	Specimen ID	F at 0.2% plastic strain MPa	F _{max} N	Tensile Strength MPa	Elongation %	a ₀ mm
●	10	B1 (2)	417,84	2360	477,59	2,04	0,89

Legend	No.	b ₀ mm	S ₀ mm ²
●	10	5,56	4,95

Curve graph:



Lampiran D 14. Hasil Pengujian Tarik Spesimen B2 (1)



Print date: 27.07.26

Parameters table:

Heading : TENSILE TEST REPORT Material : ASME SB338 GRADE 2
 Customer : PRASETYA WIRA HARTONO Specimen type : AS WELDED
 Test standard : ASTM E8/E8M

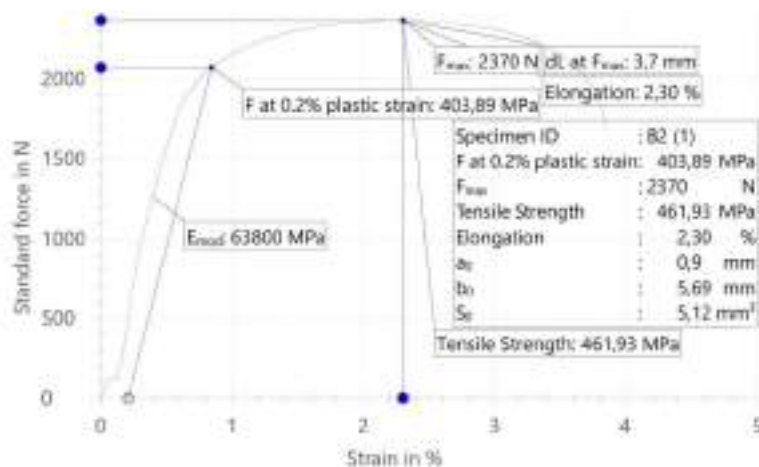
Pre-load : 5 N Speed, yield point : 5 mm/min
 Speed, Young's modulus : 5 mm/min Test speed : 5 mm/min

Results table:

Legend	No.	Specimen ID	F at 0.2% plastic strain MPa	F _{max} N	Tensile Strength MPa	Elongation %	a ₀ mm
	11	B2 (1)	403,89	2370	461,93	2,30	0,9

Legend	No.	b ₀ mm	S _s mm ²
	11	5,69	5,12

Curve graph:



Lampiran D 15. Hasil Pengujian Tarik Spesimen B2 (2)

Parameters table:

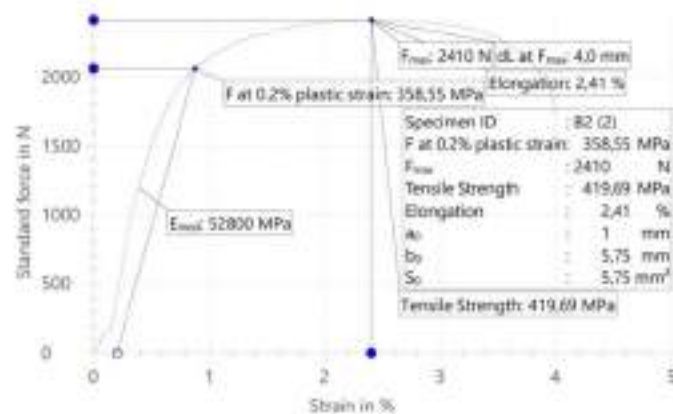
Heading	TENSILE TEST REPORT	Material	ASME SB338 GRADE 2
Customer	PRASETYA WIRA HARTONO	Specimen type	AS WELDED
Test standard	ASTM E8/E8M		
Pre-load	: 5 N	Speed, yield point	: 5 mm/min
Speed, Young's modulus	: 5 mm/min	Test speed	: 5 mm/min

Results table:

Legend	No.	Specimen ID	F at 0.2% plastic strain MPa	F _{max} N	Tensile Strength MPa	Elongation %	a ₀ mm
	12	B2 (2)	358,55	2410	419,69	2,41	1

