



TUGAS AKHIR (WE40050)

**ANALISIS VARIASI KUAT ARUS DAN *PREHEAT* PADA
PENGELASAN MATERIAL CU-DHP DENGAN PROSES GTAW
TERHADAP SIFAT MEKANIK, *METALLOGRAPHY*, DAN LAJU
KOROSI**

ACHMAD WILDAN ABRORI
NRP. 0722040100

DOSEN PEMBIMBING:
IMAM KHOIRUL ROHMAT, S.ST., M.T.
MOH. MIFTACHUL MUNIR, S.T., M.T.

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

“Halaman ini sengaja dikosongkan”
This page is intentionally left blank

TUGAS AKHIR (WE40050)

**ANALISIS VARIASI KUAT ARUS DAN *PREHEAT* PADA
PENGELASAN MATERIAL CU-DHP DENGAN PROSES
GTAW TERHADAP SIFAT MEKANIK, *METALLOGRAPHY*,
DAN LAJU KOROSI**

**ACHMAD WILDAN ABRORI
NRP. 0722040100**

**DOSEN PEMBIMBING:
IMAM KHOIRUL ROHMAT, S.ST., M.T.
MOH. MIFTACHUL MUNIR, S.T., M.T.**

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

“Halaman ini sengaja dikosongkan”
This page is intentionally left blank

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

ANALISIS VARIASI KUAT ARUS DAN *PREHEAT* PADA PENGELASAN MATERIAL CU-DHP DENGAN PROSES GTAW TERHADAP SIFAT MEKANIK, *METALLOGRAPHY*, DAN LAJU KOROSI

Disusun Oleh:
Achmad Wildan Abrori
0722040100

**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 : 23 Juli 2026
Periode Wisuda : Oktober 2026**

Menyetujui,

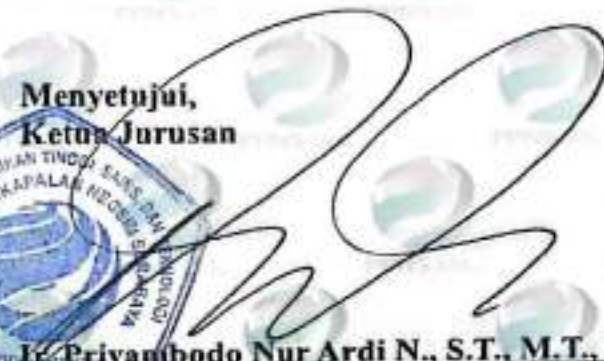
Dosen Penguji

	NIDN	Tanda Tangan
1. Hendri Budi Karniyanto, S.ST., M.T.	(0007039003)	(.....)
2. Imam Kheirul Rohmat, S.ST., M.T.	(0002068802)	(.....)
3. Moh. Miftachul Munir, S.T., M.T.	(0030086807)	(.....)
4. Rocky Andiana, S.ST., M.T.	(0028129101)	(.....)

Dosen Pembimbing

	NIDN	Tanda Tangan
1. Imam Khoirul Rohmat, S.ST., M.T.	(0002068802)	(.....)
2. Moh. Miftachul Munir, S.T., M.T.	(0030086807)	(.....)

**Menyetujui,
Ketua Jurusan**


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

**Mengetahui,
Koordinator Program Studi**


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

“Halaman ini sengaja dikosongkan”
This page is intentionally left blank



PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT

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

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Achmad Wildan Abrori
NRP : 0722040100
Jurusan/Prodi : Teknik Bangunan Kapal/D4-Teknik Pengelasan

Dengan ini menyatakan dengan sesungguhnya bahwa:

ANALISIS VARIASI KUAT ARUS DAN *PREHEAT* PADA PENGELASAN MATERIAL
CU-DHP DENGAN PROSES GTAW TERHADAP SIFAT MEKANIK,
METALLOGRAPHY, DAN LAJU KOROSI

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

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

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan penuh tanggung jawab.

Surabaya, 23 Juli 2026
Yang membuat pernyataan,

Achmad Wildan Abrori
NRP. 0722040100

“Halaman ini sengaja dikosongkan”
This page is intentionally left blank

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kehadiran Allah SWT, atas limpahan Rahmat serta Kasih Sayang-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang merupakan persyaratan dalam menyelesaikan Program Studi D4 Teknik Pengelasan di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya. Dalam penyusunan Tugas Akhir ini tidak terlepas dari bantuan berbagai pihak, dan dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Rachmad Tri Soelistijono, S.T., M.T. selaku Direktur Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
2. Bapak Ir. Priyambodo Nur Ardi Nugroho, S.T., M.T., Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Bangunan Kapal.
3. Bapak Moh. Syaiful Amri, S.ST., M.T. selaku Ketua Prodi Teknik Pengelasan.
4. Ibu Adristi Nisazarifa, S.T., M.T. selaku Koordinator Tugas Akhir yang telah memberikan arahan, bantuan, serta dukungan dalam proses pelaksanaan dan penyelesaian Tugas Akhir ini.
5. Bapak Hendri Budi Kurniyanto, S.ST., M.T. selaku ketua tim dosen penguji 1 yang telah menguji hasil karya penulis.
6. Bapak Imam Khoirul Rohmat, S.ST., M.T. selaku dosen penguji 2 serta dosen pembimbing 1 yang telah memberikan bimbingan, motivasi, dan dukungan kepada penulis.
7. Bapak Moh. Miftachul Munir, S.T., M.T. selaku dosen penguji 3 dan serta dosen pembimbing 2 yang telah memberikan bimbingan, motivasi, dan dukungan kepada penulis.
8. Bapak Rocky Andiana, S.ST., M.T. selaku dosen penguji 4 yang telah menguji hasil karya penulis.
9. Orang tua penulis, Bapak Suhadi dan Ibu Atimah yang selalu menjadi *support system* penulis dalam menempuh pendidikan tinggi di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
10. Seluruh Bapak dan Ibu dosen Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya yang telah memberikan ilmu dan pengalaman selama perkuliahan.

11. Kerabat yang telah memberikan doa dan semangat dalam proses penelitian.
12. Mas Ekky Chandra Nurfian S.ST., M.T. yang telah membimbing, membantu, dan mendukung dalam proses penelitian.
13. PT. X yang telah bersedia menerima, membantu, dan mendukung dalam proses penelitian.
14. Mahasiswa Teknik Pengelasan Angkatan 2022 yang telah memberikan semangat kepada penulis untuk menyelesaikan tugas akhir.
15. Terima kasih kepada teman yang tidak dapat penulis sebutkan, yang telah memberikan dukungan kepada penulis.

Semoga Tuhan Yang Maha Esa memberikan berkat dan Karunia-Nya kepada semua pihak yang telah banyak memberikan bantuan, bimbingan, ataupun nasehat yang bermanfaat. Penulis menyadari bahwa dalam penulisan tugas akhir ini masih banyak kekurangan. Untuk itu penulis dengan kerendahan hati mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari semua pihak demi kesempurnaan tugas akhir ini. Penulis berharap tugas akhir ini dapat menunjang perkembangan ilmu pengetahuan khususnya dalam bidang teknik serta bermanfaat bagi pembaca.

Surabaya, 23 Juli 2026

Penulis

ANALISIS VARIASI KUAT ARUS DAN *PREHEAT* PADA PENGELASAN MATERIAL CU-DHP DENGAN PROSES GTAW TERHADAP SIFAT MEKANIK, *METALLOGRAPHY*, DAN LAJU KOROSI

Achmad Wildan Abrori

ABSTRAK

Material Cu-DHP (*Deoxidized High Phosphorus Copper*) banyak digunakan pada penukar panas, kondensor, dan sistem perpipaan karena memiliki konduktivitas termal tinggi serta ketahanan korosi yang baik. Namun, konduktivitas termal yang tinggi menyebabkan panas pengelasan GTAW cepat terdistribusi ke logam induk sehingga berpotensi menurunkan penetrasi dan kualitas sambungan. Salah satu metode untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah pemberian *preheat* sebelum pengelasan. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi kuat arus dan *preheat* 300°C terhadap kualitas sambungan, sifat mekanik, struktur mikro, *microhardness*, dan laju korosi hasil pengelasan GTAW pada material Cu-DHP dengan ketebalan 4,8 mm dengan diameter 88,9 mm. Variasi arus yang digunakan adalah 180 A, 205 A, dan 230 A dengan dua kondisi, yaitu *non-preheat* dan *preheat* 300°C. Pengujian meliputi uji visual, *liquid penetrant test*, metalografi, uji tarik, *microhardness*, dan uji laju korosi metode *weight loss*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *preheat* 300°C meningkatkan kualitas sambungan dengan mengurangi cacat, khususnya *lack of fusion*, serta menghasilkan peleburan yang lebih stabil. Spesimen *preheat* arus 230 A menghasilkan *Ultimate Tensile Strength* (UTS) rata-rata tertinggi sebesar 215,08 MPa, sedangkan kondisi *non-preheat* arus 180 A memiliki UTS terendah sebesar 77,47 MPa. Distribusi *microhardness* pada daerah *Weld Metal* (WM) mengalami fluktuasi nilai sedangkan pada daerah *Heat Affected Zone* (HAZ) mengalami penurunan nilai kekerasan akibat siklus termal, kemudian meningkat kembali pada *Base Metal* (BM). Pengamatan mikrostruktur menunjukkan perubahan ukuran butir pada HAZ dan struktur solidifikasi yang seragam pada *Weld Metal* (WM) seperti adanya pembentukan persipitat Cu₃P di seluruh spesimen. Laju korosi seluruh spesimen tergolong rendah, yaitu 0,0369–0,0406 mm/tahun, dengan laju korosi terendah pada spesimen *non-preheat* arus 180 A dan tertinggi spesimen *preheat* arus 230 A.

Kata Kunci: Cu-DHP, GTAW, Kuat Arus, *Preheat*, *Microhardness*

“Halaman ini sengaja dikosongkan”
This page is intentionally left blank

ANALYSIS OF CURRENT AND PREHEAT VARIATIONS IN GTAW WELDING OF CU-DHP MATERIALS ON MECHANICAL PROPERTIES, METALLOGRAPHY, AND CORROSION RATE

Achmad Wildan Abrori

ABSTRACT

Cu-DHP (Deoxidized High Phosphorus Copper) material is widely used in heat exchangers, condensers, and piping systems because it has high thermal conductivity as well as good corrosion resistance. However, the high thermal conductivity causes the GTAW welding heat to be quickly distributed to the parent metal thus potentially degrading penetration and joint quality. One method to overcome this problem is to apply preheat before welding. This study aims to analyze the effect of strong variations in current and 300°C preheat on connection quality, mechanical properties, microstructure, microhardness, and corrosion rate of GTAW welding results in Cu-DHP materials with a thickness of 4.8 mm and a diameter of 88.9 mm. The current variations used are 180 A, 205 A, and 230 A with two conditions, namely non-preheat and 300°C preheat. Testing includes visual test, liquid penetrant test, metallography, tensile test, microhardness, and corrosion rate test weight loss method. The results showed that 300°C preheating improves the quality of the connection by reducing defects, especially the lack of fusion, and resulting in a more stable melting. The 230 A current preheat specimen produced the highest average Ultimate Tensile Strength (UTS) of 215.08 MPa, while the 180 A current non-preheat condition had the lowest UTS of 77.47 MPa. The distribution of microhardness in the Weld Metal (WM) area experienced value fluctuations while in the Heat Affected Zone (HAZ) area experienced a decrease in hardness value due to the thermal cycle, then increased again in the Base Metal (BM). Microstructure observations showed a change in grain size in HAZ and a uniform solidification structure in Weld Metal (WM) such as the formation of Cu₃P persipitates throughout the specimen. The corrosion rate of all specimens is relatively low, at 0.0369–0.0406 mm/year, with the lowest corrosion rate in non-preheat current specimens of 180 A and the highest in preheat current specimens of 230 A.

Keyword: Cu-DHP, GTAW, Current, Preheat, Microhardness

“Halaman ini sengaja dikosongkan”
This page is intentionally left blank

DAFTAR ISI

LEMBAR JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT	v
KATA PENGANTAR.....	vii
ABSTRAK	ix
<i>ABSTRACT</i>	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xxi
DAFTAR LAMPIRAN	xxiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Batasan Masalah.....	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Tembaga	7
2.1.1 Tembaga Murni (<i>Pure Copper</i>)	9
2.1.2 Tembaga DHP (<i>Deoxidised High Phosphorus Copper</i>)	11
2.2 Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)	17
2.2.1 <i>Shielding Gas</i>	18
2.2.2 Elektroda	20
2.2.3 <i>Backing Gas</i>	22
2.2.4 <i>Filler CuAg1</i>	23
2.3 <i>Heat input</i>	25
2.4 Perlakuan Panas (<i>Heat Treatment</i>)	29
2.4.1 <i>Preheat</i>	31
2.5 Pengujian.....	32
2.5.1 Uji Visual	32

2.5.2 Uji <i>Penetrant</i>	33
2.5.3 Uji Tarik.....	35
2.5.4 Uji Kekerasan	38
2.5.5 Uji Metalografi	39
2.5.6 Uji Laju Korosi.....	41
2.6 Penelitian Sebelumnya	43
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....	45
3.1 Diagram Alir	45
3.2 Studi Literatur.....	45
3.3 Studi Lapangan	46
3.4 Persiapan Spesimen dan Alat.....	47
3.4.1 Spesifikasi Material	47
3.4.2 Spesifikasi <i>Filler Metal</i>	47
3.4.3 Dimensi <i>Coupon Test</i>	48
3.4.4 Alat.....	49
3.5 Prosedur pengelasan	50
3.6 Prosedur <i>Preheat</i>	51
3.7 Pengamatan Visual	52
3.8 <i>Penetrant Test</i>	52
3.9 <i>Cutting Plan</i>	54
3.10 Pengujian <i>Metallography</i>	55
3.11 Pengujian <i>Micro Hardness Test</i>	58
3.12 Pengujian Tarik (<i>Tensile Test</i>).....	60
3.13 Pengujian Korosi	62
3.14 Analisis	64
3.15 Kesimpulan dan Saran	64
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	65
4.1 Hasil <i>Heat Input</i>	65
4.2 Evaluasi <i>Non Destructive Test</i> (NDT)	67
4.2.1 Hasil Pengujian Visual.....	67
4.2.2 Hasil Pengujian <i>Penetrant Test</i>	70
4.2.3 Pembahasan Visual dan <i>Penetrant Test</i>	73
4.3 Hasil Pengujian Makro	75

4.3.1 Evaluasi <i>Internal Imperfection</i>	76
4.3.2 Pembahasan Makro	77
4.4 Hasil Pengujian Mikrostruktur	79
4.4.1 Pembahasan Mikro.....	84
4.5 Hasil Pengujian Tarik	86
4.5.1 Pembahasan Uji Tarik	88
4.5.2 Analisis Lokasi Patahan	89
4.6 Hasil Pengujian <i>Microhardness</i>	91
4.6.1 Pembahasan <i>Microhardness</i>	93
4.7 Hasil Pengujian Laju Korosi	95
4.7.1 Pembahasan Pengujian Laju Korosi.....	98
BAB 5 KESIMPULAN	101
5.1 Kesimpulan	101
5.2 Saran.....	103
DAFTAR PUSTAKA.....	105
LAMPIRAN.....	111
BIODATA PENULIS.....	159

“Halaman ini sengaja dikosongkan”
This page is intentionally left blank

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Cacat Las pada WAAM, Laser AM, dan <i>Arc Welding</i>	8
Gambar 2. 2 Unit Kondensor pada Bagian <i>Header</i>	12
Gambar 2. 3 Struktur Mikro Material Cu-DHP	14
Gambar 2. 4 Diagram Fasa Cu-P	14
Gambar 2. 5 Konduktivitas Listrik dan Kandungan Pengotor Tembaga Teknis... 15	
Gambar 2. 6 Sifat Mekanik Tembaga Teknis terhadap Suhu.	15
Gambar 2. 7 Skema Pengelasan GTAW Manual	17
Gambar 2. 8 Perbandingan Foto Makro Pengelasan.....	20
Gambar 2. 9 Emisi Elektron Elektroda Tungsten sebagai Fungsi Suhu	21
Gambar 2. 10 Perbandingan Kekuatan Tarik pada Variasi <i>Backing Gas</i>	23
Gambar 2. 11 Hasil Uji Makro pada Variasi <i>Backing Gas</i>	23
Gambar 2. 12 Hasil Kuat Tarik terhadap Arus dan <i>Filler Metal</i>	26
Gambar 2. 13 Hubungan Arus – Voltase pada <i>Shielding Gas</i> Argon dan Helium	27
Gambar 2. 14 Hubungan <i>Heat input</i> terhadap Kedalaman Penetrasi.....	28
Gambar 2. 15 Perbandingan Hasil Kuat Tarik terhadap <i>Heat input</i> OTIG dan LBW	28
Gambar 2. 16 Hubungan Kuat Tarik dan <i>Heat input</i>	29
Gambar 2. 17 Variasi Kekuatan Luluh dan Tarik 0,2% untuk Cu-DHP	30
Gambar 2. 18 Kekerasan Cu-DHP sebagai Fungsi Suhu Perlakuan Panas.....	30
Gambar 2. 19 Ukuran Butir Cu-DHP setelah Pemanasan 740 °C	30
Gambar 2. 20 Distribusi <i>Hardness</i> pada Variasi <i>No Preheat</i> , <i>Preheat</i> 300°C, 400°C dan 500°C	32
Gambar 2. 21 <i>Welding Gauge</i>	33
Gambar 2. 22 Indikasi pada <i>Penetrant Test</i>	35
Gambar 2. 23 Grafik Hasil Pengujian Tarik.....	36
Gambar 2. 24. Metode Offset untuk Menentukan Titik Yield	37
Gambar 2. 25 Mesin Uji Tarik	38
Gambar 2. 26 Skema Pengujian Kekerasan <i>Vickers</i>	39
Gambar 2. 27 Mesin Uji <i>Vickers</i>	39

Gambar 2. 28 Perbedaan Pengamatan Uji <i>Macro</i> dan <i>Micro</i>	40
Gambar 2. 29 <i>Microscope Optic</i>	41
Gambar 2. 30 Laju Korosi Tembaga C71500 setelah <i>Immersion</i>	43
Gambar 3. 1 Diagram Alir	45
Gambar 3. 2 Spesifikasi <i>Test Cupon</i>	49
Gambar 3. 3 Proses Pengelasan dengan <i>Pipe Rotating</i>	51
Gambar 3. 4 Proses <i>Preheat</i>	52
Gambar 3. 5 Tabung Oksigen dan <i>Acetylene</i>	52
Gambar 3. 6 <i>Dwell Time</i> Aplikasi Penetrant	53
Gambar 3. 7 <i>Cutting Plan</i>	55
Gambar 3. 8 Area Pengujian Mikrostruktur.....	56
Gambar 3. 9 Proses Uji Struktur Mikro.....	56
Gambar 3. 10 Pola Indentasi <i>Microhardness</i> pada <i>Butt Welds</i>	58
Gambar 3. 11 Jarak Minimum Indentasi <i>Vickers</i>	59
Gambar 3. 12 Proses <i>Microhardness Test</i>	60
Gambar 3. 13 Spesimen Uji Tarik Pipa	61
Gambar 3. 14 Spesimen Uji Laju Korosi <i>Immersion</i>	62
Gambar 3. 15 Perendaman Spesimen	63
Gambar 4. 1 Grafik Perbandingan <i>Heat Input</i> dan <i>Travel Speed</i>	66
Gambar 4. 2 Hasil Visual Pengelasan pada Spesimen Arus 180A	68
Gambar 4. 3 Hasil Visual Pengelasan pada Spesimen Arus 205A	68
Gambar 4. 4 Hasil Visual Pengelasan pada Spesimen Arus 230A	69
Gambar 4. 5 Hasil <i>Penetrant</i> pada Spesimen Arus 180A.....	71
Gambar 4. 6 Hasil <i>Penetrant</i> pada Spesimen Arus 205A.....	72
Gambar 4. 7 Hasil <i>Penetrant</i> pada Spesimen Arus 230A.....	72
Gambar 4. 8 Morfologi hasil Makro.....	76
Gambar 4. 9 Penyebab Terjadinya LOF	78
Gambar 4. 10 Struktur Mikro <i>Base Metal</i>	80
Gambar 4. 11 Struktur Mikro HAZ	81
Gambar 4. 12 Struktur Mikro <i>Fusion Line</i>	82
Gambar 4. 13 Struktur Mikro <i>Weld Metal</i>	84
Gambar 4. 14 Ilustrasi skema mikrostruktur yang terjadi pada <i>Weld metal</i>	86

Gambar 4. 15 Grafik Rata-rata Kekuatan Tarik Maksimum.....	87
Gambar4.16 Pemilihan Temperatur <i>Preheat</i> berdasarkan Gas Pelindung dan Ketebalan Material	89
Gambar 4. 17 Grafik <i>Microhardness</i> spesimen <i>Non-Preheat</i>	91
Gambar 4. 18 Grafik <i>Microhardness</i> spesimen <i>Preheat</i>	92
Gambar 4. 19 Grafik <i>Microhardness</i> pada seluruh variabel	93
Gambar 4. 20 Distribusi Kekerasan	95
Gambar 4. 21 Grafik Kehilangan Massa Seluruh Spesimen.....	97
Gambar 4. 22 Hasil Laju Korosi pada Seluruh Spesimen.....	98

“Halaman ini sengaja dikosongkan”
This page is intentionally left blank

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Klasifikasi <i>Copper</i> dan Paduannya	7
Tabel 2. 2 Klasifikasi Tembaga Murni (<i>Pure Copper</i>)	10
Tabel 2. 3 Komposisi Kimia Cu-DHP	12
Tabel 2. 4 Klasifikasi Kondisi Material	16
Tabel 2. 5 Sifat Mekanik Tembaga dan Paduan Tembaga	16
Tabel 2. 6 Potensial Ionisasi untuk Gas yang terlibat dalam Pengelasan Busur ...	19
Tabel 2. 7 Kemurnian dan Kadar Air Gas	19
Tabel 2. 8 Kode Warna dan Elemen Paduan pada <i>Tungsten Electrode</i>	21
Tabel 2. 9 <i>Gas Purging/Backing</i> yang digunakan untuk berbagai material.	22
Tabel 2. 10 Rekomendasi Pemilihan <i>Filler Material</i>	24
Tabel 2. 11 <i>Chemical Composition Filler Metal CuAg1</i>	24
Tabel 2. 12 Sifat Mekanik Tembaga Murni	24
Tabel 2. 13 Pemilihan Proses Penyambungan Tembaga dan Paduan Tembaga	31
Tabel 2. 14 Ringkasan Jurnal	43
Tabel 3. 1 <i>Mechanical Properties</i>	47
Tabel 3. 2 <i>Symbol for the Chemical Composition of Solid Wires and Rods</i>	47
Tabel 3. 3 Rekomendasi Pemilihan <i>Filler Material</i>	48
Tabel 3. 4 Spesifikasi <i>Coupon Test</i>	49
Tabel 3. 5 Parameter Pengelasan	51
Tabel 3. 6 Syarat Keberterimaan untuk Indikasi	54
Tabel 3. 7 <i>Range Gaya Uji</i>	58
Tabel 3. 8 Rekomendasi Jarak Indentasi dari Titik Pusat pada HAZ untuk Indentasi Baris	59
Tabel 3. 9 Spesifikasi Dimensi Spesimen Uji Tarik	61
Tabel 4. 1 Hasil Perhitungan <i>Heat Input</i>	65
Tabel 4. 2 Geometri Hasil Pengelasan	69
Tabel 4. 3 Hasil Inspeksi Diskontinuitas Permukaan	70
Tabel 4. 4 Indikasi Hasil Uji <i>Penetrant Test</i>	73
Tabel 4. 5 Hasil Uji Makrografi	76

Tabel 4. 6 Perbandingan temuan <i>Internal Imperfection</i> dengan <i>Standart</i>	77
Tabel 4. 7 Hasil Pengujian Tarik.....	87
Tabel 4. 8 Sifat Mekanik Tembaga yang mengalami Pengelasan GTAW	90
Tabel 4. 9 Hasil Penimbangan Massa	96
Tabel 4. 10 Hasil Kehilangan Massa	96

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A1 <i>Mills Certificate</i>	111
Lampiran A2 <i>Mills Certificate Filler Metal CuAg1</i>	112
Lampiran A3 <i>Mills Certificate Gas H₂N₂</i>	112
Lampiran A4 <i>Certificate of Analysis NaCl</i>	113
Lampiran A5 <i>Certificate of Analysis HNO₃</i>	113
Lampiran B1 Dimensi Spesimen	114
Lampiran B2 <i>Fit-up</i>	114
Lampiran B3 Proses <i>Preheat</i>	114
Lampiran B4 Pengukuran <i>Temperature Preheat & Interpass</i> untuk Variabel <i>Preheat</i> 300 °C	115
Lampiran B5 Lanjutan Pengukuran <i>Temperature Preheat & Interpass</i> untuk Variabel <i>Non-preheat</i>	115
Lampiran B6 Proses Pengelasan	115
Lampiran B7 <i>Setup</i> Parameter Arus 180A	116
Lampiran B8 <i>Setup</i> Parameter Arus 205A	116
Lampiran B9 <i>Setup</i> Parameter Arus 230A	116
Lampiran C1 Hasil Pengelasan Variabel <i>Non-Preheat</i>	117
Lampiran C2 Hasil Pengelasan Variabel <i>Preheat</i>	117
Lampiran C3 Pengujian Visual Variabel <i>Preheat</i>	118
Lampiran C4 Pengujian Visual Variabel <i>Non-Preheat</i>	118
Lampiran C5 Pengukuran <i>Undercut</i>	119
Lampiran C6 <i>Report Visual</i> Spesimen <i>Non-Preheat</i> Arus 180A	120
Lampiran C7 <i>Report Visual</i> Spesimen <i>Non-Preheat</i> Arus 180	120
Lampiran C8 <i>Report Visual</i> Spesimen <i>Preheat</i> Arus 180A	121
Lampiran C9 <i>Report Visual</i> Spesimen <i>Preheat</i> Arus 180A	121
Lampiran C10 <i>Report Visual</i> Spesimen <i>Non-Preheat</i> Arus 205A	122
Lampiran C11 <i>Report Visual</i> Spesimen <i>Non-Preheat</i> Arus 205A	122
Lampiran C12 <i>Report Visual</i> Spesimen <i>Preheat</i> Arus 205A	123
Lampiran C13 <i>Report Visual</i> Spesimen <i>Preheat</i> Arus 205A	123

Lampiran C14 <i>Report Visual</i> Spesimen <i>Non-Preheat</i> Arus 230A	124
Lampiran C15 <i>Report Visual</i> Spesimen <i>Non-Preheat</i> Arus 230A	124
Lampiran C16 <i>Report Visual</i> Spesimen <i>Preheat</i> Arus 230A	125
Lampiran C17 <i>Report Visual</i> Spesimen <i>Preheat</i> Arus 230A	125
Lampiran D1 <i>Penetrant Test</i>	126
Lampiran D2 <i>Report Penetrant Test</i>	126
Lampiran E1 Spesimen Sebelum Pengujian <i>Tensile</i>	127
Lampiran E2 Proses Pengujian <i>Tensile</i>	128
Lampiran E3 Spesimen Setelah Pengujian <i>Tensile</i>	128
Lampiran E4 Hasil Patahan Uji Tarik.....	130
Lampiran E5 <i>Report</i> Uji Tarik Spesimen TS1 <i>Non-Preheat</i> Arus 180A	131
Lampiran E6 <i>Report</i> Uji Tarik Spesimen TS2 <i>Non-Preheat</i> Arus 180A.....	132
Lampiran E7 <i>Report</i> Uji Tarik Spesimen TS1 <i>Non-Preheat</i> Arus 205A.....	133
Lampiran E8 <i>Report</i> Uji Tarik Spesimen TS2 <i>Non-Preheat</i> Arus 205A.....	134
Lampiran E9 <i>Report</i> Uji Tarik Spesimen TS1 <i>Non-Preheat</i> Arus 230A.....	135
Lampiran E10 <i>Report</i> Uji Tarik Spesimen TS2 <i>Non-Preheat</i> Arus 230A.....	136
Lampiran E11 <i>Report</i> Uji Tarik Spesimen TS1 <i>Preheat</i> Arus 180A	137
Lampiran E12 <i>Report</i> Uji Tarik Spesimen TS2 <i>Preheat</i> Arus 180A.....	138
Lampiran E13 <i>Report</i> Uji Tarik Spesimen TS1 <i>Preheat</i> Arus 205A.....	139
Lampiran E14 <i>Report</i> Uji Tarik Spesimen TS2 <i>Preheat</i> Arus 205A.....	140
Lampiran E15 <i>Report</i> Uji Tarik Spesimen TS1 <i>Preheat</i> Arus 230A.....	141
Lampiran E16 <i>Report</i> Uji Tarik Spesimen TS2 <i>Preheat</i> Arus 230A.....	142
Lampiran F1 Proses Pengujian <i>Microhardness Vickers</i>	143
Lampiran G1 Bahan Uji <i>Metallography</i>	143
Lampiran G2 Proses Pengujian <i>Metallography</i>	143
Lampiran G3 Perhitungan <i>Grain Size Based on ASTM E112 HAZ</i> Arus 180A. 144	
Lampiran G4 Perhitungan <i>Grain Size Based on ASTM E112 HAZ</i> Arus 205A. 144	
Lampiran G5 Perhitungan <i>Grain Size Based on ASTM E112 HAZ</i> Arus 230A. 144	
Lampiran G6 Perhitungan <i>Grain Size Based on ASTM E112 WM</i> Arus 180A.. 145	
Lampiran G7 Perhitungan <i>Grain Size Based on ASTM E112 WM</i> Arus 205A.. 145	
Lampiran G8 Perhitungan <i>Grain Size Based on ASTM E112 WM</i> Arus 230A.. 145	
Lampiran G9 Rangkuman Hasil <i>Grain Size</i>	145

Lampiran G10 Pengambilan Data di HAZ.....	146
Lampiran G11 Pengambilan Data di <i>Weld Metal</i>	146
Lampiran H1 Perhitungan Kebutuhan NaCl untuk 30 Hari.....	147
Lampiran H2 Alat dan Bahan Korosi.....	148
Lampiran H3 Spesimen Laju Korosi	148
Lampiran H4 Spesimen Laju Korosi	148
Lampiran H5 Hasil Penimbangan Berat Awal	149
Lampiran H6 Hasil Penimbangan Berat Akhir 24 Jam.....	150
Lampiran H7 Hasil Penimbangan Berat Akhir 72 Jam.....	150
Lampiran H8 Hasil Penimbangan Berat Akhir 120 Jam.....	151
Lampiran H9 Hasil Penimbangan Berat Akhir 168 Jam.....	152
Lampiran H10 Hasil Penimbangan Berat Akhir 336 Jam.....	152
Lampiran H11 Hasil Penimbangan Berat Akhir 720 Jam	153
Lampiran H12 Hasil Penimbangan Berat Akhir Setelah Pembersihan.....	154
Lampiran H13 Perhitungan Laju Korosi.....	154

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Industri sistem pendingin dan perpindahan panas menuntut keandalan tinggi terhadap performa material, terutama pada komponen yang bekerja dalam kondisi termal dan operasional yang bervariasi. Sebagai perusahaan multinasional di bidang tersebut, PT. X memproduksi berbagai jenis peralatan penukar panas, seperti evaporator, *condenser*, *air cooler*, dan *dry cooler*, yang masing-masing memiliki karakteristik kerja dan tuntutan teknis yang berbeda. Kondisi ini menyebabkan pemilihan material menjadi faktor krusial, sehingga perusahaan menggunakan beragam jenis logam, antara lain tembaga, kuningan, baja karbon, *stainless steel*, dan aluminium, dalam bentuk pelat, pipa, maupun tube, yang disesuaikan dengan fungsi, desain, serta permintaan pelanggan

Salah satu material yang digunakan secara khusus pada komponen *header condenser* adalah Cu-DHP (*deoxidised high phosphorus copper*). Jenis Cu-DHP merupakan tembaga murni yang komersial dan telah dideoksidasi dengan fosfor yang menyebabkan ketahanan dari *hydrogen embrittlement* meningkat. Sisa fosfor di dalam tembaga mengakibatkan konduktivitas listrik yang relatif lebih rendah dibandingkan dengan tembaga jenis lain (Scott, 2001). Selain sifat konduktivitas listrik, material tembaga juga memiliki sifat konduktivitas termal yang tinggi sekitar 339 W/m·K atau jika dibandingkan dengan baja dan paduan nikel perbedaannya sekitar 7-30 kali lebih besar. Hal ini mengakibatkan kesulitan yang cukup besar untuk membuat sambungan las menggunakan teknik pengelasan fusi konvensional (Boțilă dkk., 2024).

Tingginya konduktivitas material tembaga menyebabkan penyebaran panas dari sambungan las ke logam dasar dan sekitarnya berlangsung dengan cepat. Hal ini menyulitkan pencapaian penetrasi dan terjadinya fusi antara logam las dan logam dasar karena hilangnya panas dengan cepat karena sifat konduktivitas termal tembaga yang tinggi (Takegami dkk., 2005). Untuk mengurangi efek dari konduktivitas termal yang tinggi dapat diminimalkan

dengan menggunakan arus las yang lebih tinggi sehingga menghasilkan *heat input* pengelasan yang lebih besar atau menggunakan proses pengelasan dengan kepadatan energi tinggi seperti LBW (*Laser Beam Welding*) (Chen dkk., 2015).

Selain itu pemanasan awal pada paduan tembaga akan mengurangi kebutuhan *heat input* pengelasan yang diperlukan untuk fusi yang baik (O'Brien, 2001). Namun dalam pembuatan unit *condenser* proses penyambungan material Cu-DHP menggunakan proses GTAW dengan kondisi tanpa *preheat* dan kerap ditemukan cacat las seperti *porosity* dan *incomplete fusion*. Secara umum penggunaan *preheat* berdasarkan pada proses pengelasan, paduan yang digunakan, ketebalan logam dasar, serta massa sambungan. Pengelasan logam dasar yang tipis membutuhkan suhu *preheat* yang lebih rendah jika dibandingkan untuk logam dasar yang lebih tebal. Proses GTAW biasanya membutuhkan *reheat* yang lebih tinggi jika dibandingkan proses GMAW. Ketika kondisi pengelasan *similar*, suhu *preheat* harus lebih tinggi karena konduktivitas termal tembaga yang tinggi (O'Brien, 2001)

Selain untuk mengurangi sifat konduktivitas termal yang tinggi, penggunaan *preheat* juga menghasilkan karakteristik hasil pengelasan yang berbeda jika dibandingkan dengan pengelasan tanpa *preheat*. Pada penelitian yang dilakukan oleh Nurfian (2025) menunjukkan hasil dari pengujian makro dari variasi *Non-preheat* dan *Preheat* 300°C, 400°C, dan 500°C bahwa semakin tinggi *temperature preheat* pengelasan maka menghasilkan penetrasi yang lebih dalam dan lebih lebar serta hasil fusi pengelasan yang lebih baik.

Selain itu variabel kuat arus juga mempengaruhi hasil pengelasan tembaga karena berkontribusi langsung pada peningkatan *heat input* pengelasan. Pada penelitian yang dilakukan oleh Azwinur dkk. (2025) menunjukkan bahwa, kenaikan kuat arus pengelasan sebesar 120A, 135A, dan 150A menghasilkan peningkatan *heat input* yang relatif kecil, namun tetap memberikan pengaruh terhadap kenaikan kekuatan tarik sambungan hasil pengelasan tembaga sebesar 172 MPa, 173 MPa, dan 180 MPa. Temuan ini menjadi penting karena mengkonfirmasi bahwa perubahan kuat arus, meskipun

hanya meningkatkan *heat input* dalam rentang terbatas, tetap berperan dalam menentukan karakteristik kekuatan tarik hasil pengelasan.

Pada unit *condenser* penempatan produk sering kali di lingkungan air laut untuk proses pembekuan, sehingga ada kontaminasi korosif dari air laut. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Fadillah (2025) hasil uji laju korosi dengan metode *weight loss* pada variasi *backing gas* Argon 100%, Nitrogen 100%, dan H₂-N₂ (20%-80%) untuk pengelasan material Cu-DHP yang direndam selama 720 jam dalam larutan NaCl 3,5% dengan hasil laju korosi tertinggi pada pengelasan yang menggunakan *backing gas* H₂-N₂ (20%-80%) dengan kehilangan berat sebesar 0,0215 gram, sedangkan *backing gas* N₂ 100% hanya 0,0196 gram dan untuk *backing gas* Argon 100% hanya kehilangan berat 0,0163 gram.

Oleh karena itu dengan adanya studi ini dapat diperoleh wawasan mendalam mengenai pengaruh *preheat* dan kuat arus terhadap sifat mekanik, *metallography*, nilai kekerasan dan laju korosi material Cu-DHP (*deoxidised high phosphorus copper*).

1.2 Rumusan Masalah

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

1. Bagaimana nilai kekuatan tarik maksimum pada proses pengelasan material Cu-DHP (*deoxidised high phosphorus copper*) dengan variasi kuat arus dan *preheat* ?
2. Bagaimana nilai distribusi kekerasan pada hasil pengelasan material Cu-DHP (*deoxidised high phosphorus copper*) dengan variasi kuat arus dan *preheat* ?
3. Bagaimana hasil uji *metallography* pada proses pengelasan material Cu-DHP (*deoxidised high phosphorus copper*) dengan variasi kuat arus dan *preheat* ?
4. Bagaimana nilai laju korosi pada proses pengelasan material Cu-DHP (*deoxidised high phosphorus copper*) dengan variasi kuat arus dan *preheat* ?

1.3 Tujuan Penelitian

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

1. Mengetahui nilai kekuatan tarik maksimum pada proses pengelasan material Cu-DHP (*deoxidised high phosphorus copper*) dengan variasi kuat arus dan *preheat* ?
2. Mengetahui nilai distribusi kekerasan pada proses pengelasan material Cu-DHP (*deoxidised high phosphorus copper*) dengan variasi kuat arus dan *preheat* ?
3. Mengetahui hasil uji *metallography* pada proses pengelasan material Cu-DHP (*deoxidised high phosphorus copper*) dengan variasi kuat arus dan *preheat* ?
4. Mengetahui nilai laju korosi pada proses pengelasan material Cu-DHP (*deoxidised high phosphorus copper*) dengan variasi kuat arus dan *preheat* ?

1.4 Manfaat Penelitian

Dengan dilakukan penelitian ini maka dapat diambil manfaat sebagai berikut:

1. Manfaat bagi mahasiswa:
Sebagai sarana pengaplikasian teori yang pernah didapat di kampus serta sebagai referensi tugas akhir untuk angkatan selanjutnya.
2. Manfaat bagi instansi:
Memberi informasi bahwa teori yang diajarkan dapat diaplikasikan dengan baik pada dunia industri.
3. Manfaat bagi industri:
Memberikan informasi dan literatur pada industri tentang pengaruh *preheat* dan kuat arus pada pengelasan Cu-DHP (*deoxidised high phosphorus copper*) dengan proses GTAW terhadap sifat mekanik, *metallography*, dan laju korosi

1.5 Batasan Masalah

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

1. Material yang digunakan adalah Cu-DHP (*deoxidised high phosphorus copper*) UNS C12200 tipe R250 dengan diameter 88,90 mm dan ketebalan 4,8mm.
2. Proses las menggunakan proses GTAW.
3. Posisi pengelasan 1G.
4. Menggunakan *filler* CuAg1.
5. Menggunakan *shielding gas* Ar 100%
6. Menggunakan *backing gas* H₂-N₂ 20-80%
7. Temperatur *Interpass* variabel *preheat* 350 °C dan untuk *non-preheat* 50°C
8. Menggunakan 6 spesimen uji yang dibagi menjadi 2 kategori, *non-preheat* dan *preheat*. Setiap kategori terdiri dari 3 spesimen yang berbeda kuat arusnya.
9. Pengujian yang dilakukan adalah *Visual test*, *Liquid Penetrant test*, *Tensile test*, *Micro Hardness test*, *Metallography test*, dan *Corrosion rate*.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”
This page is intentionally left blank

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tembaga

Tembaga dan paduannya adalah salah satu kelompok utama logam komersial. Tembaga banyak digunakan karena konduktivitas listrik dan panasnya yang sangat baik, selain itu sifat ketahanan korosi, kemudahan pembentukan, serta kekuatan dan ketahanan *fatigue* yang baik menjadi alasan utama pemilihan material tembaga. Tembaga dan banyak paduannya memiliki struktur kristal *face centered cubic* (FCC) yang menjadi alasan sifatnya yang mudah dibentuk dan ulet. Tembaga memiliki massa jenis 8,94 Mg/m³ atau 0,32 lb/in³ sekitar 3 kali lebih berat dibandingkan dengan aluminium. Tembaga memiliki konduktivitas listrik dan termal lebih rendah dibandingkan perak, tetapi lebih tinggi sekitar 1,5 kali daripada aluminium (O'Brien, 2001). Pada Tabel 2.1 merupakan klasifikasi dari material tembaga dan paduannya.

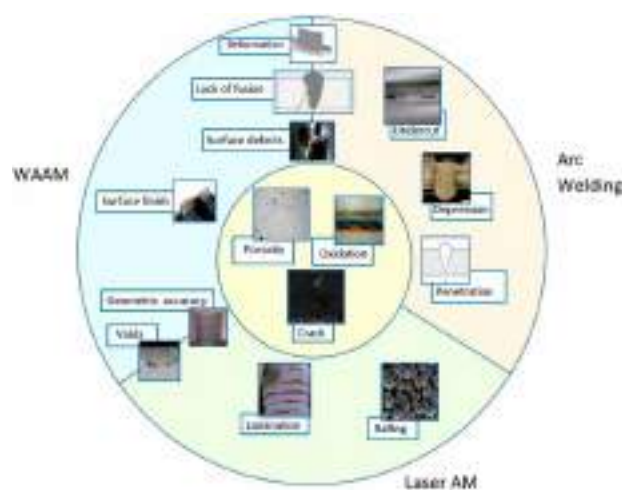
Tabel 2. 1 Klasifikasi *Copper* dan Paduannya

No.	Tipe <i>Copper</i> dan Paduannya
1	<i>Copper</i> , yang berisi setidaknya 99.3% Cu
2	<i>High-copper alloys</i> , yang mengandung hingga 5% elemen paduan
3	<i>Copper-zinc alloys (brasses)</i> , yang mengandung hingga 40% Zn
4	<i>Copper-tin alloys (phosphor bronzes)</i> , yang mengandung hingga 10% Sn dan 0,2% P
5	<i>Copper-aluminum alloys (aluminum bronzes)</i> , yang mengandung hingga 10% Al
6	<i>Copper-silicon alloys (silicon bronzes)</i> , yang mengandung hingga 3% Si
7	<i>Copper-nickel alloys</i> , yang mengandung hingga 30% Ni
8	<i>Copper-zinc-nickel alloys (nickel silvers)</i> , yang mengandung hingga 27% Zn dan 18% Ni
9	<i>Special alloys</i> , yang mengandung elemen paduan untuk meningkatkan properti tertentu atau karakteristik, misalnya, kemampuan mesin

Sumber: Scott, 2001

Produksi tembaga dan paduannya dengan cara tradisional umumnya melibatkan berbagai tahap dalam proses manufaktur seperti pengecoran, penempaan, ekstrusi, pengerolan, metalurgi serbuk, serta pemesinan untuk mencapai ukuran dan toleransi yang diinginkan. Teknik-teknik ini termasuk

dalam kategori manufaktur tradisional atau pengurangan, di mana bahan dibentuk melalui deformasi plastis atau penghilangan material dari benda kerja yang ada. Meskipun metode konvensional telah banyak diterapkan di industri dan dapat menghasilkan karakteristik mekanik yang baik, namun terdapat batasan dalam produksi komponen tembaga dengan geometri yang rumit dan struktur internal yang kompleks. Keterbatasan ini mendorong perkembangan metode produksi alternatif berdasarkan *Additive Manufacturing* (AM), termasuk *Wire Arc Additive Manufacturing* (WAAM), yang membangun bagian secara bertahap melalui pembentukan material lapis demi lapis dengan prinsip yang secara metalurgi mirip dengan proses pengelasan *multipass*. Walaupun AM dan WAAM memberikan fleksibilitas dalam desain dan efisiensi pemanfaatan material yang tinggi, teknik ini dihadapkan pada tantangan teknologi dan metalurgi akibat siklus pelelehan dan pembekuan yang berulang, yang menambah kecenderungan munculnya cacat solidifikasi seperti porositas, retak panas, diskontinuitas, dan kekurangan peleburan. Cacat-cacat ini juga sering muncul pada pengelasan busur tradisional seperti yang disajikan pada Gambar 2.1, Namun, perbedaan utamanya terletak pada tujuan dari proses tersebut, di mana pengelasan digunakan untuk menyatukan material, sementara AM dan WAAM digunakan untuk membangun geometri komponen secara utuh, di mana WAAM secara khusus cocok untuk pembuatan komponen berukuran besar dengan laju deposisi yang tinggi (Vahedi Nemani dkk., 2024).



Gambar 2. 1 Cacat Las pada WAAM, Laser AM, dan *Arc Welding* (Xia dkk., 2020)

2.1.1 Tembaga murni (*Pure Copper*)

Tembaga murni merupakan logam yang memiliki kandungan Cu minimal 99,3% dengan nilai konduktivitas listrik 103,06% berdasarkan IACS (*International Annealed Copper Standard*) (Scott, 2001), hal ini karena keseimbangan yang baik antara resistivitas listrik yang rendah ($1,72 \times 10^{-8} \Omega$) dan harga yang wajar jika dibandingkan dengan emas dan perak (Vahedi Nemani dkk., 2024). Sifat fisik tembaga dan paduan tembaga sangat dipengaruhi oleh partikel pengotor, namun tembaga murni dapat meminimalkan pengaruh partikel pengotor, sehingga memberikan kestabilan yang lebih baik terhadap sifat fisik dan kimianya. Tingginya konduktivitas termal dan listrik serta sifat kemudahan pemesian menjadikan tembaga murni banyak diaplikasikan dalam industri kedirgantaraan, otomotif, dan bidang kelistrikan (Jiang dkk., 2021).

Pemanfaatan tembaga murni tanpa unsur paduan umumnya dibatasi oleh kekuatan mekaniknya yang relatif rendah. Berbagai metode penguatan telah dikembangkan untuk meningkatkan sifat mekanik tembaga, antara lain pengerjaan dingin (*cold working*), penghalusan ukuran butir, pengerasan larutan padat, pengerasan presipitasi, dan penguatan dispersi. Metode-metode tersebut terbukti efektif dalam meningkatkan kekuatan, namun sering kali disertai dengan penurunan konduktivitas listrik dan termal. Oleh karena itu, tantangan utama dalam pengembangan material tembaga terletak pada upaya memperoleh keseimbangan optimal antara kekuatan mekanik dan kemampuan hantar listrik yang tinggi. Pengerjaan dingin merupakan salah satu metode yang mampu meningkatkan kekuatan tembaga murni dengan pengaruh yang relatif terbatas terhadap konduktivitas, meskipun material hasil proses ini cenderung mengalami pelunakan pada temperatur yang relatif rendah akibat temperatur rekristalisasi tembaga yang rendah. Di sisi lain, penambahan unsur paduan dapat meningkatkan kekuatan mekanik serta temperatur pelunakan tembaga, tetapi umumnya memberikan dampak negatif terhadap konduktivitas listrik dan termal. Di antara berbagai

mekanisme penguatan paduan, pengerasan larutan padat diketahui memberikan penurunan konduktivitas paling signifikan, sehingga kurang sesuai untuk aplikasi yang memerlukan kombinasi kekuatan tinggi dan konduktivitas tinggi (M. Li & Zinkle, 2012).

Tembaga murni memiliki banyak jenis dan dapat mengandung penambahan unsur lain untuk meningkatkan sifat mekanik dan *machineability*. Tembaga murni memiliki dua kondisi, yaitu bebas oksigen dan mengandung oksigen. Kondisi tersebut tergantung selama proses pembuatannya, jenis tembaga murni ditunjukkan pada Tabel 2.2

Tabel 2. 2 Klasifikasi Tembaga Murni (*Pure Copper*)

Technical Pure Copper					
<i>Oxygen Containing Copper</i>		<i>Oxygen-free Copper</i>			
		<i>Not Deoxidised</i>		<i>Phosphor Deoxidised</i>	
<i>Electrolytic and fire refined, oxygen containing (< 0,1%) ("poles" Copper)</i>		<i>Oxygen-free and free from de-oxidation parts</i>		<i>Deoxidised, with several high contents of residual phosphor</i>	
Cu-Content:	≥ 99,90 %	Cu-Content:	≥ 99,95 %	Cu-Content:	≥ 99,90 %
O-Content:	0,005 – 0,040 %	more:	—	P-Content:	0,003 – 0,040 %
(DIN-Types)	EN-Types	(DIN Types)	EN-Types	(DIN-Types)	EN-Types
(E1-Cu58)	Cu-ETP	—	Cu-OF1	(SE-Cu)	Cu-HCP
(E2-Cu58)	Cu-FRHC	(OF-Cu)	Cu-OF	(SW-Cu)	Cu-DLP
(F-Cu)	Cu-FRTP	—	Cu-OFE	(SF-Cu)	Cu-DHP

Sumber: SLV, 2015

Pada tembaga jenis *Oxygen Containing Copper* atau ETP, oksigen sengaja dipertahankan pada tingkat tertentu untuk bereaksi dengan *impurity* sisa dan membentuk oksida halus, sehingga matriks tembaga menjadi lebih bersih dan mendukung konduktivitas listrik yang tinggi. Namun, keberadaan oksigen tersebut juga menyebabkan terbentuknya partikel oksida tembaga (Cu_2O) dalam mikrostruktur yang meningkatkan kerentanan material terhadap *hydrogen embrittlement* pada temperatur tinggi. Hal ini berbahaya jika pengelasan fusi dilakukan pada tembaga ETP dengan gas pelindung yang mengandung hidrogen, karena dapat menyebabkan *hydrogen embrittlement* (Miller, 2025).

Untuk menghilangkan oksigen bebas di dalam matriks tembaga yang dapat menyebabkan *hydrogen embrittlement*, dapat menggunakan unsur deoksidator kuat seperti fosfor yang bereaksi dengan oksigen membentuk oksida fosfor (P_2O_5) sehingga mengurangi ketersediaan oksigen bebas. Namun, keberadaan fosfor ini menyebabkan penurunan konduktivitas listrik tembaga, sehingga tembaga terdeoksidasi fosfor tidak cocok untuk aplikasi listrik atau elektronik yang menuntut konduktivitas tinggi. Oleh karena itu, tembaga bebas oksigen (*oxygen-free copper*) menjadi pilihan utama, karena kandungan oksigen sisa di dalam material ini sangat rendah sehingga kemampuannya untuk bereaksi dengan *impurity* bebas di dalam matriks tembaga menjadi terbatas. Kondisi tersebut mengharuskan kandungan total *impurity* ditekan serendah mungkin agar konduktivitas listrik yang tinggi tetap dapat dipertahankan. Hal inilah yang mendasari persyaratan standar kandungan tembaga minimum yang lebih tinggi pada tembaga bebas oksigen, yaitu sebesar 99,95% hingga 99,99% Cu, dibandingkan dengan tembaga ETP yang memiliki batas minimum sekitar 99,90% Cu. Selain keunggulan dalam konduktivitas, tembaga bebas oksigen juga menunjukkan performa mekanik yang lebih baik, khususnya ketahanan terhadap *fatigue* dan *fatigue-creep* pada aplikasi jangka panjang di temperatur tinggi (Miller, 2025).

2.1.2 Tembaga DHP (*Deoxidised High Phosphorus Copper*)

Tembaga DHP (*deoxidised high phosphorus copper*) adalah tembaga yang termasuk dalam klasifikasi tembaga murni dengan kondisi bebas oksigen karena penambahan unsur fosfor sebagai deoksidator. Material ini banyak diaplikasikan untuk unit perpindahan panas seperti, AC, lemari es, evaporator, dan kondensor (Aminazad dkk., 2015). Pada PT. X material Cu-DHP digunakan pada pembuatan unit kondensor, seperti yang disajikan pada Gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Unit Kondensor pada Bagian Header

Material Cu-DHP mengandung fosfor dalam kisaran 0,015 – 0,04% dan dengan kandungan oksigen maksimal 0,0010%. Untuk kebutuhan komersial tembaga ini memiliki kemurnian minimal 99,9% termasuk kandungan Ag maksimal 0,015% (Balart dkk., 2015). Pada Tabel 2.3 merupakan komposisi kimia material Cu-DHP

Tabel 2. 3 Komposisi Kimia Cu-DHP

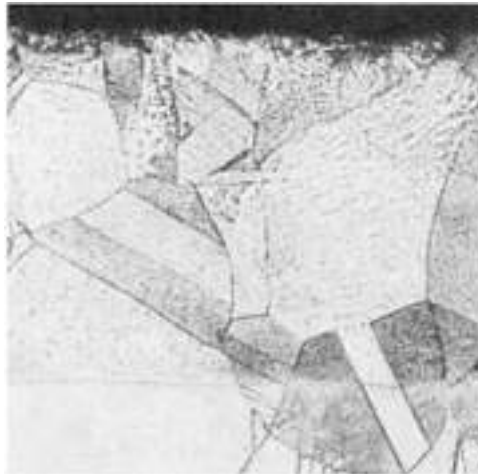
Material Designation		Composition							Density _b		
Symbol	Number	Element	Cu ^a	Bi	O	P	Pb	Other Elements (see NOTE)		Approx. g/cm ³	
									Total		Excluding
		% (mass fraction)									
Cu-DHP	CW024A	Min.	99,90	-	-	0,015	-	-	-	8,9	
		Max.	-	-	- ^c	0,040	-	- ^f			
NOTE: The total of other elements (than copper) is defined as the sum of Ag, As, Bi, Cd, Co, Cr, Fe, Mn, Ni, O, P, Pb, S, Sb, Se, Si, Sn, Te and Zn, subject to the exclusion of any individual elements indicated.											
a	Including silver, up to a maximum of 0,015 %.										
b	For information only.										
c	Oxygen content up to 0,060 % is permitted, subject to agreement between the purchaser and the supplier.										
d	Higher total impurities content is permitted, subject to agreement between the purchaser and the supplier.										
e	The oxygen content shall be such that the material conforms to the hydrogen embrittlement requirements of EN 1976.										
f	If required, the permitted total of elements, other than silver and phosphorus, should be agreed between the purchaser and the supplier.										

Sumber: BS EN 12449, 2023

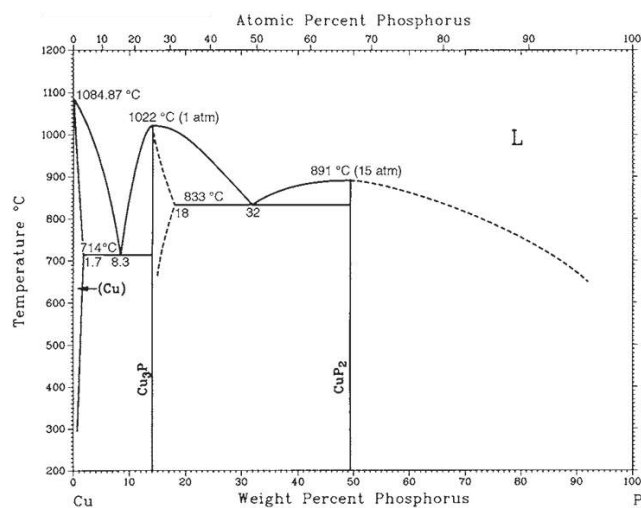
Berdasarkan Tabel 2.3 ada dua unsur yang turut serta menjadi unsur tambahan di dalam material Cu-DHP, unsur tersebut merupakan perak (Ag) dan fosfor (P). Perak (Ag) berperan dalam memperhalus ukuran butir ketika ditambahkan bersama fosfor dan juga dapat meningkatkan ketahanan *creep* pada kisaran kandungan tertentu. Penambahan Ag diketahui mampu mengurangi jarak lengan dendrit dan meningkatkan kekuatan pada kondisi temperatur tinggi. Meskipun Ag dapat tersegregasi di batas butir, unsur ini tidak menyebabkan *embrittlement*, namun sedikit menurunkan konduktivitas listrik dan termal Cu-DHP dibandingkan tembaga murni, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.5. Oleh karena itu, kadar Ag umumnya dibatasi hingga sekitar 150 ppm agar manfaat penghalusan butir tetap diperoleh tanpa penurunan konduktivitas yang signifikan (Balart dkk., 2015).

Fosfor (P) pada Cu-DHP memiliki peran penting dalam mengendalikan struktur mikro. Pada kadar rendah, sekitar 0,1% fosfor dapat membantu terjadinya transisi dari struktur kolumnar ke ekuiaks (*columnar to equiaxed transition*), terutama jika dikombinasikan dengan unsur lain seperti perak (Ag) atau zirkonium (Zr). Namun, penambahan fosfor yang terlalu tinggi, sekitar 0,5% P, dapat menyebabkan pembesaran butir ekuiaks secara berlebihan, sehingga kadar fosfor disarankan dibatasi hingga sekitar 400 ppm untuk menjaga ukuran butir tetap terkendali (Balart dkk., 2015).

Oleh karena itu, dengan penambahan fosfor yang cukup, kandungan oksigen di dalam tembaga akan diubah menjadi P_2O_5 (*phosphorus pentoxide*), senyawa ini akan mengikat oksigen mencegah penyerapan oksigen selama *hot working*, *annealing*, dan menjadikan material ini dapat di las (Vijayaram, 2023). Pada Gambar 2.3 dapat dilihat bintik hitam yang muncul merupakan *phosphorus pentaoxide* sedangkan Gambar 2.4 adalah diagram fasa Cu-P.

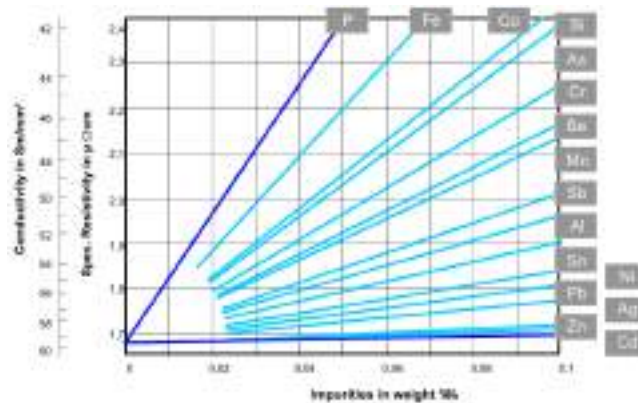


Gambar 2. 3 Struktur Mikro Material Cu-DHP (Scott, 2001)



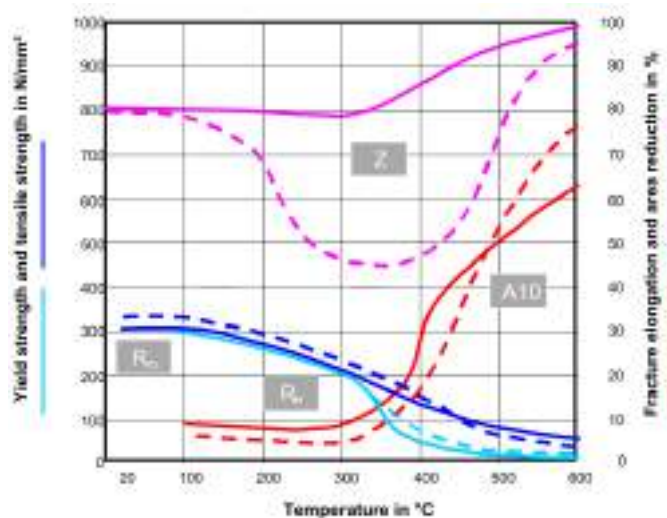
Gambar 2. 4 Diagram Fasa Cu-P (Scott, 2001)

Selain itu kandungan fosfor pada tembaga akan berdampak penurunan konduktivitas listrik material, alasan tersebut membuat Cu-DHP tidak cocok sebagai penghantar listrik. Selain itu, penurunan konduktivitas termal juga terjadi, hal ini menguntungkan untuk proses pengelasan karena memungkinkan masukan panas yang dibutuhkan lebih rendah untuk peleburan dan mencegah terjadinya *porosity* pada pengelasan (SLV, 2015). Namun pengontrolan arus untuk menghasilkan *heat input* yang tepat juga penting agar penetrasi dan fusi antara *base metal* dan *weld metal* terbentuk, mengingat bahwa konduktivitas termal tembaga melebihi baja dan paduan nikel sebesar 7-30 kali (Boțilă dkk., 2024). Pada Gambar 2.5 menunjukkan efek penambahan elemen terhadap konduktivitas listrik dan termal material.



Gambar 2. 5 Konduktivitas Listrik dan Kandungan Pengotor Tembaga Teknis (SLV, 2015).

Pada Gambar 2.5 unsur kadmium (Cd) hampir tidak berpengaruh terhadap konduktivitas termal dan listrik. Meski begitu, sejumlah kecil pengotor (misalnya persipitasi S dan Bi) akan berdampak negatif terhadap area reduksi retakan dari tembaga murni teknis dalam kisaran suhu antara 300 dan 420°C (*Hot Embrittlement*), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2. 6 Sifat Mekanik Tembaga Teknis terhadap Suhu (SLV, 2015).

Material Cu-DHP digolongkan berdasarkan kondisi materialnya yang ditandai dengan huruf R, H, dan S, sistem ini diberikan berdasarkan Standar Eropa yang sesuai dalam EN 1173. Dalam Tabel 2.4 adalah penjelasan klasifikasi kondisi material.

Tabel 2. 4 Klasifikasi Kondisi Material

Kode	Penjelasan
R...	Kondisi material yang ditetapkan oleh nilai minimum persyaratan kekuatan tarik untuk produk dengan persyaratan sifat tarik wajib
H...	Kondisi material yang ditetapkan oleh nilai minimum persyaratan kekerasan untuk produk dengan persyaratan kekerasan wajib
S (<i>suffix</i>)	Kondisi material untuk suatu produk yang telah mengalami pelepasan tegangan.
Catatan: 1. Produk dalam kondisi H... dapat ditentukan kekerasannya menggunakan <i>Vickers</i> atau <i>Brinell</i> . Penunjukan kondisi H... sama untuk kedua metode pengujian kekerasan tersebut. 2. Produk dalam kondisi R... atau H... dapat diproses secara khusus (misalnya melepaskan tegangan secara mekanis atau termal) untuk menurunkan tingkat tegangan sisa guna meningkatkan ketahanan terhadap korosi tegangan. 3. Konversi tepat antara kondisi material yang ditetapkan sebagai R... dan H... tidak mungkin dilakukan. 4. Kecuali ketika akhiran S digunakan, kondisi material ditunjuk hanya dengan salah satu dari penunjukan di atas.	

Sumber: BS EN 12451, 2012

Selain itu, angka setelah simbol R, H, dan S juga memiliki arti minimum kuat tarik material tersebut, dapat dilihat pada Tabel 2.5 tentang sifat mekanik material tembaga dan paduannya.

Tabel 2. 5 Sifat Mekanik Tembaga dan Paduan Tembaga

Material Designation		Composition						
symbol	number	Material Condition	Tensile strength	0,2% proof strength	Elongation	Drift expansion	Hardness	
			R_m N/mm ² min	R_m N/mm ² Min	A % min	% min	min.	max.
Cu-DHP	CW024A	R220	220	-	40	-	-	-
		R250	250	150	30	-	-	-
		H075	-	-	-	-	75	100
		R290	290	250	3	-	-	-
		H100	-	-	-	-	-	-

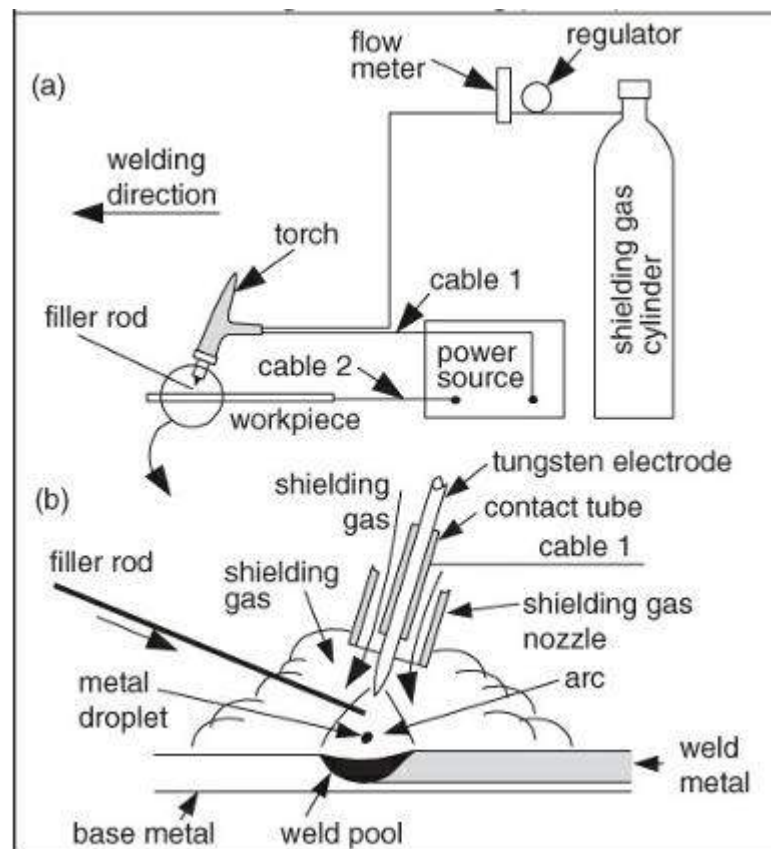
Sumber: BS EN 12451, 2012

Selain sifat dasar Cu-DHP, khususnya konduktivitas termal yang tinggi dan keberadaan fosfor dalam matriks tembaga yang secara langsung memengaruhi perilaku material selama proses pengelasan. Material ini juga memiliki keunggulan lain seperti sifat anti bakteri dan ketahanan korosi yang baik, namun ketahanan korosi ini tergantung pada layanan penggunaan material. Seperti contoh untuk produk HVAC

dengan instalasi atau parameter lingkungan yang agresif, seperti kualitas air yang tidak tepat, dapat menyebabkan kegagalan yang tidak terduga yang mengakibatkan kerugian material (Tzevelekou dkk., 2013).

2.2 Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)

GTAW kerap dipakai untuk menyambung logam tipis untuk material *non-ferrous* dan *stainless steel*, juga material seperti aluminium, magnesium, dan tembaga. Karena operator punya kendali lebih bagus dibanding cara lain seperti *Shielded Arc Welding* dan *Gas Metal Arc Welding*, teknik ini bisa menghasilkan sambungan las yang lebih bagus dan bermutu tinggi (Hassan Malik, 2021). Pada Gambar 2.7 merupakan ilustrasi proses pengelasan GTAW secara manual.



Gambar 2. 7 (a) Skema Pengelasan GTAW (b) area proses las (Kou, 2021)

Proses *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) sangat sesuai untuk pengelasan tembaga dan paduannya karena menghasilkan busur listrik yang intens dengan temperatur sangat tinggi pada daerah sambungan, sehingga

memungkinkan terbentuknya *heat affected zone* (HAZ) yang relatif sempit. Intensitas busur yang tinggi ini menjadi faktor penting dalam pengelasan tembaga dan paduan tembaga karena memiliki konduktivitas termal yang tinggi, hal ini memungkinkan terjadinya peleburan yang sempurna dengan pemanasan minimum pada logam induk di sekitarnya. HAZ yang sempit sangat diinginkan, terutama pada paduan tembaga yang diperkuat melalui mekanisme pengerasan presipitasi, karena dapat meminimalkan degradasi sifat mekanik.

Dalam praktiknya, GTAW paling sering digunakan untuk pengelasan tembaga dan paduannya dengan ketebalan hingga sekitar 3,2 mm menggunakan sambungan *square edge*, dan pada ketebalan ini sering kali tidak diperlukan logam pengisi. Untuk ketebalan yang lebih besar dari 3,2 mm, penggunaan logam pengisi umumnya diperlukan. Pengelasan GTAW pada pelat dengan ketebalan di atas 12,7 mm jarang dilakukan dan biasanya hanya dipilih apabila peralatan *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) tidak tersedia atau terdapat kondisi khusus, seperti kecenderungan *hot shortness* pada logam induk atau keberadaan bagian yang sensitif terhadap panas, sehingga diperlukan pembatasan *heat input*. Dalam kondisi tertentu, proses GMAW dengan arus *pulsed* dapat menjadi alternatif yang lebih sesuai (Scott, 2001).

2.2.1 *Shielding gas*

Gas pelindung digunakan dalam GTAW untuk mencegah kontaminasi atmosfer pada logam las. Kontaminasi ini dapat menghasilkan porositas, retak las, dan perubahan komposisi kimia bahan leleh. Selain itu, gas pelindung juga memiliki pengaruh yang besar terhadap stabilitas busur listrik. Gas dengan potensi ionisasi rendah memfasilitasi pengapian busur listrik dan gas dengan konduktivitas termal rendah cenderung meningkatkan stabilitas busur seperti contoh argon adalah gas pelindung GTAW yang paling banyak digunakan. Argon memiliki potensi ionisasi yang rendah dan lebih berat dari udara, memberikan pelindung yang sangat baik pada kolam las cair. (Kutelu dkk., 2018).

Potensial ionisasi adalah energi yang dibutuhkan untuk mengionisasi gas. Seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 2.6, potensial

ionisasi untuk argon dan helium masing-masing adalah 15,7 dan 24,5 eV (volt elektron). Karena lebih mudah mengionisasi argon dibandingkan helium, konduktivitas listriknya lebih tinggi dan penurunan tegangan di seluruh busur lebih rendah dengan argon. Selain itu, karena argon lebih berat daripada helium, argon memberikan perlindungan yang lebih baik dan tahanan yang lebih besar terhadap aliran silang dibanding helium. Dengan DCEP atau AC, argon juga memiliki aksi pembersihan oksida yang lebih besar daripada helium. Keuntungan-keuntungan ini ditambah biaya argon yang lebih rendah membuatnya lebih menarik untuk GTAW dibandingkan helium (Kou, 2021).

Tabel 2. 6 Potensial Ionisasi untuk Gas yang terlibat dalam Pengelasan Busur

Gas	Chemical symbol	Ionization potential (eV)
Argon	Ar	15.7
Karbon Dioksida	CO ₂	14.4
Helium	He	24.5
Hidrogen	H ₂	13.5
Nitrogen	N ₂	14.5
Oksigen	O ₂	13.2

Sumber: Kou, 2021

Selain itu kandungan kemurnian gas dan kandungan air pada gas dan campuran gas harus dijaga sesuai dengan ISO 14175:2008 (E) pada Tabel 2.7 tentang persyaratan kemurnian dan kandungan air pada gas.

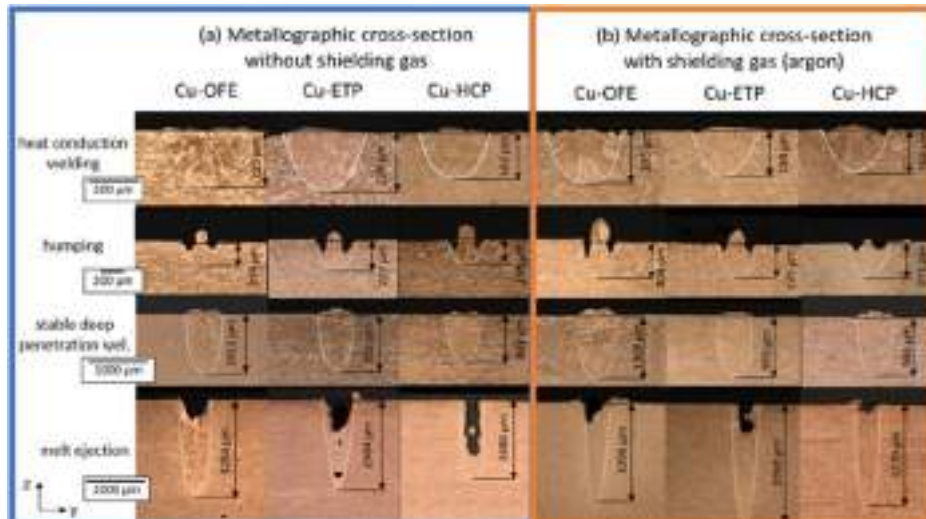
Tabel 2. 7 Kemurnian dan Kadar Air Gas

Gas	Purity (% Minimum)	Dew Point (°C)	Moisture (ppm Max)
<i>Inert Gas</i>	99,99	- 50	40
Karbon Dioksida	99,98	- 40	120
Nitrogen	99,9	- 50	40
Oksigen	99,5	- 50	40

Sumber: ISO 14175, 2008

Selain melindungi permukaan hasil las, gas pelindung juga memiliki peran penting pada hasil penetrasi pengelasan dan topografi hasil las. Pada penelitian Will dkk. (2023) dengan proses *laser welding* digunakan untuk dua kondisi pengelasan, yaitu tanpa gas pelindung dan dengan gas pelindung argon. Material yang digunakan ada 3 jenis dan termasuk tembaga murni yaitu Cu-OFE (*Oxygen-Free Electronic*), Cu-

ETP (*Electrolytic Tough Pitch*), dan Cu-HCP (*High Conductivity Phosphorus*) hasil dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 2.8

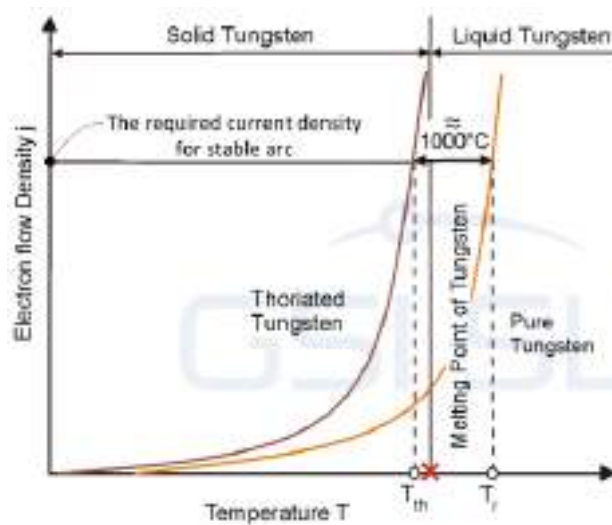


Gambar 2. 8 Perbandingan Foto Makro Pengelasan (a) tanpa Gas Pelindung Ar (b) dengan Gas Pelindung Ar (Will dkk., 2023)

Berdasarkan analisis metalografi, Cu-HCP menunjukkan kecenderungan kedalaman las yang lebih rendah dibandingkan Cu-OFE dan Cu-ETP. Penerapan gas pelindung terbukti meningkatkan kedalaman las pada Cu-HCP, yang diasumsikan berkaitan dengan berkurangnya penghalangan energi inframerah akibat penguapan tembaga fosfat. Tidak ditemukan perbedaan porositas yang signifikan pada seluruh jenis tembaga yang diuji, baik dengan maupun tanpa gas pelindung. Pengaruh utama gas pelindung terlihat pada pengendalian *blowout* percikan (*spatter*), sementara karakteristik topografi permukaan las dianalisis menggunakan sistem *Optical Coherence Tomography* (OCT) (Will dkk., 2023).

2.2.2 Elektroda

Kualitas sambungan las TIG pada dasarnya tergantung pada jenis elektroda tungsten yang digunakan dan bentuk ujung elektroda. Kita membedakan antara elektroda tungsten murni dan elektroda dengan tambahan oksida. Perbedaan antara jenis elektroda ini didasarkan pada energi emisi elektron yang dijelaskan pada Gambar 2.9.



Gambar 2. 9 Emisi Elektron Elektroda Tungsten sebagai Fungsi Suhu (SLV, 2015)

T_{th} : *Temperature of thoriated electrode during welding*

T_r : *Temperature of pure tungsten electrode during welding*

Hal ini menunjukkan bahwa, untuk mencapai busur yang stabil menyala, elektroda tungsten murni menjadi sekitar 1000 °C lebih panas dibandingkan elektroda tungsten torium. Kerapatan arus busur yang dibutuhkan untuk elektroda tungsten murni berada pada fase cair ujung elektroda, sedangkan energi emisi yang diperlukan untuk elektroda torium terjadi dalam keadaan padat. Berdasarkan komposisi kimianya, elektroda dibagi menjadi beberapa jenis yaitu *pure tungsten* dan *lanthanated*, *zirconiated*, *ceriated*, dan *thoriated* yang dapat ditunjukkan pada Tabel 2.8. Elektroda tersedia dalam diameter standar mulai dari 0,010" hingga 1/4". Diameter elektroda tungsten yang dibutuhkan sering kali ditentukan oleh ketebalan logam dasar yang dilas dan arus listrik yang dibutuhkan untuk melakukan pengelasan.

Tabel 2. 8 Kode Warna dan Elemen Paduan pada *Tungsten Electrode*

<i>Short Symbol</i>	<i>Chemical Composition</i>			<i>Colour</i>
	<i>Main oxide</i>	<i>Content (%)</i>	<i>Pollution Content (%)</i>	
WP	Non	N.A	Max. 0.5	Green
WCe 20	CeO ₂	1.8 to 2.2	Max. 0.5	Grey
WLa 10	La ₂ O ₃	0.8 to 1.2	Max. 0.5	Black
WLa 15	La ₂ O ₃	1.3 to 1.7	Max. 0.5	Gold
WLa 20	La ₂ O ₃	1.8 to 2.2	Max. 0.5	Blue
WTh 10	ThO ₂	0.8 to 1.2	Max. 0.5	Yellow
Th 20	ThO ₂	1.7 to 2.2	Max. 0.5	Red

Short Symbol	Chemical Composition			Colour
	Main oxide	Content (%)	Pollution Content (%)	
WTh 30	ThO ₂	1.8 to 3.2	Max. 0.5	Violet
WZr 3	ZrO ₂	0.15 to 0.50	Max. 0.5	Brown
WZr 8	ZrO ₂	0.7 to 0.9	Max. 0.5	White

Sumber: SLV, 2015

2.2.3 Backing gas

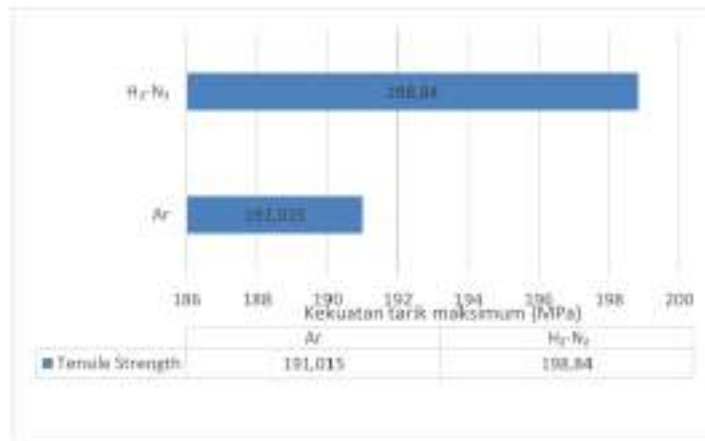
Backing gas adalah jenis gas yang berfungsi sebagai pelindung selama kegiatan pengelasan untuk menghindari terjadinya oksidasi pada bagian bawah logam yang sedang mencair. Fungsi gas ini adalah untuk menciptakan suasana yang *inert* atau semi *inert* yang dapat mempengaruhi kualitas pengelasan serta struktur mikro dari logam. Tipe *backing gas* yang sering digunakan mencakup argon, nitrogen, dan kombinasi nitrogen dengan hidrogen (H₂-N₂), dimana masing-masing jenis gas tersebut memberikan dampak tertentu terhadap hasil pengelasan. Di bawah ini adalah daftar gas *purging/backing gas* yang dapat diterapkan pada berbagai jenis material yang dapat dilihat pada Tabel. 2.9

Tabel 2. 9 Gas Purging/Backing yang digunakan untuk berbagai material.

Backing/ Purging Gases	Materials
Argon	<i>Austenitic Cr-Ni Steels, austenitic-ferritic steels (duplex) gas-sensitive materials (titanium, zirconium, molybdenum) Hydrogen-sensitive materials (high strength fine grain structural steels, copper and copper alloys, aluminium and aluminium alloys as well as other non-ferrous metals), ferritic Cr steels).</i>
Hydrogen-Nitrogen Mixture.	<i>Steels, except high-strength fine grain structural steels, austenitic Cr-Ni Steels.</i>
Nitrogen	<i>Austenitic Cr-Ni steels, austenitic ferritic steels (duplex).</i>

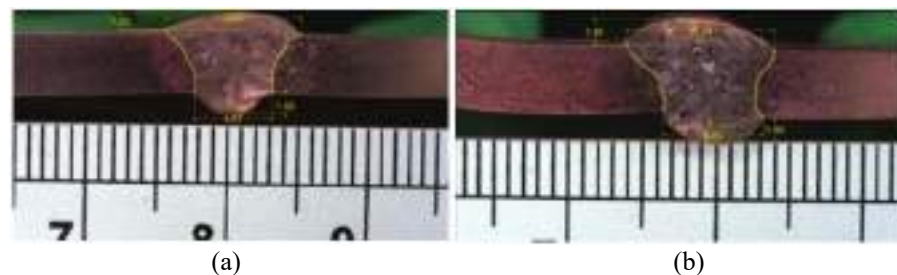
Sumber: SLV, 2015

Selain sebagai pelindung hasil pengelasan pada bagian *root pass*, *backing gas* juga dapat berpengaruh terhadap sifat mekanik hasil pengelasan. Hal ini dibuktikan dalam penelitian Khoirul Rohmat dkk. (2025) yang membahas tentang perbandingan hasil *backing gas* H₂N₂ dengan Ar pada pengelasan Cu-DHP dengan proses GTAW dan diperoleh hasil sesuai pada Gambar 2.10



Gambar 2. 10 Perbandingan Kekuatan Tarik pada Variasi *Backing Gas* (Khoirul Rohmat dkk., 2025)

Kenaikan kekuatan tarik H₂-N₂ ini disebabkan oleh struktur mikro yang halus karena pendinginan yang lebih cepat dan hasil mikrostruktur pada *weld metal* terdapat fasa Cu₃P dimana sifatnya yang keras dan dapat meningkatkan kekuatan tarik (Khoirul Rohmat dkk., 2025). Selain itu *backing gas* juga berpengaruh terhadap kedalaman penetrasi yang dihasilkan, hal ini terbukti pada Gambar 2.11



Gambar 2. 11 Hasil Uji Makro pada Variasi *Backing Gas* (a) Argon, (b) H₂-N₂ (Khoirul Rohmat dkk., 2025)

pada pengujian makro dapat dilihat hasil penetrasi *backing gas* Ar 100% memiliki kedalaman 7,26 mm dan *backing gas* campuran gas H₂-N₂ 20%-80% memiliki kedalaman 8,60 mm, hal ini disebabkan karena sifat gas hidrogen yang reaktif (Khoirul Rohmat dkk., 2025).

Filler CuAg1

Pada pengelasan material Cu-DHP menggunakan *filler metal* Cu-Ag1 dengan proses GTAW. *Filler metal* GTAW menggunakan jenis *solid wire* (ASME II C, 2025). *Filler metal* CuAg1 merupakan golongan *filler metal* yang tidak termasuk pada AWS Class, kode nomor *filler* ini adalah Cu 1897 dengan *symbol* CuAg1 dengan kandungan Cu 99,5% dan

kandungan Ag 0,8 - 1,2% (BS EN ISO 24373, 2018). Penambahan Ag (perak/*silver*) bertujuan untuk meningkatkan ketahanan terhadap pelunakan tanpa mempengaruhi konduktivitas listrik hasil pengelasan (Kulakli et al., 2021). Dalam pengelasan Cu-DHP ada dua rekomendasi *filler metal* yang dapat digunakan yaitu, *Filler* Cu-Ag1 dan CuSn1 hal ini dapat dilihat pada Tabel 2.10 sedangkan Pada Tabel 2.11 merupakan komposisi kimia dari *filler metal* CuAg1 dan Tabel 2.12 merupakan sifat mekanik dari *filler metal* CuAg1.

Tabel 2. 10 Rekomendasi Pemilihan *Filler* Material

<i>Base Material</i>	<i>Weldability</i>	<i>Typical Alloys</i>	<i>Recommended Filler Material</i>
<i>Pure copper (O₂-free, P-deoxidised Cu)</i>	(+)	Cu-OFE, Cu-DLP, Cu-DHP	CuSn1, CuAg1

Sumber: SLV, 2015

Tabel 2. 11 *Chemical Composition Filler Metal CuAg1*

Komposisi Kimia <i>Filler</i> CuAg1		
Weight percent (%)	Unsur	Value
	Cu	99,5 incl Ag
	Al	0,01
	Fe	0,05
	Mn	0,2
	Ni	0,3
	P	0,01-0,05
	Pb	0,01
	Si	0,1
	As	0,05
	Ag	0,8-1,2
	Others	0,1

Sumber: BS EN ISO 24373, 2018

Tabel 2. 12 Sifat Mekanik Tembaga Murni

<i>Properties</i>	<i>Value</i>
<i>Melting range:</i>	1070 - 1080 °C
<i>Tensile strength:</i>	200 N/mm ²
<i>Yield strength (0.2 %):</i>	80 N/mm ²
<i>Elongation (l=5d):</i>	30 %
<i>Hardness (BHN):</i>	60 HB
<i>Impact energy:</i>	75 J
<i>Heat conductivity:</i>	220 - 315 W/m • K
<i>Electrical conductivity (20 °C):</i>	44 - 46 Sm/mm ²
<i>Termal elongation:</i>	17.7 • 10 ⁻⁶ /K
<i>Specific gravity:</i>	8.9 kg/dm ³

Sumber:Fontargen, t.t.

Pemilihan CuAg1 sebagai *filler metal* berdasarkan pada sifatnya yang memiliki konduktivitas termal yang lebih tinggi, hal ini dapat

dibuktikan pada Gambar 2.5 bahwa penambahan unsur Ag lebih rendah berdampak pada penurunan konduktivitas daripada unsur Sn. CuAg1 juga lebih mudah untuk di *handle* serta memiliki ketahanan korosi yang baik dan *weld* depositnya bebas *porosity* (Certilas, 2022a). Namun karena memiliki konduktivitas termal yang lebih tinggi, *filler metal* CuAg1 membutuhkan daya listrik yang lebih tinggi jika dilakukan pengelasan dibandingkan paduan lainnya (Kreie dkk., 2025).

Sedangkan untuk *filler metal* CuSn1, meskipun sama menghasilkan deposit las yang bebas *porosity* (Certilas, 2022b), namun memiliki konduktivitas yang lebih rendah karena adanya penambahan unsur Sn (Timah) serta memiliki kecepatan pelelehan yang lebih lambat (*sluggish flow*) dengan kebutuhan *bevel angle* yang lebih besar (disarankan 70°) (TWI, 2012). Hal ini untuk memastikan penyatuan yang baik pada sudut sambungan, yang dapat menyulitkan pembentukan sambungan yang mulus terutama pada kondisi pengelasan tembaga yang cepat menyebarkan panas.

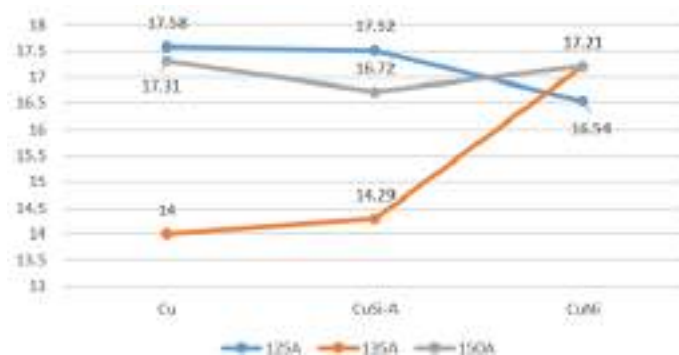
2.3 Heat input

Heat input adalah ukuran relatif dari energi yang ditransfer per satuan panjang las yang dihitung dengan persamaan 2,1 . Semakin tinggi *heat input*, semakin lambat laju pendinginan. Sebaliknya, semakin rendah *heat input*, semakin cepat laju pendinginan. Oleh karena itu, seperti pemanasan awal dan *interpass temperature*. *Heat input* merupakan karakteristik penting yang mempengaruhi laju pendinginan, yang dapat mempengaruhi sifat mekanik dan struktur metalurgi las dan HAZ.

$$Heat\ Input\ \left(\frac{kJ}{mm}\right): \frac{Voltage\ x\ Ampere\ x\ 60}{Travel\ Speed\ \left(\frac{mm}{min}\right) \times 1000} \quad (2,1)$$

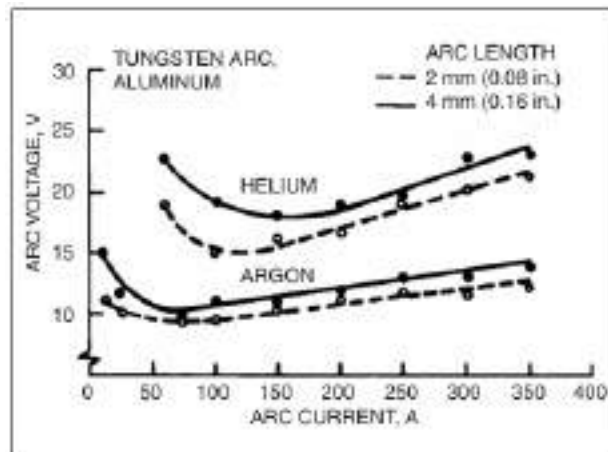
Di dalam *heat input* ada 3 faktor utama yang menjadi indikator penting dalam pengelasan yaitu, ampere, voltase dan *travel speed*. Dari ke tiga faktor tersebut biasanya yang dapat diatur adalah ampere, sedangkan voltase biasanya mengikuti kenaikan ampere pada mesin las dan juga dapat diatur sesuai dengan mesin las. Untuk pengelasan manual, *travel speed* sangat sulit untuk diatur

kecuali pada pengelasan otomatis yang dapat diatur kecepatannya dan tetap stabil. Dalam pengelasan tembaga murni, ampere berpengaruh terhadap hasil pengelasan dan sifat mekaniknya, pada penelitian Azwinur dkk., (2024) yang membahas efek dari parameter ampere terhadap perbedaan jenis *filler metal* sesuai pada Gambar 2.12, bahwa kenaikan ampere sedikit saja dapat berpengaruh terhadap kekuatan tarik material. Hal ini mungkin terjadi karena adanya fusi yang baik akibat kenaikan *heat input* dari kenaikan ampere yang menyebabkan percampuran logam dasar dengan *filler metal* dapat terjadi dengan sempurna dan tidak terjadi *incomplete fusion*.



Gambar 2. 12 Hasil Kuat Tarik terhadap Arus dan *Filler Metal* (Azwinur dkk., 2024)

Selain ampere, voltase juga memiliki pengaruh terhadap proses pengelasan, voltase merupakan perbedaan potensial listrik antara ujung kawat las dan permukaan kolam las cair. Tegangan awal yang tinggi memungkinkan inisiasi busur yang mudah dan rentang jarak ujung kerja yang lebih besar. Inisiasi busur ini juga dapat dipengaruhi oleh gas pelindung yang digunakan selama proses pengelasan. Pada Gambar 2.13 gas pelindung argon memiliki arus dan voltase yang lebih rendah jika dibandingkan dengan gas pelindung helium, hal ini disebabkan helium memiliki potensi ionisasi yang lebih tinggi daripada argon sehingga membutuhkan voltase lebih tinggi untuk inisiasi dan kestabilan busur (Kutelu dkk., 2018).



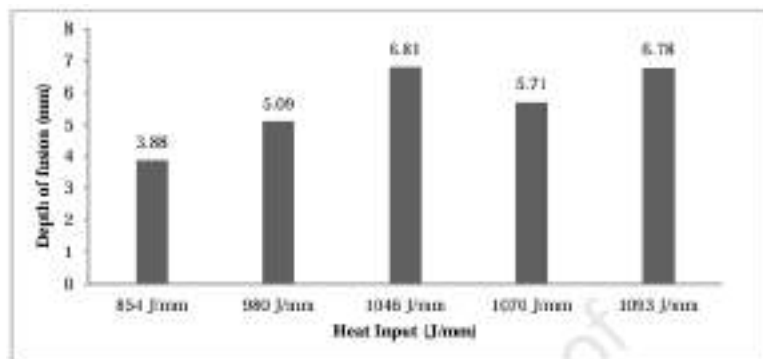
Gambar 2. 13 Hubungan Arus – Voltase pada *Shielding Gas* Argon dan Helium (Ian D. Harris, 2004)

Faktor yang terakhir merupakan *travel speed*, faktor ini sangat berpengaruh pada *heat input* karena menjadi faktor pembagi dalam perhitungan *heat input*. Meningkatkan *travel speed* adalah kunci untuk meningkatkan produktivitas pengelasan pada material yang tipis. Namun, peningkatan kecepatan pengelasan dapat menimbulkan berbagai cacat pengelasan seperti *incomplete fusion*, *undercut*, *lack of fusion*, hingga *bead* yang menggumpal (C. Li dkk., 2012). Pada umumnya, peningkatan kecepatan pengelasan bersamaan dengan meningkatnya arus pengelasan yang digunakan agar tidak terjadi *burn through* pada material yang dilas dan menyeimbangkan masukan panas yang diterima material.