Legend	No.	b ₀ mm	S ₀ mm ²
	12	5,75	5,75

Curve graph:



Lampiran D 16. Hasil Pengujian Tarik Spesimen B3 (1)



Print date: 27.07.26

Parameters table:

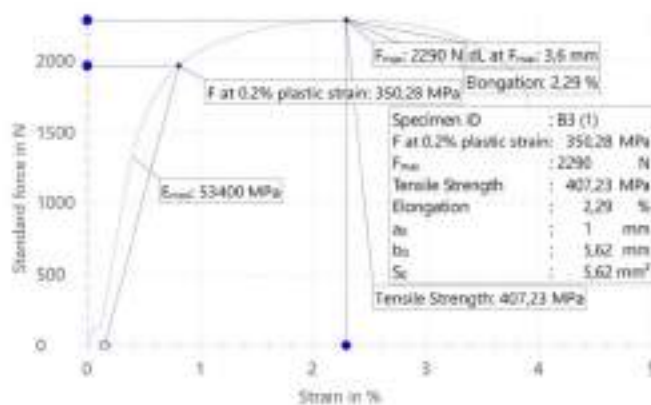
Heading	: TENSILE TEST REPORT	Material	: ASME SB338 GRADE 2
Customer	: PRASETYA WIRA HARTONO	Specimen type	: AS WELDED
Test standard	: ASTM E8/EBM		
Pre-load	: 5 N	Speed, yield point	: 5 mm/min
Speed, Young's modulus	: 5 mm/min	Test speed	: 5 mm/min

Results table:

Legend	No.	Specimen ID	F at 0.2% plastic strain MPa	F _{max} N	Tensile Strength MPa	Elongation %	a ₀ mm
●	13	B3 (1)	350,28	2290	407,23	2,29	1

Legend	No.	b ₀ mm	S ₀ mm ²
●	13	5,62	5,62

Curve graph:



Lampiran D 17. Hasil Pengujian Tarik Spesimen B3 (2)

Parameters table:

Heading : TENSILE TEST REPORT Material : ASME SB338 GRADE 2
 Customer : PRASETYA WIRA HARTONO Specimen type : AS WELDED
 Test standard : ASTM E8/E8M

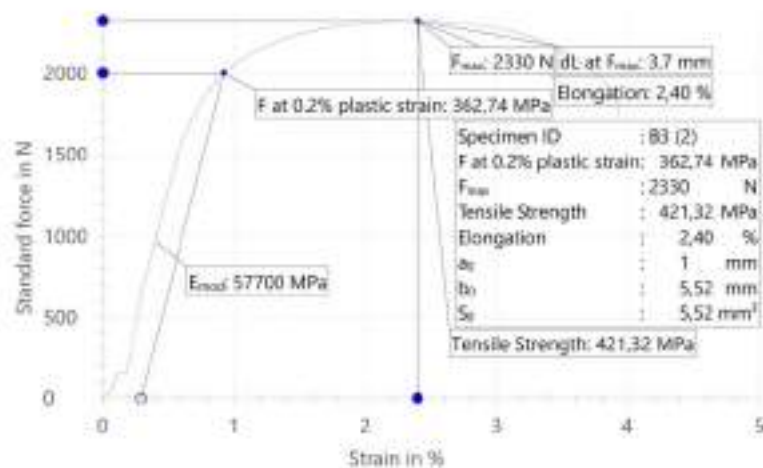
Pre-load : 5 N Speed, yield point : 5 mm/min
 Speed, Young's modulus : 5 mm/min Test speed : 5 mm/min

Results table:

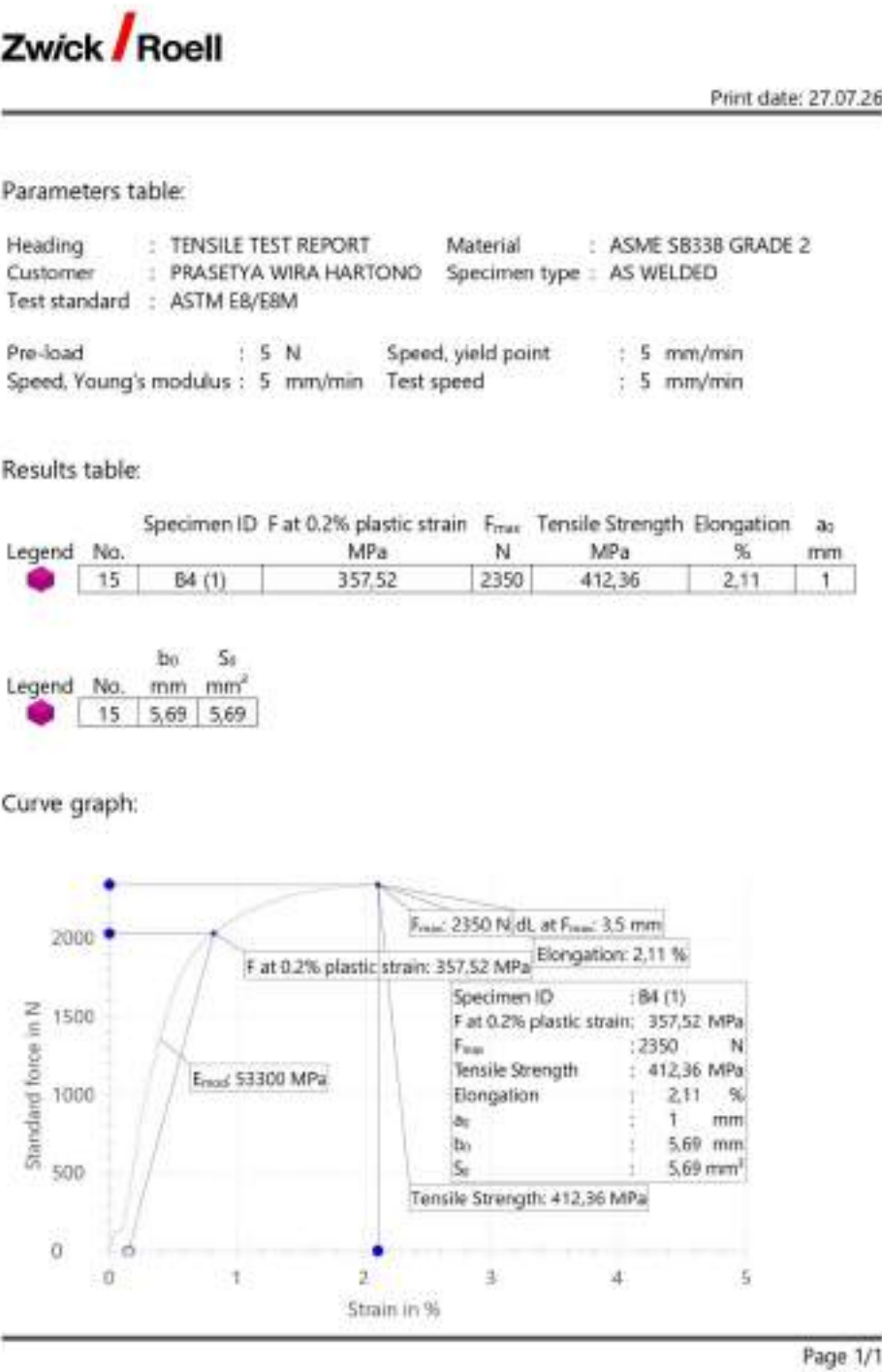
Legend	No.	Specimen ID	F at 0.2% plastic strain MPa	F _{Tmax} N	Tensile Strength MPa	Elongation %	a ₀ mm
●	14	B3 (2)	362,74	2330	421,32	2,40	1

Legend	No.	b ₀ mm	S ₀ mm ²
●	14	5,52	5,52

Curve graph:



Lampiran D 18. Hasil Pengujian Tarik Spesimen B4 (1)



Parameters table:

Heading : TENSILE TEST REPORT

Customer : PRASETYA WIRA HARTONO

Test standard : ASTM E8/E8M

Material : ASME SB338 GRADE 2

Specimen type : AS WELDED

Pre-load : 5 N

Speed, yield point : 5 mm/min

Speed, Young's modulus : 5 mm/min

Test speed : 5 mm/min

Results table:

Legend

No.