Dalam pengelasan tembaga *heat input* tinggi diperlukan untuk memastikan pencairan material terjadi secara optimal, terutama pada material dengan ketebalan 2 mm ke atas. Peningkatan *heat input* dibutuhkan untuk ketebalan diatas 5 mm, hal ini berguna untuk mengimbangi sifat konduktivitas termal yang tinggi dan menjaga agar tidak terjadi retak panas terutama pada zona fusi, *heat input* yang terlalu rendah akan menghasilkan kolam las yang tidak stabil dan penetrasi yang tidak memadai, sementara arus yang terlalu tinggi dapat menyebabkan penguapan elemen penting dari bahan tembaga, sehingga mengurangi sifat mekanik dan ketahanan korosi dari sambungan las (Azwinur dkk., 2025).

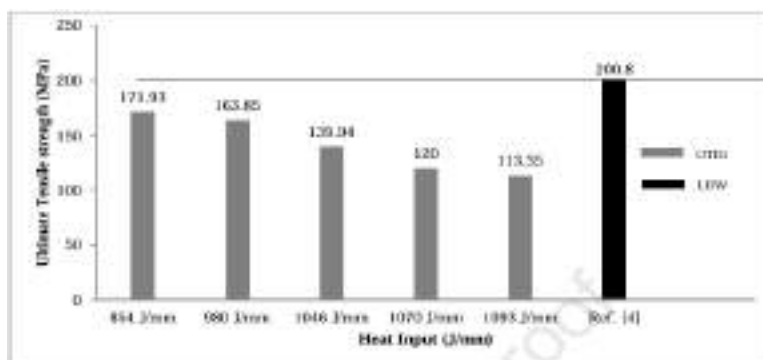
Selain itu, *heat input* berperan penting pada kedalaman penetrasi hasil pengelasan seperti pada penelitian (Dak dkk., 2020) yang membahas tentang

pengelasan *autogenous pure copper* dimana, penetrasi yang dihasilkan dipengaruhi oleh *heat input* seperti yang disajikan pada Gambar 2.14



Gambar 2. 14 Hubungan *Heat input* terhadap Kedalaman Penetrasi (Dak dkk., 2020)

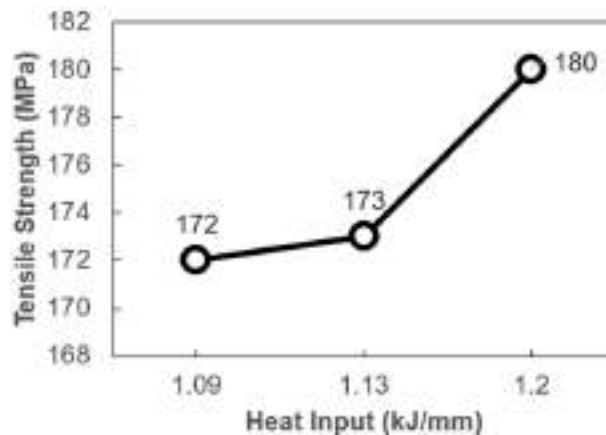
Selain berpengaruh pada kedalaman penetrasi hasil pengelasan, *heat input* juga berpengaruh terhadap kekuatan tarik hasil pengelasan. Pada penelitian (Dak dkk., 2020) hasil kekuatan tarik yang paling tinggi dihasilkan pada *heat input* paling rendah yaitu 854 J/mm dengan nilai kuat tarik 171,93 MPa, sedangkan nilai kekuatan tarik yang paling rendah berada pada *heat input* yang paling tinggi yaitu 1093 J/mm dengan nilai kuat tarik maksimum 113,35 MPa, hasil ini sesuai dengan Gambar 2.15.



Gambar 2. 15 Perbandingan Hasil Kuat Tarik terhadap *Heat input* OTIG dan LBW (Dak dkk., 2020)

Namun, dalam penelitian lain seperti pada (Azwinur dkk., 2025) menjelaskan bahwa kenaikan *heat input* justru menaikkan kekuatan tarik hasil pengelasan sesuai dengan Gambar 2.16, meskipun kenaikan *heat input* tidak terlalu signifikan perbedaannya, namun tetap mempengaruhi sifat mekanik hasil pengelasan. Oleh karena itu perbedaan hasil tersebut dapat dipengaruhi oleh faktor eksternal seperti, adanya penambahan *filler metal* ERCuNi 90/10 pada

penelitian (Azwinur dkk., 2025) dan kemungkinan adanya dikontinuitas hasil pengelasan.



Gambar 2. 16 Hubungan Kuat Tarik dan *Heat input* (Azwinur dkk., 2025)

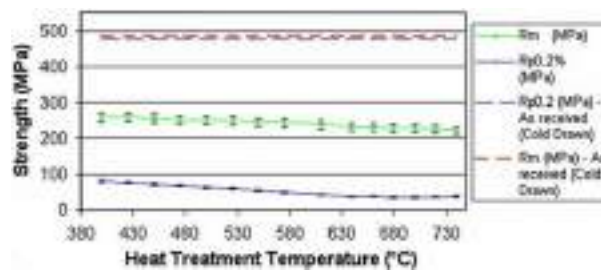
2.4 Perlakuan Panas (*Heat Treatment*)

Perlakuan panas (*Heat Treatment*) merupakan suatu proses untuk mengubah struktur mikro melalui proses pemanasan dan pengendalian laju pendinginan dengan atau tanpa mengubah komposisi kimia dari logam yang bertujuan untuk menghasilkan sifat logam yang diinginkan. Perubahan sifat logam akibat perlakuan panas dapat mencakup keseluruhan bagian logam atau hanya sebagian dari logam (Setiawan dkk., 2022).

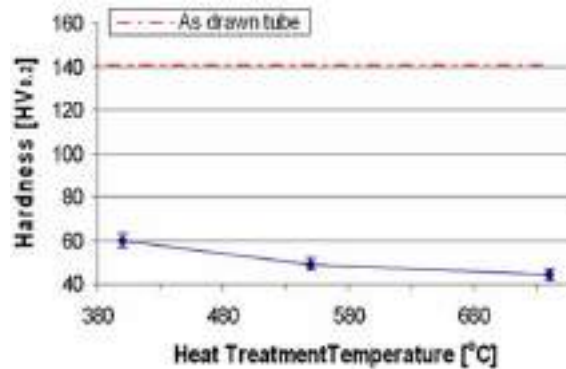
Pada tahapan pengelasan logam terdapat juga perlakuan panas yang dilakukan, yaitu pemanasan awal (*preheat*) dan perlakuan panas pasca pengelasan (PWHT). Pemanasan awal dilaksanakan sebelum pengelasan dimulai, biasanya dilakukan dengan cara memanaskan material secara langsung menggunakan api dari *torch* atau alat pemanas lainnya. Sementara itu, perlakuan panas pasca pengelasan (PWHT) dikerjakan setelah pengelasan selesai, biasanya menggunakan oven *furnace*. Perlakuan panas utama yang diterapkan pada tembaga murni dan paduan tembaga larutan padat adalah *annealing* untuk rekristalisasi setelah pengerjaan dingin (Bhargava dkk., 2017).

Dalam penelitian yang dilakukan oleh (Pantazopoulos dkk., 2012) tentang efek *annealing* terhadap sifat mekanik CuFe₂P dan Cu-DHP. Tembaga DHP mengalami rekristalisasi penuh pada suhu sekitar 400 °C, yang diikuti oleh pertumbuhan butir pada rentang suhu 425–740 °C sehingga menghasilkan

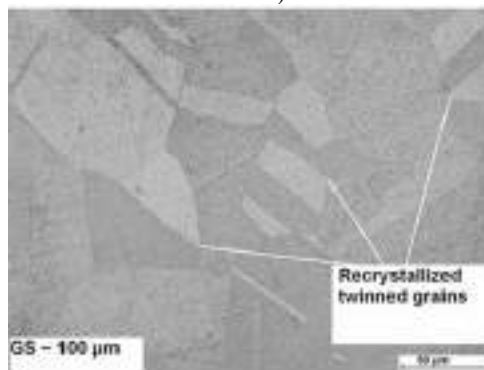
ukuran butir yang relatif kasar, sekitar 100 μm . Pada suhu rekristalisasi tersebut terjadi penurunan sifat mekanik yang signifikan, ditunjukkan oleh turunnya kekuatan tarik dari sekitar 477 MPa menjadi 259 MPa pada Gambar 2.17 serta penurunan kekerasan dari 141 HV menjadi 60 HV pada Gambar 2.18, yang mencerminkan kondisi temper anil lunak. Struktur mikro Cu-DHP setelah rekristalisasi didominasi oleh butir *equiaxed* yang disertai kembaran anil ganda seperti pada Gambar 2.19. Selain itu, kurva pelunakan Cu-DHP cenderung relatif mendatar hingga suhu perendaman sekitar 550 $^{\circ}\text{C}$, yang mengindikasikan stabilitas sifat mekanik dalam rentang suhu tersebut sebelum terjadinya pertumbuhan butir yang lebih lanjut.



Gambar 2. 17 Variasi Kekuatan Luluh dan Tarik 0,2% untuk Cu-DHP (Pantazopoulos dkk., 2012)



Gambar 2. 18 Kekerasan Cu-DHP sebagai Fungsi Suhu Perlakuan Panas(Pantazopoulos dkk., 2012)



Gambar 2. 19 Ukuran Butir Cu-DHP setelah Pemanasan 740 $^{\circ}\text{C}$ (Pantazopoulos dkk., 2012)

2.4.1 Preheat

Kemampuan pengelasan tembaga dan beberapa paduan tembaga sangat dipengaruhi oleh konduktivitas listrik dan konduktivitas termal yang tinggi. Panas pengelasan dengan cepat diteruskan ke logam dasar dan dapat menyebabkan *incomplete fusion* di daerah las dan hal tersebut rentan menimbulkan *hot crack* (Scott, 2001). *Preheat* pada paduan tembaga akan mengurangi kebutuhan *heat input* pengelasan yang diperlukan untuk fusi yang baik. Pemilihan *temperature Preheat* tergantung pada proses pengelasan, paduan yang dilas, ketebalan logam dasar, gas pelindung yang digunakan dan massa keseluruhan dari sambungan las, dapat dilihat pada Tabel 2.13. Pengelasan untuk material yang lebih tipis membutuhkan *temperature Preheat* yang lebih rendah dibandingkan dengan bagian yang lebih tebal. Penggunaan proses pengelasan berenergi tinggi umumnya membutuhkan *Preheat* yang lebih rendah daripada proses pengelasan berenergi tinggi, contohnya proses las GMAW membutuhkan *temperature preheat* yang lebih rendah daripada proses las GTAW atau OAW. Ketika logam dasar di sekitar sambungan harus dipanaskan secara merata hingga suhu yang ditentukan, suhu tersebut harus dipertahankan hingga pengelasan sambungan selesai. Jika pengelasan terganggu, area sambungan harus dipanaskan terlebih dahulu sebelum pengelasan dilanjutkan (O'Brien, 2001).

Tabel 2. 13 Pemilihan Proses Penyambungan Tembaga dan Paduan Tembaga

<i>Welding Process</i>	<i>Application</i>	<i>Preheating</i>	<i>Technological characteristic</i>
<i>Manual Arc Welding</i>	<i>Less widely spread</i>	<i>Required, max. 500 °C</i>	<i>Filler metal not standardised, limited available, low heat capacity</i>
<i>MIG Welding</i>	<i>widely spread</i>	<i>Required, max. 600 °C</i>	<i>Shielding gas required, high draft sensibility, high deposition rates</i>
<i>TIG Welding</i>	<i>Very widely spread</i>	<i>Required, 300 to 600 °C</i>	<i>Shielding gas required, high draft sensibility, flux on weld flanks useful</i>

Sumber: SLV, 2015

Selain itu, *preheat* memiliki efek yang sangat signifikan terhadap metalografi dari hasil pengelasan. Pada penelitian yang dilakukan oleh (Nurfian, 2025) memperlihatkan bahwa hasil dari pengujian XRD

diketahui bahwa pada variabel *no preheat* terdapat unsur yang intensitasnya paling tinggi yaitu *Copper Phospide* (Cu_3P) dan *Copper (I) Oxide* (Cu_2O). Sedangkan pada variabel *preheat* 300°C, 400°C, 500°C intensitas paling tinggi yaitu *Copper Phospide* (Cu_3P) yang dapat meningkatkan kekerasan hasil pengelasan.

Selain daripada itu, *preheat* juga mempengaruhi hasil kekerasan pada *weld metal*, HAZ, dan *base metal*. Hasil dari pengujian *hardness* diketahui bahwa spesimen dengan variasi *no preheat* pada daerah *weld metal* dan memiliki kekerasan terendah sebesar 34.55 kgf/mm². Sedangkan nilai kekerasan paling tinggi terjadi pada variabel *preheat* 400°C di daerah *base metal pipe* dan memiliki kekerasan sebesar 55.21 kgf/mm² hal ini sesuai dengan yang disajikan pada Gambar 2.20.



Gambar 2. 20 Distribusi *Hardness* pada Variasi *No Preheat*, *Preheat* 300°C, 400°C dan 500°C (Nurfian, 2025)

2.5 Pengujian

Pengujian yang dilakukan pada penelitian ini mencakup uji visual, *penetrant*, metalografi, makrografi, uji tarik, *microhardness*, dan laju korosi dengan metode *weight loss*. Seluruh pengujian dan alurnya akan dijelaskan berikut.

2.5.1 Uji visual

Uji visual merupakan salah satu jenis pengujian tidak merusak (*Non Destructive Test*) yang harus dilakukan terlebih dahulu sebelum melakukan pengujian tidak merusak lainnya. Pengujian visual merupakan suatu proses inspeksi pada permukaan pengelasan secara

langsung baik menggunakan mata telanjang atau menggunakan alat bantu optik seperti kaca pembesar, boroskop dan kamera digital yang berfungsi untuk mendeteksi cacat las seperti retak, *porosity*, *undercut*, *overlap*, dan lain-lain. Pengujian visual dapat dilakukan sebelum pengelasan / *fit-up* proses, selama proses pengelasan dan setelah proses pengelasan. Pengujian visual sebelum pengelasan dapat dilakukan untuk memastikan area las bebas kotoran, minyak dan kontaminasi lainnya. Proses *fit up* seperti memeriksa jenis logam dasar, bentuk sambungan juga termasuk uji visual sebelum pengelasan. Saat proses pengelasan dapat juga dilakukan uji visual berupa pengecekan terhadap parameter pengelasan yang digunakan sudah sesuai dengan *welding procedure specification* (WPS) dan setelah proses pengelasan uji visual digunakan untuk mengevaluasi hasil akhir pengelasan dan melihat, mengukur adanya cacat las yang terjadi. Intensitas Cahaya merupakan syarat penting untuk uji visual, dan telah ditentukan minimal 500 lux cahaya yang dapat digunakan untuk uji visual. Jika pemeriksaan uji visual tidak dapat dijangkau dengan mata telanjang maka dapat digunakan bantuan optik seperti boroskop untuk mempermudah mengevaluasi hasil pengelasan. Alat bantu pengukur las atau *welding gauge* sangat penting untuk memeriksa hasil dan mengukur cacat las dan geometri las. Gambar untuk *welding gauge* dapat dilihat pada Gambar 2.21 berikut.



Gambar 2. 21 *Welding Gauge* (SLV, 2015).

2.5.2 Uji *penetrant*

Penetrant Test merupakan salah satu metode uji tidak merusak / *Non Destructive Test* yang digunakan untuk mendeteksi cacat permukaan

yang tidak dapat terlihat secara mata telanjang / *visual test*. Proses pengujian ini menggunakan prinsip kapilaritas yaitu cairan dapat meresap masuk ke retakan atau celah kecil suatu benda yang bahkan dapat melawan gravitasi. Ada beberapa jenis *penetrant test* berdasarkan kondisi pencahayaannya, yaitu :

1. *Visible Dye Penetrant*
2. *Fluorescent Penetrant*
3. *Dual mode Penetrant*

Visible Dye Penetrant merupakan metode yang paling umum digunakan, dan pencahayaannya dapat menggunakan cahaya putih biasa. Cairan *penetrant* yang digunakan berwarna merah terang atau warna mencolok lain nya. Kelebihan dari metode ini adalah dapat diaplikasikan di lapangan dan tidak memerlukan peralatan khusus seperti lampu UV (Ultra Violet), sedangkan kekurangan dari metode ini sensitivitasnya lebih rendah daripada metode lainnya dan tidak efektif untuk mendeteksi cacat yang sangat kecil. Metode *Fluorescent Penetrant* yaitu metode yang menggunakan sinar ultraviolet untuk pencahayaannya dan cairannya menggunakan zat fluoresen yang dapat bersinar di bawah sinar ultraviolet. Kelebihan dari metode ini yaitu sensitivitasnya yang tinggi sehingga dapat mendeteksi cacat yang sangat kecil dan metode ini banyak digunakan di industri penerbangan dan otomotif. Metode *Dual Mode Penetrant* yaitu cairan *penetrant* yang dapat digunakan di bawah sinar biasa dan di bawah sinar ultraviolet sehingga kelebihanannya dapat diaplikasikan di berbagai macam kondisi dan praktis untuk inspeksi di lapangan, namun metode ini jarang digunakan karena harganya yang cukup mahal dibanding yang lainnya. Contoh hasil pengujian *penetrant test* dapat dilihat pada Gambar 2.22 di bawah ini.



Gambar 2. 22 Indikasi pada *Penetrant Test* (SLV, 2015).

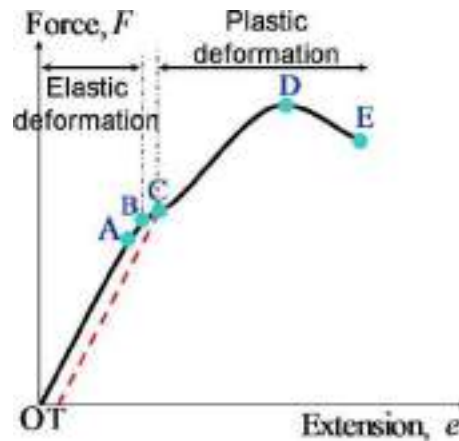
2.5.3 Uji tarik

Pengujian tarik banyak dilakukan untuk melengkapi informasi rancangan dasar kekuatan suatu bahan dan sebagai data pendukung bagi spesifikasi bahan. Kekuatan (*strength*) menyatakan kemampuan bahan untuk menerima tegangan tanpa menyebabkan bahan menjadi patah. Kekuatan ini ada beberapa macam, tergantung pada jenis beban yang bekerja, yaitu kekuatan tarik, kekuatan geser, kekuatan tekan, kekuatan torsi dan kekuatan lengkung. Uji tarik adalah suatu metode yang digunakan untuk menguji kekuatan (*tensile strength*) suatu bahan/material dengan cara memberikan beban (gaya statis) yang sesumbu dan diberikan secara lambat ataupun cepat. Didapatkan hasil sifat mekanik dari pengujian ini berupa kekuatan dan elastisitas dari material. Nilai kekuatan dan elastisitas dari material uji dapat dilihat dari kurva hasil uji tarik. Selain kekuatan dan elastisitas, sifat lain yang dapat diketahui adalah sebagai berikut (Munir dkk., 2019) :

1. Kekuatan luluh dari material
2. Keuletan dari material
3. Kelentingan dari suatu material

Pada pengujian tarik spesimen diberi beban uji aksial yang semakin besar secara kontinyu. Sebagai akibat pembebanan aksial tersebut, spesimen mengalami perubahan panjang. Perubahan beban (P) dan perubahan panjang (ΔL) tercatat pada mesin uji tarik berupa grafik, yang merupakan fungsi beban dan pertambahan panjang dan

disebut sebagai grafik $P - \Delta L$ dan kemudian dijadikan grafik *Stress-Strain* (Grafik $\sigma - \varepsilon$) yang menggambarkan sifat bahan secara umum seperti pada Gambar 2. 23.



Gambar 2. 23 Grafik Hasil Pengujian Tarik (Munir dkk., 2019)

Keterangan :

A = Titik proporsionalitas

B = Titik elastis

C = Titik *yield*

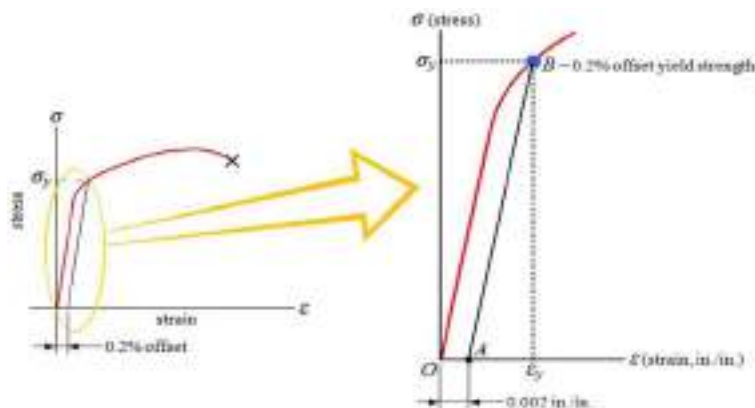
D = Titik maksimum

E = Titik patah

Dari Gambar 2.23 di atas tampak bahwa sampai titik A perpanjangan sebanding dengan pertambahan beban. Pada daerah inilah berlaku hukum Hooke, sedangkan titik C merupakan batas berlakunya hukum tersebut. Oleh karena itu titik A disebut juga batas proporsional. Sedikit di atas titik A terdapat titik B yang merupakan batas elastis di mana bila beban dihilangkan maka belum terjadi pertambahan panjang permanen dan spesimen kembali ke panjang semula. Daerah di bawah titik B disebut daerah elastis. Sedangkan di atasnya disebut daerah plastis (Munir dkk., 2019).

Di atas titik B terdapat titik C yang merupakan titik *yield* (luluh) yakni di mana logam mengalami pertambahan panjang tanpa pertambahan beban yang berarti. Dengan kata lain titik *yield* merupakan keadaan di mana spesimen terdeformasi dengan beban

minimum. Deformasi yang di mulai dari titik C ini bersifat permanen sehingga bila beban dihilangkan masih tersisa deformasi yang berupa pertambahan panjang yang di sebut deformasi plastis. Pada kenyataannya karena perbedaan antara ketiga titik A, B dan C sangat kecil maka untuk perhitungan teknik sering kali keberadaan ketiga titik tersebut cukup diwakili dengan titik C saja. Dalam kurva titik *yield* ditunjukkan pada bagian kurva yang mendatar atau beban relatif tetap. Penampakan titik C ini tidak sama untuk semua logam. Pada material yang ulet seperti besi murni dan baja karbon rendah, titik C tampak sangat jelas. Namun pada umumnya penampakan titik C tidak tampak jelas. Untuk kasus seperti ini cara menentukan titik y dengan menggunakan metode *offset*. Metode *offset* dilakukan dengan cara menarik garis lurus yang sejajar dengan garis miring pada daerah proporsional dengan jarak 0,2% dari regangan maksimal. Titik *yield* didapat pada perpotongan garis tersebut dengan kurva seperti ditunjukkan pada Gambar 2.24



Gambar 2. 24. Metode Offset untuk Menentukan Titik Yield (Munir dkk., 2019)

Adapun mesin yang digunakan untuk pengujian tarik material dapat dilihat pada Gambar 2.25.

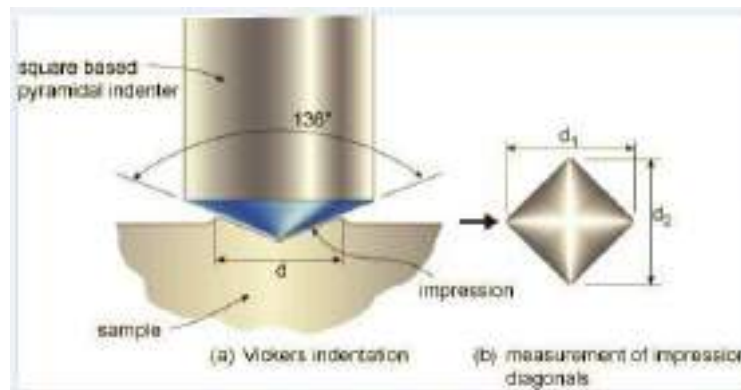


Gambar 2. 25 Mesin Uji Tarik (Munir dkk., 2019)

2.5.4 Uji kekerasan

Kekerasan adalah ukuran ketahanan material terhadap deformasi plastik lokal. Selama bertahun-tahun, beberapa teknik pengujian kekerasan (seperti *Brinell*, *Vickers*, *Knoop*, dan *Rockwell*) telah dikembangkan, dan masing-masing memiliki skalanya sendiri. Namun, prinsip dasar untuk mengukur kekerasan adalah dengan memaksa indenter ke permukaan yang akan diuji dalam kondisi beban yang terkendali. Semakin besar lekukan, semakin lunak material tersebut. Kedalaman dan ukuran lekukan kemudian diubah menjadi angka kekerasan (Farelo dkk., 2022)

Metode *Vickers* sebagai pengujian kekerasan material dilakukan dengan cara menekan material atau spesimen uji. Alat ini memakai indenter piramidada intan yang berbentuk bujur sangkar untuk membuat jejak pada material dengan beban tertentu. Besar sudut antar permukaan-permukaan piramida yang saling berhadapan adalah 136° . Penekanan dengan indenter akan menghasilkan suatu jejak atau lekukan pada permukaan material uji. Gambar 2.26 merupakan skema pengujian kekerasan *vickers*.



Gambar 2. 26 Skema Pengujian Kekerasan *Vickers* (Munir dkk., 2019)

Adapun mesin yang digunakan dalam pengujian kekerasan *vickers* memiliki bentuk seperti pada Gambar 2.27, pada mesin ini beban yang dipakai dapat diatur sesuai kebutuhan dan waktu penetrasi indenter juga dapat ditentukan, jika pengujian *microhardness* maka beban yang diberikan lebih kecil dari pada pengujian *hardness* biasa.



Gambar 2. 27 Mesin Uji *Vickers* (Munir dkk., 2019)

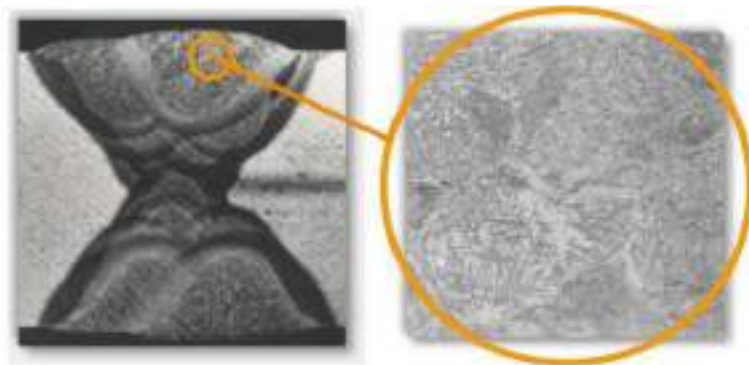
2.5.5 Uji metalografi

Metalografi merupakan perpaduan ilmu dan seni yang mempelajari tentang struktur mikroskopis logam dan paduan menggunakan mikroskop optik, mikroskop elektron atau jenis mikroskop lainnya. Kinerja dan sifat material terutama sifat mekanik logam ditentukan oleh struktur mikro, dengan menganalisis struktur mikro material maka kinerja dan keandalan saat digunakan dapat dipahami dengan lebih baik. Metalografi digunakan dibidang pengembangan bahan, inspeksi, produksi, manufaktur, dan untuk analisis kegagalan. Analisis metalografi atau mikrostruktur mencakup, tetapi tidak terbatas pada, jenis analisis berikut;

1. *Grain size* (ASTM E112, E930, E1181)
2. Analisis fasa (ASTM E566)
3. *Intergranular corrosion attack*
4. *Coating thickness* (ASTM B487)
5. *Inclusion size, shape and distribution* (ASTM E454)
6. *Weld and Heat Affected Zone*
7. *Carburizing, Nitriding thickness*
8. *Decarburization* (ASTM E1077)
9. *micro crack and porosity*

untuk material logam dan keramik *grain size* adalah yang paling sering dianalisis saat melakukan metalografi karena secara langsung berhubungan dengan sifat mekanik logam. Pengukuran *grain size* dapat dinyatakan dengan jumlah *grain* per unit area/volume dan *average* diameter atau *grain size number*. Penentuan *grain size number* dapat dihitung atau dibandingkan dengan *standarized grain size chart*. Standard ISO 17639 ada 2 istilah pengujian, yaitu *macroscopic examination* dan *microscopic examination*.

Macroscopic examination didefinisikan sebagai pengujian dengan mata telanjang atau dengan pembesaran rendah biasanya kurang dari x 50 dengan atau tanpa proses etsa. *Microscopic examination* didefinisikan sebagai pengujian menggunakan mikroskop dengan pembesaran x 50 sampai dengan x 500 dengan atau tanpa proses etsa. Perbedaan antara uji *macro* dan *micro* secara detail dapat dilihat pada Gambar 2.28 di bawah ini,



Gambar 2. 28 Perbedaan Pengamatan Uji *Macro* dan *Micro* (Munir dkk., 2019)

Pada pengujian makro dan mikro benda uji harus di poles dengan mesin poles dan untuk hasil evaluasi pengujian makro hanya menggunakan mata atau bantuan kamera, sedangkan untuk pengujian mikro harus menggunakan mikroskop yang dapat diatur pembesarannya, seperti pada Gambar 2.29



Gambar 2. 29 *Microscope Optic* (Munir dkk., 2019)

2.5.6 Uji laju korosi

Pengujian laju korosi dengan metode *immersion* merupakan salah satu metode laboratorium yang umum digunakan untuk mengevaluasi ketahanan korosi logam melalui pengukuran kehilangan massa setelah material terpapar lingkungan korosif selama periode tertentu. Prosedur ini mencakup tahapan persiapan spesimen, pembersihan produk korosi setelah pengujian, serta evaluasi kerusakan yang terjadi pada material. Penekanan utama metode ini adalah memperoleh nilai kehilangan massa yang merepresentasikan degradasi logam akibat proses korosi sehingga dapat digunakan untuk menentukan tingkat keparahan serangan korosi pada material yang diuji.

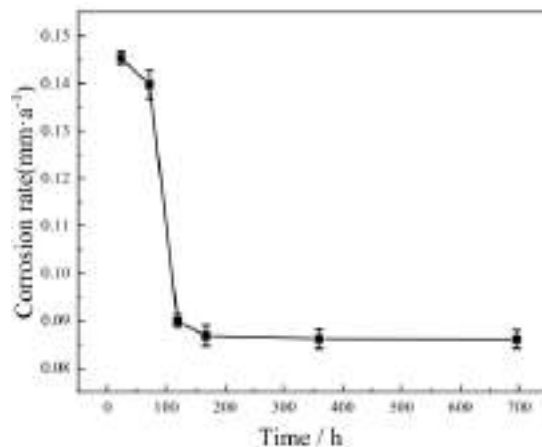
Prinsip dasar pengujian *immersion* didasarkan pada penentuan laju korosi rata-rata melalui hubungan antara kehilangan massa, luas permukaan spesimen yang terpapar, waktu paparan, dan densitas material. Laju korosi dihitung menggunakan persamaan umum yang melibatkan konstanta konversi satuan sehingga hasil dapat dinyatakan dalam berbagai bentuk, seperti mm/tahun atau *mils/year*. Namun

demikian, laju korosi tidak selalu konstan terhadap waktu karena mekanisme korosi dapat berubah selama paparan, sehingga interpretasi hasil harus mempertimbangkan kemungkinan variasi kinetika korosi sepanjang durasi pengujian.

Keakuratan hasil pengujian sangat dipengaruhi oleh prosedur persiapan dan pembersihan spesimen. Spesimen harus dibersihkan dari minyak, oksida, dan kontaminan sebelum pengujian, kemudian setelah paparan produk korosi harus dihilangkan dengan metode mekanik, kimia, atau elektrolitik yang mampu mengangkat produk korosi tanpa melarutkan logam dasar secara signifikan. Penggunaan bahan kimia dengan kemurnian reagen serta air tipe reagen juga diperlukan untuk menjaga ketelitian pengukuran kehilangan massa dan meminimalkan kesalahan akibat proses pembersihan.

Selain kehilangan massa rata-rata, evaluasi kerusakan korosi juga dapat dilakukan melalui pengamatan *pitting*, perubahan sifat mekanik, perubahan konduktivitas listrik, maupun pemeriksaan metalografi penampang. Pendekatan ini penting karena korosi lokal seperti *pitting* atau korosi celah dapat menyebabkan penetrasi yang lebih besar dibandingkan nilai rata-rata yang dihitung dari kehilangan massa. Oleh sebab itu, pelaporan hasil pengujian harus mencakup kondisi spesimen, metode pembersihan, serta parameter evaluasi korosi agar interpretasi ketahanan korosi material menjadi lebih komprehensif (ASTM G31 – 12a, 2012).

Hasil pengujian *weight loss* menunjukkan tembaga C71500 di lingkungan laut yang tercemar jauh lebih tinggi seiring bertambahnya waktu perendaman, adanya lapisan oksida yang terbentuk sebagai pelindungan dan cenderung stabil seiring waktu perendaman. Hal ini dapat dibuktikan pada Gambar 2.30 di bawah ini.



Gambar 2. 30 Laju Korosi Tembaga C71500 setelah *Immersion* (Gao & Liu, 2022a)

2.6 Penelitian Sebelumnya

Penelitian terdahulu menunjukkan parameter pengelasan GTAW pada Cu-DHP, khususnya arus dan *preheat*, memengaruhi sifat mekanik dan mikrostruktur. Pada Tabel 2.14 akan menjelaskan hasil dari penelitian terdahulu yang terkait dengan pengelasan material tembaga.

Tabel 2. 14 Ringkasan Jurnal

Referensi	Objek Pengamatan	Metode	Hasil
Azwinur, Mukhsinun Hadi Kusuma, Usman, Surya Dharma, Akhyar (2025)	<i>Effects Of Heat input On Mechanical Properties, Microstructures And Termal Conductivity Of Copper Alloy In Gas Tungsten Arc Welding Technology</i>	Metode yang digunakan adalah pengujian tarik, <i>metallography</i> , <i>hardness test</i> , dan <i>termal conductivity measurement</i> .	Didapatkan hasil kuat tarik paling tinggi pada <i>heat input</i> paling tinggi (1,2 kJ/mm) yaitu 18,3 kgf/mm ² . Konduktivitas termal ikut menurun seiring naiknya ampere pengelasan. Sedangkan, nilai <i>hardness test</i> hasilnya merata pada <i>weld metal</i>
Azwinur, M. Hadi Kusuma, Usman, Surya Dharma (2024)	<i>The Effect Of TIG Welding Technology Parameters On The Weld Quality Of Copper Material Joints For Heat Pipe Applications</i>	Metode yang dilakukan adalah pengujian tarik, <i>hardness test</i> , dan <i>strain test</i>	Hasil pengujian tarik dan <i>hardness test</i> menunjukkan bahwa pemilihan <i>filler metal</i> dan arus pengelasan berperan penting dalam hasil kuat tarik dan hasil kekerasan, setiap jenis <i>filler</i> bereaksi berbeda terhadap kuat arus.
Xin Gao and Ming Liu (2022)	<i>Corrosion Behavior of High-Strength C71500 Copper-Nickel Alloy in Simulated Seawater with High Concentration of Sulfide</i>	Metode yang digunakan adalah <i>immersion test</i> , <i>Electrochemical Measurement</i> , <i>surface analysis</i> , dan mikrostruktur	Hasil pengujian <i>weight loss</i> menunjukkan tembaga C71500 di lingkungan laut yang tercemar jauh lebih tinggi seiring bertambahnya waktu perendaman, adanya lapisan oksida yang terbentuk sebagai pelindungan dan cenderung stabil seiring waktu perendaman.

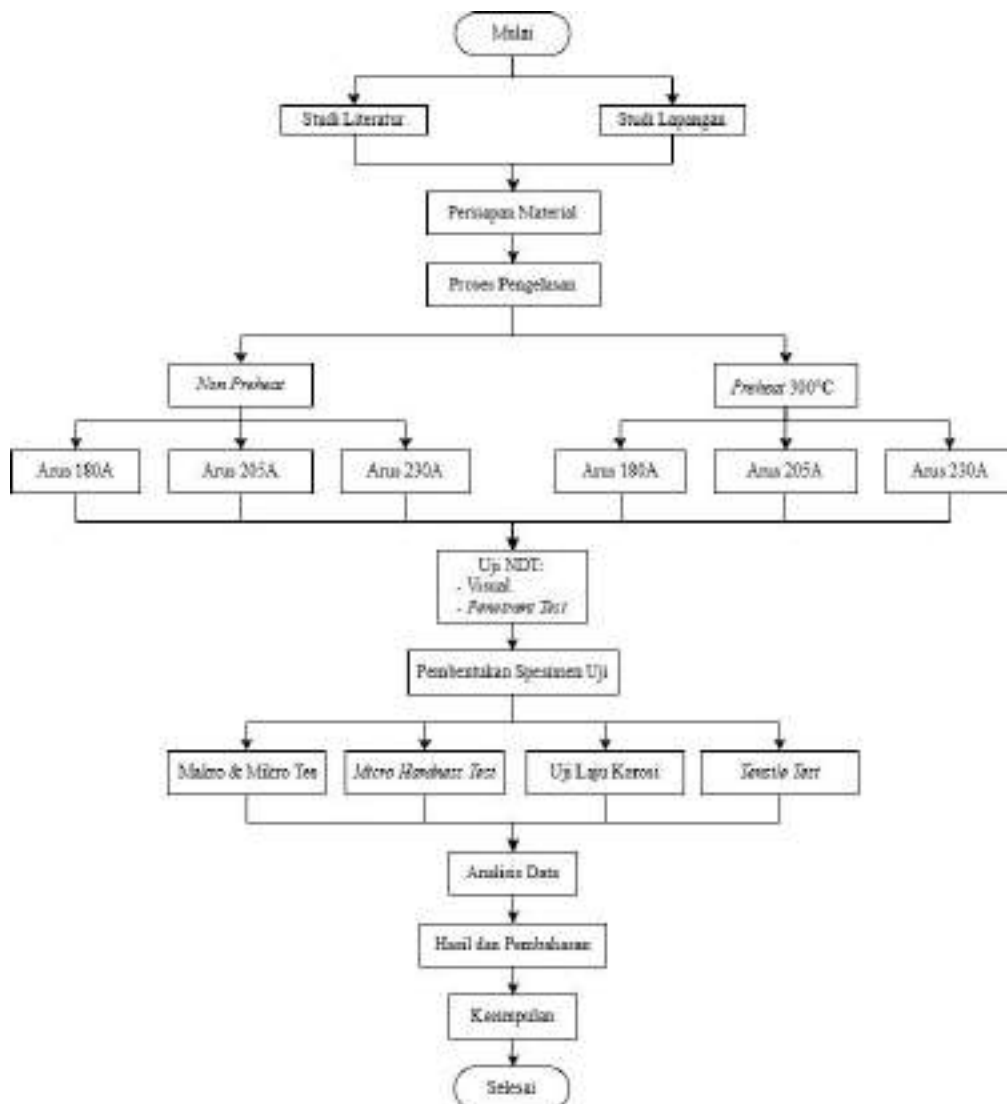
Referensi	Objek Pengamatan	Metode	Hasil
Gaurav Dak, Jaydeep Joshi, Ashish Yadav, Arun Chakraborty, Navneet Khanna (2020)	<i>Autogenous Welding Of Copper Pipe Using Orbital TIG Welding Technique For Application As High Vacuum Boundary Parts Of Nuclear Fusion Devices</i>	Metode pengujian yang dilakukan meliputi, <i>X-ray examination, metallography, tensile test, dan hardness test.</i>	Didapatkan hasil bahwa kuat tarik maksimum yang tertinggi diperoleh pada proses las LBW sedangkan untuk OTIG, <i>heat input</i> terendah memiliki kuat tarik tertinggi. Nilai kekerasan dari <i>center weld metal</i> menjauh ke <i>base metal</i> menunjukkan ketidakstabilan nilai karena grafik yang naik turun. <i>Heat input</i> juga mempengaruhi kedalaman fusi hasil OTIG
M. Essam El-Rafey, Ali El-Ashram, Ismael M. Albadrany & Eslam Syala (2025)	<i>Characterization Of Joining Copper Rods By Upset Technique And Investigating The Effect Of Preheat Treatment On The Weld Characteristics</i>	Metode pengujian yang dilakukan adalah uji tarik, <i>drawing test</i> , pengukuran konduktivitas listrik, dan karakteristik metalurgi	Hasil uji tarik menunjukan nilai kuat tarik paling tinggi diperoleh pada <i>heat input</i> terbesar, nilai kuat tarik terkecil diperoleh pada <i>heat input</i> rendah. <i>Preheat 500°C</i> menyebabkan penurunan kuat Tarik dan <i>elongation</i> . Konduktivitas listrik menurun seiring berkurangnya <i>heat input</i> .
Ekky Chandra Nurfian (2025)	Pengaruh <i>Preheat</i> Pada Pengelasan GTAW Menggunakan Material Cu-DHP Terhadap Kekuatan Sambungan, Nilai Kekerasan Dan Struktur Mikro	Metode yang digunakan meliputi observasi <i>metallography</i> , pengujian <i>hardness</i> , <i>fracture test</i> , serta simulasi <i>ansys</i>	Hasil dari pengujian <i>fillet break test</i> terlihat sambungan tanpa <i>preheat</i> tidak terjadi fusi antara weld metal dan base metal, hasil makrografi menunjukan terlihat pengaruh <i>preheat</i> dan variasi <i>temperature preheat</i> , variasi <i>preheat</i> memperbesar ukuran butir pada hasil mikro. Nilai kekerasan terendah pada spesimen tanpa <i>preheat</i> sedangkan tertinggi pada <i>preheat 400°C</i>
Moch. Yusril Ihza Mahendra (2019)	Analisis Variasi Suhu <i>Preheat</i> Pada Sambungan Las GTAW Material Cu-DHP Terhadap Nilai Kekerasan Dan Struktur Mikro	Metode yang digunakan adalah pengujian mikro dan makro, serta pengujian <i>hardness test</i>	Hasil pengujian <i>hardness</i> yang diperoleh adalah, variasi <i>preheat 150°C</i> memiliki nilai kekerasan tertinggi, sedangkan kekerasan terendah pada <i>preheat 500°C</i> . Didapatkan hasil pengujian makro bahwa <i>preheat</i> yang semakin tinggi akan menghasilkan penetrasi yang dalam

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir

Di bawah ini merupakan proses tahapan dalam pengerjaan tugas akhir yang dapat dilihat pada diagram alir Gambar 3.1



Gambar 3. 1 Diagram Alir

3.2 Studi Literatur

Studi literatur yang dilakukan dalam penelitian ini bertujuan untuk mengumpulkan informasi dari berbagai referensi, seperti penelitian

sebelumnya, jurnal ilmiah, standar teknik, modul pembelajaran, artikel, dan sumber *online* yang relevan dengan topik pembahasan. Fokus utama dari studi literatur ini adalah untuk memperkuat landasan teori serta memahami hasil riset lain mengenai sifat-sifat tembaga dan paduannya, terutama Cu-DHP (*deoxidised high phosphorus copper*) yang memiliki konduktivitas yang tinggi dan stabilitas mikrostruktur yang baik. Dalam konteks penelitian ini, titik berat diberikan pada pengaruh variasi kuat arus las dan *preheat* sebagai strategi untuk mengatasi tantangan konduktivitas termal yang tinggi pada material tembaga termasuk bagaimana kedua parameter ini berdampak pada hasil pengelasan.

Selain membahas dasar teori dan aspek teknis pengelasan GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*), penelitian ini juga meliputi peninjauan terhadap metode pengujian sifat mekanik, pemeriksaan mikrostruktur (*metallography*), dan karakterisasi fenomena korosi. Analisis mikrostruktur di sini bertujuan untuk mengetahui perubahan yang terjadi pada tembaga setelah proses pengelasan, seperti distribusi fase dan adanya cacat mikro yang mempengaruhi kekuatan dan kekerasan material secara keseluruhan. Tak hanya itu, observasi makrostruktur juga dilakukan untuk menilai *integritas* sambungan, meliputi aspek penetrasi, bentuk hasil las, dan adanya cacat visual untuk memastikan kualitas pengelasan.

Dengan pendekatan ini, penelitian diharapkan memberi wawasan lebih mendalam mengenai pengaruh kuat arus pengelasan dan *preheat* terhadap sifat mekanik, karakteristik struktur mikro, serta ketahanan korosi pada Cu-DHP, sehingga hasilnya dapat menjadi referensi teknik dan akademis dalam proses pengelasan material tembaga yang berkualitas tinggi.

3.3 Studi Lapangan

Penelitian ini diawali dengan studi lapangan yang dilakukan secara langsung di PT. X yang berlokasi di Kabupaten Pasuruan, Jawa Timur. Hasil pengamatan di lapangan menunjukkan bahwa kuat arus merupakan parameter yang sangat menentukan pada proses pengelasan GTAW material Cu-DHP karena berpengaruh langsung terhadap kualitas sambungan las. Dalam praktik yang diterapkan di lapangan, pengelasan dilakukan tanpa pemanasan awal atau

preheat, meskipun material tembaga dikenal memiliki konduktivitas termal yang tinggi. Kondisi ini mendorong perlunya evaluasi lebih lanjut mengenai perbedaan karakteristik hasil las apabila pengelasan dilakukan dengan arus relatif kecil disertai *preheat* dibandingkan dengan penggunaan arus besar tanpa *preheat*. Tujuan utama dari kajian ini adalah mengoptimalkan parameter pengelasan yang digunakan di lapangan guna meminimalkan potensi cacat las yang muncul akibat cepatnya rambatan panas pada tembaga.

Penelitian sebelumnya telah membahas pengaruh *preheat* pada pengelasan Cu-DHP, namun dilakukan dengan kuat arus yang dijaga konstan dan belum disertai pengujian tarik untuk mengevaluasi kekuatan mekanik sambungan las. Oleh karena itu, penelitian ini dikembangkan dengan menambahkan variasi kuat arus pada kondisi dengan *preheat* dan tanpa *preheat*. Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai pengaruh kombinasi parameter tersebut terhadap sifat mekanik, karakteristik metalografi, serta laju korosi sambungan las Cu-DHP.

3.4 Persiapan Spesimen dan Alat

3.4.1 Spesifikasi material

Pada penelitian ini material yang digunakan adalah Cu-DHP (*deoxidised high phosphorus copper*) dengan UNS 12200 berbentuk pipa. Tipe material yang digunakan adalah Cu-DHP (R250) dengan *mechanical properties* seperti pada Tabel 3.1

Tabel 3. 1 *Mechanical Properties*

<i>Designation Material</i>			<i>Tensile Strength</i> (N/mm ²)	<i>Yield Strength</i> (N/mm ²)		<i>Elongation</i>
<i>Symbol</i>	<i>Number</i>	<i>Condition</i>	<i>Min.</i>	<i>Min.</i>	<i>Max.</i>	<i>Min.</i>
Cu-DHP	CW024A	R250	250	180	-	30

Sumber: BS EN 12449, 2023

3.4.2 Spesifikasi *filler metal*

Filler metal yang digunakan dalam penelitian ini adalah jenis *solid wire* dan *rods* dengan kode *numerical* Cu 1897 dengan *symbol chemical* CuAg1 dan termasuk pada *copper low alloyed filler metal* (BS EN ISO 24373, 2018). Komposisi kimia *filler* dapat dilihat pada Tabel 3.2

Tabel 3. 2 *Symbol for the Chemical Composition of Solid Wires and Rods*

Komposisi Kimia <i>Filler</i> CuAg1		
<i>Weight Percent (%)</i>	Unsur	<i>Value</i>
	Cu	99,5 <i>incl</i> Ag
	Al	0,01
	Fe	0,05
	Mn	0,2
	Ni	0,3
	P	0,01-0,05
	Pb	0,01
	Si	0,1
	As	0,05
	Ag	0,8-1,2
	<i>Others</i>	0,1

Sumber: BS EN ISO 24373, 2018

Pemilihan *filler metal* CuAg1 berdasarkan dari rekomendasi yang digunakan pada Tabel 3.3 tentang rekomendasi pemilihan *filler metal*.

Tabel 3. 3 Rekomendasi Pemilihan *Filler* Material

<i>Base Material</i>	<i>Weldability</i>	<i>Typical Alloys</i>	<i>Recommended Filler Material</i>
<i>Pure copper</i> (<i>O₂-free, P-deoxidised Cu</i>)	(+)	Cu-OFE, Cu-DLP, Cu-DHP	CuSn1, CuAg1

Sumber: SLV, 2015

Pemilihan CuAg1 sebagai *filler metal* berdasarkan pada sifatnya yang memiliki konduktivitas termal yang lebih tinggi, hal ini dapat dibuktikan pada Gambar 2.5 bahwa penambahan unsur Ag lebih rendah berdampak pada penurunan konduktivitas daripada unsur Sn. CuAg1 juga lebih mudah untuk di *handle* serta memiliki ketahanan korosi yang baik dan *weld* depositnya bebas *porosity* (Certilas, 2022a). Namun karena memiliki konduktivitas termal yang lebih tinggi, *filler metal* CuAg1 membutuhkan daya listrik yang lebih tinggi jika dilakukan pengelasan dibandingkan paduan lainnya (Kreie dkk., 2025).

3.4.3 Dimensi *coupon test*

Spesimen untuk penelitian ini menggunakan pipa Cu-DHP dengan desain sambungan *butt join pipe to pipe*, pemilihan sambungan *butt join* dipilih karena *butt weld* dapat mengkualifikasi PJP dan CJP dan *fillet weld* serta pemilihan posisi 1G karena pengelasan dalam posisi apapun

mengkualifikasi semua posisi (BS EN ISO 15614-6, 2006). Alasan lain adalah untuk mengakomodasi pengujian tarik, hal ini karena dalam penelitian sebelumnya belum pernah dilakukan *tensile test* untuk variasi *preheat*. Detail spesimen dapat dilihat pada Tabel 3.4 dan detail sambungan las dapat dilihat pada Gambar 3.2.

Tabel 3. 4 Spesifikasi *Coupon Test*

Material	Tipe	Bentuk	Thickness	Panjang	Ø OD
Cu-DHP	R250	Pipa	4,8 mm	150 mm	4,8 mm



Gambar 3. 2 Spesifikasi *Test Cupon*

3.4.4 Alat

Dalam penelitian ini alat-alat yang akan digunakan untuk menunjang pengerjaan adalah sebagai berikut:

1. Mesin Las
2. *Tungsten Electrode*
3. Gas Regulator
4. *Nozzle (Cup)*
5. Tabung Gas (Argon dan H_2N_2)
6. *Thermo Gun*
7. Multimeter
8. *Welding Gauge*
9. Gerinda
10. Alat pelindung diri (APD)
11. Mesin Pemotong *Sample*
12. Mesin *polishing*
13. *Etching kit*

14. Mikroskop metalografi
15. *Macro-etching tools*
16. Mesin uji tarik
17. Mesin uji *vickers Hardness*
18. *Caliper*
19. Kamera
20. *Stopwatch*
21. Cairan *Liquid Penetrant*
22. Cairan *Cleaner Remover*
23. Cairan Developer

3.5 Prosedur pengelasan

Prosedur pengelasan merupakan prosedur yang berdasarkan pada WPS yang sudah ter-*qualified* atau sudah lolos semua pengujian sesuai standar ISO 15614-6. Metode pengelasan yang digunakan dalam penelitian ini adalah proses *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW). Proses pengelasan ini akan menggunakan polaritas DCEN (Elektroda Negatif) agar mendapatkan hasil penetrasi las yang dalam. Pengelasan akan menggunakan *filler metal* CuAg1, adanya penambahan Ag pada *filler* untuk meningkatkan kemampuan *weldability*. Elektroda yang digunakan adalah tungsten *lanthanun* dengan kandungan 1.5 % atau dikenal WLa 1.5 dimana elektroda ini mempunyai keunggulan suhu pada elektrodanya lebih rendah sehingga mencegah terjadi pencairan elektroda pada saat pengelasan. *Shielding gas* yang digunakan adalah gas Argon dengan kemurnian 99.9 % dengan *flow rate* 15 liter / menit dan ditambahkan *backing gas* menggunakan gas H_2N_2 dengan kandungan hidrogen 20% dan kandungan nitrogen 80% dan dengan *flow rate* 10 liter / menit. Proses pengelasan ditampilkan pada Gambar 3.3 dan akan mengikuti parameter berikut, pada Tabel 3.5 agar didapat hasil pengelasan yang diinginkan.



Gambar 3. 3 Proses Pengelasan dengan *Pipe Rotating*

Tabel 3. 5 Parameter Pengelasan

Parameter	1	2	3
Kondisi	<i>Preheat dan Non-Preheat</i>		
<i>Interpass</i>	50°C dan 350°C		
Arus (A)	180	205	230
Voltase (V)	17-19	17-19	17-19
<i>Travel speed</i> (mm/menit)	40-55	45-60	50-65
<i>Heat input</i> (kJ/mm)	3,34 – 5,13	3,49 – 5,19	3,61 – 5,24

3.6 Prosedur *Preheat*

Preheat atau pemanasan awal merupakan proses pemanasan yang dilakukan pada sebagian area benda kerja sebelum pelaksanaan pengelasan, dengan tujuan untuk mengurangi perbedaan temperatur antara daerah las dan logam dasar (*base metal*) dan mengimbangi sifat konduktivitas termal yang tinggi pada material, sehingga dapat meminimalkan tegangan termal dan potensi terjadinya cacat las. Proses pemanasan awal ini sangat diperlukan untuk beberapa material sebelum dimulai pengelasan seperti material Cu-DHP. Proses *preheat* akan dilakukan menggunakan *torch* sesuai dengan Gambar 3.4 dengan bahan bakar *acetylene* dan oksigen seperti pada Gambar 3.5 dengan variasi temperatur ruang dan 300°C. Untuk pengecekan temperatur *preheat* akan menggunakan alat *thermo gun*.



Gambar 3. 4 Proses *Preheat*



Gambar 3. 5 Tabung Oksigen dan *Acetylene*

3.7 Pengamatan Visual

Pengujian visual merupakan pengujian yang dilakukan pada hasil pengelasan dengan cara melihat dan mengamati hasil las tersebut secara kasat mata juga dibantu dengan menggunakan alat ukur untuk memastikan agar hasil las sesuai standar dan bebas dari cacat las. Standard *acceptance criteria* dijelaskan dalam (BS EN ISO 10042, 2018) *Quality levels for imperfections*.

3.8 *Penetrant Test*

Liquid Penetrant Test merupakan salah satu jenis *Non Destructive Test* / Uji tidak merusak yang berfungsi untuk mendeteksi cacat yang terjadi pada bagian permukaan benda uji yang tidak dapat dilihat dengan pengujian visual atau *open discontinuity*. Metode pengujian *liquid penetrant* menggunakan prinsip kapilaritas untuk mengetahui letak *discontinuity* yang terjadi. Pengujian ini dilakukan dengan tipe pengujian *visible penetrant* dan dengan metode

solvent removable. Untuk *procedure* dan langkah – langkah pada proses *penetrant test* dilakukan sebagaimana berikut sesuai dengan *standard* (ISO 3452-1, 2021).

a. *Precleaning*

Preclean dilakukan dengan menyemprotkan *cleaner* ke permukaan benda kerja secara langsung untuk menghilangkan kotoran yang menutupi permukaan area benda kerja.

b. Pengeringan

Pengeringan bertujuan memastikan permukaan benda kerja kering setelah *preclean* dan memastikan tidak ada sisa *solvent* pada permukaan yang akan diaplikasikan *penetrant*.

c. Pengecekan Temperatur Permukaan

Sebelum diaplikasikan *penetrant*, benda kerja harus di cek temperatur permukaannya harus berada pada 10 °C – 50 °C.

d. Pengaplikasian *Penetrant*

Proses pengaplikasian ini akan menggunakan kuas dengan cara di oleskan secara merata pada daerah *weld metal*.

e. *Dwell Time*

Setelah *penetrant* diaplikasikan, maka *penetrant* harus ditunggu sekitar 5 menit, seperti pada Gambar 3.6. Waktu tunggu ini dapat dipengaruhi oleh *properties penetrant*, suhu lingkungan dan diskontinuitas yang harus di uji.



Gambar 3. 6 *Dwell Time* Aplikasi Penetrant

f. *Excess Penetrant Removal*

Setelah *penetrant* sudah meresap pada material, maka *penetrant* sisa yang menempel pada permukaan material harus dihilangkan dengan cara

menyemprotkan cairan *solvent* ke majun lalu diusapkan ke permukaan yang terkena cairan *penetrant*.

g. *Excess Penetrant Removal Check*

Selama pembersihan sisa *penetrant* di permukaan material, harus di cek untuk residu *penetrant* yang dapat mengganggu hasil interpretasi.

h. *Developing*

Setelah *penetrant* sisa di permukaan sudah bersih dan sisa *solvent* dari pembersihan sudah kering, selanjutnya mengaplikasikan developer ke seluruh bagian yang di *penetrant* dengan merata dengan cara di *spray*.

i. *Inspection*

Setelah developer kering, maka proses interpretasi dapat dilakukan untuk menentukan mana yang termasuk *defect* dan *discontinuity* berdasarkan *acceptance criteria* (ISO 23277, 2015).

Berikut merupakan syarat keberterimaan *penetrant test* pada Tabel 3.6 berdasarkan (ISO 23277, 2015).

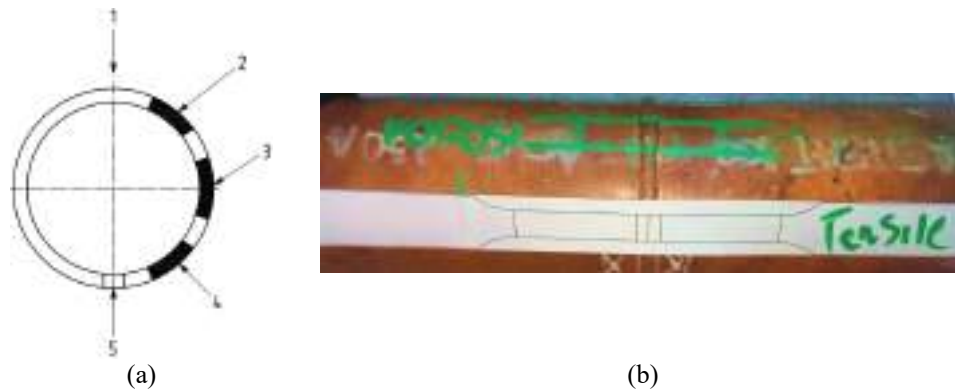
Tabel 3. 6 Syarat Keberteriman untuk Indikasi

Type of indication	Acceptance level ^a		
	1	2	3
Linear indication <i>l</i> = length of indication	$l \leq 2$	$l \leq 4$	$l \leq 8$
Nonlinear indication <i>d</i> = major axis dimension	$d \leq 4$	$d \leq 6$	$d \leq 8$
^a Acceptance levels 2 and 3 can be specified with a suffix, "X", which denotes that all linear indications detected shall be evaluated to level 1. However, the probability of detection of indications smaller than those denoted by the original acceptance level can be low.			

Sumber: ISO 23277, 2015

3.9 Cutting Plan

Setelah dilakukan pengujian visual dan *penetrant test*, tahap selanjutnya adalah persiapan pembentukan spesimen uji sesuai dengan kebutuhan masing-masing pengujian, yaitu *tensile test*, analisis metalografi, dan pengujian laju korosi. Adapun pengambilan dan penentuan *cutting plan* spesimen uji mengacu pada Gambar 3.7 sesuai dengan standar (BS EN ISO 15614-6, 2006).



Gambar 3. 7 *Cutiing Plan* (a) Lokasi Spesimen Uji *Butt Join Pipe* (BS EN ISO 15614-6, 2006) dan (b) Realisasi *Cutting Plan*

Keterangan:

1. Bagian atas untuk *fixed pipe*
2. Spesimen *Tensile Test*
3. Spesimen Tambahan (dapat digunakan untuk spesimen uji laju korosi)
4. Spesimen *Tensile Test*
5. Spesimen *Macro Test*

3.10 Pengujian *Metallography*

Metallografi merupakan perpaduan ilmu dan seni yang mempelajari tentang struktur mikroskopis logam dan paduan menggunakan mikroskop optik, mikroskop elektron atau jenis mikroskop lainnya. Kinerja dan sifat material terutama sifat mekanik logam ditentukan oleh struktur mikro, dengan menganalisis struktur mikro material maka kinerja dan keandalan saat digunakan dapat dipahami dengan lebih baik (Munir dkk., 2019)

Pada penelitian ini menggunakan pengujian *metallography* dengan menggunakan OM (*Optical Microscope*). Analisis *metallography* ini untuk mengetahui geometri dan struktur mikro yang terdapat pada material Cu-DHP (*deoxidised high phosphorus copper*), dimana hasil pengamatan ini digunakan untuk menentukan daerah *Weld Metal* (WM), *Heat Affected Zone* (HAZ), *Fusion Line* (FL) dan *Base Metal* (BM). Dengan menggunakan *Optical Microscope* (OM) analisis *metallography test* ini dibagi menjadi 2 tahapan yaitu secara pengamatan makro agar mendapatkan nilai kedalaman penetrasi las yang dibentuk dan setelah itu dilanjutkan dengan secara mikro untuk

mendapatkan citra butiran yang terbentuk pada geometri las tersebut dengan menggunakan pembesaran 100, 200, dan 500 kali sesuai dengan prosedur (ISO 17639, 2022)

Adapun daerah yang akan diamati sesuai dengan Gambar 3.8 dan proses pengujian pada Gambar 3.9 serta untuk alat dan bahan dan langkah-langkah pengujian struktur mikro sebagai berikut.



Gambar 3. 8 Area Pengujian Mikostruktur



Gambar 3. 9 Proses Uji Struktur Mikro

A. Alat dan bahan uji *Metallography*

1. *Hand grinding machine*
2. *Polishing machine*
3. Kertas gosok
4. Kain Bludru.
5. Larutan etsa
6. Spesimen uji mikrostruktur
7. *Dryer*
8. Pipet

B. Langkah-langkah uji *Metallography*

1. Proses *grinding*.
 - a) Memotong kertas gosok yang telah disediakan sesuai dengan bentuk piringan pada *handgrinding*.
 - b) Menyalakan *polishing machine*.

- c) Membuka kran air dan letakkan tepat di atas piringan.
- d) Melakukan proses *grinding* dengan kertas gosok dari *grit* 200 sampai *grit* 5000.
- e) Melakukan proses penggosokan pada spesimen untuk setiap *grit* dengan 2 posisi berbeda, yaitu vertikal dan horizontal.
- f) Memastikan arah goresan pada permukaan menunjukkan searah.
- g) Setelah proses selesai matikan mesin *polishing*.

2. *Polishing*

- a) Memasang kertas kain wol pada *polishing machine*.
- b) Menyalakan *polishing machine* dan buka katup air.
- c) Meletakkan spesimen uji pada *polisher* dengan diberikan sedikit tekanan.
- d) Mengangkat spesimen dan amati masih ada atau tidak bekas goresan dari proses *grinding* sebelumnya.
- e) Jika *specimen* sudah halus maka permukaan *specimen* akan mengkilap.
- f) Mencuci *specimen* hingga bersih dan keringkan dengan *drayer*.

3. Etsa

- a) Menyiapkan alat yang akan digunakan seperti : pipet, cawan kimia, dan *hair dryer*.
- b) Membuat cairan etsa dengan takaran HNO_3 50 ml dan H_2O 50 ml lalu tuangkan ke cawan kimia (ASTM E340, 2023).
- c) Mengoleskan cairan etsa ke spesimen dengan cairan yang telah disediakan selama beberapa detik kemudian bilas dengan air bersih.
- d) Mengeringkan spesimen dengan *hair dryer*.

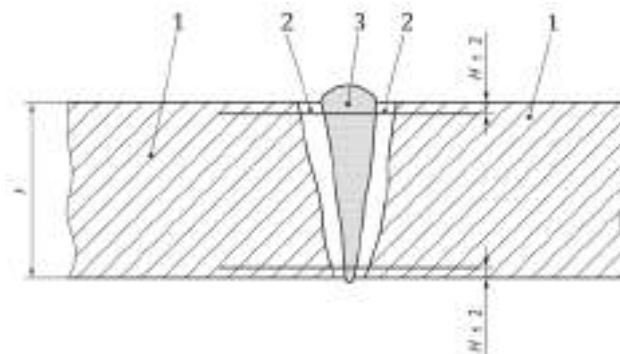
4. Pengamatan

- a) Meletakkan spesimen di bawah mikroskop dan pastikan bahwa permukaan spesimen rata.
- b) Mengatur pembesaran pada mikroskop (100x, 200x, dan 500x).
- c) Mengatur fokus agar mikroskop terlihat dengan jelas.
- d) Mengambil gambar struktur mikro yang tampak pada lensa mikroskop.

e) Melakukan analisa dari gambar struktur mikro yang telah didapat.

3.11 Pengujian *Micro Hardness Test*

Kekerasan (*Hardness*) dapat didefinisikan sebagai kemampuan bahan untuk tahan terhadap penggoresan, pengikisan (abrasi), *indentasi* atau penetrasi. Pengujian *Hardness* dilakukan untuk mengetahui nilai kekerasan dari suatu material pada daerah *Weld Metal* (WM), *Heat Affected Zone* (HAZ), dan *Base Metal* (BM) sesuai pada Gambar 3.10. Pada penelitian ini metode yang digunakan untuk pengujian kekerasan adalah metode *micro hardness vickers* dengan beban 0,1 HV atau 100 gf. Metode ini dipilih karena cocok untuk material tipis dan lunak seperti tembaga, metode *micro hardness* mengartikan penggunaan beban yang lebih kecil daripada pengujian *hardness vickers* biasa, hal ini sesuai dengan Tabel 3.7.



Gambar 3. 10 Pola Indentasi *Microhardness* pada *Butt Welds* (BS EN ISO 9015-2, 2016)

Keterangan:

1. *Base Metal*
2. *Heat Affected Zone* (HAZ)
3. *Weld Metal*

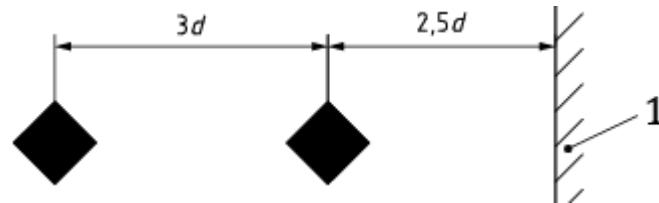
Tabel 3. 7 Range Gaya Uji

Ranges of test force (N)	Hardness symbol	Designation
$F \geq 49,03$	$\geq \text{HV } 5$	<i>Vickers hardness test</i>
$1,961 \leq F < 49,03$	$\text{HV } 0,2 \text{ to } < \text{HV } 5$	<i>Low-force Vickers hardness test</i>
$0,009\,807 \leq F < 1,961$	$\text{HV } 0,001 \text{ to } < \text{HV } 0,2$	<i>Vickers microhardness test</i>

Sumber: ISO 6507-1, 2023

Berdasarkan Gambar 3.10, pengambilan daerah indentasi dibatasi ≤ 2 mm dari permukaan, pengambilan baris dapat dilakukan pada kedua sisi material, namun dalam penelitian ini pengambilan baris akan dilakukan hanya

pada satu sisi saja, hal ini dikarenakan material yang digunakan merupakan *similar join* dan untuk logam seperti aluminium dan tembaga serta paduannya, baris pada daerah *root* untuk *butt weld* tidak selalu diperlukan dan dapat dihilangkan (BS EN ISO 9015-2, 2016). Jumlah indentasi akan menyesuaikan daerah hasil pengelasan dan jarak antar indentasi seperti pada Gambar 3.11 dan Tabel 3.8.



Gambar 3. 11 Jarak Minimum Indentasi *Vickers* (ISO 6507-1, 2023)

Keterangan:

1. Tepi spesimen

Tabel 3. 8 Rekomendasi Jarak Indentasi dari Titik Pusat pada HAZ untuk Indentasi Baris

Vickers hardness symbol	Recommended distance between indentations, L mm ^a	
	Ferrous metals ^b	Aluminium, copper and their alloys
HV 0,1	0,2	0,6 to 2
HV 1	0,5	1,5 to 4
HV 5	0,7	2,5 to 5
^a The distance between centre points shall not be less than the minimum value allowed in ISO 6507-1.		
^b Excluding austenitic steels		

Sumber: BS EN ISO 9015-2, 2016

Adapun alat dan bahan yang digunakan saat pengujian *hardness vickers* adalah :

1. Mesin uji kekerasan *vickers*
2. *Indentor* piramida intan
3. *Grinding machine*
4. Kertas gosok
5. Spesimen yang akan di uji kekerasan
6. Tisu
7. *Liquid etsa*
8. *Polishing machine*

Langkah-langkah pengujian *microhardness vickers* sebagai berikut :

1. Permukaan spesimen dihaluskan dengan menggunakan mesin *polishing* dengan *grit* 120, *grit* 280, *grit* 320, *grit* 500, *grit* 1000, *grit* 1200, dan *grit* 2000
2. Setelah permukaan telah halus, dilakukan *polishing* dengan kain beludru.
3. Mengoleskan cairan etsa HNO_3 .
4. Titik pengujian kekerasan pada *specimen* uji diberi jarak 0,6 – 2 mm setiap titik pengujian.
5. *Setting* beban indenter sebesar $0,001 < 0,2 \text{ kgf}$
6. Spesimen uji diatur dan diletakkan secara tepat sesuai dengan rencana penetrasi yang telah ditentukan.
7. Menggeser *handling* pada penopang spesimen untuk memposisikan lokasi titik pengujian pada spesimen uji.
8. Menekan tombol start untuk memulai penetrasi indenter pada spesimen.
9. Menunggu selama 5 – 15 detik untuk waktu penetrasi.
10. Mengukur diagonal hasil indentasi
11. Hasil pengujian kekerasan akan muncul pada layar, dan mencatat hasil pengujian kekerasan. Berikut proses pengujian pada Gambar 3.12



Gambar 3. 12 Proses *Microhardness Test*

3.12 Pengujian Tarik (*Tensile Test*)

Pada penelitian ini juga menggunakan pengujian tarik yang bertujuan untuk mengetahui kekuatan tarik pada hasil pengelasan. Hal ini karena kekuatan tarik adalah salah satu sifat mekanik yang sangat penting dalam melakukan perancangan konstruksi dan manufaktur. Pengujian tarik dilakukan dengan memberikan beban pada *specimen* uji secara perlahan yang akan

mengakibatkan pertambahan panjang pada *specimen* yang berbanding lurus dengan gaya yang bekerja hingga *specimen* patah. Setelah *specimen* uji patah, alat pengujian tarik akan mengeluarkan grafik dan data kekuatan tarik hasil pengujian *specimen* uji. Spesimen tarik dapat digunakan untuk mengetahui kekuatan tarik lasan, kekuatan luluh, tingkat elastisitas, dan tingkat keuletan material hasil lasan. Persiapan untuk melakukan uji tarik adalah sebagai berikut:

1. Peralatan

- a. Mesin uji tarik
- b. Gerinda tangan
- c. *Marker*
- d. Jangka sorong
- e. Penitik
- f. Palu
- g. Kacamata *safety*

2. Spesimen Uji

Spesimen uji tarik dibentuk sesuai dengan standar (ISO 4136, 2012), dan hasilnya dapat dilihat pada Gambar 3.13 dengan kriteria dimensi pada Tabel 3.9.



Gambar 3. 13 Spesimen Uji Tarik Pipa (ISO 4136, 2012)

Tabel 3. 9 Spesifikasi Dimensi Spesimen Uji Tarik

<i>Denomination</i>		<i>Symbol</i>	<i>Dimensions (mm)</i>
<i>Total Length Of The Test Specimen</i>		L_t	<i>to suit particular testing machine</i>
<i>Width Of Shoulder</i>		B_1	$b + 12$
<i>Width Of The Parallel Length</i>	<i>Plates</i>	b	$12 \text{ for } t_s \leq 2$ $25 \text{ for } t_s > 2$
<i>Denomination</i>		<i>Symbol</i>	<i>Dimensions (mm)</i>
	<i>Pipes</i>	b	$6 \text{ for } D \leq 50$ $12 \text{ for } 50 < D \leq 168,3$ $25 \text{ for } D > 168,3$

Parallel Length ^{a B}	L_c	$\geq L_s + 60$
Radius At Shoulder	R	≥ 25
^a For pressure welding and beam welding (process groups 2, 4, and 5 in accordance with ISO 4063:2009), $L_s = 0$.		
^b For some other metallic materials (e.g. aluminium, copper and their alloys) $L_c \geq L_s + 100$ may be necessary.		

Sumber: ISO 4136, 2012

3.13 Pengujian Korosi

Pada Penelitian ini menggunakan pengujian laju korosi dengan tujuan untuk mengetahui besaran laju korosi pada pengelasan material Cu-DHP (*deoxidised high phosphorus copper*) untuk variasi kuat arus yang dikombinasikan dengan *preheat*. Uji perendaman dilakukan sesuai dengan standar ASTM G31 – 2012a. Ukuran spesimen yang digunakan berdasarkan (ASTM G31 – 12a, 2012), yaitu 20 mm x 50 mm dengan ketebalan 1,6 mm – 4,8 mm seperti pada Gambar 3.14. Waktu pengecekan laju korosi diatur ke 7 durasi 24, 72, 120, 168, 336, 672, dan 720 jam. Berat sampel sebelum dan sesudah pengujian perendaman diukur dengan timbangan elektronik dengan akurasi 0,0001 g (Gao & Liu, 2022a). Langkah-langkah yang dilakukan untuk proses pengujian laju korosi *immersion test* adalah sebagai berikut :

1. Persiapan Spesimen

- Siapkan 6 spesimen Cu-DHP sesuai (ASTM G31 – 12a, 2012).



Gambar 3. 14 Spesimen Uji Laju Korosi *Immersion*

2. Perhitungan Geometri Spesimen

- Hitung luas permukaan seluruh spesimen.

3. Pembuatan Larutan NaCl 3,5 wt.%

- Untuk pengujian hingga 30 hari, rasio minimum yang disukai antara volume larutan uji dan luas permukaan spesimen uji adalah 0,20 mL/mm² (130 mL/in.²).

4. *Setup Immersion*

- Gantung spesimen dan pastikan tidak saling bersentuhan, seperti pada Gambar 3.15.



Gambar 3. 15 Perendaman Spesimen

5. Proses *Immersion*

- Rendam spesimen selama 24–720 jam.

6. Pengangkatan Spesimen

- Angkat spesimen menggunakan sarung tangan atau pinset.

7. Pembilasan Awal

- Bilas dengan aquades

8. *Post-Cleaning*

Celupkan spesimen dalam larutan pembersih yang terdiri dari H_2SO_4 (100 mL) dan aquades (1000 mL) dan diamkan selama 1–3 menit sesuai (ASTM G1-03, 2003). Namun, pembersihan dilakukan hanya setelah 720 jam.

9. Pembilasan Akhir

Bilas dengan aquades untuk menghentikan reaksi asam.

10. Pengeringan

Keringkan spesimen hingga bebas kelembaban.

11. Penimbangan Massa

Catat massa W_0 , W_1 , W_2 , dan seterusnya.

12. Perhitungan Laju Korosi

$$\text{Corrosion rate} = \frac{(K \times W)}{(A \times T \times D)} \quad (3,1)$$

Dimana:

K = Konstanta (mm/years $8,76 \times 10^4$)

T = Waktu paparan dalam jam hingga 0,01 jam terdekat

A = Luas dalam cm^2 hingga mendekati $0,01 \text{ cm}^2$

W = Kehilangan massa, dibulatkan ke 1 mg terdekat
(diperbaiki untuk setiap kehilangan selama pembersihan.

D = *Density* g/cm³,

13. *Re-Immersion*

Masukkan kembali spesimen jika pengujian dilanjutkan.

14. Pelaporan dan Analisis

Susun data dan lakukan analisis.

3.14 Analisis

Analisis penelitian ini dilakukan untuk mengkaji hasil variasi kuat arus dan temperatur *preheat* pada proses pengelasan GTAW terhadap sifat mekanik, mikrostruktur, dan laju korosi material Cu-DHP. Hasil uji tarik dan *microhardness* dianalisis untuk mengetahui perubahan kekuatan dan distribusi kekerasan pada daerah las, HAZ, dan logam induk, sedangkan pengamatan *metallography* digunakan untuk mengevaluasi karakteristik mikrostruktur akibat variasi *input* panas. Selain itu, hasil uji korosi *immersion* dianalisis berdasarkan kehilangan massa dan laju korosi, kemudian dikorelasikan dengan parameter pengelasan dan perubahan mikrostruktur yang terjadi.

3.15 Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan penelitian ini dirumuskan berdasarkan hasil analisis pengaruh variasi kuat arus dan temperatur *preheat* terhadap sifat mekanik, mikrostruktur, dan ketahanan korosi material Cu-DHP hasil pengelasan GTAW. Saran penelitian diarahkan pada pengembangan studi lanjutan dengan variasi parameter pengelasan yang lebih luas atau metode pengujian tambahan untuk memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif terhadap performa sambungan las Cu-DHP.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil *Heat Input*

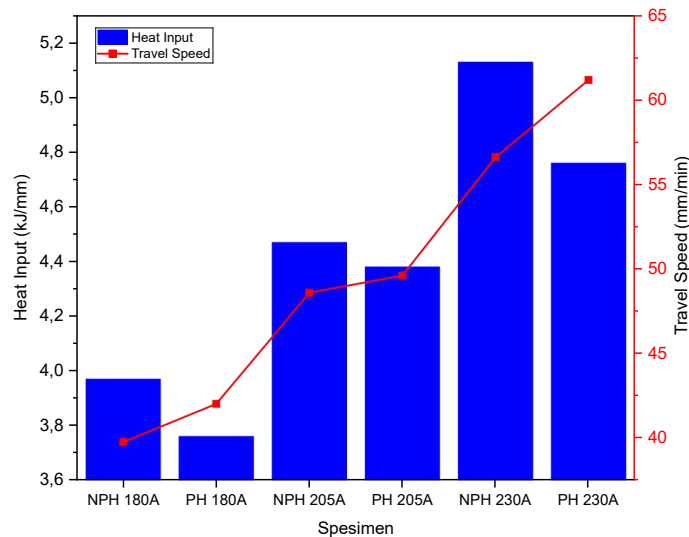
Heat Input merupakan parameter penting yang dihasilkan setelah proses pengelasan dilakukan, *heat input* dapat dihitung dengan persamaan 2,1. Dalam persamaan tersebut *heat input* menghasilkan jumlah energi panas yang diterima per satuan panjang las, besarnya *heat input* dipengaruhi arus, tegangan, dan kecepatan pengelasan. Menurut Kou (2021) Aliran panas mempengaruhi struktur mikro dan sifat pengelasan yang dihasilkan serta tegangan sisa dan distorsi pada benda kerja yang dilas. Hasil *heat input* dari proses pengelasan pada penelitian ini disajikan pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Hasil Perhitungan *Heat Input*

Arus (A)	Voltase (V)	Kondisi	Pass	Waktu (min)	Travel Speed (mm/min)	Heat Input (kJ/mm)	Rata-rata Heat Input (kJ/mm)	Rata-rata Travel Speed (mm/min)
180	14,6	Non-Preheat	Root	07:10	38,95	4,05	3,97	39,75
			Cap	06:53	40,55	3,89		
		Preheat 300°C	Root	06:50	40,85	3,86	3,76	42,01
			Cap	06:28	43,17	3,66		
205	17,6	Non-Preheat	Root	06:02	46,27	4,68	4,47	48,59
			Cap	05:29	50,91	4,25		
		Preheat 300°C	Root	05:56	47,05	4,60	4,38	49,61
			Cap	05:21	52,18	4,15		
230	21	Non-Preheat	Root	05:02	55,46	5,24	5,13	56,61
			Cap	04:50	57,76	5,03		
		Preheat 300°C	Root	04:49	57,96	5,01	4,76	61,19
			Cap	04:20	64,42	4,51		

Tabel 4.1 menyajikan hasil perhitungan *travel speed* dan *heat input* pada setiap variasi arus pengelasan, baik pada kondisi *non-preheat* maupun *preheat* 300°C. Data yang ditampilkan merupakan nilai pada masing-masing *pass* (*root* dan *cap*) beserta nilai rata-ratanya. Secara umum terlihat bahwa perubahan arus pengelasan dan kondisi *preheat* memengaruhi kecepatan pengelasan sehingga

berdampak pada besarnya *heat input* yang diterima material. Untuk memperjelas kecenderungan perubahan tersebut, hubungan antara rata-rata *heat input* dan *travel speed* pada setiap variasi pengelasan disajikan dalam Gambar 4.1.



Gambar 4. 1 Grafik Perbandingan *Heat Input* dan *Travel Speed*

Pada Gambar 4.1 menunjukkan hasil rata-rata nilai *heat input* dan *travel speed* pada semua variabel arus, baik pada kondisi *preheat* dan *non-preheat*. Secara umum, hasil yang diperoleh pada grafik memperlihatkan bahwa kenaikan arus pada proses pengelasan, dapat meningkatkan nilai *heat input* yang diterima material, kenaikan arus ini berbanding lurus pada kenaikan *travel speed* pengelasan. Pada kondisi *preheat*, *heat input* meningkat dari 3,76 kJ/mm pada arus 180A menjadi 4,76 kJ/mm pada arus 230A, sedangkan pada kondisi *non-preheat*, *heat input* meningkat dari 3,97 kJ/mm menjadi 5,13 kJ/mm. Selain itu, pada Gambar 4.1 memperlihatkan hubungan *travel speed* dengan kenaikan arus pengelasan. Pada kondisi *preheat*, *travel speed* dengan arus 180A memiliki kecepatan 42,01 mm/min, dan meningkat pada arus 205A sebesar 49,61 mm/min dan terus naik pada arus 230A bernilai 61,19 mm/min. Sedangkan pada kondisi *non-preheat*, pada arus 180A nilai *travel speed* pengelasan adalah 39,75 mm/min dan meningkat pada arus 205A sebesar 48,59 mm/min dan pada arus 230A menjadi 56,61 mm/min,

Peningkatan *heat input* dapat terjadi karena interaksi antara arus, tegangan, dan *travel speed*. Pada kondisi *preheat*, *heat input* yang dihasilkan

selalu lebih rendah dibandingkan pada kondisi *non-preheat*, hal ini sesuai dengan O'Brien (2001) yang menyatakan bahwa, *preheat* pada tembaga dan paduannya dapat menurunkan *heat input* yang dibutuhkan untuk menghasilkan fusi yang baik. Selain itu, *travel speed* pada kondisi *preheat* selalu lebih tinggi daripada *non-preheat*, hal ini terjadi karena temperatur awal (T_0) material lebih tinggi, sehingga menyebabkan logam dasar lebih cepat mencapai temperatur peleburan dan menurunkan laju pendinginan. Dalam kondisi tersebut, operator dapat meningkatkan kecepatan pengelasan tanpa mengurangi kestabilan kolam las.

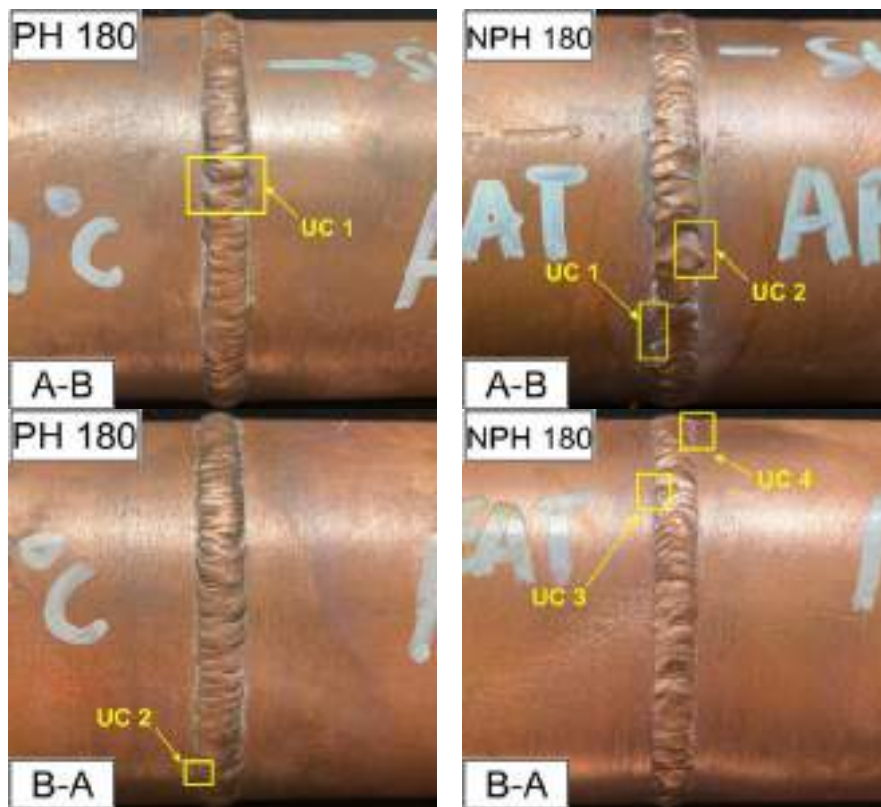
4.2 Evaluasi *Non Destructive Test* (NDT)

Setelah dilakukan proses pengelasan dan sebelum dilakukan pengujian destruktif, seluruh spesimen harus terlebih dahulu dievaluasi menggunakan *Non-Destructive Testing* (NDT). Proses ini dilakukan untuk mengidentifikasi adanya diskontinuitas pada permukaan las, tanpa menyebabkan kerusakan pada spesimen. Dalam penelitian ini, metode NDT yang digunakan terdiri atas *Visual Test* (VT) dan *Liquid Penetrant Test* (PT).

Hasil kedua metode tersebut disajikan secara terpisah berdasarkan jenis pengujiannya, sedangkan pembahasan dilakukan secara terpadu karena keduanya mengevaluasi fenomena yang sama, yaitu kualitas permukaan sambungan las. Dengan demikian, hasil *Penetrant Test* berfungsi untuk memperkuat interpretasi yang diperoleh dari hasil *Visual Test* sehingga evaluasi kondisi sambungan las menjadi lebih komprehensif.

4.2.1 Hasil pengujian visual

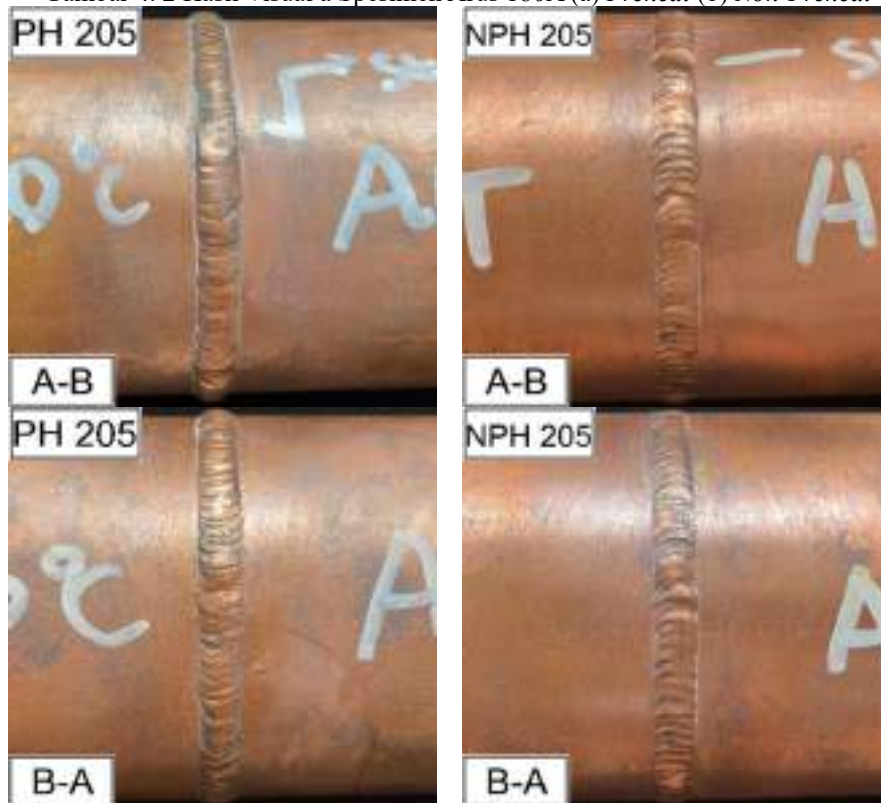
Pengujian visual dilakukan untuk mengevaluasi geometri permukaan hasil pengelasan, khususnya tinggi *capping* (*excess weld metal*) dan lebar *capping*. Pengukuran dilakukan menggunakan *welding gauge* setelah seluruh proses pengelasan selesai. Hasil pengukuran selanjutnya dibandingkan dengan kriteria penerimaan berdasarkan (BS EN ISO 10042, 2018). Berikut merupakan visual hasil pengelasan GTAW pada material Cu-DHP dengan variabel arus pada kondisi *preheat* dan *non-preheat* pada Gambar 4.2 sampai Gambar 4.4.



(a)

(b)

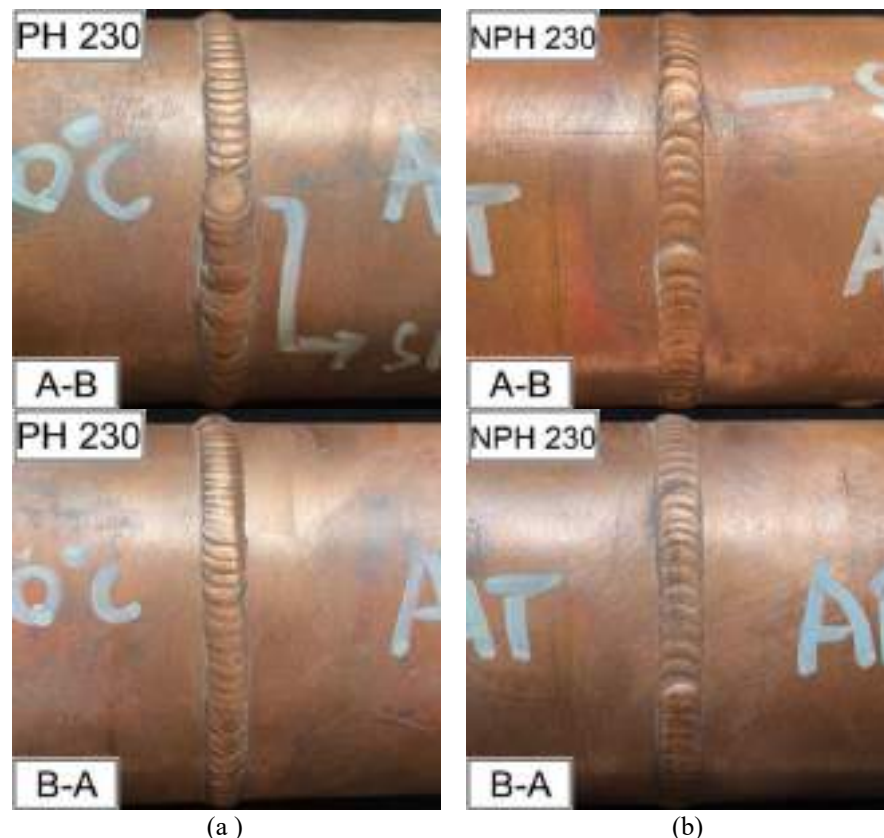
Gambar 4. 2 Hasil Visual a Spesimen Arus 180A (a) *Preheat* (b) *Non-Preheat*



(a)

(b)

Gambar 4. 3 Hasil Visual Spesimen Arus 205A (a) *Preheat* (b) *Non-Preheat*



Gambar 4. 4 Hasil Visual Spesimen Arus 230A (a) *Preheat* (b) *Non-Preheat*
Berdasarkan Gambar 4.2 sampai Gambar 4.4, memperlihatkan

kondisi permukaan sambungan las pada setiap variabel. Secara umum, variabel *preheat* dan arus menghasilkan citra yang berbeda pada setiap kombinasi, untuk memberikan perbandingan yang lebih sistematis, hasil inspeksi visual kemudian dirangkum berdasarkan parameter geometri las, jenis cacat permukaan, dan hasil evaluasi terhadap kriteria penerimaan sebagaimana disajikan pada Tabel 4.2 dan 4.3.