15

Specimen ID

F at 0.2% plastic strain

F_{max}

Tensile Strength

Elongation

a₀

B4 (1)

MPa

N

MPa

%

mm

357,52

2350

412,36

2,11

1

Legend

No.

15

b₀

S_s

mm

mm²

5,69

5,69

Curve graph:

Standard force in N

2000

1500

1000

500

0

0

1

2

3

4

5

Strain in %

F_{0.2%}: 2350 N/dL at F_{max}: 3,5 mm

Elongation: 2,11 %

F at 0.2% plastic strain: 357,52 MPa

E_{mod}: 53300 MPa

Tensile Strength: 412,36 MPa

Specimen ID : B4 (1)

F at 0.2% plastic strain: 357,52 MPa

F_{max} : 2350 N

Tensile Strength : 412,36 MPa

Elongation : 2,11 %

a₀ : 1 mm

b₀ : 5,69 mm

S_s : 5,69 mm²

Page 1/1

Lampiran D 19. Hasil Pengujian Tarik Spesimen B4 (2)



Print date: 27.07.26

Parameters table:

Heading : TENSILE TEST REPORT Material : ASME SB338 GRADE 2
 Customer : PRASETYA WIRA HARTONO Specimen type : AS WELDED
 Test standard : ASTM E8/E8M

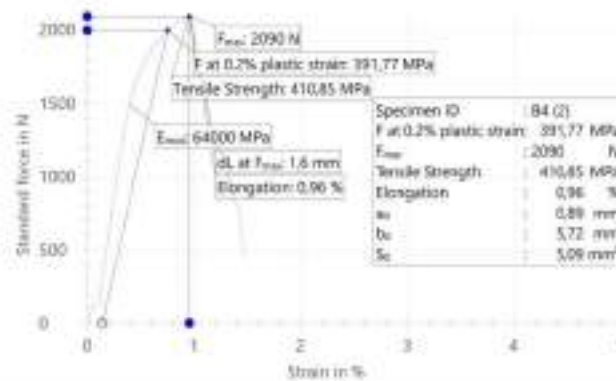
Pre-load : 5 N Speed, yield point : 5 mm/min
 Speed, Young's modulus : 5 mm/min Test speed : 5 mm/min

Results table:

Legend	No.	Specimen ID	F at 0.2% plastic strain MPa	F _{max} N	Tensile Strength MPa	Elongation %	a ₀ mm
●	16	B4 (2)	391,77	2090	410,85	0,96	0,89

Legend	No.	b ₀ mm	S ₀ mm ²
●	16	5,72	5,09

Curve graph:



(halaman ini sengaja dikosongkan)

BIOGRAFI PENULIS



PRASETYA WIRA HARTONO		
Tempat, Tanggal Lahir	Nama panggilan	Jenis Kelamin
Surabaya, 27 Juli 2004	Wira	Laki-Laki
Alamat	Kode Pos	Negara
Jl. Siwalankerto 3b, RT 01, RW 01, Kel. Siwalankerto, Kec. Wonocolo, Kota Surabaya, Jawa Timur	60236	Indonesia
Email	No. Telp	Agama
Prwirahartono@gmail.com	081907766018	Islam
Riwayat Pendidikan		
Sekolah	Tahun	Jurusan
SDN Manukan Kulon VI	2010-2016	-
SMP Negeri 15 Surabaya	2016-2019	-
SMA Negeri 10 Surabaya	2019-2022	MIPA
Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya	2022-2026	Teknik Pengelasan