Tabel 4. 2 Geometri Hasil Pengelasan

Variabel	Tinggi <i>Capping</i> (mm)	Lebar <i>Capping</i> (mm)	Batas BS EN ISO 10042 Level C (mm)	Status
NPH. 180A	1,1	9	2,85	<i>Accepted</i>
NPH. 205A	1	8	2,7	<i>Accepted</i>
NPH. 230A	1,29	8	2,7	<i>Accepted</i>
PH. 180A	1,58	9	2,85	<i>Accepted</i>
PH. 205A	2	8	2,7	<i>Accepted</i>
PH. 230A	1,34	9	2,85	<i>Accepted</i>

Tabel 4. 3 Hasil Inspeksi Diskontinuitas Permukaan

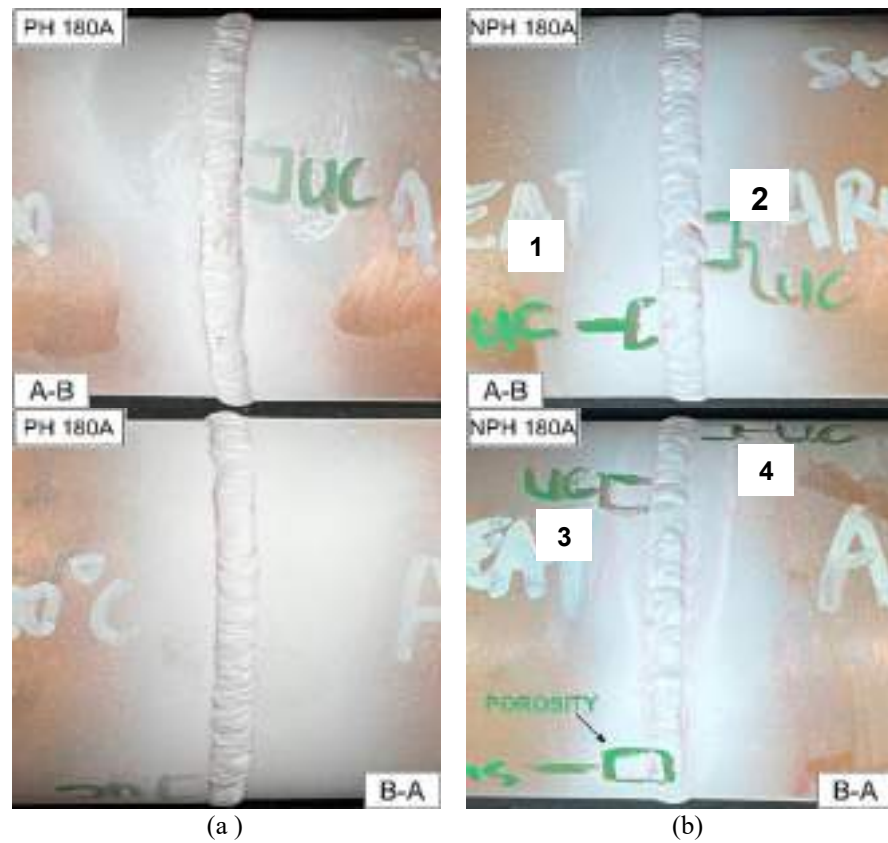
Variabel	Depth of UC-1	Depth of UC-2	Depth of UC-3	Depth of UC-4	Batas BS EN ISO 10042 Level B (mm)	Status
NPH. 180A	0,5 mm	0,3mm	0,4 mm	0,4 mm	0,48	UC-1 <i>Reject, other than that Accepted</i>
NPH. 205A	–	–	–	–	0,48	<i>Accepted</i>
NPH. 230A	–	–	–	–	0,48	<i>Accepted</i>
PH. 180A	0,2 mm	0,5 mm	–	–	0,48	UC-2 <i>Reject, other than that Accepted</i>
PH. 205A	–	–	–	–	0,48	<i>Accepted</i>
PH. 230A	–	–	–	–	0,48	<i>Accepted</i>

Berdasarkan Tabel 4.2 menunjukkan bahwa seluruh spesimen memiliki tinggi *capping* antara 1,00 – 2,00 mm, nilai tersebut belum termasuk *excess weld metal* atau masih di bawah persyaratan, sehingga semuanya memenuhi persyaratan *Quality Level C* BS EN ISO 10042, (2018). Selain evaluasi geometri, inspeksi terhadap diskontinuitas yang muncul di permukaan juga dilakukan. Hasil pengamatan ditunjukkan pada Tabel 4.3 yang memperlihatkan bahwa indikasi diskontinuitas yang ditemui berupa *undercut* pada spesimen dengan arus 180A baik pada kondisi *preheat* dan *non-preheat*. Berdasarkan kriteria penerimaan BS EN ISO 15614-6, (2006), *imperfection* selain *excess weld metal*, *excess convexity*, *excess throat thickness* and *excessive penetration*, menggunakan *quality level B* BS EN ISO 10042, (2018). Jadi, syarat keberterimaan *undercut* hanya indikasi dengan kedalaman $\geq 0,48$ mm yang dikategorikan *reject*, sedangkan indikasi lainnya masih memenuhi batas penerimaan. Untuk memvalidasi hasil uji visual dibutuhkan pengujian lanjut berupa *penetrant test*, hal ini bertujuan sebagai penguat hasil yang diperoleh dari pengujian *penetrant test*.

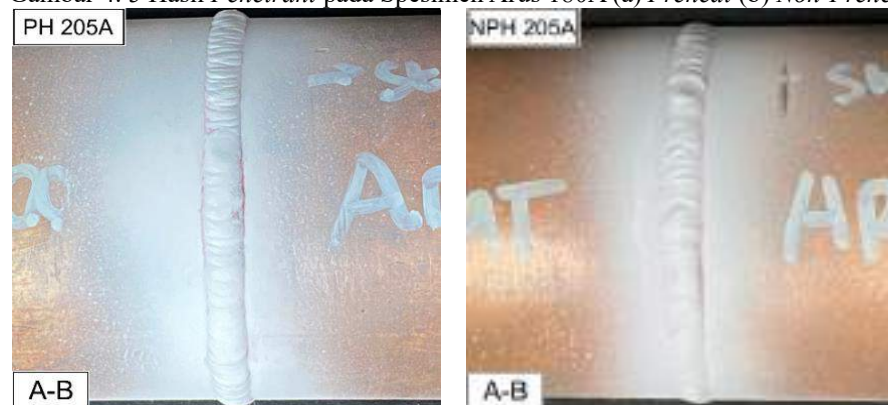
4.2.2 Hasil pengujian *penetrant test*

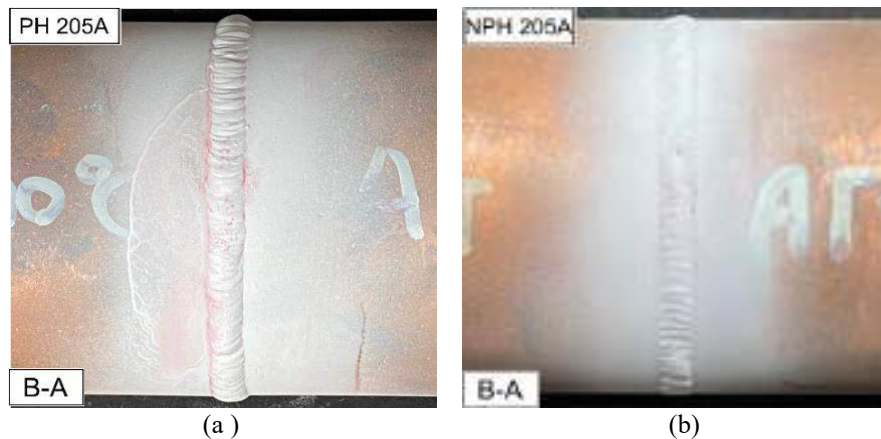
Penetrant Test (PT) dilakukan sebagai pengujian lanjutan untuk memvalidasi hasil inspeksi visual terhadap indikasi diskontinuitas yang terbuka di permukaan seperti *undercut*, retak (*crack*), maupun porositas terbuka yang mungkin tidak dapat diidentifikasi secara pasti melalui

pengamatan visual. Evaluasi hasil pengujian mengacu pada ISO 23277:2015, Hasil pemeriksaan *Penetrant Test* pada setiap spesimen disajikan pada Gambar 4.5 sampai Gambar 4.7.

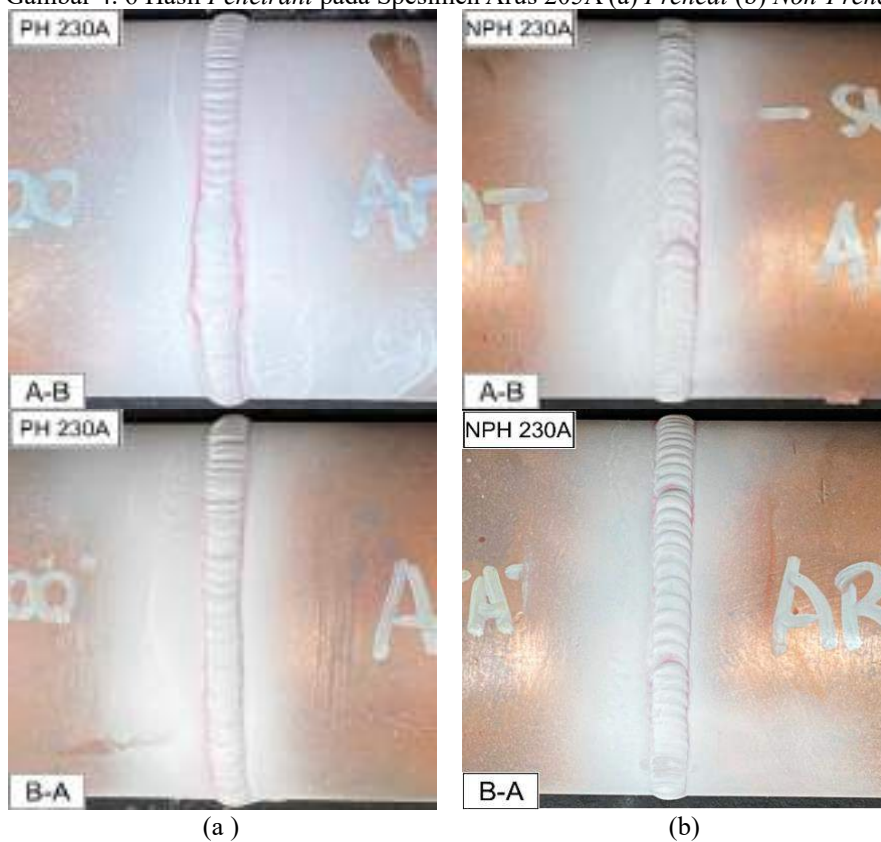


Gambar 4. 5 Hasil *Penetrant* pada Spesimen Arus 180A (a) *Preheat* (b) *Non-Preheat*





Gambar 4. 6 Hasil *Penetrant* pada Spesimen Arus 205A (a) *Preheat* (b) *Non-Preheat*



Gambar 4. 7 Hasil *Penetrant* pada Spesimen Arus 230A (a) *Preheat* (b) *Non-Preheat*

Hasil dokumentasi *Liquid Penetrant Test* pada Gambar 4.5 sampai Gambar 4.7 menunjukkan bahwa pengujian ini tidak hanya mengonfirmasi indikasi *undercut* yang telah diamati pada inspeksi visual, tetapi juga mengidentifikasi adanya indikasi porositas pada 1 spesimen. Seluruh indikasi yang terdeteksi kemudian dievaluasi berdasarkan persyaratan (BS EN ISO 17635, 2025) dimana menggunakan level 2X

dengan acuan kriteria penerimaan ISO 23277:2015, hasil yang diperoleh disajikan secara ringkas pada Tabel 4.4.

Tabel 4. 4 Indikasi Hasil Uji *Penetrant Test*

Accepted Criteria BS EN ISO 23277: Level 2X				Linier = $l \leq 2$ mm		Nonlinier = $d \leq 6$ mm
Variabel	Lenght of UC-1	Lenght of UC-2	Lenght of UC-3	Lenght of UC-4	Porosity	Status
NPH. 180A	5,7 mm	3,7 mm	4,3 mm	3,3 mm	0,7 mm	Indikasi <i>Linier Reject</i> tetapi, Indikasi <i>Nonlinier Accepted</i>
	Linier				Nonlinier	
NPH. 205A	–	–	–	–	–	<i>Accepted</i>
NPH. 230A	–	–	–	–	–	<i>Accepted</i>
PH. 180A	5,2 mm	2,9 mm	–	–	–	<i>All Reject</i>
	Linier					
PH. 205A	–	–	–	–	–	<i>Accepted</i>
PH. 230A	–	–	–	–	–	<i>Accepted</i>

Berdasarkan hasil inspeksi visual dan *penetrant test* yang disajikan pada Tabel 4.2 hingga Tabel 4.4, diketahui bahwa indikasi diskontinuitas yang paling dominan adalah *undercut*, yang ditemukan pada spesimen NPH 180A dan PH 180A. Hasil *Liquid Penetrant Test* mengonfirmasi hasil inspeksi visual dengan mendeteksi indikasi linear pada lokasi yang sama, sehingga dapat disimpulkan bahwa diskontinuitas tersebut merupakan diskontinuitas terbuka yang memenuhi karakteristik *undercut*. Selain itu, pada spesimen NPH 180A juga teridentifikasi satu *nonlinier indication* yang mengarah pada adanya porositas terbuka di permukaan, namun ukuran porositas ini termasuk kecil. Hasil ini menunjukkan bahwa *Liquid Penetrant Test* tidak hanya berfungsi sebagai validasi terhadap hasil inspeksi visual, tetapi juga memiliki sensitivitas yang lebih tinggi dalam mengidentifikasi diskontinuitas permukaan yang sulit diamati secara langsung.

4.2.3 Pembahasan visual dan *penetrant test*

Berdasarkan hasil inspeksi visual dan *penetrant test* yang disajikan pada Tabel 4.2 – 4.4, diketahui bahwa indikasi yang dominan muncul adalah *undercut*. Diskontinuitas ini hanya muncul pada spesimen dengan

variasi arus 180A pada semua kondisi. Selain itu, pada spesimen NPH 180A terdapat 1 diskontinuitas *rounded* yang teridentifikasi sebagai *porosity*, meskipun indikasi tersebut ukurannya kecil, temuan tersebut mengkonfirmasi bahwa hasil *penetrant test* dapat memperkuat hasil dari *visual test*.

Munculnya indikasi *undercut* pada variasi arus 180A, diduga dipengaruhi oleh kombinasi arus dan *travel speed*. Berdasarkan Tabel 4.1, diketahui *travel speed* rata-rata untuk spesimen NPH 180A adalah 38,24 mm/min dan 40,83 mm/min untuk spesimen PH 180A, selisih nilai tersebut tidak terpaut jauh namun, kecepatan pada spesimen yang menerima *preheat* lebih tinggi walaupun selisihnya sedikit, tetapi menghasilkan indikasi *undercut* yang lebih sedikit dan bebas dari *porosity*. Menurut Weman (2011) meningkatkan *travel speed* dapat berisiko menyebabkan *undercut*, *porosity*, *root defect* dan fusi yang buruk. Karena arus 180A, energi panas yang dihasilkan lebih kecil sehingga dibutuhkan *weaving* untuk mendistribusikan panas di daerah *molten pool*. Dalam kondisi tersebut, penerapan pola *weaving* yang relatif lebar menyebabkan logam cair harus mengisi daerah yang lebih luas. Namun, karena jumlah logam cair dan temperatur kolam las tidak mencukupi, logam pengisi tidak mampu membasahi (*wetting*) daerah *toe weld* secara sempurna sebelum pembekuan terjadi.

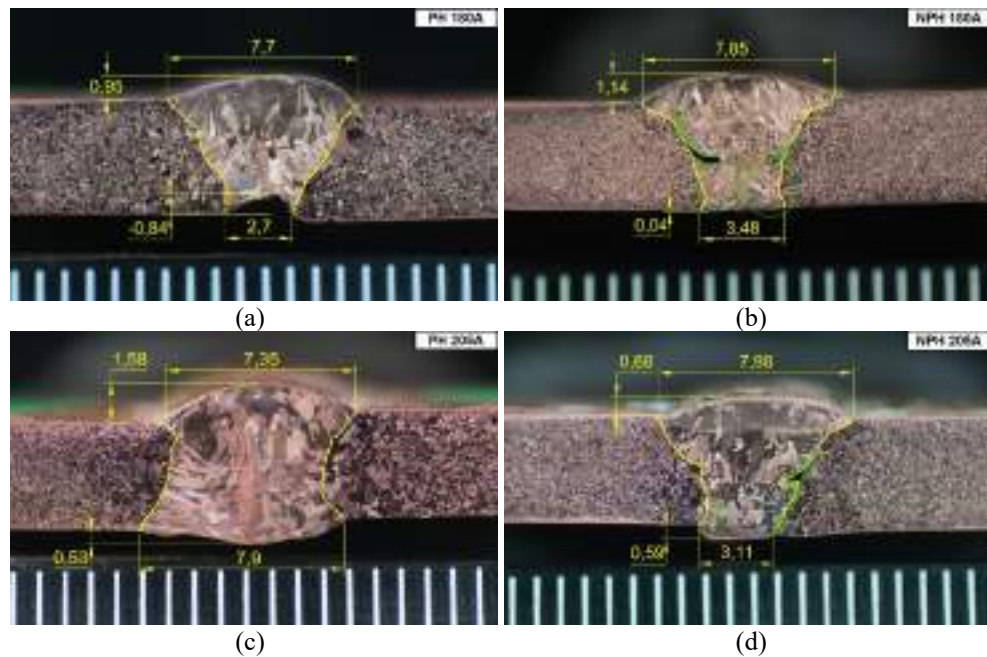
Selain *undercut*, adanya indikasi *porosity* atau *pin hole* yang ikut muncul diduga disebabkan oleh gas yang terperangkap selama pemadatan, hal ini sejalan oleh Weman (2011) yang menjelaskan bahwa *pin hole* dapat terjadi karena terjebaknya gas hidrogen selama pemadatan dan dapat di minimalisir dengan mengurangi kecepatan pengelasan. Hal tersebut sangat relevan pada penelitian ini karena pada arus yang rendah menghasilkan energi yang lebih rendah dengan *weld pool* lebih kecil dan cepat membeku sehingga gas yang terperangkap tidak dapat keluar dan membentuk rongga. Hal tersebut sejalan dengan teori *melting efficiency* Kou (2021) dimana, hanya sebagian energi panas yang masuk untuk

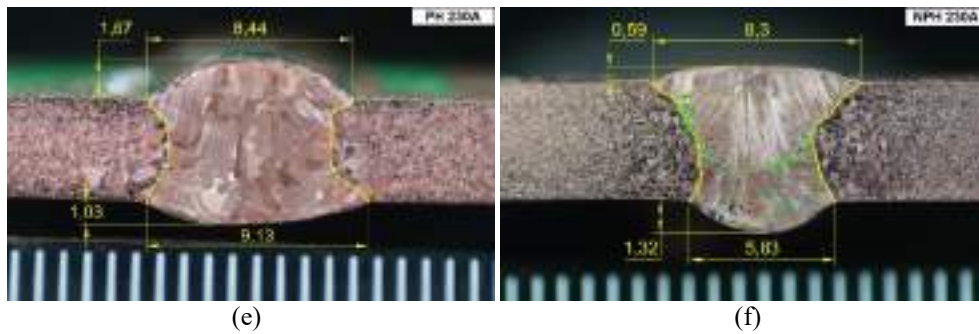
melelehkan logam dan *filler* metal, sedangkan sisanya hilang melalui konduksi, konveksi, dan radiasi.

Secara keseluruhan, spesimen dengan arus 205A dan 230A tidak menghasilkan diskontinuitas permukaan, namun kenaikan arus dapat mempengaruhi keseragaman *bead* las, alur las untuk arus 230A pada semua kondisi lebih seragam daripada arus 205A hal tersebut dapat terjadi karena efek kombinasi energi panas dan *travel speed* yang nantinya menjadi nilai *heat input*.

4.3 Hasil Pengujian Makro

Pengujian struktur makro dilakukan untuk mengevaluasi kualitas hasil pengelasan secara visual terhadap bentuk geometri logam las (*weld bead*), kedalaman penetrasi, tinggi akar (*root reinforcement*), tinggi *capping* (*cap reinforcement*), serta keberadaan cacat makro seperti *incomplete penetration* (IP), *lack of fusion* (LOF), *incomplete fusion* (IF), dan porositas. Hasil foto makro disajikan pada Gambar 4.8.





Gambar 4. 8 Morfologi hasil Makro (a) Spesimen PH 180A (b) Spesimen NPH 180A (c) Spesimen PH 205A (d) Spesimen NPH 205A (e) Spesimen PH 230A (f) Spesimen NPH 230A

Berdasarkan hasil pengamatan makro pada Gambar 4.8, memperlihatkan karakteristik yang berbeda pada setiap variabel, untuk memudahkan melihat perbedaan hasil uji makro akan disajikan pada Tabel 4.5.

Tabel 4. 5 Hasil Uji Makrografi

Variabel	Lebar Capping (mm)	Tinggi Capping (mm)	Lebar Root (mm)	Tinggi Root (mm)	Cacat Makro yang Teridentifikasi
NPH 180A	7,85	1,14	3,48	0,04	<i>Lack of inter-run fusion</i> dan <i>Cluster Porosity</i>
PH 180A	7,7	0,95	2,7	-0,84	<i>Suckback (root concavity)</i>
NPH 205A	7,98	0,68	3,11	0,59	<i>Lack of side wall Fusion</i> dan <i>Porosity</i>
PH 205A	7,35	1,58	7,9	0,53	Tidak ditemukan cacat
NPH 230A	8,3	0,59	5,83	1,32	<i>Lack of inter-run fusion</i> dan <i>Cluster Porosity</i> , dan <i>porosity</i>
PH 230A	8,44	1,67	9,13	1,03	Tidak ditemukan cacat

Berdasarkan hasil pengujian makrografi pada Tabel 4.5, variasi arus pengelasan dan perlakuan *preheat* menghasilkan perbedaan geometri sambungan serta jenis cacat makro yang teridentifikasi. Secara umum, peningkatan arus pengelasan cenderung meningkatkan ukuran daerah penetrasi, sedangkan perlakuan *preheat* menghasilkan geometri *fusion zone* yang lebih baik. Cacat yang teramati meliputi *lack of inter-run fusion*, *lack of side wall fusion*, *cluster porosity*, dan *suckback (root concavity)*. Dari enam variasi parameter, hanya spesimen PH 205A dan PH 230A yang tidak menunjukkan indikasi cacat makro berdasarkan hasil pengamatan makrografi.

4.3.1 Evaluasi *internal imperfection*

Dari hasil pengujian makro yang didapat, akan dibandingkan dengan pendekatan syarat keberterimaan berdasarkan BS EN ISO 10042, (2018) untuk *internal imperfection*, hal ini untuk mengetahui apakah

cacat makro tersebut masih diperbolehkan atau tidak, pada Tabel 4.6 akan disajikan hasil perbandingannya.

Tabel 4. 6 Perbandingan temuan *Internal Imperfection* dengan *Standart*

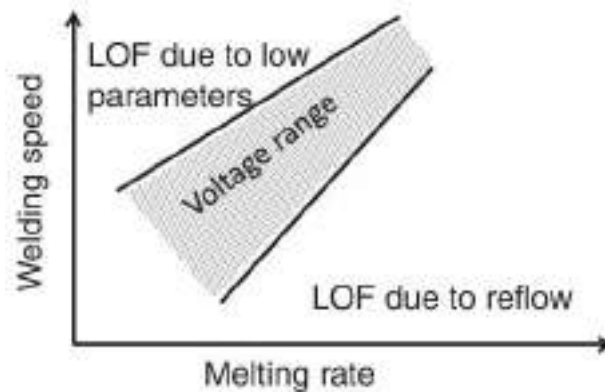
Variabel	Jenis Cacat	Nilai Hasil	Batas BS EN ISO 10042 (Level B)	Keputusan
NPH 180A	<i>Lack of inter-run fusion</i>	2,61 mm 1,63 mm 0,55 mm	Tidak diizinkan	<i>Reject</i>
	<i>Cluster Porosity</i>	∅ 4,21 mm	Max. $\frac{1}{2}t = 4,8/2 = 2,4$ mm	<i>Reject</i>
PH 180A	<i>Suckback (root concavity)</i>	0,84 mm	$h_{max} = 0,05t = 0,05 \times 4,8 = 0,24$ mm	<i>Reject</i>
NPH 205A	<i>Lack of side wall Fusion</i>	4,01 mm	Tidak diizinkan	<i>Reject</i>
	<i>Porosity</i>	∅ 0,11 mm ∅ 0,17 mm ∅ 0,06 mm	$D = 0,2t = 0,2 \times 4,8 = \emptyset 0,96$ mm	<i>Accepted</i>
PH 205A	-	-	-	<i>Accepted</i>
NPH 230A	<i>Lack of inter-run fusion</i>	3,43 mm 0,53 mm 2,74 mm	Tidak diizinkan	<i>Reject</i>
	<i>Cluster Porosity</i>	4,44 mm	2,4 mm	<i>Reject</i>
NPH 230A	<i>Porosity</i>	∅ 0,43 mm ∅ 0,15 mm	$D = 0,2t = 0,2 \times 4,8 = \emptyset 0,96$ mm	<i>Accepted</i>
PH 230A	-	-	-	<i>Accepted</i>

Berdasarkan hasil evaluasi BS EN ISO 10042, (2018) level B, ketidakberterimaan sambungan terutama disebabkan oleh cacat *lack of fusion* dan *suckback*, sedangkan *porosity* maupun *cluster porosity* masih memenuhi batas dimensi yang dipersyaratkan.

4.3.2 Pembahasan makro

Dari hasil pengamatan makro dan evaluasi *internal imperfection*, cacat dominan pada spesimen *non-preheat* adalah *lack of fusion* dan *porosity*. *Lack of fusion* dapat terjadi karena *heat input* efektif belum cukup untuk mengurangi efek konduktivitas termal tembaga yang besar, hal ini sejalan dengan O'Brien, (2001) yang menjelaskan panas pengelasan cepat menghantarkan ke logam dasar dan bisa menyebabkan *incomplete fusion*, O'Brien, (2001) juga mensyaratkan penggunaan *preheat* untuk mengurangi *heat input* untuk tetap menghasilkan fusi yang baik, pernyataan ini mendukung hasil penelitian parameter *preheat* pada

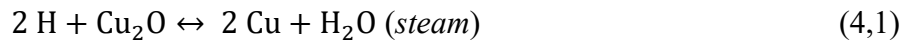
semua variasi arus dengan tetap menghasilkan fusi yang baik meskipun *heat input* lebih rendah. Selain dari faktor *heat input*, Gambar 4.9 menjelaskan penyebab terjadinya fenomena *lack of fusion* (LOF).



Gambar 4. 9 Penyebab Terjadinya LOF (Yusof dkk., 2014)

Berdasarkan diagram hubungan antara *melting rate* dan *welding speed*, *lack of fusion* dapat terjadi akibat dua mekanisme yang berbeda, yaitu *heat input* yang terlalu rendah (*LOF due to low parameters*) maupun aliran kembali logam cair (*reflow*) pada kondisi *melting rate* yang terlalu tinggi. Pada kondisi pertama, energi panas tidak cukup untuk melelehkan logam induk sehingga tidak terbentuk ikatan metalurgi yang sempurna. Sebaliknya, pada kondisi kedua, logam cair yang berlebihan cenderung mengalir kembali dan menutupi daerah sambungan sebelum terjadi peleburan yang memadai pada *fusion boundary*, sehingga *lack of fusion* tetap dapat terbentuk meskipun arus pengelasan tinggi. Oleh karena itu, peningkatan arus pengelasan tidak selalu menghilangkan kecenderungan terbentuknya *lack of fusion*, melainkan harus diimbangi dengan distribusi panas yang baik, seperti penerapan *preheat* untuk mengurangi gradien temperatur.

Pada spesimen *non-preheat*, *porosity* menjadi cacat ke dua dominan setelah LOF, *porosity* terbentuk. Jika tembaga yang mengandung oksigen dipanaskan di atas sekitar 400 °C (750 °F) dalam atmosfer yang mengandung hidrogen (atau dalam beberapa kasus gas pereduksi lainnya), hidrogen akan mudah larut dalam tembaga dan kemudian berdifusi dengan cepat. Saat bertemu dengan partikel *Copper (I) Oxide* / Cu₂O, reaksi berikut terjadi:



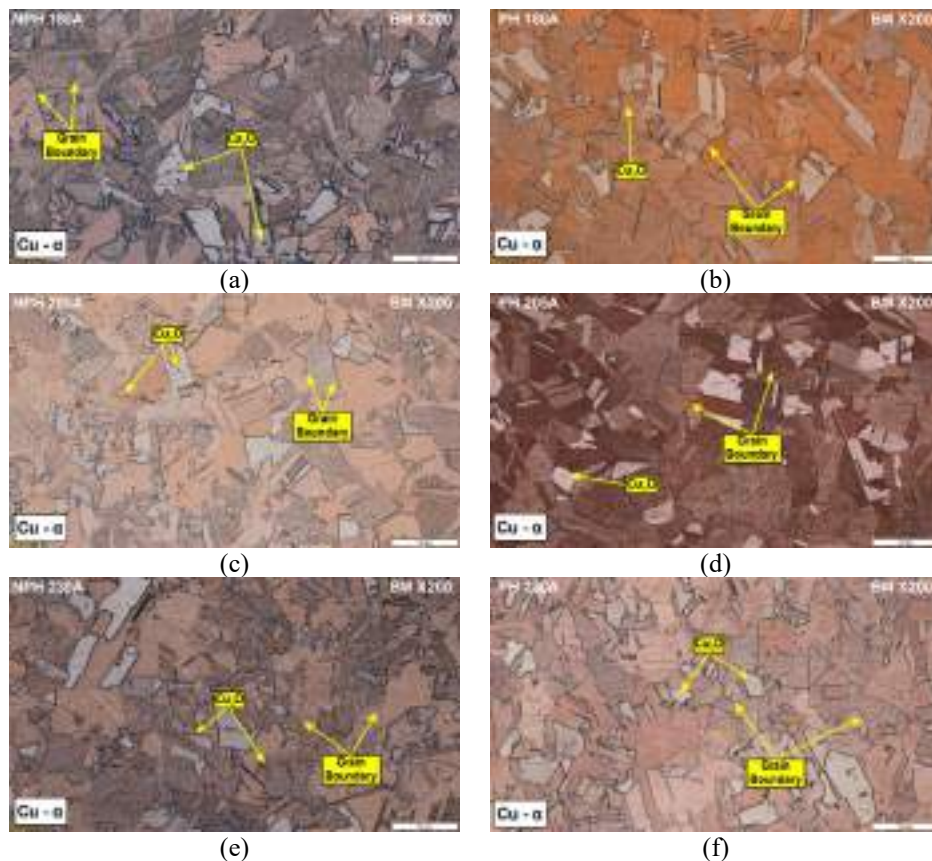
Molekul H_2O yang terbentuk mudah bergabung membentuk kantung gas (uap), karena molekul-molekul ini tidak larut dalam tembaga. Ini meninggalkan struktur berpori, sehingga terbentuklah rongga berisi gas atau gelembung (Scott, 2001). Cacat selanjutnya yang terjadi adalah *root concavity* atau *suck back* yang terjadi pada spesimen PH 180A, *root concavity* diduga terjadi akibat penyusutan logam cair selama solidifikasi yang tidak sepenuhnya dikompensasi oleh suplai logam cair ke daerah *root*, sehingga terbentuk permukaan akar las yang cekung (*concave*). Kondisi ini dapat diperparah oleh *heat input* yang relatif rendah, kecepatan pengelasan yang tinggi, serta pelelehan ulang (*remelting*) *root pass* selama pengelasan lapisan berikutnya (TWI, 2004).

4.4 Hasil Pengujian Mikrostruktur

Pada penelitian ini, pengamatan mikrostruktur dilakukan menggunakan mikroskop optik setelah spesimen melalui proses preparasi metalografi dan etsa. Pengamatan dilakukan pada empat daerah utama sambungan las, yaitu *Base Metal* (BM), *Heat Affected Zone* (HAZ), *Fusion Line* (FL), dan *Weld Metal* (WM). Pembagian daerah tersebut bertujuan untuk mengidentifikasi perubahan struktur mikro akibat pengaruh *preheat* dan variasi arus selama proses pengelasan GTAW pada material Cu-DHP. Seluruh foto mikro diambil pada beberapa tingkat pembesaran untuk memperoleh informasi yang berbeda. Pembesaran rendah digunakan untuk mengidentifikasi batas antar daerah, sedangkan pembesaran tinggi digunakan untuk mengamati morfologi butir, batas butir, maupun indikasi persipitasi.

a) *Base Metal* (BM)

Base metal yang digunakan dalam penelitian ini adalah Cu-DHP (*deoxidized high phosphorus copper*) dengan kode UNS 12200. Material ini memiliki kandungan oksigen yang sangat rendah karena penambahan fosfor sebagai deoksidator, hasil pengamatan metalografi dilakukan dengan pembesaran 200x dan disajikan pada Gambar 4.10

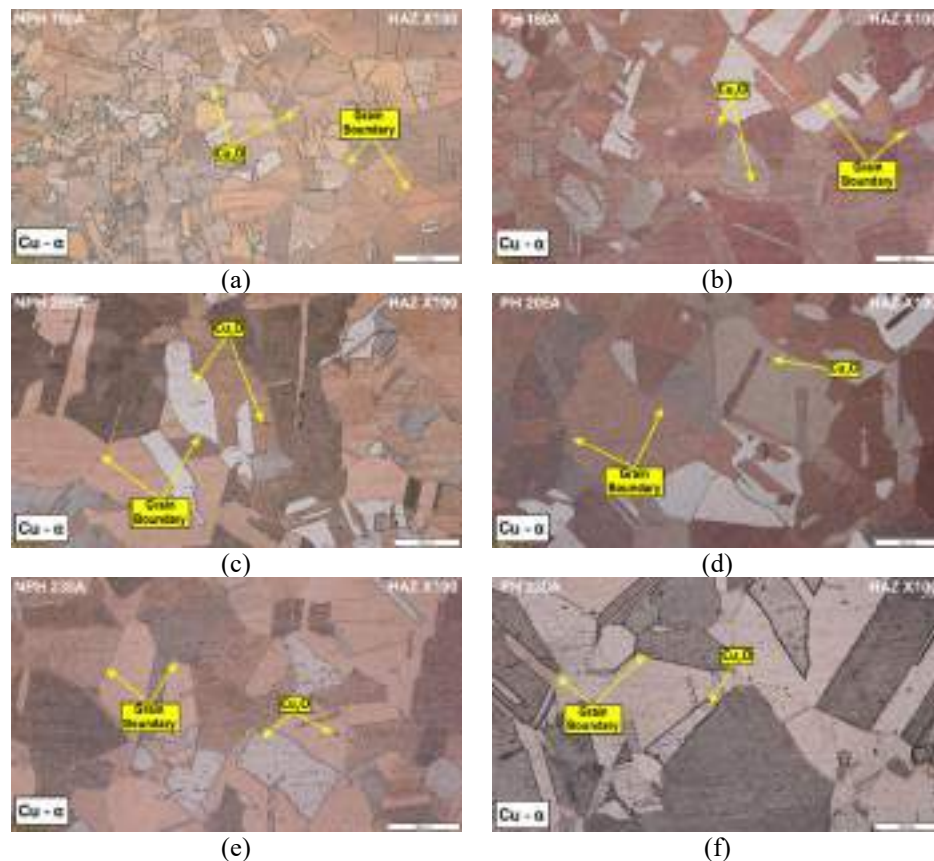


Gambar 4. 10 Struktur Mikro *Base Metal* dengan pembesaran 200x pada spesimen (a) NPH 180A (b) PH 180A (c) NPH 205A (d) PH 205A (e) NPH 230A (f) PH 230A

Berdasarkan Gambar 4.10 pada *base metal* dapat diamati matriks utama yang membentuk struktur mikro adalah *alfa-Cu*. Selain itu, ditemukan senyawa yang diduga Cu_2O dengan indikasi bintik hitam yang muncul di permukaan butir pada seluruh spesimen. Selain itu, batas butir terlihat jelas dan kontinu, menunjukkan bahwa material memiliki tingkat homogenitas yang baik.

b) *Heat Affected Zone* (HAZ)

Daerah *Heat Affected Zone* (HAZ) merupakan wilayah yang mengalami pengaruh siklus termal selama proses pengelasan tanpa mengalami proses peleburan. Pengamatan pada daerah ini bertujuan untuk melihat perubahan morfologi dan ukuran butir, batas butir, serta karakteristik mikrostruktur akibat variasi arus dan *preheat*. Hasil pengamatan mikrostruktur dilakukan dengan pembesaran x100 dan disajikan pada Gambar 4.11



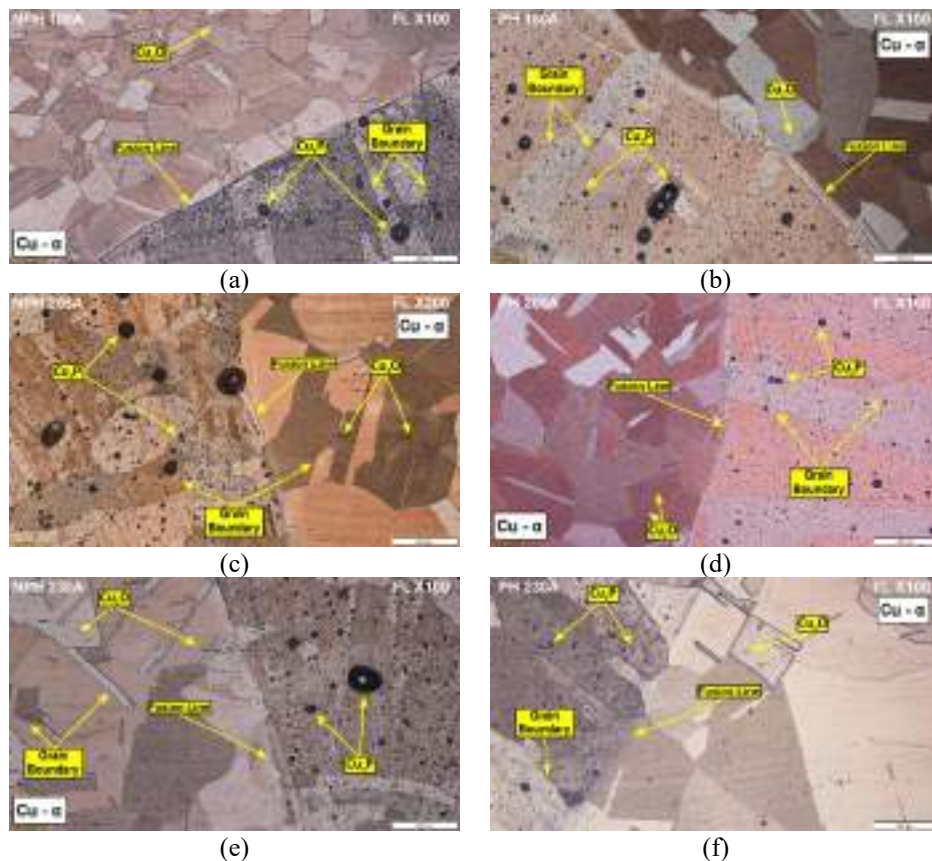
Gambar 4. 11 Struktur Mikro HAZ dengan pembesaran 100x pada spesimen (a) NPH 180A (b) PH 180A (c) NPH 205A (d) PH 205A (e) NPH 230A (f) PH 230A

Gambar 4.11 menyajikan hasil pengamatan struktur mikro daerah HAZ pada seluruh spesimen dengan pembesaran 100 $\times$. Pada setiap citra ditunjukkan matriks α -Cu yang menjadi struktur utama dalam Cu-DHP, batas butir (*grain boundary*), serta indikasi partikel Cu_2O dengan indikasi *globular* berwarna hitam. Morfologi yang dihasilkan pada setiap variabel memiliki perbedaan, kenaikan arus mempengaruhi ukuran butiran dan luas daerah HAZ serta kombinasi *preheat* dan kenaikan arus menghasilkan butiran yang lebih kasar. Berdasarkan perhitungan *Grain Size* ASTM E112 pada Lampiran G3-G5, spesimen NPH 180A memiliki *grain size number* (G) sebesar 5. Sedangkan, pada spesimen PH 180A, nilai G menurun menjadi 4 dan untuk arus 205A pada seluruh kondisi memiliki nilai G sebesar 4 dan turun kembali menjadi 3 pada arus 230A pada seluruh kondisi. Secara keseluruhan, rentang ukuran rata-rata diameter butir berkisar 63,5 μm untuk nomor 5 dan 127 μm untuk nomor 3. Pada spesimen PH 180A nilai (G) lebih kecil daripada NPH 180A, hal ini mengindikasikan bahwa

pemberian *preheat* dapat meningkatkan ukuran butir yang dihasilkan meskipun dengan *heat input* yang lebih kecil.

c) *Fusion Line* (FL)

Fusion Line merupakan daerah batas antara *weld metal* dan logam induk. Pengamatan mikrostruktur pada daerah ini dilakukan untuk mengamati perubahan morfologi butir pada batas peleburan, hasil *bonding* antara *weld* dan *base metal*, dan karakteristik transisi mikrostruktur. Hasil pengamatan mikrostruktur dilakukan pada daerah yang mengalami fusi dengan pembesaran 100x dan disajikan pada Gambar 4.12



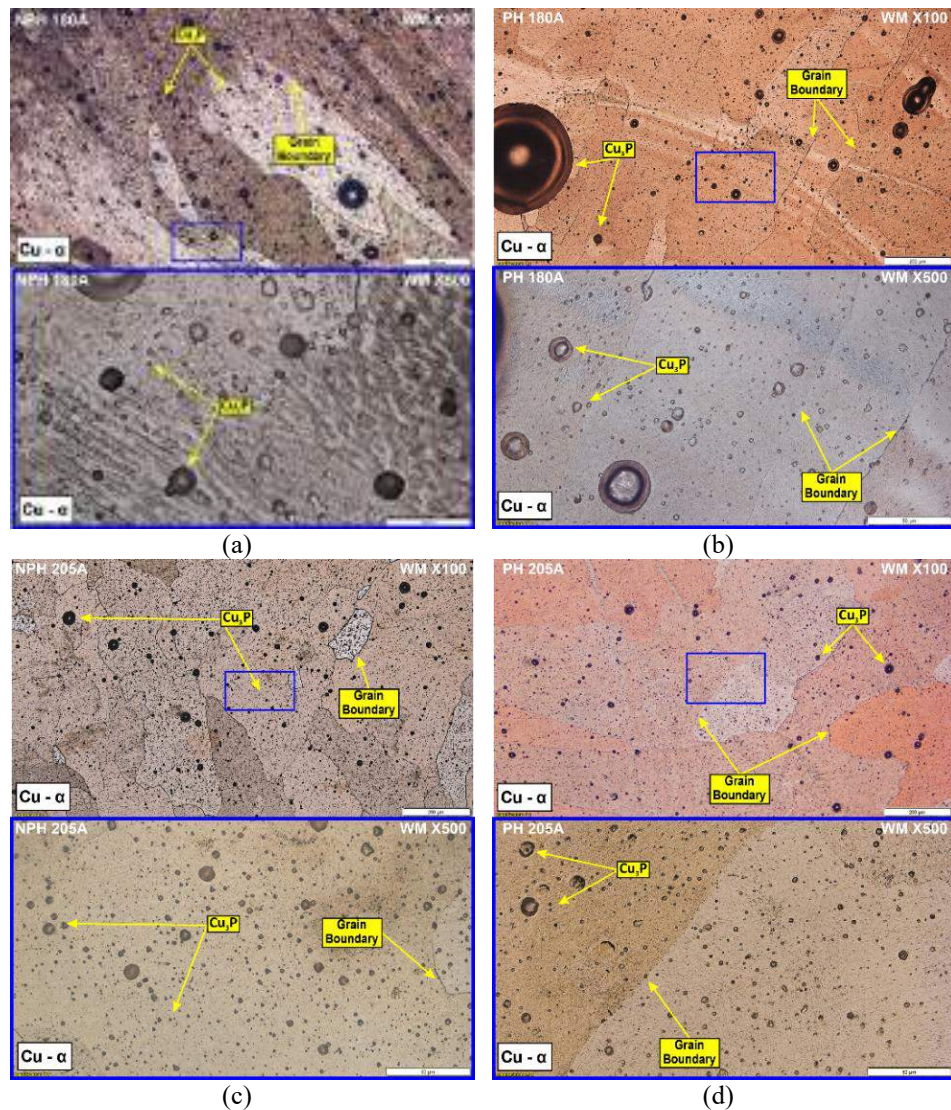
Gambar 4. 12 Struktur Mikro *Fusion Line* dengan Pembesaran 100x pada Spesimen (a) NPH 180A (b) PH 180A (c) NPH 205A (d) PH 205A (e) NPH 230A (f) PH 230A

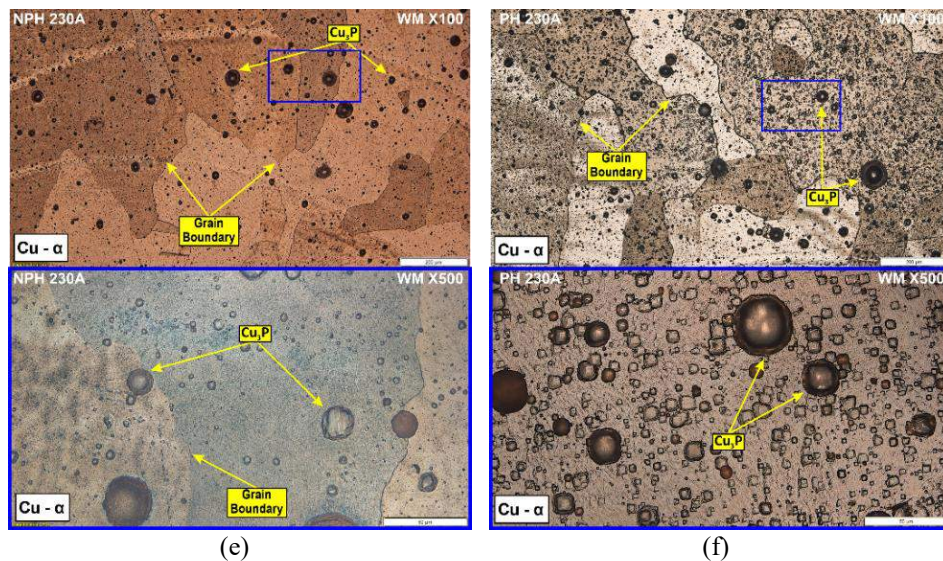
Berdasarkan Gambar 4.12, daerah *fusion line* (FL) terlihat seperti daerah batas transisi antara HAZ dan *Weld Metal*. Perubahan morfologi butir terlihat jelas pada kedua sisi, zona HAZ mengalami pertumbuhan butir dan zona *weld metal* terdiri dari solidifikasi *base metal* dan *filler* CuAg1. Jika dilihat pada batas peleburan seluruh spesimen terlihat kontinu tanpa adanya celah antar daerah, hal tersebut mengindikasikan seluruh spesimen

memiliki ikatan metalurgi yang baik antara *base metal* dan *weld metal*. Jika dibandingkan antar spesimen, variasi arus dan *preheat* tidak mengubah jenis mikrostruktur pada *fusion line*.

d) *Weld Metal* (WM)

Daerah *Weld Metal* (WM) merupakan daerah yang terbentuk dari hasil peleburan logam induk dan logam pengisi CuAg1 selama proses pengelasan GTAW. Pengamatan mikrostruktur pada daerah ini dilakukan untuk mengidentifikasi karakteristik mikrostruktur hasil solidifikasi, meliputi morfologi butir, batas butir (*grain boundary*), dan persipitasi Cu_3P . Hasil pengamatan mikrostruktur dilakukan dengan pembesaran 100x dengan diperjelas pembesaran 500x dan disajikan pada Gambar 4.13





Gambar 4. 13 Struktur Mikro *Weld Metal* dengan pembesaran 100x dan 500x pada spesimen (a) NPH 180A (b) PH 180A (c) NPH 205A (d) PH 205A (e) NPH 230A (f) PH 230A

Pengamatan struktur mikro pada daerah *weld metal* yang disajikan pada Gambar 4.13. Secara umum, mikrostruktur pada daerah ini masih didominasi oleh matriks α -Cu yang membentuk butir-butir hasil solidifikasi dengan orientasi yang bervariasi, ukuran butir yang dihasilkan memiliki rentang nilai 1-2 yang artinya nilai rata-rata diameter butir yang dihasilkan antara 179,6 μm untuk nomor 2 dan 254 μm untuk nomor 1. Pada arus 180A memiliki ukuran butir yang lebih halus yaitu nomor 2 pada seluruh kondisi, dan sisanya memiliki nilai (G) 1, batas butir (*grain boundary*) tampak jelas membatasi setiap butir, sedangkan pada beberapa lokasi terlihat partikel berukuran relatif kecil dengan morfologi *globular* yang diduga sebagai presipitat Cu₃P. Partikel tersebut tersebar pada beberapa bagian di dalam butir maupun di sekitar batas butir dengan jumlah dan distribusi yang bervariasi pada masing-masing spesimen.

4.4.1 Pembahasan mikro

Pada daerah *base metal* struktur mikro yang terlihat didominasi oleh alfa-Cu menunjukkan bahwa material Cu-DHP tetap mempertahankan struktur kristal *face centered cubic* (FCC) yang stabil pada suhu ruang hingga titik leburnya (Scott, 2001). Selain matriks alfa-Cu, pada beberapa lokasi ditemukan partikel *globular* atau titik-titik kecil

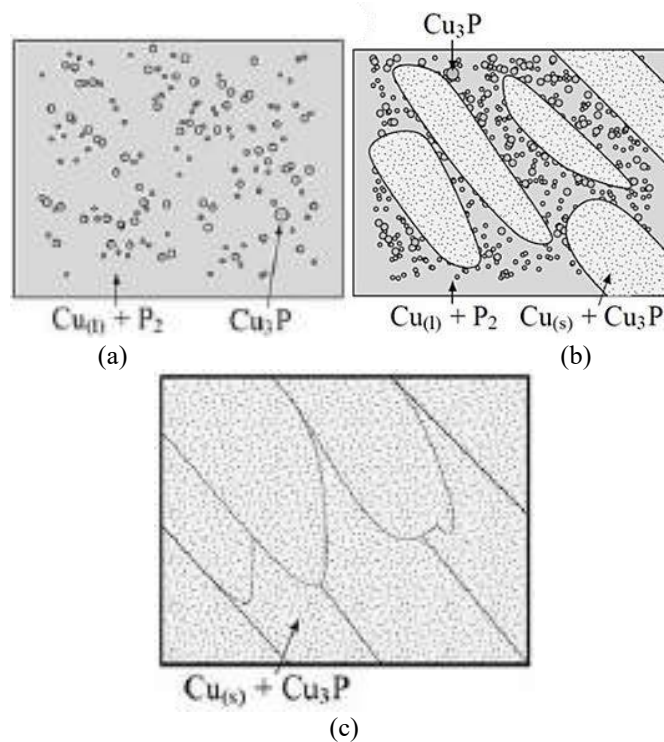
berwarna hitam yang diduga sebagai *Copper (I) Oxide* atau Cu_2O berdasarkan penelitian oleh (Bušić dkk., 2024).

Fenomena ini juga terjadi di daerah HAZ, dimana ditemukan titik-bintik hitam yang diduga *Copper (I) Oxide* atau Cu_2O pada batas butir dan di dalam area butir. Fenomena lain pada daerah HAZ adalah pertumbuhan butir, kenaikan arus akan berpengaruh pada *heat input*, ketika kenaikan *heat input* dikombinasikan dengan *preheat*, maka akan memperlambat laju pendinginan sehingga mobilitas *grain boundary* meningkat (Kou, 2021). Fenomena *grain growth* pada daerah HAZ juga sejalan pada penelitian Nurfian (2025), yang menjelaskan bahwa aplikasi *preheat* menyebabkan pendinginan lambat sehingga terjadi pertumbuhan butir. Namun, daerah *base metal* dan HAZ tetap menunjukkan larutan padat yang homogen karena tidak mengalami pembentukan *intermediate phase*, tetapi butiran menjadi lebih besar di dalam HAZ (Von Lintel dkk., 2021). Pada hasil citra *fusion line* menunjukkan perubahan morfologi butir antara HAZ ke *weld metal*, hal ini konsisten dengan mekanisme *epitaxial growth* yang dijelaskan Kou (2021) yaitu pertumbuhan logam las diawali dari butir logam induk pada batas peleburan. Akan tetapi, identifikasi mekanisme tersebut pada penelitian ini didasarkan pada karakteristik morfologi pengamatan mikroskop optik dan bukan pada analisis orientasi kristal (EBSD).

Hal berbeda terjadi pada struktur mikro pada area *weld metal*, terlihat pada struktur mikro untuk ukuran butir pada semua variabel membentuk *coarse grain* dan terbentuk titik-bintik hitam yang diduga terbentuknya unsur *Copper Phospide* / Cu_3P baik di dalam butir maupun di batas butir. Terbentuknya *Copper Phospide* / Cu_3P dikarenakan pada bagian tengah *welding line* terbebas dari oksigen. Oleh karena itu, tembaga cair dan fosfor membentuk situasi awal yang digambarkan pada Gambar 4.14 (a). Pembentuk *Copper Phospide* / Cu_3P dimulai ketika fosfor memiliki modifikasi *bimolecular* (P_2) / pada temperatur di bawah 2000°C seperti reaksi kimia di bawah ini (Von Lintel dkk., 2021).



Hal yang harus di perhatikan adalah *Copper Phospide* / Cu_3P memiliki temperatur leleh yang lebih rendah daripada tembaga, Setelah temperatur turun di bawah temperatur leleh tembaga, perilaku dari *Copper Phospide* / Cu_3P dapat dijelaskan dalam 2 tahap. Pertama, *Copper Phospide* / Cu_3P terakumulasi diantara kristal Cu yang tumbuh seperti pada Gambar 4.14 (b) dan yang ke dua, *Copper Phospide* / Cu_3P diambil alih oleh pemadatan dan berada di dalam kristal tembaga seperti pada Gambar 4.14 (c)



Gambar 4. 14 Ilustrasi skema mikrostruktur yang terjadi pada *Weld metal* (a) awal mula munculnya *Copper Phospide* (b) solidifikasi kristal tembaga dengan *Copper Phospide* (c) solidifikasi yang sepenuhnya terjadi (Von Lintel dkk., 2021)

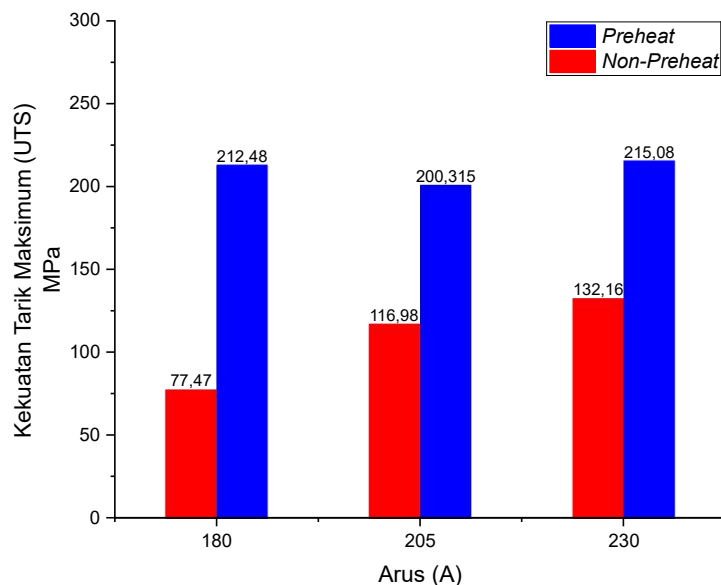
4.5 Hasil Pengujian Tarik

Pengujian tarik dilakukan untuk mengevaluasi karakteristik sifat mekanik hasil dari proses pengelasan GTAW pada material Cu-DHP dengan variasi arus dalam kondisi *preheat* dan *non-preheat*. Spesimen disiapkan berdasarkan pada ISO 4136-2012, parameter utama yang diamati pada hasil uji tarik adalah kekuatan tarik maksimum (UTS), kekuatan luluh (*Yield Strength*), dan lokasi patahan uji. Hasil pengujian tarik dari seluruh spesimen disajikan pada Tabel 4.7

Tabel 4. 7 Hasil Pengujian Tarik

No	Variasi		Kode	Max Strength (UTS)		Yield Strength		Lokasi Patahan
	Arus	Preheat		MPa	Rata-rata	MPa	Rata-rata	
TS 1	180A	Non-Preheat	NPH. 180A	87,47	77,47	61,09	53,01	Weld Metal
TS 2				67,47		44,93		Weld Metal
TS 1	205A	Non-Preheat	NPH. 205A	118,96	116,98	65,44	57,63	Weld Metal
TS 2				115,00		49,82		Weld Metal
TS 1	230A	Non-Preheat	NPH. 230A	109,98	132,16	52,35	54,20	Weld Metal
TS 2				154,34		56,04		Weld Metal
TS 1	180A	Preheat 300°C	PH. 180A	217,78	212,48	60,1	59,50	Weld Metal
TS 2				207,18		58,9		Weld Metal
TS 1	205A	Preheat 300°C	PH. 205A	200,31	200,32	49,41	50,32	Weld Metal
TS 2				200,32		51,23		Weld Metal
TS 1	230A	Preheat 300°C	PH. 230A	218,77	215,08	50,1	54,37	Weld Metal
TS 2				211,39		58,63		Weld Metal

Berdasarkan Tabel 4.7, terlihat bahwa nilai kekuatan tarik yang dihasilkan pada setiap sambungan pengelasan memiliki hasil yang berbeda pada setiap variasi yang diberikan, hal ini menjadi acuan bahwa parameter yang digunakan memiliki efek yang cukup signifikan terhadap hasil pengujian. Untuk memperjelas hubungan antara variasi arus pengelasan dan *preheat* pada kekuatan tarik yang diperoleh, data hasil pengujian disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 4.15.



Gambar 4. 15 Grafik Rata-rata Kekuatan Tarik Maksimum pada Variabel Arus 180A,205A, 230A, dengan Kondisi *Preheat* dan *Non-Preheat*

Berdasarkan Gambar 4.15 hasil pengujian tarik pada seluruh variabel, terlihat bahwa parameter *preheat* menghasilkan nilai kuat tarik yang lebih tinggi pada semua variasi arus dibanding parameter *non-preheat* pada semua rentang arus. Pada kondisi *preheat*, nilai UTS berturut-turut sebesar 212,48 MPa, 200,32 MPa, dan 215,08 MPa untuk arus 180A, 205A, dan 230A. Sementara itu, pada kondisi *non-preheat* diperoleh nilai UTS sebesar 77,47 MPa, 116,98 MPa, dan 132,16 MPa pada arus 180A, 205A, dan 230A.

Pada kondisi *non-preheat* hasil yang diperoleh memperlihatkan kecenderungan peningkatan nilai UTS seiring kenaikan arus pengelasan, nilai UTS meningkat sebesar 51% dari arus 180A ke 205A, kemudian kembali meningkat sebesar 12,97% pada arus 230A. Hal ini berbeda jika melihat hasil variabel *preheat*, nilai UTS relatif lebih tinggi pada seluruh variasi arus dan cenderung memiliki selisih yang lebih kecil antar variasi arus.

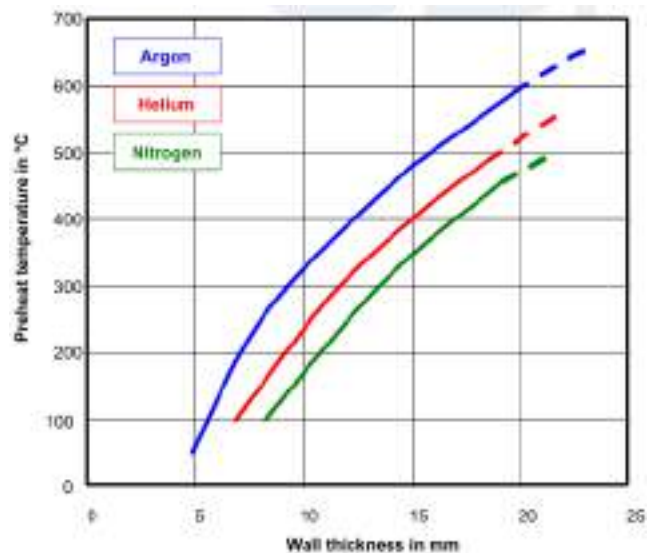
4.5.1 Pembahasan uji tarik

Berdasarkan hasil pengujian tarik yang telah disajikan pada Tabel 4.7 dan Gambar 4.15, terlihat bahwa variasi arus pengelasan pada kondisi *preheat* dan *non-preheat* menghasilkan nilai yang berbeda terhadap hasil uji tarik. Secara umum dapat diamati bahwa, pada kondisi *non-preheat* yang berperan besar terhadap kenaikan kuat tarik adalah kenaikan arus pengelasan yang dibarengi dengan kenaikan *heat input*. Hasil tersebut sejalan dengan penelitian Azwinur dkk. (2025) yang membahas tentang kenaikan *heat input* dapat memberikan peningkatan kekuatan tarik sambungan pengelasan pada kondisi *non-preheat*. Tetapi pada kondisi *preheat* memperlihatkan kenaikan arus tidak selalu menghasilkan kenaikan nilai kuat tarik, namun nilai kuat tarik yang dihasilkan relatif lebih tinggi dan selisihnya cukup besar dibandingkan kondisi *non-preheat* pada semua rentang arus pengelasan.

Perbedaan yang sangat besar ini menunjukkan bahwa *preheat* memiliki peranan yang lebih dominan dibandingkan peningkatan arus pengelasan dan *heat input*. Fenomena tersebut sangat logis mengingat karakteristik Cu-DHP yang memiliki konduktivitas termal sekitar 339 W/m·K atau jika dibandingkan dengan baja dan paduan nikel

perbedaannya sekitar 7-30 kali lebih besar (Bořilá dkk., 2024). Tanpa *preheat*, panas dari busur las dengan cepat mengalir ke seluruh bagian material sehingga kolom las kehilangan energi secara cepat. Kondisi ini menyebabkan peleburan tidak sempurna dan menghasilkan sambungan dengan kekuatan tarik yang relatif rendah akibat *incomplete fusion* pada logam las (O'Brien, 2001). Hal tersebut sejalan pada hasil morfologi makro pada Gambar 4.8.

Hasil ini sangat sesuai dengan karakteristik pengelasan tembaga yang umumnya memerlukan *preheat* untuk mengatasi tingginya konduktivitas termal material, meskipun untuk ketebalan material <5 mm, temperatur *preheat* hanya berkisar 50°C berdasarkan Gambar 4.16 atau mendekati suhu ruang sekitar 35°C. Tetapi pada penelitian ini dengan *preheat* 300°C menghasilkan sambungan yang memiliki fusi yang baik dan kekuatan tarik yang masih memenuhi persyaratan kekuatan tarik dari *filler metal* yang digunakan dibandingkan dengan kondisi *non-preheat*.



Gambar 4. 16 Pemilihan Temperatur *Preheat* berdasarkan Gas Pelindung dan Ketebalan Material (SLV, 2015)

4.5.2 Analisis lokasi patahan

Seluruh spesimen mengalami patahan pada daerah *weld metal*. Hasil ini menunjukkan bahwa kekuatan daerah las masih lebih rendah dibandingkan logam induk Cu-DHP. Berdasarkan O'Brien, (2001) pada

Tabel 4.8 kekuatan tarik dari hasil proses pengelasan berkisar antara 200-220 MPa, hal ini sejalan pada hasil uji kuat tarik yang dihasilkan pada spesimen dengan kondisi *preheat* yang nilainya berkisar di 200 – 220 MPa.

Tabel 4. 8 Sifat Mekanik Tembaga yang mengalami Pengelasan GTAW

<i>Test and Conditions</i>	<i>Tensile Strength (MPa)</i>	<i>Tensile Strength (ksi)</i>	<i>Yield Strength (MPa)</i>	<i>Yield Strength (ksi)</i>	<i>Elongation, %</i>	<i>Electrical Conductivity, % IACS</i>
<i>All Weld Metal Test</i>						
<i>As-welded</i>	186-220	27-32	103-138	15-20	20-40	-
<i>Annealed at 538°C (1000°F)</i>	186-220	27-32	83-124	12-18	20-40	-
<i>Transverse Tension Test</i>						
<i>As-welded</i>	200-220	29-32	69-159	10-13	-	-

Sumber: (O'Brien, 2001)

Pada penelitian yang dilakukan oleh Lin dkk. (2014), kegagalan uji tarik pada daerah *weld metal* disebabkan oleh pori-pori dan rongga gas yang terbentuk selama proses pengelasan. Hasil pengamatan SEM pada permukaan patahan memperlihatkan bentuk patahan ulet yang ditandai terbentuknya *dimples*. Namun demikian, keberadaan *dimples* yang relatif besar mengindikasikan adanya konsentrasi tegangan lokal akibat keberadaan cacat internal berupa porositas. Dalam penelitian tersebut menjelaskan bahwa saat temperatur melebihi 400°C, kelembapan udara yang tinggi dan pada penelitian ini ada tambahan dari penggunaan *backing gas* H₂N₂ yang menjadi tambahan sumber hidrogen yang signifikan. Ketika hidrogen berdifusi ke dalam logam cair dan bereaksi dengan oksida tembaga (Cu₂O) yang terdapat pada material sehingga akan menghasilkan uap air melalui reaksi (4,2):

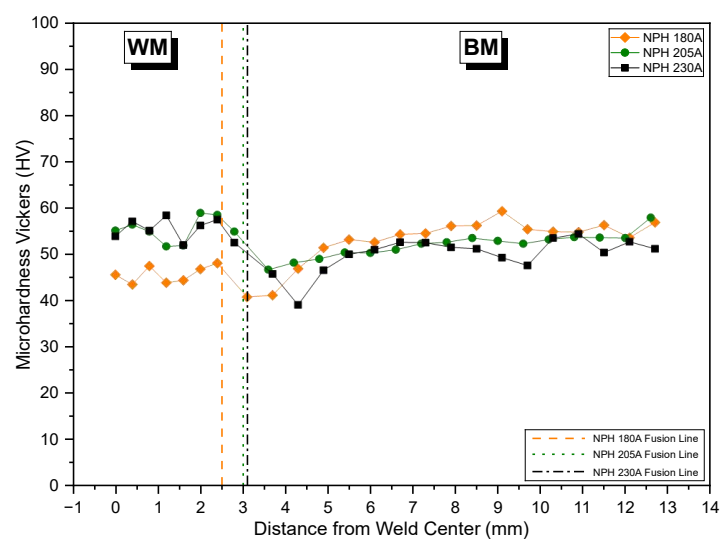
Uap air yang terbentuk pada temperatur tinggi akan terperangkap ke dalam kolam las dan membentuk gelembung gas (*gas pockets*). Gelembung tersebut akan berkembang menjadi porositas setelah logam mengalami pembekuan. Selain itu patahan di *weld metal* dapat diakibatkan oleh *filler metal* yang digunakan, karena memiliki kekuatan tarik yang lebih rendah dibandingkan kekuatan *base material*. Berdasarkan Tabel 2.10 ada 2 rekomendasi *filler metal* yang dapat

digunakan, tetapi pemilihan *filler* CuAg1 didasari oleh kemampuan *thermal conductivity* yang lebih baik dibandingkan dengan CuSn1, selain itu pemilihan kekuatan *filler metal* pada material tembaga tidak hanya pada aspek kekuatan saja, namun kecocokan unsur kimia, ketahanan keuletan dan ketahanan *thermal conductivity* yang sangat relevan untuk aplikasinya pada bagian *header section* pada *heat exchanger*.

4.6 Hasil Pengujian *Microhardness*

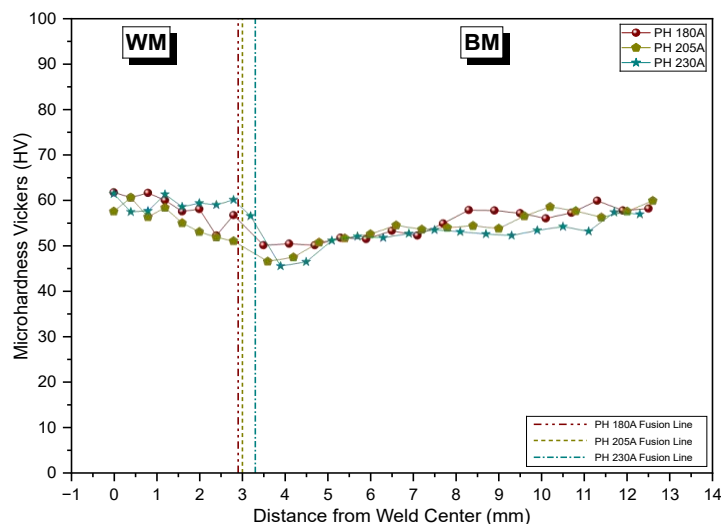
Pengujian kekerasan mikro dilakukan menggunakan metode *Vickers Microhardness* (HV0,1) dengan beban 100 gf mengacu pada standar ISO 9015-2. Pengambilan titik indentasi dilakukan pada penampang melintang hasil pengelasan dengan posisi 1 mm dari permukaan atas (*cap reinforcement /capping side*). Pengujian dimulai dari *center of weld metal* (WM) kemudian menuju *base metal* (BM).

Pemilihan lokasi tersebut bertujuan agar distribusi kekerasan yang diperoleh merepresentasikan daerah yang mengalami siklus termal terakhir selama proses pengelasan GTAW, sehingga perubahan kekerasan yang diamati berkaitan langsung dengan pengaruh variasi arus dan perlakuan *preheat* terhadap mikrostruktur hasil pengelasan, hasil uji *microhardness* disajikan pada Gambar 4.17 sampai Gambar 4.19



Gambar 4. 17 Grafik *Microhardness* spesimen *Non-Preheat* pada seluruh Variasi Arus

Pada Gambar 4.17, Distribusi kekerasan yang diperoleh dari spesimen NPH (*non-preheat*) pada daerah WM (*weld metal*) dan BM (*base metal*) menghasilkan nilai yang berbeda pada tiap daerah, hal ini dapat diakibatkan oleh peningkatan arus pengelasan bersamaan kenaikan *heat input*. Kenaikan arus dari 180A, 205A sampai 230A akan meningkatkan *heat input*, peningkatan *heat input* pada variabel *non-preheat* berakibat pada fluktuasi nilai kekerasan dan perluasan daerah WM. Nilai terendah pada daerah WM diperoleh rata-rata 45,67 HV dengan titik puncak 48,10 HV untuk spesimen NPH 180A, pada spesimen NPH 205A dan 230A cenderung memiliki selisih nilai yang kecil antar keduanya dengan rata-rata 55,29 HV dengan titik puncak 58,9 HV pada spesimen NPH 205A. Sedangkan, spesimen NPH 230A memiliki nilai rata-rata 55,34 HV dengan titik puncak 58,4 HV. Pada daerah setelah *fusion line* mengalami penurunan nilai kekerasan pada semua spesimen namun, akan kembali meningkat seiring menjauh dari titik pusat las. Tren ini terlihat pada seluruh spesimen tetapi, kenaikan arus mempengaruhi panjang daerah yang mengalami penurunan nilai kekerasan yang diakibatkan siklus termal di dekat *fusion line*.

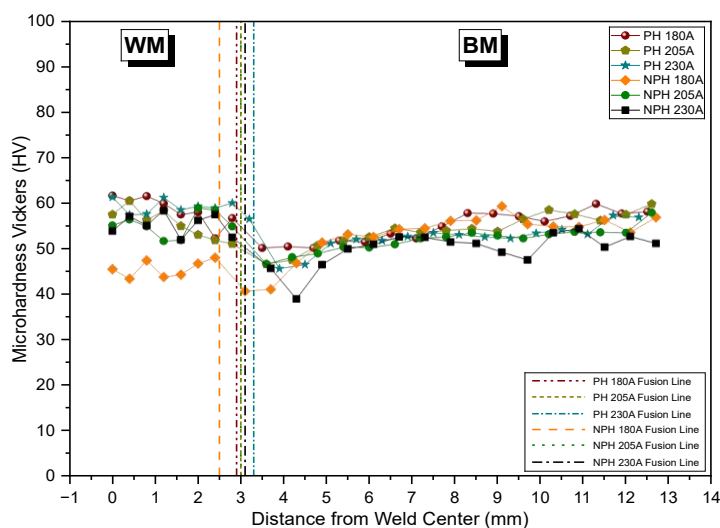


Gambar 4. 18 Grafik *Microhardness* spesimen *Preheat* pada seluruh Variasi Arus
Selanjutnya hasil distribusi nilai kekerasan untuk kondisi *preheat* pada Gambar 4.18, kenaikan arus pada kondisi *preheat* menghasilkan nilai kekerasan yang cukup seragam pada setiap daerah meskipun daerah yang dekat dengan *fusion line* tetap menjadi lokasi nilai terendah. Kombinasi peningkatan arus dan

perlakuan *preheat* juga menghasilkan penambahan luas daerah WM serta fluktuasi nilai pada daerah tersebut, hasil yang diperoleh pada spesimen PH 180A memiliki rata-rata 58,5 HV dengan titik puncak 61,6 HV. Untuk spesimen PH 205A hasil rata-rata daerah WM sebesar 55,46 HV dengan nilai puncak 60,5 HV. Sedangkan, pada spesimen PH 230A rata-rata nilainya 58,97 HV dengan nilai puncak 61,3 HV, seluruh spesimen tetap memiliki selisih yang tergolong kecil pada daerah WM hal ini juga sama terjadi pada kondisi *non-preheat*. Melewati *fusion line* penurunan nilai mulai terlihat yang diduga karena efek panas yang diterima material selama proses pengelasan dan luas daerah ini juga mengalami perubahan seiring kenaikan arus tetapi nilainya lebih seragam dan tetap terus meningkat seiring menjauh dari titik pusat las.

4.6.1 Pembahasan *microhardness*

Distribusi nilai kekerasan pada variabel kuat arus dan *preheat* menunjukkan adanya perubahan karakteristik pada setiap daerah pengelasan, untuk melihat seluruh perbandingan spesimen uji, hasilnya akan disajikan pada Gambar 4.19.



Gambar 4. 19 Grafik *Microhardness* pada seluruh variabel

Daerah *weld metal* menunjukkan pengaruh paling nyata akibat kombinasi variasi arus dan *preheat*. Apabila dikaitkan dengan hasil mikrostruktur penelitian ini, peningkatan kekerasan pada *weld metal* kemungkinan dipengaruhi adanya oleh presipitat Cu_3P maupun senyawa kaya fosfor yang telah diamati pada daerah las. Senyawa Cu_3P terbentuk

melalui penambahan paduan P–Cu ke dalam lelehan. Senyawa ini keras dan tersebar merata di batas butir dan di dalam butir. Dengan adanya fenomena ini, di satu sisi, senyawa Cu_3P menghambat pergerakan dislokasi, sementara saat jumlah partikel senyawa Cu_3P meningkat, hambatan terhadap pergerakan dislokasi juga meningkat, sehingga kekerasan paduan pun meningkat (Zhang dkk., 2019).

Daerah berikutnya yang mengalami perubahan nilai adalah daerah sekitar *fusion line*, daerah ini memiliki titik terendah pada seluruh variabel, penurunan ini dapat terjadi karena karakteristik material yang terbuat dari tembaga murni, sifat mekanis akan berkurang di area las dan zona yang terpengaruh panas, dan ini karena efek perlakuan panas yang terjadi selama proses pengelasan (Dak dkk., 2020). Selain itu, selama pengelasan, material di sekitar *fusion line* mengalami pemanasan hingga di bawah titik lebur sehingga terjadi *recovery*, rekristalisasi lokal, dan pertumbuhan butir. Pertumbuhan butir menyebabkan jumlah *grain boundary* berkurang sehingga hambatan terhadap pergerakan dislokasi menurun dan kekerasan ikut menurun. Penjelasan tersebut didukung oleh penelitian Taylor dkk. (2020) pada Cu-DHP yang menunjukkan bahwa material Cu-DHP mengalami rekristalisasi sekitar 300°C pada kondisi *annealed*. Rekristalisasi diikuti berkurangnya densitas dislokasi serta berkembangnya *annealing twins* yang menyebabkan material menjadi lebih lunak dibanding kondisi sebelum dipanaskan. Pada spesimen *preheat*, walaupun temperatur awal material lebih tinggi, distribusi panas menjadi lebih merata sehingga gradien temperatur menurun dan siklus termal menjadi lebih stabil. Dengan demikian daerah yang dekat *fusion line* tidak mengalami konsentrasi panas setinggi kondisi *non-preheat*. Hal tersebut menjelaskan mengapa nilai kekerasan pada spesimen *preheat* cenderung sedikit lebih tinggi dan seragam dibanding spesimen tanpa *preheat* pada arus yang sama. Fenomena ini juga terjadi pada penelitian Nurfian, (2025) dimana material pengelasan Cu-DHP yang mengalami proses *preheat* menghasilkan nilai kekerasan yang lebih tinggi daripada *non-preheat*, hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.20



Gambar 4. 20 Distribusi Kekerasan Nurfian, (2025)

Secara umum, nilai kekerasan pada daerah *base material* baik yang di sekitar *fusion line* dan daerah yang lebih jauh dari titik pusat, tidak menunjukkan perubahan yang signifikan, hal ini sejalan dengan penelitian Hao dkk. (2023). yang melaporkan bahwa penerapan *arc preheating* untuk memanaskan material tembaga sebelum pengelasan tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap daerah disekitar *fusion line* maupun daerah yang jauh dari *fusion line* berdasarkan profil *microhardness* yang diperoleh.

Meskipun demikian, nilai kekerasan *base metal* pada penelitian ini masih berada di bawah rentang kekerasan Cu-DHP kondisi awal yang dilaporkan dalam BS EN 12735-1:2020 sebagai saran untuk prosedur produksi material, yaitu sekitar 75–100 HV. Penurunan nilai kekerasan ini diduga disebabkan karena material telah mengalami siklus termal pengelasan, bukan pada *raw material*. Konduktivitas termal Cu-DHP yang tinggi memungkinkan panas merambat hingga ke daerah *base metal* sehingga terjadi *recovery* atau rekristalisasi parsial yang menurunkan densitas dislokasi dan menyebabkan sedikit penurunan kekerasan dibandingkan kondisi awal material.

4.7 Hasil Pengujian Laju Korosi

Pengujian laju korosi dilakukan untuk mengevaluasi ketahanan korosi sambungan las Cu-DHP hasil proses GTAW terhadap lingkungan yang

menyerupai kondisi operasi kondensor. Pengujian dilaksanakan menggunakan metode *immersion test* sesuai ASTM G31-12a dengan media larutan NaCl 3,5% selama 30 hari (720 Jam). Penimbangan spesimen dilakukan dengan interval waktu mulai dari 0, 24, 72, 120, 168, 336, dan 720 Jam untuk mengetahui jumlah kehilangan berat per interval waktu. Setelah proses perendaman spesimen dibersihkan sesuai prosedur ASTM G1-03 menggunakan larutan $H_2SO_4 + H_2O$ dengan perbandingan 1:10, tetapi pembersihan hanya dilakukan hanya setelah interval 720 Jam, hal ini bertujuan untuk mengetahui apakah lapisan oksida yang terbentuk selama perendaman akan mempercepat atau memperlambat laju korosi yang terjadi. Nilai kehilangan massa selanjutnya digunakan untuk menghitung laju korosi menggunakan persamaan yang telah dijelaskan pada (3,1). Hasil pengukuran massa sebelum dan sesudah perendaman beserta kehilangan massa masing-masing spesimen disajikan pada Tabel 4.9 dan Tabel 4.10.

Tabel 4. 9 Hasil Penimbangan Massa

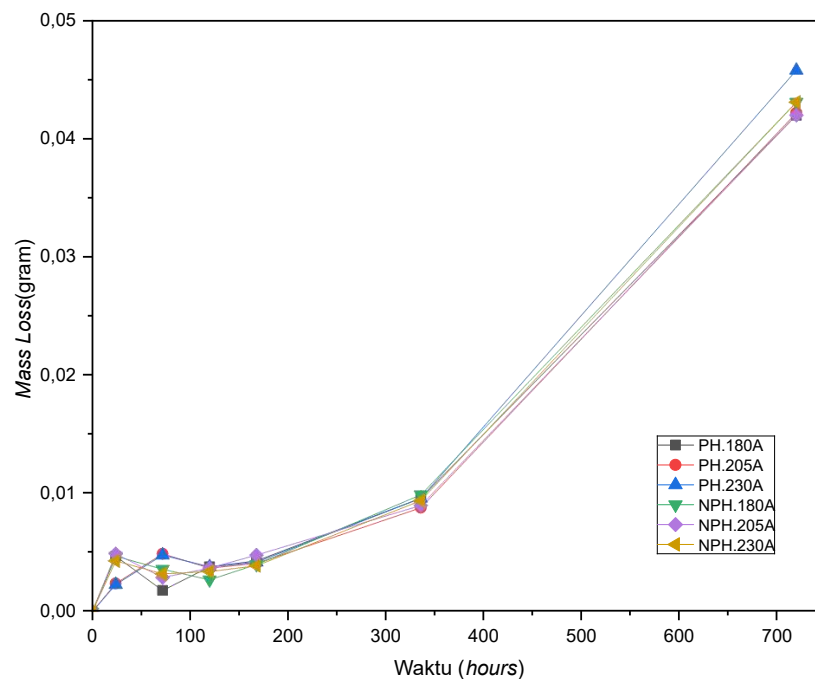
No.	Kode	0 Jam	24 Jam	72 Jam	120 Jam	168 Jam	336 Jam	720 Jam	After Cleaning
1	PH. 180A	20,1097g	20,1050g	20,1032g	20,0994g	20,0951g	20,0855g	20,0435g	20,0380g
2	PH. 205A	29,8311g	29,8287g	29,8238g	29,8201g	29,8160g	29,8072g	29,7650g	29,7593g
3	PH. 230A	32,1829g	32,1806g	32,1758g	32,1720g	32,1678g	32,1582g	32,1124g	32,1079g
4	NPH. 180A	30,5127g	30,5080g	30,5044g	30,5017g	30,4977g	30,4878g	30,4447g	30,4424g
5	NPH. 205A	32,9106g	32,9057g	32,9028g	32,8991g	32,8943g	32,8853g	32,8433g	32,8380g
6	NPH. 230A	32,4257g	32,4214g	32,4182g	32,4148g	32,4109g	32,4015g	32,3584g	32,3534g

Tabel 4. 10 Hasil Kehilangan Massa

No.	Kode	0 Jam	24 Jam	72 Jam	120 Jam	168 Jam	336 Jam	720 Jam
1	PH. 180A	0g	0,0047g	0,0018g	0,0038g	0,0043g	0,0096g	0,0420g
2	PH. 205A	0g	0,0024g	0,0049g	0,0037g	0,0041g	0,0088g	0,0422g
3	PH. 230A	0g	0,0023g	0,0048g	0,0038g	0,0042g	0,0096g	0,0458g
4	NPH. 180A	0g	0,0047g	0,0036g	0,0027g	0,0040g	0,0099g	0,0431g
5	NPH. 205A	0g	0,0049g	0,0029g	0,0037g	0,0048g	0,0090g	0,0420g
6	NPH. 230A	0g	0,0043g	0,0032g	0,0034g	0,0039g	0,0094g	0,0431g

Berdasarkan Tabel 4.10 terlihat bahwa seluruh spesimen mengalami penurunan massa setelah proses perendaman. Penurunan massa tersebut

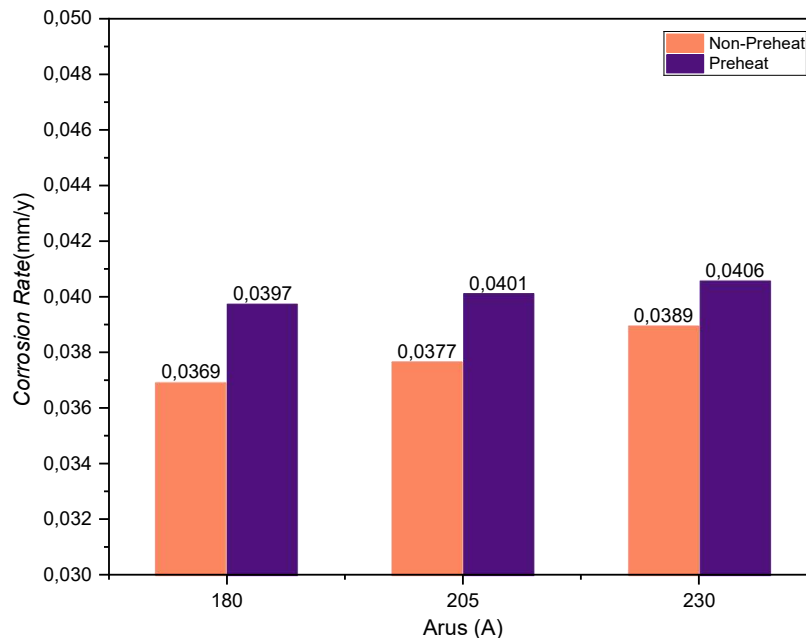
menunjukkan bahwa terjadi proses pelarutan logam akibat reaksi elektrokimia antara permukaan Cu-DHP dengan media korosif. Besarnya kehilangan massa berbeda pada setiap variasi arus pengelasan dan kondisi *preheat*, yang mengindikasikan bahwa parameter pengelasan memberikan pengaruh terhadap ketahanan korosi sambungan las. Untuk memperjelas perbedaan kehilangan massa dan laju korosi pada setiap variasi parameter, hasil pengujian disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 4.21 dan Gambar 4.22.



Gambar 4. 21 Grafik Kehilangan Massa Seluruh Spesimen

Pada Gambar 4.21 menunjukkan bahwa seluruh spesimen memiliki kecenderungan yang hampir sama. Pada tahap awal perendaman, massa yang hilang mengalami fluktuasi nilai yang relatif rendah, fluktuasi ini menandakan bahwa proses korosi masih berada pada fase awal, dimana permukaan logam mulai berinteraksi dengan media korosi sehingga lapisan oksida awal terbentuk dan sebagian mengalami pelarutan kembali. Seiring bertambahnya waktu perendaman, kehilangan massa terus meningkat dengan kenaikan paling signifikan antara 336-720 jam. Karena seluruh spesimen mengalami tren kenaikan yang serupa, hal ini mengindikasikan mekanisme korosi yang terjadi relatif sama pada semua variasi pengelasan meskipun, terdapat perbedaan kecil pada hasil kehilangan massa akibat variasi arus dan *preheat*. Nilai kehilangan massa yang diperoleh, selanjutnya digunakan sebagai dasar perhitungan laju

korosi berdasarkan perhitungan Lampiran H13 yang hasilnya disajikan pada Gambar 4.22.



Gambar 4. 22 Hasil Laju Korosi pada Seluruh Spesimen

Berdasarkan Gambar 4.22, terlihat bahwa nilai laju korosi pada seluruh spesimen berada pada kisaran yang relatif berdekatan, namun menunjukkan kecenderungan peningkatan seiring bertambahnya arus pengelasan. Pada setiap variasi arus, spesimen yang diberi *preheat* memiliki nilai laju korosi yang sedikit lebih tinggi dibandingkan spesimen *non-preheat*. Pada arus 180A, merupakan nilai laju korosi yang paling rendah pada kondisi *preheat* dan *non-preheat*, kondisi ini mengindikasikan bahwa *heat input* yang relatif lebih rendah menghasilkan perubahan mikrostruktur yang lebih kecil sehingga permukaan material masih memiliki ketahanan korosi yang relatif baik. Saat peningkatan arus menjadi 205A dan 230A, laju korosi cenderung mengalami peningkatan pada semua kondisi pengelasan. Peningkatan tersebut diduga karena semakin besarnya *heat input* yang diterima menghasilkan perubahan struktur mikro yang berpotensi meningkatkan aktivitas elektrokimia permukaan material ketika terpapar lingkungan korosif.

4.7.1 Pembahasan pengujian laju korosi

Meskipun struktur mikro utama seperti Cu_3P dan Cu_2O tampak sama, pemberian *preheat* 300°C secara signifikan mengubah kondisi

permukaan sebelum pengujian korosi dimulai. Ketahanan korosi tembaga sangat bergantung pada pembentukan lapisan oksida (Cu_2O) yang ditandai dengan lapisan berwarna merah bata. Cu_2O pada lapisan permukaan ini berbeda dengan yang ada di dalam struktur mikro, pada struktur mikro Cu_2O terbentuk selama proses peleburan material yang memadat dan bereaksi dengan oksigen sehingga menjadi inklusi atau titik-titik hitam di dalam butir kristal atau di sepanjang batas butir (Kosec dkk., 2021). Selain itu, efek dari peningkatan arus (180A ke 230A) dan *preheat* mempengaruhi laju pendinginan yang secara halus mengubah distribusi fasa tanpa mengubah jenis fasanya. Dalam pengelasan tembaga dengan unsur fosfor (DHP) fasa Cu_3P dapat terbentuk, fasa ini cenderung kurang mulia (lebih anodik) dibandingkan dengan matriks perak pada *filler* CuAg1 (Aminazad dkk., 2015). Selain Cu_3P dan Cu_2O adapun lapisan CuO (tenorit) yang berada di permukaan logam, lapisan ini berfungsi sebagai lapisan sekunder yang berada di atas lapisan Cu_2O dan menutupi pori-pori lapisan Cu_2O , lapisan ini berwarna lebih hitam dan tidak ditemukan sebagai inklusi internal karena kurang stabil dibandingkan Cu_2O pada suhu tinggi selama proses pengelasan.

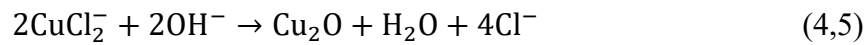
Mekanisme terjadinya korosi pada material Cu-DHP dalam larutan klorida (NaCl) melibatkan mekanisme elektrokimia berdasarkan penelitian Gao dkk., (2022).

- Reaksi katodik: melibatkan reduksi oksigen terlarut yang menghasilkan ion hidroksil (OH^-)

$$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^- \quad (4,3)$$
- Reaksi Anodik: Tembaga teroksidasi menjadi ion tembaga (I). Ion ini bereaksi dengan ion klorida Cl^- dari media NaCl membentuk kompleks klorida yang stabil namun larut, seperti Cl^-

$$\text{Cu} + 2\text{Cl}^- \rightarrow \text{CuCl}_2 + \text{e}^- \quad (4,4)$$
- Pembentukan Lapisan Cu_2O : Di permukaan, kompleks CuCl_2 ini kemudian bereaksi dengan ion hidroksil (hasil

reaksi katodik) atau air untuk membentuk endapan *cuprous oxide* (Cu_2O) yang berfungsi sebagai film pasif/pelindung



- Serangan Lokal: Keberadaan ion klorida sangat agresif, mereka dapat menembus pori-pori film tersebut, menyebabkan pelarutan tembaga berlanjut secara lokal dan membentuk sumuran (*pitting*)

Dalam paparan jangka panjang di lingkungan klorida, produk korosi sekunder dapat terbentuk seperti *atacamite* $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$. Atacamite adalah produk korosi sekunder yang bersifat *loose* (longgar), berpori, dan tidak protektif, ketika lapisan pelindung Cu_2O dan CuO berubah menjadi *atacamite*, lapisan tersebut akan mudah terlepas dari permukaan logam, karena *atacamite* tidak mampu menghalangi difusi ion klorida ke logam induk, laju pelarutan tembaga meningkat drastis, yang menyebabkan hasil uji kehilangan massa meningkat (Adeloju dkk., 1994). Lapisan ini berwarna biru-hijau yang mulai muncul pada perendaman 720 jam dan dapat diamati pada Lampiran H11.

BAB 5

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan pada proses pengelasan material Cu-DHP (*deoxidized high phosphorus copper*) menggunakan variasi arus dan *preheat* dengan proses GTAW (*gas tungsten arc welding*), maka dapat disimpulkan beberapa poin sebagai berikut.

1. Hasil pengujian tarik menunjukkan bahwa variasi arus pengelasan dan perlakuan *preheat* 300°C berpengaruh terhadap kekuatan tarik sambungan Cu-DHP hasil pengelasan GTAW. Pada seluruh variasi arus, spesimen yang diberi *preheat* menghasilkan nilai *Ultimate Tensile Strength* (UTS) dan Yield Strength (YS) rata-rata yang lebih tinggi dibandingkan spesimen tanpa *preheat*. Nilai UTS rata-rata pada spesimen tanpa *preheat* berturut-turut sebesar 77,47 MPa (180 A), 116,98 MPa (205 A), dan 132,16 MPa (230 A). Setelah diberikan *preheat* 300°C, nilai tersebut meningkat menjadi 212,48 MPa (180 A), 200,32 MPa (205 A), dan 215,08 MPa (230 A). Secara keseluruhan, spesimen PH 230A menghasilkan kekuatan tarik maksimum tertinggi, yaitu UTS rata-rata sebesar 215,08 MPa, sedangkan spesimen NPH 180A memiliki UTS terendah, yaitu 77,47 MPa. Hasil tersebut menunjukkan bahwa *preheat* 300°C meningkatkan efektivitas peleburan, memperbaiki kualitas ikatan metalurgi, serta mengurangi pengaruh cacat pengelasan, sehingga kemampuan sambungan dalam menahan beban tarik menjadi lebih baik. Selain itu, seluruh spesimen mengalami patah pada daerah *weld metal*. Hal ini menunjukkan bahwa daerah logam las merupakan bagian yang memiliki kekuatan paling rendah dibandingkan daerah lainnya, sehingga menjadi lokasi awal terjadinya kegagalan selama pembebanan tarik.
2. Hasil pengujian *metallography* menunjukkan bahwa variasi arus dan perlakuan *preheat* memengaruhi kualitas sambungan las serta karakteristik mikrostruktur material Cu-DHP. Pada pengamatan makro, spesimen PH 205A dan PH 230A menghasilkan sambungan las terbaik karena tidak

ditemukan cacat pengelasan. Spesimen PH 180A masih menunjukkan cacat berupa *root concavity*, sedangkan spesimen *non-preheat* pada seluruh variasi arus masih ditemukan cacat berupa *lack of inter-run fusion*, *lack of side wall fusion*, *cluster porosity*, dan *porosity*. Pada pengamatan mikro, seluruh variabel menunjukkan matriks α -Cu pada *base metal* dan *weld metal*, adapun ditemukan indikasi keberadaan yang diduga Cu_2O pada *base metal* dan Cu_3P pada *weld metal*. Selain itu, ukuran *grain size number* (G) pada daerah HAZ memiliki rentang nilai 5 – 3 dengan rata-rata diameter butir 63,5-127 μm sedangkan pada daerah *Weld Metal* memiliki rentang nilai (G) adalah 1 – 2 dengan rata-rata diameter butir 179,6-254 μm

3. Hasil pengujian *microhardness* menunjukkan bahwa variasi arus pengelasan dan perlakuan *preheat* memengaruhi distribusi kekerasan pada sambungan las Cu-DHP hasil proses GTAW. Pada daerah *weld metal* (WM), peningkatan arus pengelasan dari 180 A hingga 230 A cenderung meningkatkan nilai kekerasan rata-rata, baik pada kondisi *non-preheat* maupun *preheat*. Perlakuan *preheat* menghasilkan distribusi kekerasan yang lebih seragam pada daerah WM dibandingkan kondisi *non-preheat*, meskipun masih ditemukan fluktuasi nilai kekerasan. Setelah melewati *fusion line* menuju *base metal*, seluruh spesimen mengalami penurunan nilai kekerasan yang diduga berkaitan dengan pengaruh siklus termal selama proses pengelasan. Selanjutnya, nilai kekerasan kembali meningkat secara bertahap seiring bertambahnya jarak dari *fusion line* menuju *base metal* hingga mendekati nilai material dasar. Selain itu, peningkatan arus pengelasan mengakibatkan perluasan daerah *weld metal* dan luas daerah disekitar *fusion line* menjadi lebih luas pada kondisi *preheat* dan *non preheat*, yang mengindikasikan pengaruh *heat input* terhadap luas daerah terpapar panas, secara keseluruhan nilai yang diperoleh masih di bawah *standart* material karena dugaan efek panas pengelasan
4. Hasil pengujian laju korosi menunjukkan bahwa variasi kuat arus dan perlakuan *preheat* 300°C memberikan pengaruh terhadap nilai laju korosi sambungan las Cu-DHP, meskipun pengaruhnya relatif kecil. Berdasarkan perhitungan laju korosi, seluruh spesimen memiliki nilai yang relatif rendah,

yaitu berada pada kisaran 0,0369–0,0406 mm/tahun. Pada kondisi *non-preheat*, laju korosi meningkat seiring kenaikan arus pengelasan, yaitu 0,0369 mm/tahun (180 A), 0,0377 mm/tahun (205 A), dan 0,0389 mm/tahun (230 A). Tren yang sama juga terjadi pada kondisi *preheat* 300°C, dengan nilai laju korosi sebesar 0,0397 mm/tahun (180 A), 0,0401 mm/tahun (205 A), dan 0,0406 mm/tahun (230 A). Namun, selisih peningkatan tersebut relatif kecil, yaitu sekitar 0,0007–0,0028 mm/tahun atau kurang dari 5%, sehingga tidak menunjukkan penurunan ketahanan korosi yang signifikan.

5.2 Saran

Masih banyak kekurangan pada pengerjaan Tugas Akhir ini, sehingga membutuhkan bahan evaluasi agar kedepannya terdapat penyempurnaan dalam penelitian selanjutnya sehingga hasilnya lebih optimal. Beberapa saran perlu diperhatikan untuk mendapatkan hasil yang lebih baik sebagai berikut.

1. Penambahan pengujian SEM-EDX disarankan untuk mengetahui evolusi struktur mikro pada *weld metal* secara jelas dan lebih detail daripada *metallography*. Serta dapat mengetahui secara pasti unsur yang terkandung didalam suatu fasa yang diduga Cu_2O maupun Cu_3P didalam *weld metal*.
2. Disarankan menambah pengujian X-Ray *Diffraction* (XRD) untuk menganalisis determinasi fase dan mengetahui fase yang terbentuk pada daerah *weld metal*, *fusion line*, dan *base metal*

“Halaman ini sengaja dikosongkan”
This page is intentionally left blank

DAFTAR PUSTAKA

- Adeloju, S. B., & Duan, Y. Y. (1994). *Corrosion Resistance of Cu₂O and CuO on Copper Surfaces in Aqueous Media*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1179/000705994798267485>
- Aminazad, A. M., Hadian, A. M., & Ghasimakbari, F. (2015). *Investigation on Corrosion Behaviour of Copper Brazed Joints*. *Procedia Materials Science*, 11, 672–678. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.11.024>
- ASME II C. (2025). *SECTION II MATERIALS Part C Specifications for Welding Rods, Electrodes, and Filler Metals ASME Boiler and Pressure Vessel Code An International Code*. www.asme.org/cer
- ASTM E340. (2023). *Standard Practice for Macroetching Metals and Alloys*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/E0340-23>
- ASTM G1-03. (2003). *Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens*.
- ASTM G31 – 12a. (2012). *Guide for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/G0031-12A>
- Azwinur, Kusuma, M. H., Usman, & Dharma, S. (2024). *The effect of TIG welding technology parameters on the weld quality of copper material joints for heat pipe applications*. <http://e-jurnal.pnl.ac.id/polimesin>
- Azwinur, Kusuma, M. H., Usman, Dharma, S., & Akhyar. (2025). *Effects of heat input on mechanical properties, microstructures and thermal conductivity of copper alloy in gas tungsten arc welding technology*. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 19(6), 316–329.
<https://doi.org/10.12913/22998624/203367>
- Balart, M. J., Patel, J. B., Gao, F., & Fan, Z. (2015). *Grain refinement of DHP copper by elemental additions*. *International Journal of Cast Metals Research*, 28(4), 248–256. <https://doi.org/10.1179/1743133615Y.0000000008>
- Bhargava, A. K., & Banerjee, M. K. (2017). *Heat-Treating Copper and Nickel Alloys*. Dalam *Comprehensive Materials Finishing* (hlm. 398–420). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.09196-7>
- Boțilă, L. N., Perianu, I. A., Radu, B., Codrean, C., Nicolaescu, M., & Binchiciu, E.-F. (2024). *Failure Analysis of Cu-DHP Joining Processes: A Comparative Study of FSW and SFSW Techniques*. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1319(1), 012008. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1319/1/012008>

- BS EN 12449. (2023). *Copper and copper alloys. Seamless, round tubes for general purposes*. British Standards Institution.
- BS EN 12451. (2012). *Copper and copper alloys — Seamless, round tubes for heat exchangers*.
- BS EN ISO 9015-2. (2016). *Destructive tests on welds in metallic materials — Hardness testing Part 2: Microhardness testing of welded joints*.
- BS EN ISO 15614-6. (2006). *Specification and qualification of welding procedures for metallic materials — Welding procedure test — Part 6: Arc and gas welding of copper and its alloys*.
- BS EN ISO 24373. (2018). *BSI Standards Publication Welding consumables-Solid wires and rods for fusion welding of copper and copper alloys-Classification*.
- Bušić, M., Šolić, S., Tropša, V., & Klobčar, D. (2024). *Influence of Flux Agent Composition in A-TIG Welding Of Cu-ETP Sheets*. *International Journal of Mining, Materials, and Metallurgical Engineering*, 10.
<https://doi.org/10.11159/ijmmme.2024.002>
- Certilas. (2022a). *CEWELD CuAg Tig*. <https://certilas.com/en/product/cuag-tig>
- Certilas. (2022b). *CEWELD CuSn Tig*. <https://certilas.com/en/product/cusn-tig>
- Chen, H. C., Bi, G., Nai, M. L. S., & Wei, J. (2015). *Enhanced welding efficiency in laser welding of highly reflective pure copper*. *Journal of Materials Processing Technology*, 216, 287–293.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.09.020>
- Dak, G., Joshi, J., Yadav, A., Chakraborty, A., & Khanna, N. (2020). *Autogenous welding of copper pipe using orbital TIG welding technique for application as high vacuum boundary parts of nuclear fusion devices*. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 188.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2020.104225>
- Dovale-Farelo, V., Tavadze, P., Lang, L., Bautista-Hernandez, A., & Romero, A. H. (2022). *Vickers hardness prediction from machine learning methods*. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26729-3>
- Fadillah, M. W. (2025). *Analisis Perbandingan Backing Gas Pada Pengelasan Material Cu-Dhp Dengan Proses Gtaw Terhadap Sifat Mekanik, Metallography, Dan Laju Korosi*.
- Fontargen. (2020). *Handbook for brazing consumables*. www.voestalpine.com/welding

- Gao, X., & Liu, M. (2022). *Corrosion Behavior of High-Strength C71500 Copper-Nickel Alloy in Simulated Seawater with High Concentration of Sulfide. Materials*, 15(23). <https://doi.org/10.3390/ma15238513>
- Hao, Q., Jin, J., Wang, H., Liu, X., Tao, B., Wu, Y., Vostner, A., Laquiere, J., & Claudio, F. (2023). *Research and development of copper joint for ITER In-Vessel Coils. Nuclear Fusion*, 63(9). <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ace7df>
- Hassan Malik, Q. (2021). *Gas tungsten Arc Welding (GTAW) or (TIG) Welding*.
- Ian D. Harris, C. (2004). *Welding handbook. Volume 2, Welding processes. Part 1*. American Welding Society.
- ISO 3452-1. (2021). *Non-destructive testing — Penetrant testing — Part 1: General principles*. www.iso.org
- ISO 4136. (2012). *Destructive tests on welds in metallic materials — Transverse tensile test*.
- ISO 5817. (2023). *Welding - Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded) - Quality levels for imperfections*.
- ISO 6507-1. (2023). *Metallic materials — Vickers hardness test — Part 1: Test method*. www.iso.org
- ISO 14175. (2008). *Welding consumables-Gases and gas mixtures for fusion welding and allied processes*. www.iso.org
- ISO 17639. (2022). *Destructive tests on welds in metallic materials - Macroscopic and microscopic examination of welds*.
- ISO 23277. (2015). *Non-destructive testing of welds-Penetrant testing-Acceptance levels*. www.iso.org
- Jiang, Q., Zhang, P., Yu, Z., Shi, H., Wu, D., Yan, H., Ye, X., Lu, Q., & Tian, Y. (2021). *A review on additive manufacturing of pure copper*. Dalam *Coatings* (Vol. 11, Nomor 6). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/coatings11060740>
- Khoirul Rohmat, I., Munir, M. M., Fadillah, M. W., Ari, M., & Anggara, D. (2025). Analisis Perbandingan Backing Gas Argon Dan H₂-N₂ Pada Pengelasan Material Cu-DHP Dengan Proses GTAW Terhadap Kekuatan Tarik Dan Metallograhy. *Jurnal Teknologi Maritim*, 8(2), 33–42. <https://doi.org/10.35991/jtm.v8i2.81>

- Kosec, T., Voglar, J., Močnik, P., & Legat, A. (2021). Effect of the microstructural properties of copper on corrosion performance. *Corrosion Engineering Science and Technology*, 56(8), 728–735. <https://doi.org/10.1080/1478422X.2021.1947942>
- Kou, S. (2021). *Welding Metallurgy, Sindo Kou, 3rd Ed., 2021*.
- Kreie, L., Maier, H. J., & Hassel, T. (2025). *Gas absorption and the directional development of mechanical properties of copper alloys produced by GMAW-WAAM*.
- Kulakli, A., Çitrak, T., Tozkoparan, S., Şimşir, A. B., & Kasap, E. (2021). *Effect of Phosphorus Content And Cold Deformation on Mechanical Properties of CuAg0.1 Alloy. METAL 2021 - 30th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings*, 1125–1129. <https://doi.org/10.37904/metal.2021.4226>
- Kutelu, B. J., Seidu, S. O., Eghabor, G. I., & Ibitoye, A. I. (2018). *Review of GTAW Welding Parameters. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 06(05), 541–554. <https://doi.org/10.4236/jmmce.2018.65039>
- Li, C., Chen, M., Yuan, S., & Liu, L. (2012). *Effect of welding speed in high speed laser-TIG welding of magnesium alloy. Materials and Manufacturing Processes*, 27(12), 1424–1428. <https://doi.org/10.1080/10426914.2012.700144>
- Li, M., & Zinkle, S. J. (2012). *Physical and mechanical properties of copper and copper alloys*. Dalam *Comprehensive Nuclear Materials* (Vol. 4, hlm. 667–690). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-056033-5.00122-1>
- Lin, J. W., Chang, H. C., & Wu, M. H. (2014). *Comparison of mechanical properties of pure copper welded using friction stir welding and tungsten inert gas welding. Journal of Manufacturing Processes*, 16(2), 296–304. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2013.09.006>
- Miller, S. (2025). *High Conductivity Copper Rod and Wire*.
- Munir, M., Thoriq, M., Kurniyanto, H., & Anggara, D. (2019). *Modul praktik DT NDT*.
- Nurfian, E. C. (2025). Pengaruh preheat pada pengelasan gtaw menggunakan material Cu-DHP terhadap kekuatan sambungan, nilai kekerasan dan struktur mikro.
- O'Brien, A. (2001). *Welding Handbook Volume 5 materials and applications, part 2*.

- Pantazopoulos, G., Toulfatzis, A., Zormalia, S., Vazdirvanidis, A., & Skarmoutsos, D. (2012). *Preliminary evaluation of the thermally affected metallurgical condition of extruded and drawn CuFe2P tubes*. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 21(10), 2188–2194. <https://doi.org/10.1007/s11665-012-0148-9>
- Scott, W. W. (2001). *ASM Specialty Handbook ® Copper and Copper Alloys*. www.asminternational.org
- Setiawan, A., & Pamungkas, B. Y. (2022). *Tempering Terhadap Sifat Mekanik Pipa Low Carbon Steel Low Alloy Grade X65Q*. *Journal Of Metallurgical Engineering And Processing Technology*, 3(7), 53–62.
- SLV, G. (2015). *The Welding Engineer's Current Knowledge*.
- Takegami, H., & Shinoda, T. (2005). *Friction welding of Cr–Zr copper alloy*. *Welding International*, 19(7), 524–530. <https://doi.org/10.1533/wint.2005.3444>
- Taylor, S., Masters, I., Li, Z., & Kotadia, H. R. (2020). *Direct Observation via In Situ Heated Stage EBSD Analysis of Recrystallization of Phosphorous Deoxidised Copper in Unstrained and Strained Conditions*. *Metals and Materials International*, 26(7), 1030–1035. <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00493-y>
- TWI. (2004, Januari). *A general review of the causes and acceptance of shape imperfections - Part 2*. <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/a-general-review-of-the-causes-and-acceptance-of-shape-imperfections-part-2-068?locale=en>
- TWI. (2012). *Copper alloys - brasses and bronzes*. <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/welding-of-copper-alloys-brasses-and-bronzes-112>
- Tzevelekou, T., Flampouri, A., Rikos, A., Vazdirvanidis, A., Pantazopoulos, G., & Skarmoutsos, D. (2013). *Hot-water corrosion failure of a hard-drawn copper tube*. *Engineering Failure Analysis*, 33, 176–183. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.04.020>
- Vahedi Nemani, A., Ghaffari, M., Sabet Bokati, K., Valizade, N., Afshari, E., & Nasiri, A. (2024). *Advancements in Additive Manufacturing for Copper-Based Alloys and Composites: A Comprehensive Review*. Dalam *Journal of Manufacturing and Materials Processing* (Vol. 8, Nomor 2). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/jmmp8020054>

- Vijayaram, T. R. (2023). *Exploring the Applications and Advancements of Copper and Copper Alloys in Modern Manufacturing Processes*. 1(2). <https://doi.org/10.37591/IJIPDE>
- Von Lintel, H., Böhlke, P., Wobker, H. G., Michels, W., Krupp, U., & Jahns, K. (2021). *Laser beam welding of deoxidized copper: microstructure investigation and thermodynamic consideration*. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 52(11), 1161–1172. <https://doi.org/10.1002/mawe.202100003>
- Weman, K. (2011). *Welding processes handbook Second edition*.
- Will, T., Kohl, J., Hoelbling, C., Müller, L., & Schmidt, M. (2023). *Laser welding of different pure copper materials under consideration of shielding gas influence and impact on quality relevant surface topographical features*. *Journal of Laser Applications*, 35(1). <https://doi.org/10.2351/7.0000891>
- Xia, C., Pan, Z., Polden, J., Li, H., Xu, Y., Chen, S., & Zhang, Y. (2020). *A review on wire arc additive manufacturing: Monitoring, control and a framework of automated system*. Dalam *Journal of Manufacturing Systems* (Vol. 57, hlm. 31–45). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.08.008>
- Yusof, F., & Jamaluddin, M. F. (2014). *Welding Defects and Implications on Welded Assemblies*. Dalam *Comprehensive Materials Processing: Thirteen Volume Set* (Vol. 6, hlm. V6-125-V6-134). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.00605-1>
- Zhang, X., Ren, X. Y., Hong, X., & Gao, X. Y. (2019). *Effect of P content on microstructure and wear properties of ZCuPb20Sn5 alloy*. *RSC Advances*, 9(60), 34972–34985. <https://doi.org/10.1039/c9ra04651h>

LAMPIRAN

Lampiran A: Sertifikat Material

Lampiran A1 Mills Certificate



ELVALHALCOR
Hellas - Athens - Greece



HALCOR
Hellas - Athens - Greece

MRC GmbH (Eudingen)
Metallkondeminierte Sued
Ruhmelberg Str.2
72384 Eudingen im Gailu

QUALITY MANAGEMENT DEPT.

Article code: HC080400.1

PG number: HC080400.1

Checked by: [Signature] Date: 03/05/2018

Scanned by: [Signature]

INSPECTION CERTIFICATE ✓
Type 3.1 acc. EN 10204
Certificate No: 1000349542
Delivery No: 0005161686

DATE: 03/05/2018

Customer:	MRC GmbH (GUENTNER)	Cut's Part No:	HC080400.1 ✓
Cut's Ref. No:	4500023570	Inspection Lot:	020000481993
Our Order No:	1200087463 / 50	Quantity:	565,20 KG

Designation:	CuT & 088,990x4,55x5006 JJ HSN D I
according to:	SP23-8, REV. 17, AD2000 W5/2, PED 2014/68/EU
Material:	Cu-DHP ✓

Characteristic	Unit of meas.	Specifications	Values	Sample No
Cu	%	≥99,9000	99,9515 - 99,9675	2
P	%	0,0150 - 0,0400	0,0216 - 0,0226	2
ODmin	mm	≥88,400	88,770 - 88,930	2
ODmax	mm	≤89,400	88,990 - 89,040	2
ODav	mm	88,700 - 89,100	88,905 - 88,950	2
Imin	mm	≥4,200	4,350 - 4,380	2
Imax	mm	≤4,800	4,380 - 4,610	2
LENGTH	mm	5000 - 5100	5006	2
Re	N/mm²	≥250,0	254,8 - 256,6	2
Rp0,2	N/mm²	≥150,0	219,5 - 234,5	2
AS0	%	≥30,0	31,8 - 32,7	2
DRIFT TEST	%	≤30,0	OK	4
ECT EN 1971	%	100	OK ✓	-

DECLARATION OF CONFORMITY

The products depicted above, conform to the conditions and requirements of the purchaser and to the description, quantities and specified. The Quality Assurance System applied to monitor their production, complies with the requirements of ISO 9001:2015, independently certified by TÜV HELLAS, with certification No 041070119 and in addition is also approved and recognized by notified body 0045, TÜV NORD acc. to AD2000-Merkblatt WD and Pressure Equipment Directive 2014/68/EU, Annex I, Clause 4.3.

Athens

Q.C. INSPECTOR



HLR
2

04.05.2018

Q.A. MANAGER

[Signature]
D. SKARNOUTSOS

email: info@halcor.com
website: www.halcor.com
VAT number: EL384010718

Offices & Copper Tube Plant (Hellas - Athens)
877, Ave. Athens - Larissa National Road 6
GR-18511 Larissa, Greece
Tel: +30 22620 48711, Fax: +30 22620 48711

Plant
GR - Ave. Athens - Larissa National Road
GR-20021 Larissa - Voreia, Greece
Tel: +30 22620 50478, Fax: +30 22620 51975

Domestic Sales Dept.
252 Pireas Str.
GR-17139, Piraeus, Athens, Greece
Tel: +30 210 4894111, Fax: +30 210 4894197

Lampiran A2 Mills Certificate Filler Metal CuAg1

voestalpine Böhler Welding Fontargen GmbH
Siemensstraße 4 · D-67304 Eisenberg
Postfach 1280 · D-67299 Eisenberg
Tel.: +49-(0)6351-401-0
Fax: +49-(0)6351-401-149
www.voestalpine.com/welding

Guentner Tata Kft.
Szomodi ut. 4
2890 Tata
Ungarn

Abnahmeprüfzeugnis 3.1
Inspection certificate 3.1
nach / as per : EN 10204
Nr. 2022-2009401332-10-41100421-013
Rev. 0 Seite / Page : 1 / 1

Bestell-Nr.	PO no.	495000898	vom / of 30.03.2022
Auftrags-Nr.	Order no.	1009289144	
Lieferschein/Pos./Splitt	Delivery note/pos./split	2009401332/000000/000010	vom / of 07.04.2022
Produkt	Product	WIG-Stab/-Draht / GTAW rod/wire	
Handelsname	Trade name	A 200 W	
Normbezeichnung	Standard designation	EN ISO 24373: S-Cu 1897 (CuAg1)	
Abmessung	Dimension	2,0X1000	207581
Charge	Heat no.	41100421	23518
Liefermenge	Quantity	100,0 KG	3K18971W 0005

Chemische Analyse in % des Produktes **Chemical composition in % of the product**

Si	Mn	P	Cu	Al	Fe	As	Pb	Ag	Ni+Co					
< 0,01	0,07	0,01	REST	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,86	< 0,01					

Lampiran A3 Mills Certificate Gas H₂N₂


SAMATOR
PT ANEKA GAS INDUSTRI Tbk
Jl. Raya Srenged - Munduwoy, Dk.
Srenged - Bekasi - Jawa Barat 17137

No. Dokumen : SGT/MTG/COI-31

CERTIFICATE OF CONFORMITY

Date : Desember 22, 2024
Certificate No. : 454 / COC-OC / XII-2024
Customer : PT. GUNTNER INDONESIA
Gas Code : Mixed gases (H₂ 20% in N₂)
Cylinder size : 6 m³
Cylinder No. : 1

3685317	3670997	3680920	3683464	3685305	3680226	3670844	3680930
3680104	3680596	3680031	3680103	3680704	3680502	3680514	

COMPOSITION

NO	PARAMETER	SPECIFICATION
1	Hydrogen (H ₂)	20%
2	Nitrogen (N ₂)	Balance

Revisi : 6, Tgl. Berlaku : 01/01/2020



Lampiran A4 *Certificate of Analysis* NaCl[illegible]Lampiran A5 *Certificate of Analysis* HNO₃[illegible]

Lampiran B: *Set-up* Parameter Pengelasan

Lampiran B1 Dimensi Spesimen



Lampiran B2 *Fit-up*



Lampiran B3 Proses *Preheat*



Lampiran B4 Pengukuran *Temperature Preheat & Interpass* untuk Variabel *Preheat 300 °C*



Lampiran B5 Lanjutan Pengukuran *Temperature Preheat & Interpass* untuk Variabel *Non-preheat*



Lampiran B6 Proses Pengelasan



Lampiran B7 *Setup* Parameter Arus 180A



Lampiran B8 *Setup* Parameter Arus 205A



Lampiran B9 *Setup* Parameter Arus 230A



Lampiran C: Hasil Uji Visual

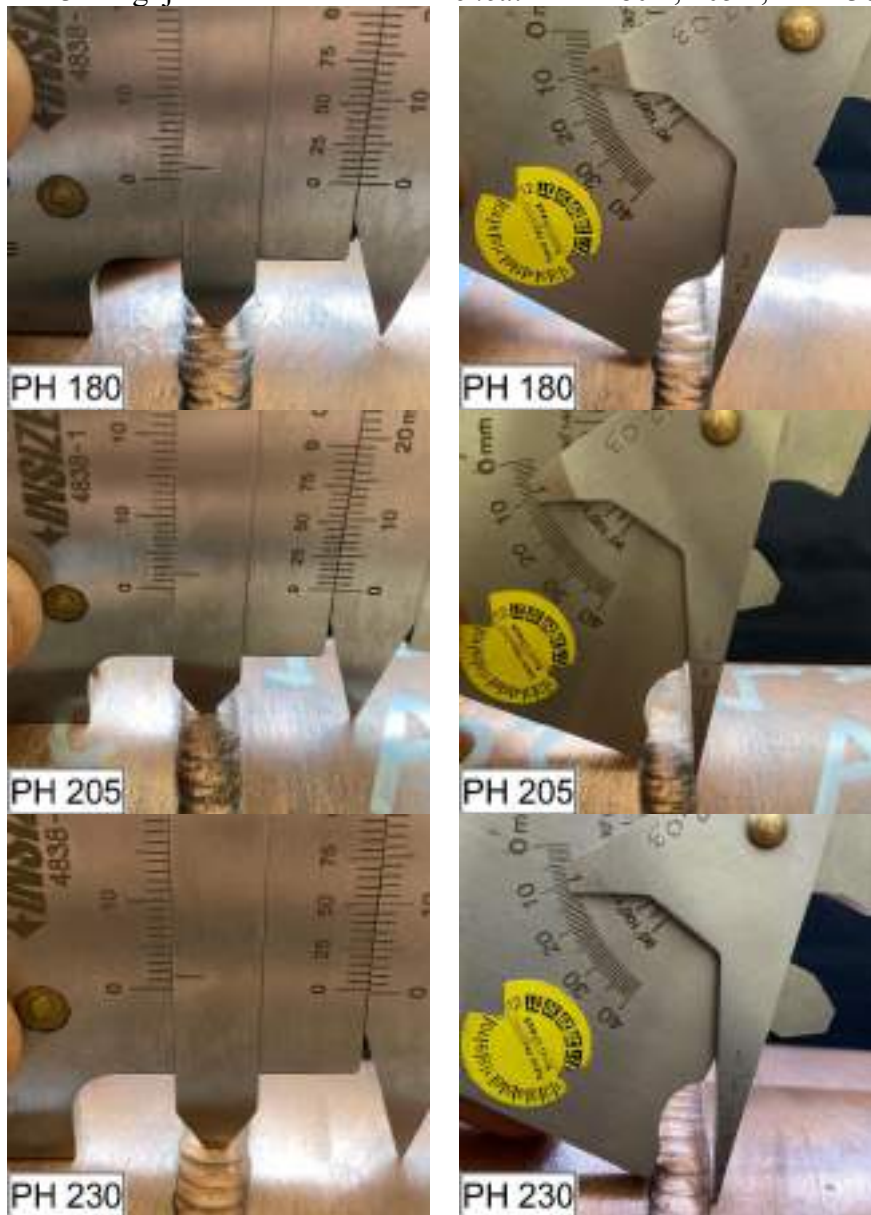
Lampiran C1 Hasil Pengelasan Variabel *Non-Preheat* Arus 180A, 205A, dan 230A



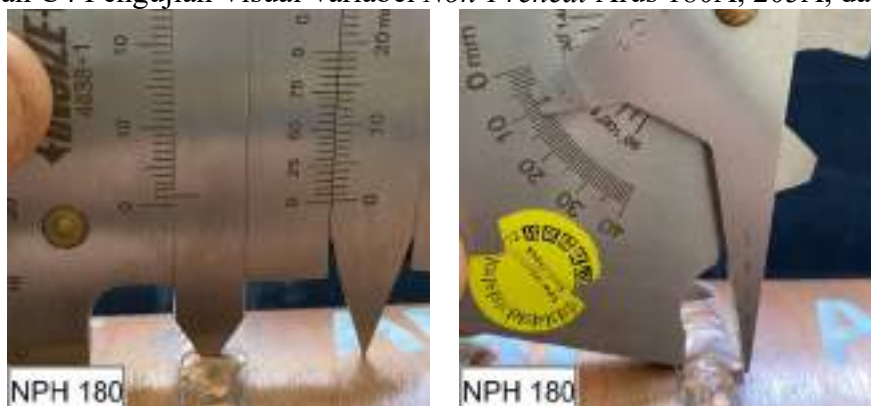
Lampiran C2 Hasil Pengelasan Variabel *Preheat* Arus 180A, 205A, dan 230A

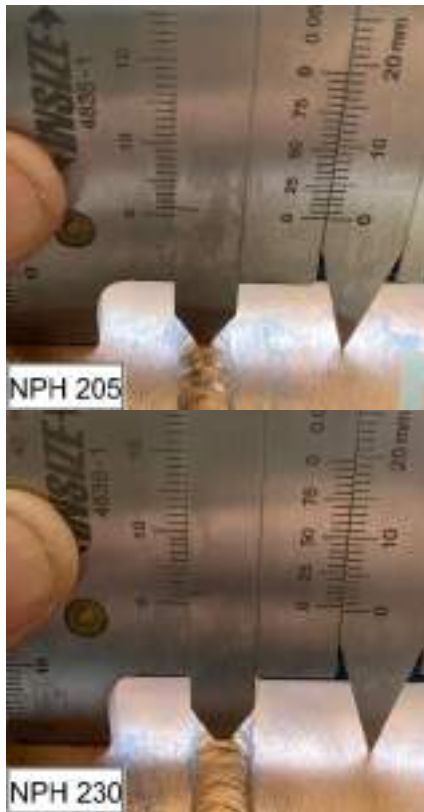


Lampiran C3 Pengujian Visual Variabel *Preheat* Arus 180A, 205A, dan 230A

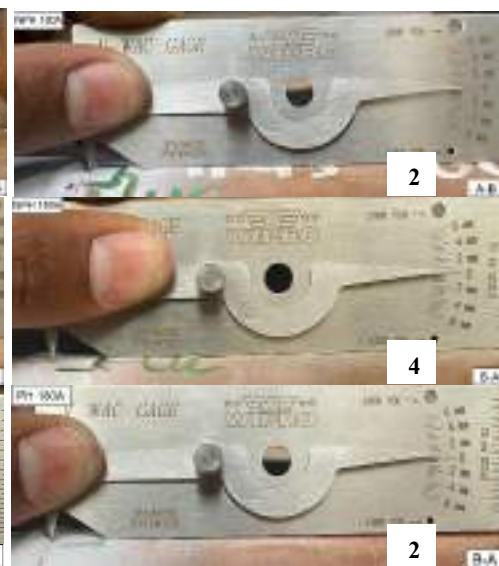
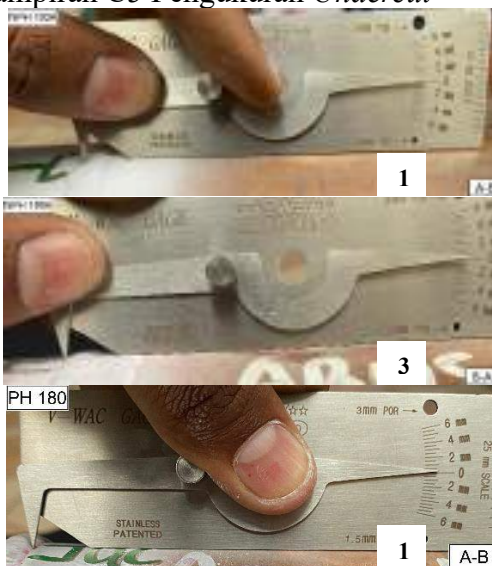


Lampiran C4 Pengujian Visual Variabel *Non-Preheat* Arus 180A, 205A, dan 230A





Lampiran C5 Pengukuran *Undercut*



Lampiran C6 Report Visual Spesimen Non-Preheat Arus 180A (Sesi A-B)

VISUAL INSPECTION PIPE REPORT WELD FACE					
Name	: Achmad Widan Alrozi	Signature	:	Test Piece Identification	: NPH 180A
Code/Specifications used	: ISO 5817-2023	Welding Process	: GTAW	Joint Type	: V - Groove
Welding Position	: 1G	Thickness of Material	: 4,8 mm	Date	: 21-02-26

MEASURE FROM THIS ATTU M E D G E

A
B

32

Undercut 1
 5,7
 D=0,5

54

Undercut 2
 3,7
 D=0,3

All Dimension Give in mm

Notes: Excess Weld Metal	: 1,3 mm	Linear Misalignment	: -	Toe Blend	: Poor
Weld Width	: 9 mm				

Lampiran C7 Report Visual Spesimen Non-Preheat Arus 180 (Sesi B-A)

VISUAL INSPECTION PIPE REPORT WELD FACE					
Name	: Achmad Widan Alrozi	Signature	:	Test Piece Identification	: NPH 180A
Code/Specifications used	: ISO 5817-2023	Welding Process	: GTAW	Joint Type	: V - Groove
Welding Position	: 1G	Thickness of Material	: 4,8 mm	Date	: 21-02-26

MEASURE FROM THIS ATTU M E D G E

B
A

82

Undercut 3
 4,3
 D=0,4

115

Undercut 4
 3,3
 D=0,4

All Dimension Give in mm

Notes: Excess Weld Metal	: 1,3 mm	Linear Misalignment	: -	Toe Blend	: Poor
Weld Width	: 9 mm				

Lampiran C8 Report Visual Spesimen Preheat Arus 180A (Sesi A-B)

VISUAL INSPECTION PIPE REPORT WELD FACE					
Name	Achmad Widada Albari	Signature		Test Piece Identification	PH 180A
Code Specifications used	ISO 5817:2023	Welding Process	GTAW	Joint Type	V - Groove
Welding Position	1G	Thickness of Material	4,8 mm	Date	21-02-26

MEASURE FROM THIS ATTITUDE

A

B

All Dimension Give in mm

Notes: Excess Weld Metal	1,58 mm	Under Misalignment	-	Toe Blend	Poor
Weld Width	9 mm				

Lampiran C9 Report Visual Spesimen Preheat Arus 180A (Sesi B-A)

VISUAL INSPECTION PIPE REPORT WELD FACE					
Name	Achmad Widada Albari	Signature		Test Piece Identification	PH 180A
Code Specifications used	ISO 5817:2023	Welding Process	GTAW	Joint Type	V - Groove
Welding Position	1G	Thickness of Material	4,8 mm	Date	21-02-26

MEASURE FROM THIS ATTITUDE

B

A

All Dimension Give in mm

Notes: Excess Weld Metal	1,58 mm	Under Misalignment	-	Toe Blend	Poor
Weld Width	9 mm				

Lampiran C10 *Report Visual Spesimen Non-Preheat Arus 205A (Sesi A-B)*

VISUAL INSPECTION PIPE REPORT WELD FACE					
Name	Achmad Widan Abriati	Signature		Test Piece Identification	NPH 205A
Code/Specifications used	ISO 5817:2023	Welding Process	GTAW	Joint Type	V - Groove
Welding Position	1G	Thickness of Material	4,8 mm	Date	25-02-26

MEASURE FROM THIS EDGE

A

B

All Dimension Give in mm					
Notes: Excess Weld Metal	: 1 mm	Linear Misalignment	: -	Toe Blend	: Good
Weld Width	: 8 mm				

Lampiran C11 *Report Visual Spesimen Non-Preheat Arus 205A (Sesi B-A)*

VISUAL INSPECTION PIPE REPORT WELD FACE					
Name	Achmad Widan Abriati	Signature		Test Piece Identification	NPH 205A
Code/Specifications used	ISO 5817:2023	Welding Process	GTAW	Joint Type	V - Groove
Welding Position	1G	Thickness of Material	4,8 mm	Date	21-02-26

MEASURE FROM THIS EDGE

B

A

All Dimension Give in mm					
Notes: Excess Weld Metal	: 1 mm	Linear Misalignment	: -	Toe Blend	: Good
Weld Width	: 8 mm				

Lampiran C12 *Report Visual Spesimen Preheat Arus 205A (Sesi A-B)*

VISUAL INSPECTION PIPE REPORT WELD FACE					
Name	: Achmad Willem Abrori	Signature	:	Test Piece Identification	: PH 205A
Code/Specifications used	: ISO 5817-2023	Welding Process	: GTAW	Joint Type	: V - Groove
Welding Position	: 1G	Thickness of Material	: 4.8 mm	Date	: 21-02-26

MEASURE FROM THIS ATTITUDE

A

B

All Dimension Give in mm

Notch Excess/Weld Metal	: 2 mm	Liner Misalignment	: -	Toe Blend	: Good
Weld Width	: 8 mm				

Lampiran C13 *Report Visual Spesimen Preheat Arus 205A (Sesi A-B)*

VISUAL INSPECTION PIPE REPORT WELD FACE					
Name	: Achmad Willem Abrori	Signature	:	Test Piece Identification	: PH 205A
Code/Specifications used	: ISO 5817-2023	Welding Process	: GTAW	Joint Type	: V - Groove
Welding Position	: 1G	Thickness of Material	: 4.8 mm	Date	: 21-02-26

MEASURE FROM THIS ATTITUDE

B

A

All Dimension Give in mm

Notch Excess/Weld Metal	: 2 mm	Liner Misalignment	: -	Toe Blend	: Good
Weld Width	: 8 mm				

Lampiran C14 *Report Visual Spesimen Non-Preheat Arus 230A (Sesi A-B)*

VISUAL INSPECTION PIPE REPORT					
WELD FACE					
Name	: Achmad Wilhan Abrori	Signature	:	Test Piece Identification	: NPH 230A
Code/Specifications used	: ISO 5817:2023	Welding Process	: GTAW	Joint Type	: V - Groove
Welding Position	: 1G	Thickness of Material	: 4,8 mm	Date	: 21-02-26

MEASURE FROM THIS ATTITUDE

A

B

All Dimension Give in mm					
Notes: Excess Weld Metal	: 1,29 mm	Linear Misalignment	: -	Toe Blend	: Good
Weld Width	: 8 mm				

Lampiran C15 *Report Visual Spesimen Non-Preheat Arus 230A (Sesi B-A)*

VISUAL INSPECTION PIPE REPORT					
WELD FACE					
Name	: Achmad Wilhan Abrori	Signature	:	Test Piece Identification	: NPH 230A
Code/Specifications used	: ISO 5817:2023	Welding Process	: GTAW	Joint Type	: V - Groove
Welding Position	: 1G	Thickness of Material	: 4,8 mm	Date	: 21-02-26

MEASURE FROM THIS ATTITUDE

B

A

All Dimension Give in mm					
Notes: Excess Weld Metal	: 1,29 mm	Linear Misalignment	: -	Toe Blend	: Good
Weld Width	: 8 mm				

Lampiran C16 *Report Visual* Spesimen *Preheat* Arus 230A (Sesi A-B)

VISUAL INSPECTION PIPE REPORT WELD FACE					
Name	: Achmad Wildan Albesri	Signature	:	Test Piece Identification	: PH 230A
Code/Specifications used	: ISO 5817:2023	Welding Process	: GTAW	Joint Type	: V - Groove
Welding Position	: 1G	Thickness of Material	: 4,8 mm	Date	: 21-02-26

MEASURE FROM THIS ATTITUDE

A

B

All Dimension Give in mm

Notes: Excess/Weld Metal	: 1,34 mm	Linear Misalignment	: -	Toe Blend	: Good
Weld Width	: 9 mm				

Lampiran C17 *Report Visual* Spesimen *Preheat* Arus 230A (Sesi B-A)

VISUAL INSPECTION PIPE REPORT WELD FACE					
Name	: Achmad Wildan Albesri	Signature	:	Test Piece Identification	: PH 230A
Code/Specifications used	: ISO 5817:2023	Welding Process	: GTAW	Joint Type	: V - Groove
Welding Position	: 1G	Thickness of Material	: 4,8 mm	Date	: 21-02-26

MEASURE FROM THIS ATTITUDE

B

A

All Dimension Give in mm

Notes: Excess/Weld Metal	: 1,34 mm	Linear Misalignment	: -	Toe Blend	: Good
Weld Width	: 9 mm				

Lampiran D: Hasil Uji Penetrant

Lampiran D1 *Penetrant Test*



Lampiran D2 *Report Penetrant Test*

	Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya Laboratorium Uji Bahan	No. Dok.	PM-007-LUB-PPNS
		No. Rev.	01/09/2012
		Tanggal	-/-

PENETRANT TEST

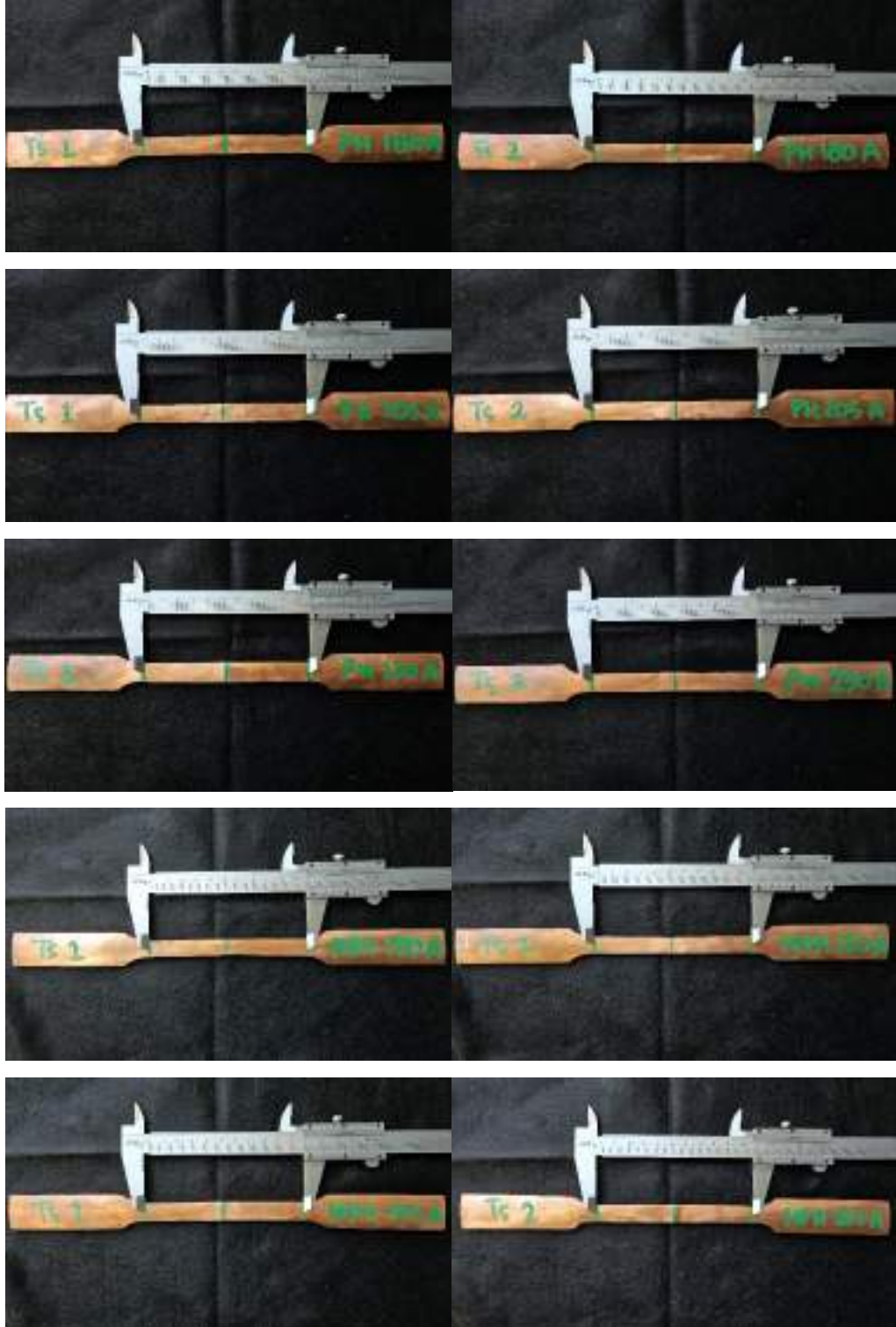
Date : 21-03-26
 Material : Cu-DHP
 Welding Process / Position : GTAW / IG
 Reference : ISO 3452-1

Type of Penetrant	☒ Visible	☐ Fluorescent	☐ Dual Sensitivity			
Method	☒ Solvent Removable	☐ Water-Washable	☐ Post-Emulsifier			
Time	Pre-cleaning 1 min Penetration 2 min	Etching 0 min Developing 5-30 min				
Surface Condition	☒ Weld ☐ Machine Process ☐ Grind ☐ Other					
Range	☐ Base Metal ☐ Edge Preparation ☐ Back Chipping		☒ Weld Part ☐ Repair Weld ☐ Other			
No.	Item	Type of Defect	Size (mm)	Accepted	Reject	Remark
1.	NPH 180A	Porosity	0,7	✓		-
		Undercut 1	5,7		✓	-
		Undercut 2	3,7	✓		-
		Undercut 3	4,3		✓	-
		Undercut 4	3,3	✓		-
2.	PH 180A	Undercut 1	5,2		✓	-
		Undercut 2	2,9	✓		-
3.	NPH 205A	-	-	✓		-
4.	PH 205A	-	-	✓		-
5.	NPH 230A	-	-	✓		-
6.	PH 230A	-	-	✓		-

Lighting equipment : Lampu dan Lux Meter
 Light intensity : 1000 Lux

Lampiran E: Hasil Uji Tarik

Lampiran E1 Spesimen Sebelum Pengujian *Tensile*

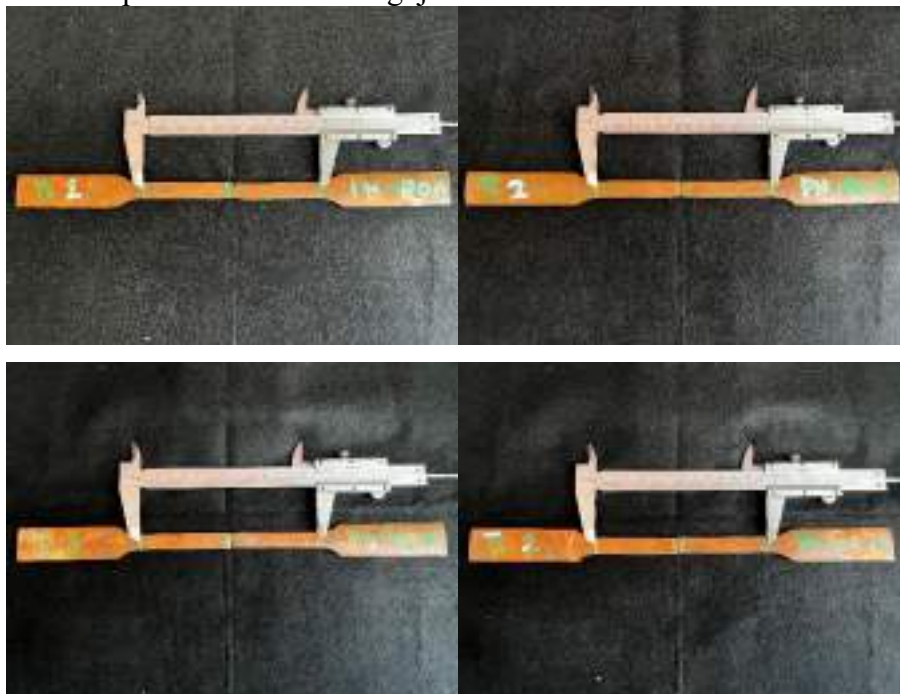


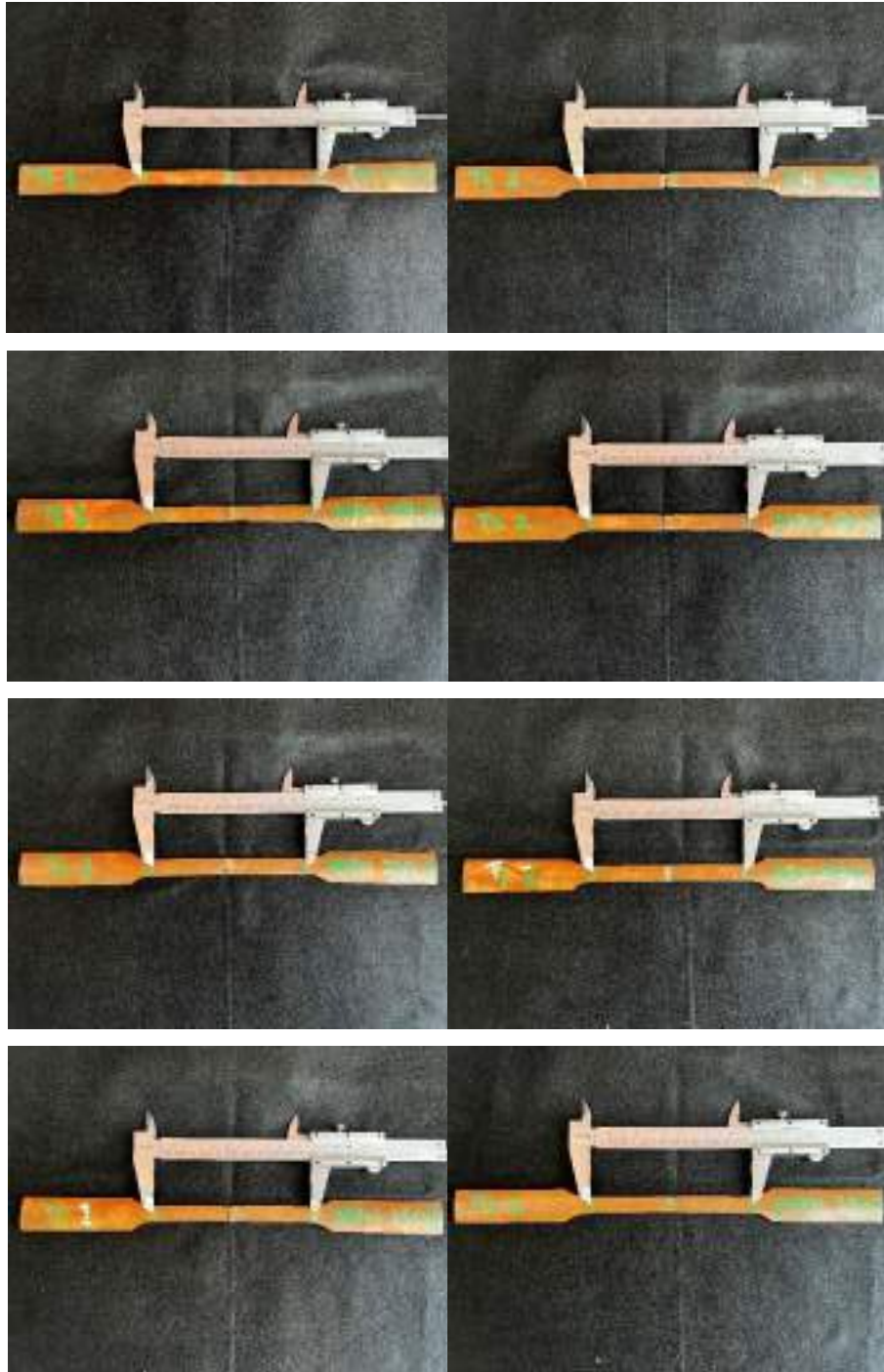


Lampiran E2 Proses Pengujian *Tensile*



Lampiran E3 Spesimen Setelah Pengujian *Tensile*





Lampiran E4 Hasil Patahan Uji Tarik



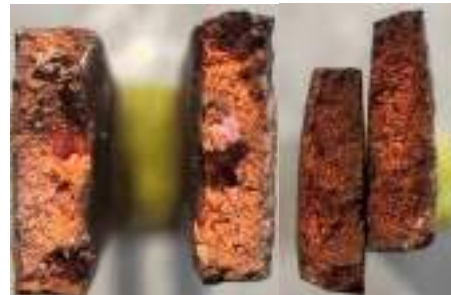
Spesimen NPH 180A TS 1 & TS 2



Spesimen PH 180A TS 1 & TS 2



Spesimen NPH 205A TS 1 & TS 2



Spesimen PH 205A TS 1 & TS 2



Spesimen NPH 230A TS 1 & TS 2



Spesimen PH 230A TS 1 & TS 2

Lampiran E5 Report Uji Tarik Spesimen TS1 Non-Preheat Arus 180A

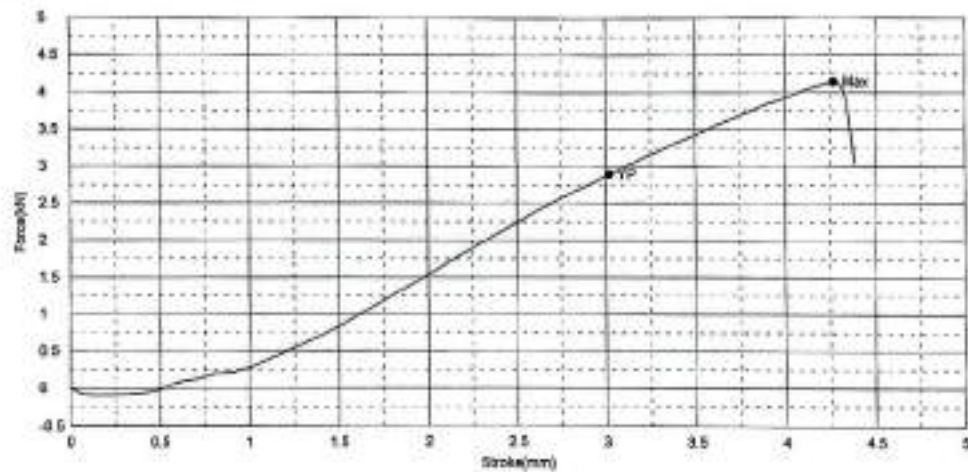
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM UJI BAHAN

Shape: Plate

	Thickness	Width	Gauge Length
Units	mm	mm	mm
TS 1	4,1200	11,5000	111,2000

Name Parameter	Area	Yield Force 0.1 %FS	Max. Force	Yield Strength 0.1 %FS	Max. Strength
Units	mm ²	kN	kN	MPa	MPa
TS 1	47,38	2,89	4,14	61,09	87,47

Name	Elongation
Units	%
TS 1	1,71



Comment

Putus di weld metal

SPK No. : 22-III/PL18/BJP/2026
Customer : Achmad Widan Abrori NRP. 0722040100 /TL
Project: TUGAS AKHIR
Specimen : Pipa Dia. 88.9mm Thick 4.8mm / NPH 180A
Material : CU DHP
Weld. process/Position/Welder : GTAW / 1G / Friend
Test method: ASTM E8/E8M
Reference code: ISO 15614-6

Surabaya, April 8, 2026

[Signature]
(*Andi Widiyudi*)

Lampiran E6 Report Uji Tarik Spesimen TS2 Non-Preheat Arus 180A

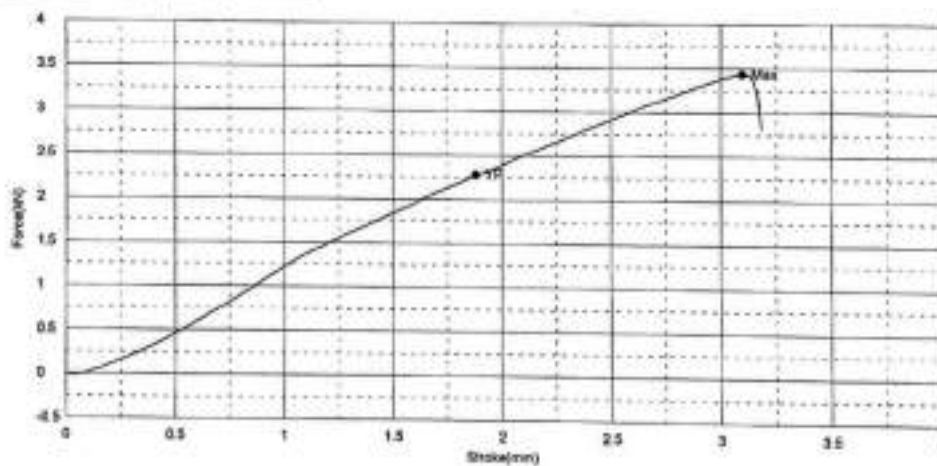
**POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM UJI BAHAN**

Shape: Plate

	Thickness	Width	Gauge Length
Units	mm	mm	mm
TS 2	4.4200	11.4800	109.6000

Name Parameter	Area	Yield Force 0.1 %FS	Max. Force	Yield Strength 0.1 %FS	Max. Strength
Units	mm ²	kN	kN	MPa	MPa
TS 2	50.74	2.28	3.44	44.93	67.74

Name	Elongation
Units	%
TS 2	2.28



Comment

Putus di weld metal

SPK No. : 22-III/PL19/BJP/2025
 Customer : Achmad Wildan Abrori NRP. 0722040100 /TL
 Project : TUGAS AKHIR
 Specimen : Pipe Dia. 58.9mm Thick 4.8mm / NPH. 180A
 Material : CU DHP
 Weld. process/Position/Welder : GTAW / 1G / Friend
 Test method: ASTM E8/E8M
 Reference code: ISO 15614-6

Surabaya, April 8, 2025

[Signature]
 (Name of Signatory)

Lampiran E7 Report Uji Tarik Spesimen TS1 Non-Preheat Arus 205A

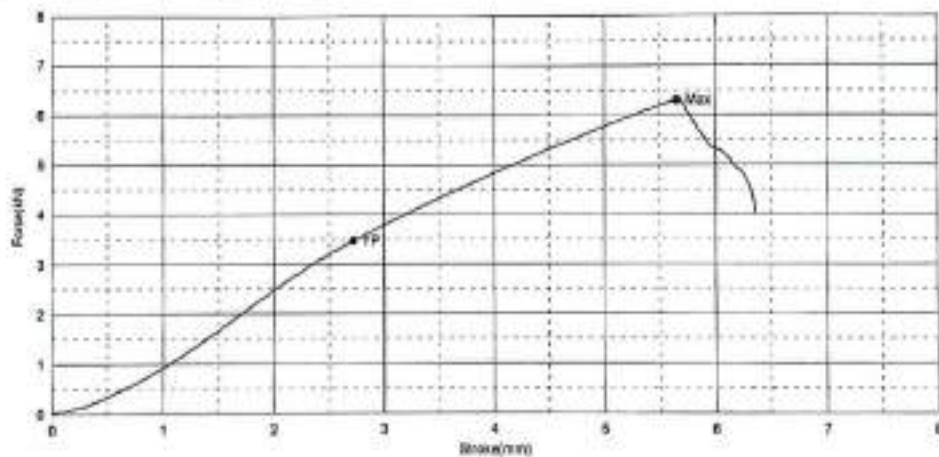
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM UJI BAHAN

Shape: Plate

	Thickness	Width	Gauge Length
Units	mm	mm	mm
TS 1	4,2200	12,5800	109,0000

Name Parameter	Area	Yield Force 0.1 %FS	Max. Force	Yield Strength 0.1 %FS	Max. Strength
Units	mm ²	kN	kN	MPa	MPa
TS 1	53,00	3,47	8,31	65,44	118,96

Name	Elongation
Units	%
TS 1	2,84



Comment:

Pulus di weld metal

SPK No. : 22-III/PL19/BJP/2026

Customer : Achmad Widan Abrori NRP. 0722040100 /TL

Project : TUGAS AKHIR

Specimen : Pipa Dia. 68.9mm Thick 4.8mm / NPH. 205A

Material : CU DHP

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

Test method : ASTM E8/E8M

Reference code : ISO 15614-6

Surabaya, April 8, 2026

[Signature]
I, *[Signature]*

Lampiran E8 Report Uji Tarik Spesimen TS2 Non-Preheat Arus 205A

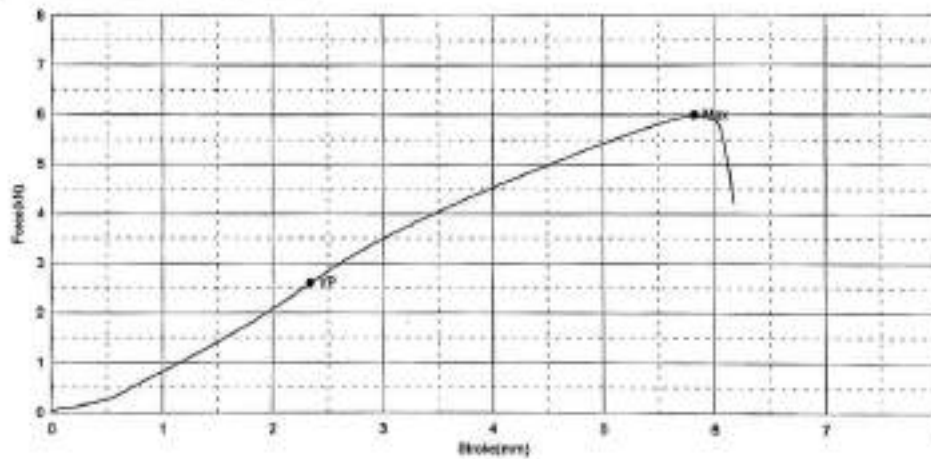
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM UJI BAHAN

Shape: Plala

	Thickness	Width	Gauge Length
Units	mm	mm	mm
TS 2	4,2200	12,3600	111,0000

Name Parameter	Area	Yield Force 0,1 %FS	Max. Force	Yield Strength 0,1 %FS	Max. Strength
Units	mm ²	kN	kN	MPa	MPa
TS 2	52,16	2,60	8,00	49,82	115,00

Name	Elongation
Units	%
TS 2	1,53



Comment

Putus di weld metal

SPK No. : 22-HUPL19/BJP/2026
Customer : Achmad Wildan Abrori NRP. 0722040100/TL
Project : TUGAS AKHIR
Specimen : Pipa Dia. 88,9mm Thick 4.8mm / NPH. 205A
Material : CU DHP
Weld. process/Position/Welder : GTAW / 1G / Friend
Test method : ASTM E8/E8M
Reference code : ISO 15614-6

Surabaya, April 8, 2026

[Signature]
(Nure Wahyuni)

Lampiran E9 Report Uji Tarik Spesimen TS1 Non-Preheat Arus 230A

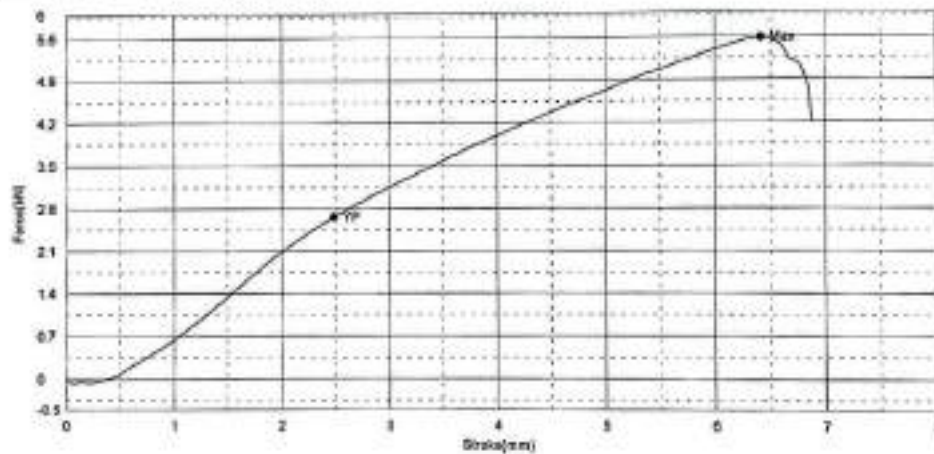
**POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM UJI BAHAN**

Shape: Plate

	Thickness	Width	Gauge Length
Units	mm	mm	mm
TS 1	4,4200	11,4800	110,0000

Name	Area	Yield Force	Max. Force	Yield Strength	Max. Strength
Parameter		0,1 %FS		0,1 %FS	
Units	mm ²	kN	kN	MPa	MPa
TS 1	50,74	2,68	5,58	52,35	109,98

Name	Elongation
Units	%
TS 1	4,45



Comment

Putus di weld metal

SPK No. : 22-III/PL19IBJP/2025
Customer : Achmad Wildan Abrori NRP. 0722040100 /ITL
Project : TUGAS AKHIR
Specimen : Pipa Dia. 88.9mm Thick 4.8mm / NPH. 230A
Material : CU DHP
Weld. process/Position/Welder : GTAW / 1G / Friend
Test method: ASTM E8/E8M
Reference code: ISO 15614-6

Surabaya, April 8, 2025

(Signature)
(Achmad Wildan Abrori)

Lampiran E10 Report Uji Tarik Spesimen TS2 Non-Preheat Arus 230A

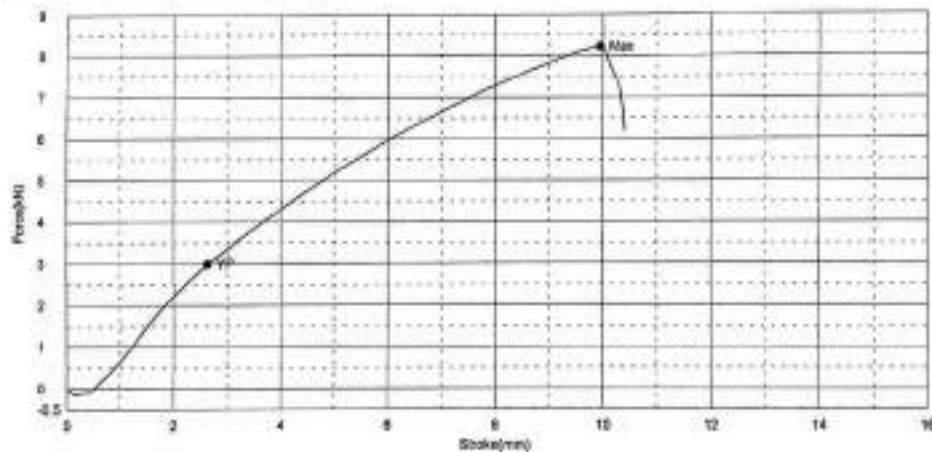
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM UJI BAHAN

Shape: Plate

	Thickness	Width	Gauge Length
Units	mm	mm	mm
TS 2	4,5200	11,7600	110,0000

Name	Area	Yield Force 0,1 %FS	Max. Force	Yield Strength 0,1 %FS	Max. Strength
Parameter					
Units	mm ²	kN	kN	MPa	MPa
TS 2	53,25	2,98	8,22	56,04	154,34

Name	Elongation
Units	%
TS 2	6,27



Comment

Pulus di weld metal

SPK No. : 22-III/PL19/BJP/2025
Customer : Achmad Widan Abrori NRP. 0722040100 /TL
Project : TUGAS AKHIR
Specimen : Pipa Dia. 88.9mm Thick 4.8mm / NPH, 230A
Material : CU DHP
Weld. process/Position/Welder : GTAW / 1G / Friend
Test method: ASTM E8/E8M
Reference code: ISO 15614-6

Surabaya, April 8, 2026

(Signature)
(Achmad Widan Abrori)

Lampiran E11 Report Uji Tarik Spesimen TS1 Preheat Arus 180A

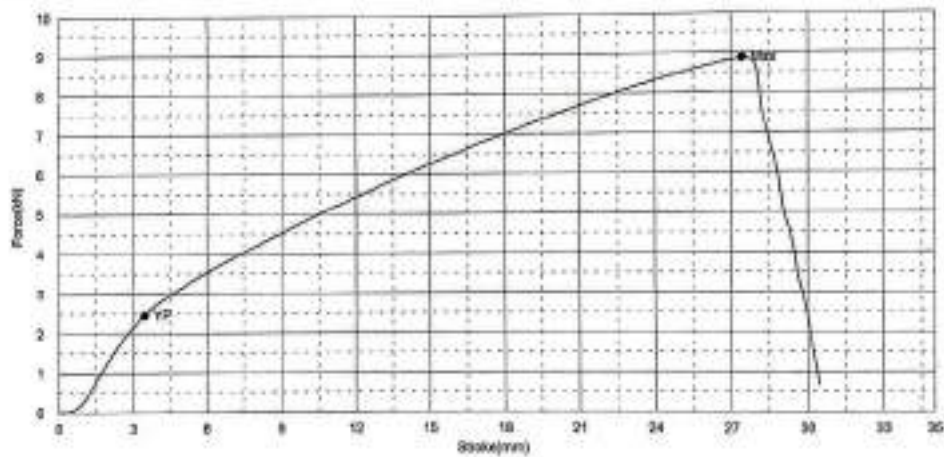
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM UJI BAHAN

Shape: Plate

	Thickness	Width	Gauge Length
Units	mm	mm	mm
TS 1	3,3400	12,2000	110,0000

Name Parameter	Area	Yield Force 0,1 %FS	Max. Force	Yield Strength 0,1 %FS	Max. Strength
Units	mm ²	kN	kN	MPa	MPa
TS 1	40,75	2,45	8,67	60,10	217,78

Name	Elongation
Units	%
TS 1	16,91



Comment

Putus di weld metal

SPK No. : 22-III/PL19BJP/2025

Customer : Achmad Widen Abrori NRP. 0722040100 /ITL

Project : TUGAS AKHIR

Specimen : Pipa Dis. 88.9mm Thick 4.8mm / PH. 180 A

Material : CU DHP

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

Test method: ASTM E8/E8M

Reference code: ISO 15614-6

Surabaya, April 8, 2025

(Handwritten signature)
(Audi wahyuni)

Lampiran E12 Report Uji Tarik Spesimen TS2 Preheat Arus 180A

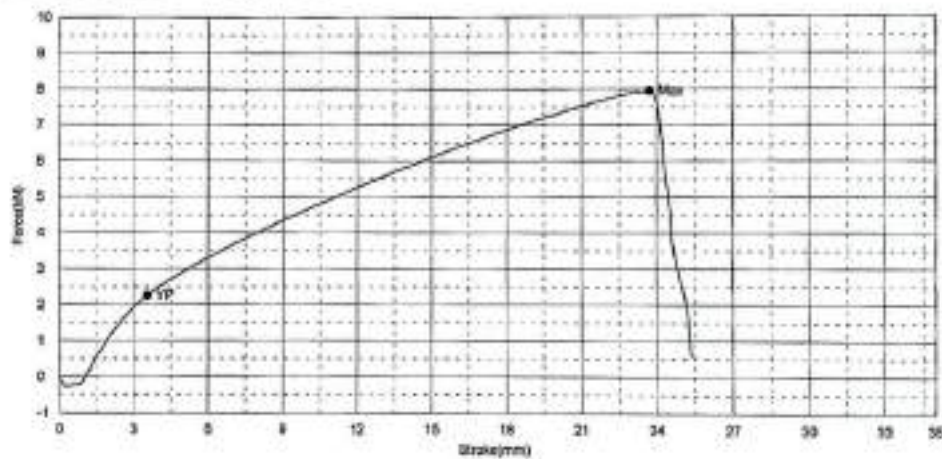
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM UJI BAHAN

Shape: Plate

	Thickness	Width	Gauge Length
Units	mm	mm	mm
TS 2	3,0000	12,8000	110,0000

Name Parameter	Area	Yield Force 0.1 %FS	Max. Force	Yield Strength 0.1 %FS	Max. Strength
Units	mm ²	kN	kN	MPa	MPa
TS 2	38,40	2,28	7,95	58,90	207,18

Name	Elongation
Units	%
TS 2	12,91



Comment

Petus di weld metal

SPK No : 22-IVPL1018.P/2026
Customer : Achmad Wildan Abrori NRP. 0722040100 /TL
Project: TUGAS AKHIR
Specimen : Pipa Dia. 68.9mm Thick 4.8mm / PH. 180 A
Material : CU DHP
Weld. process/Position/Welder : GTAW / 1G / Friend
Test method: ASTM E8/E8M
Reference code: ISO 15614-6

Surabaya, April 8, 2026


(Nur Widiyanti)

Lampiran E13 Report Uji Tarik Spesimen TS1 Preheat Arus 205A

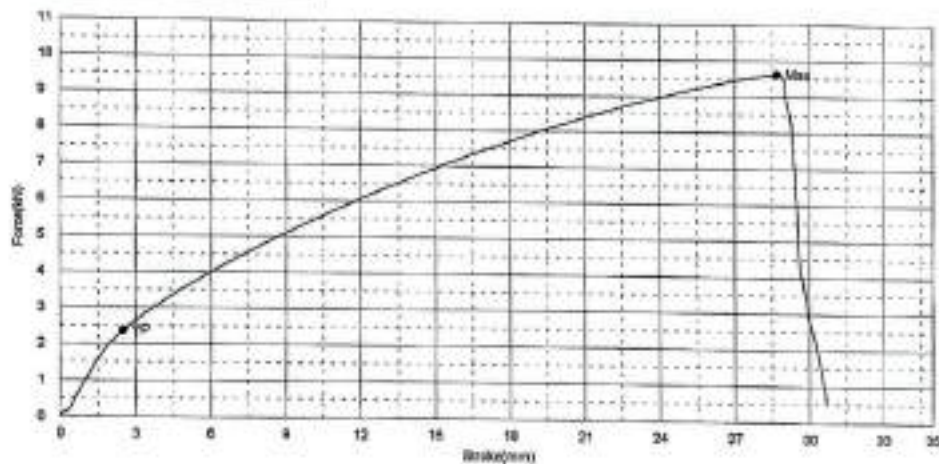
**POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM UJI BAHAN**

Shape: Plate

	Thickness	Width	Gauge Length
Units	mm	mm	mm
TS 1	4,0000	12,0000	111,0000

Name Parameter	Area	Yield Force 0,1 %FS	Max. Force	Yield Strength 0,1 %FS	Max. Strength
Units	mm ²	kN	kN	MPa	MPa
TS 1	48,00	2,37	9,61	49,41	200,31

Name	Elongation
Units	%
TS 1	18,63



Comment

Putus di weld metal

SPK No. : 22-IUPL19/BJP/2026

Customer : Achmad Widan Abrori NRP. 0722040100 / TL

Project : TUGAS AKHIR

Specimen : Pipe Dia. 68,8mm Thick 4,8mm / PH. 205 A

Material : CU DHP

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

Test method : ASTM E8/EBM

Reference code : ISO 15614-6

Surabaya, April 8, 2025

(Signature)
(Name: Achmad Widan Abrori)

Lampiran E14 Report Uji Tarik Spesimen TS2 Preheat Arus 205A

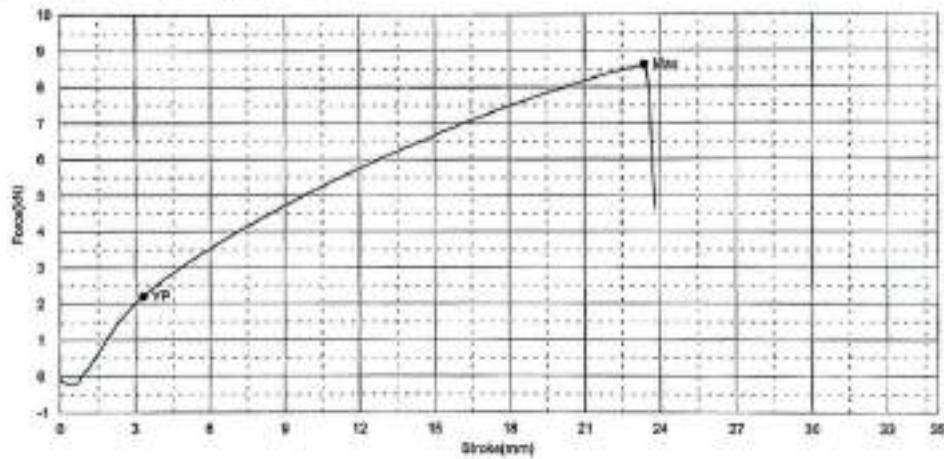
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM UJI BAHAN

Shape: Plate

	Thickness	Width	Gauge Length
Units	mm	mm	mm
TS 2	3,5000	12,3000	111,0050

Name Parameter	Area	Yield Force 0,1 %FS	Max. Force	Yield Strength 0,1 %FS	Max. Strength
Units	mm ²	kN	kN	MPa	MPa
TS 2	43,05	2,21	8,62	51,23	200,32

Name	Elongation
Units	%
TS 2	13,51



Comment

Potus di weld metal

SPK No. : 22-IVPL10BJP/2026
Customer : Achmad Wildan Abrori NRP. 0722040100 /TL
Project : TUGAS AKHIR
Specimen : Pipe Dia. 88.9mm Thick 4.8mm / PH. 205 A
Material : CU DHP
Weld. process/Position/Welder : GTAW / 1G / Friend
Test method: ASTM E8/E8M
Reference code: ISO 15614-6

Surabaya, April 8, 2028

(Signature)
(Name of the person who signed)

Lampiran E15 Report Uji Tarik Spesimen TS1 Preheat Arus 230A

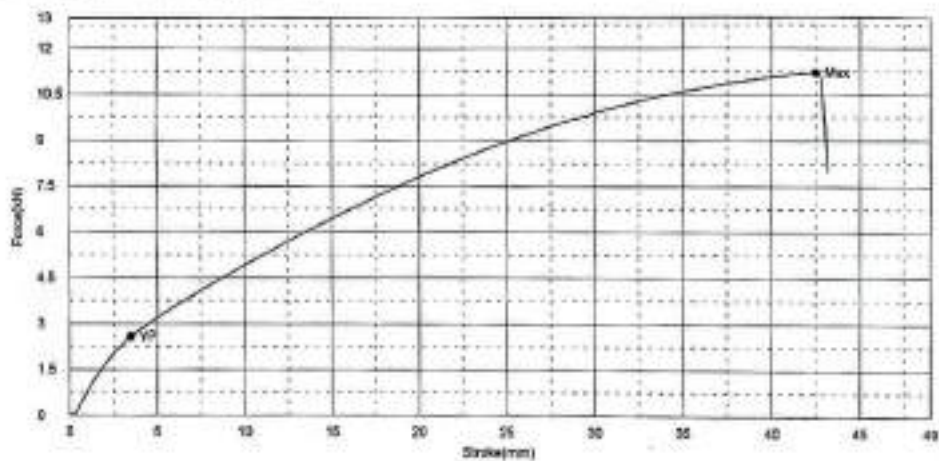
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM UJI BAHAN

Shape: Plate

	Thickness	Width	Gauge Length
Units	mm	mm	mm
TS 1	4,0000	12,8000	110,0000

Name Parameter	Area	Yield Force 0,1 %FS	Max. Force	Yield Strength 0,1 %FS	Max. Strength
Units	mm ²	kN	kN	MPa	MPa
TS 1	51,20	2,57	11,20	50,10	218,77

Name	Elongation
Units	%
TS 1	25,55



Comment

Petus di weld metal

SPK No. : 22-III/PL10/BJP/2026
Customer : Achmad Wildan Abrori NRP. 0722040100 /TL
Project : TUGAS AKHIR
Specimen : Pipa Dia. 88.9mm Thick 4.8mm / PH. 230A
Material : CU DHP
Weld. process/Position/Welder : GTAW / 1G / Friend
Test method: ASTM E8/E8M
Reference code: ISO 15614-6

Surabaya, April 8, 2026

(Signature)
(MUR WANGYU)

Lampiran E16 Report Uji Tarik Spesimen TS2 Preheat Arus 230A

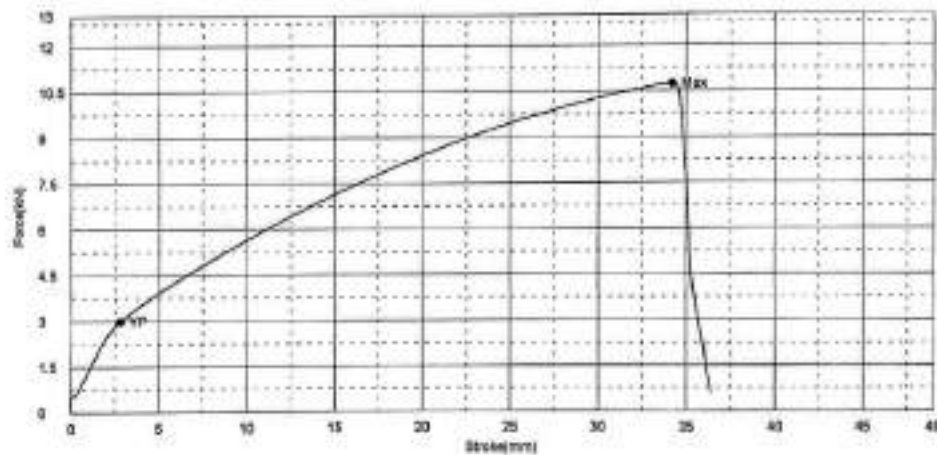
**POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM UJI BAHAN**

Shape Plate

	Thickness	Width	Gauge Length
Units	mm	mm	mm
TS 2	4,0000	12,7000	110,0000

Name Parameter	Area	Yield Force 0,1 %FS	Max. Force	Yield Strength 0,1 %FS	Max. Strength
Units	mm ²	kN	kN	MPa	MPa
TS 2	50,80	2,98	10,74	58,63	211,39

Name	Elongation
Units	%
TS 2	20,82



Comment

Pulus di weld metal

SPK No. : 22-IIIUPL19/BJP/2026
Customer : Achmad Widan Abrori NRP. 0722040100 /TL
Project : TUGAS AKHIR
Specimen : Pipe Dia. 88.9mm Thick 4.8mm / PH. 230A
Material : CU DHP
Weld. process/Position/Welder : GTAW / 1G / Friend
Test method: ASTM E8/E8M
Reference code: ISO 15614-6

Surabaya, April 8, 2026

(Signature)
(Name Widiyanti)

Lampiran F: Hasil Uji Microhardness

Lampiran F1 Proses Pengujian *Microhardness Vickers*



Lampiran G: Hasil Uji Metallography

Lampiran G1 Bahan Uji *Metallography*



Lampiran G2 Proses Pengujian *Metallography*



Lampiran G3 Perhitungan *Grain Size Based on ASTM E112 HAZ Arus 180A*

<i>Non-Preheat Arus 180A</i>			<i>Preheat Arus 180A</i>		
G No.	Grain Size No.	5	G No.	Grain Size No.	4
1	mean lineal intercept length in mm at 1X	0.058418605	1	mean lineal intercept length in mm at 1X	0.08662069
PL	Number grain boundary intersection per unit length (mm) of test line at 1X	17.11783439	PL	Number grain boundary intersection per unit length (mm) of test line at 1X	11.54458599
Pi	number of intercepts or intersections counted on the field	43	Pi	number of intercepts or intersections counted on the field	29
L	total test line length	251.2	L	total test line length	251.2
M	magnification	100	M	magnification	100

Lampiran G4 Perhitungan *Grain Size Based on ASTM E112 HAZ Arus 205A*

<i>Non-Preheat Arus 205A</i>			<i>Preheat Arus 205A</i>		
G No.	Grain Size No.	4	G No.	Grain Size No.	4
1	mean lineal intercept length in mm at 1X	0.093037037	1	mean lineal intercept length in mm at 1X	0.093037037
PL	Number grain boundary intersection per unit length (mm) of test line at 1X	10.74840764	PL	Number grain boundary intersection per unit length (mm) of test line at 1X	10.74840764
Pi	number of intercepts or intersections counted on the field	27	Pi	number of intercepts or intersections counted on the field	27
L	total test line length	251.2	L	total test line length	251.2
M	magnification	100	M	magnification	100

Lampiran G5 Perhitungan *Grain Size Based on ASTM E112 HAZ Arus 230A*

<i>Non-Preheat Arus 230A</i>			<i>Preheat Arus 230A</i>		
G No.	Grain Size No.	3	G No.	Grain Size No.	3
1	mean lineal intercept length in mm at 1X	0.132210526	1	mean lineal intercept length in mm at 1X	0.132210526
PL	Number grain boundary intersection per unit length (mm) of test line at 1X	7.563694268	PL	Number grain boundary intersection per unit length (mm) of test line at 1X	7.563694268
Pi	number of intercepts or intersections counted on the field	19	Pi	number of intercepts or intersections counted on the field	19
L	total test line length	251.2	L	total test line length	251.2
M	magnification	100	M	magnification	100

Lampiran G6 Perhitungan Grain Size Based on ASTM E112 WM Arus 180A

Non-Preheat Arus 180A			Preheat Arus 180A		
G No.	Grain Size No.	2	G No.	Grain Size No.	2
1	mean lineal intercept length in mm at 1X	0.157	1	mean lineal intercept length in mm at 1X	0.179428571
PL	Number grain boundary intersection per unit length (mm) of test line at 1X	6.369426752	PL	Number grain boundary intersection per unit length (mm) of test line at 1X	5.573248408
Pi	number of intercepts or intersections counted on the field	16	Pi	number of intercepts or intersections counted on the field	14
L	total test line length	251.2	L	total test line length	251.2
M	magnification	100	M	magnification	100

Lampiran G7 Perhitungan Grain Size Based on ASTM E112 WM Arus 205A

Non-Preheat Arus 205A			Preheat Arus 205A		
G No.	Grain Size No.	1	G No.	Grain Size No.	1
1	mean lineal intercept length in mm at 1X	0.193230769	1	mean lineal intercept length in mm at 1X	0.2093333
PL	Number grain boundary intersection per unit length (mm) of test line at 1X	5.175159236	PL	Number grain boundary intersection per unit length (mm) of test line at 1X	4.7770701
Pi	number of intercepts or intersections counted on the field	13	Pi	number of intercepts or intersections counted on the field	12
L	total test line length	251.2	L	total test line length	251.2
M	magnification	100	M	magnification	100

Lampiran G8 Perhitungan Grain Size Based on ASTM E112 WM Arus 230A

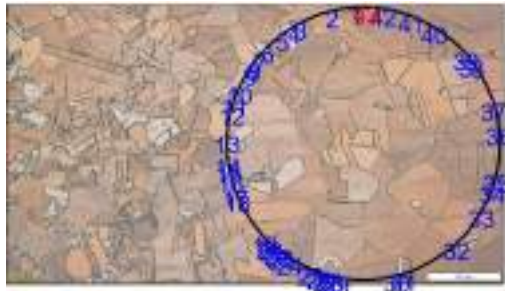
Non-Preheat Arus 230A			Preheat Arus 230A		
G No.	Grain Size No.	1	G No.	Grain Size No.	1
1	mean lineal intercept length in mm at 1X	0.2512	1	mean lineal intercept length in mm at 1X	0.2512
PL	Number grain boundary intersection per unit length (mm) of test line at 1X	3.98089	PL	Number grain boundary intersection per unit length (mm) of test line at 1X	3.98089
Pi	number of intercepts or intersections counted on the field	10	Pi	number of intercepts or intersections counted on the field	10
L	total test line length	251.2	L	total test line length	251.2
M	magnification	100	M	magnification	100

Lampiran G9 Rangkuman Hasil Grain Size

RANGKUMAN HASIL						
SPESIMEN	Number Grain Size (G) HAZ	Number Grain Size (G) WM	Average Grain Area HAZ	Average Grain Area WM	Average Diameter HAZ	Average Diameter WM
NPH 180A	5	2	4032 μm^2	32258 μm^2	63,5 μm	179,6 μm
PH 180A	4	2	8065 μm^2	32258 μm^2	89,8 μm	179,6 μm
NPH 205A	4	1	8065 μm^2	64516 μm^2	89,8 μm	254 μm
PH 205A	4	1	8065 μm^2	64516 μm^2	89,8 μm	254 μm
NPH 230A	3	1	16129 μm^2	64516 μm^2	127 μm	254 μm
PH 230A	3	1	16129 μm^2	64516 μm^2	127 μm	254 μm

Lampiran G10 Pengambilan Data di HAZ

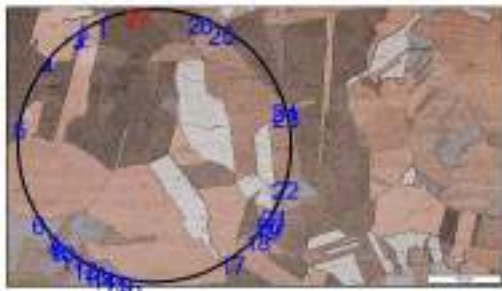
Non-Preheat Arus 180A



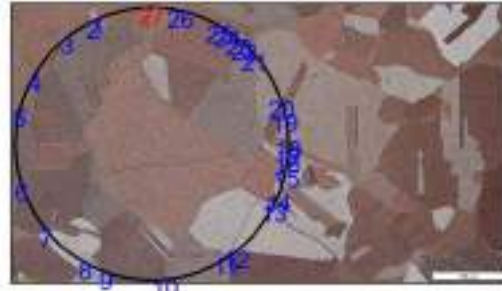
Preheat Arus 180A



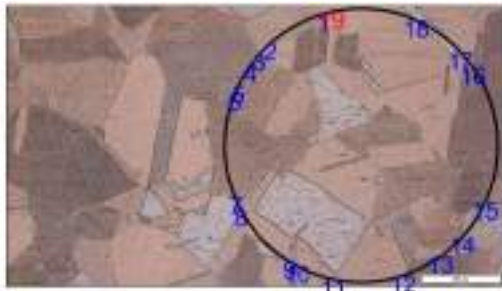
Non-Preheat Arus 205A



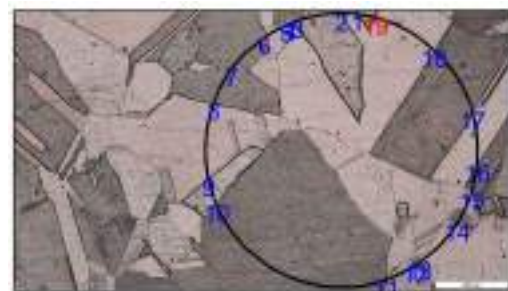
Preheat Arus 205A



Non-Preheat Arus 230A

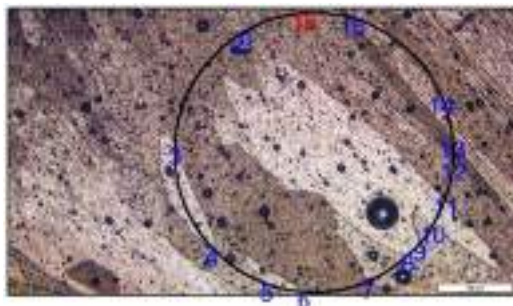


Preheat Arus 230A

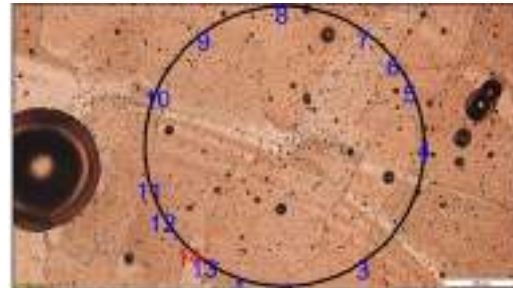


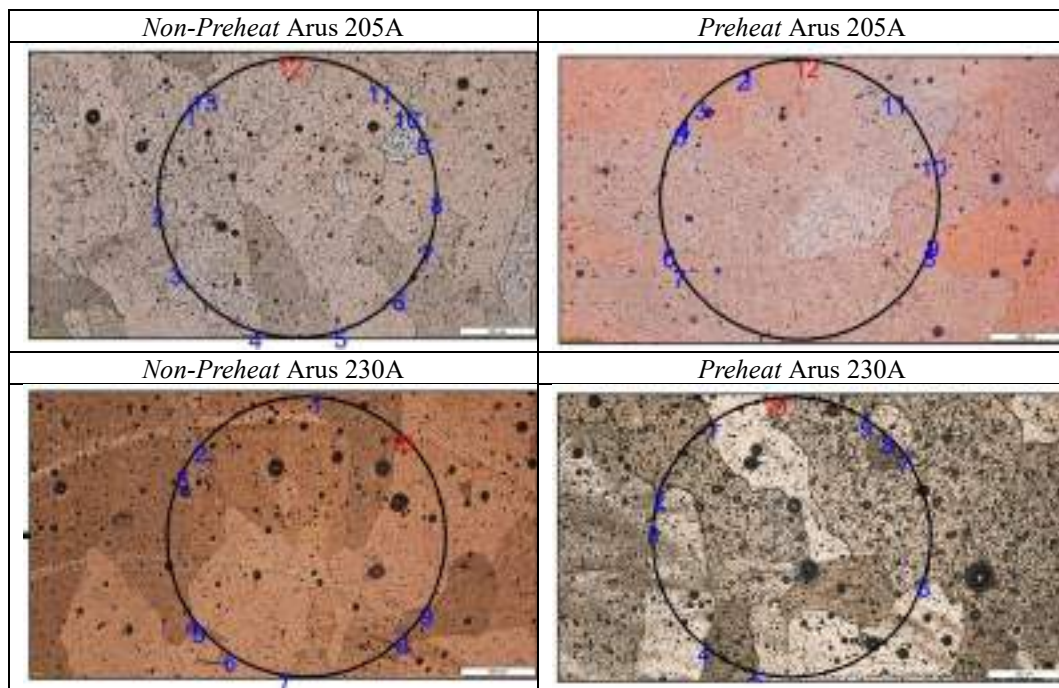
Lampiran G11 Pengambilan Data di *Weld Metal*

Non-Preheat Arus 180A



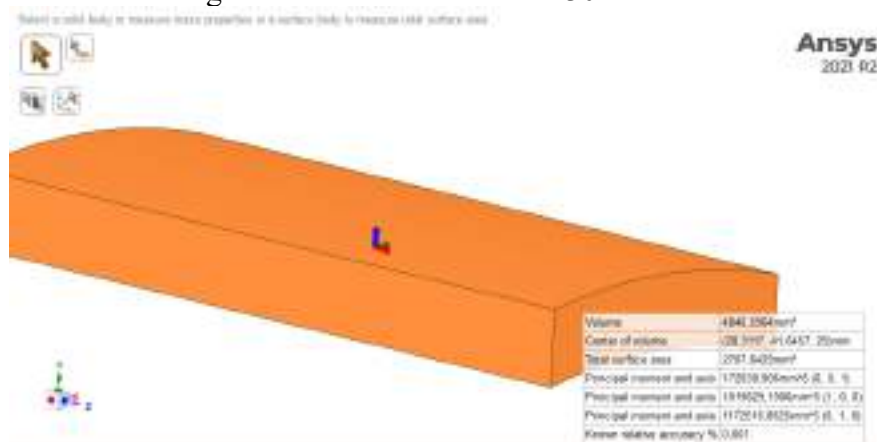
Preheat Arus 180A





Lampiran H: Hasil Uji Laju Korosi

Lampiran H1 Perhitungan Kebutuhan NaCl untuk 30 Hari



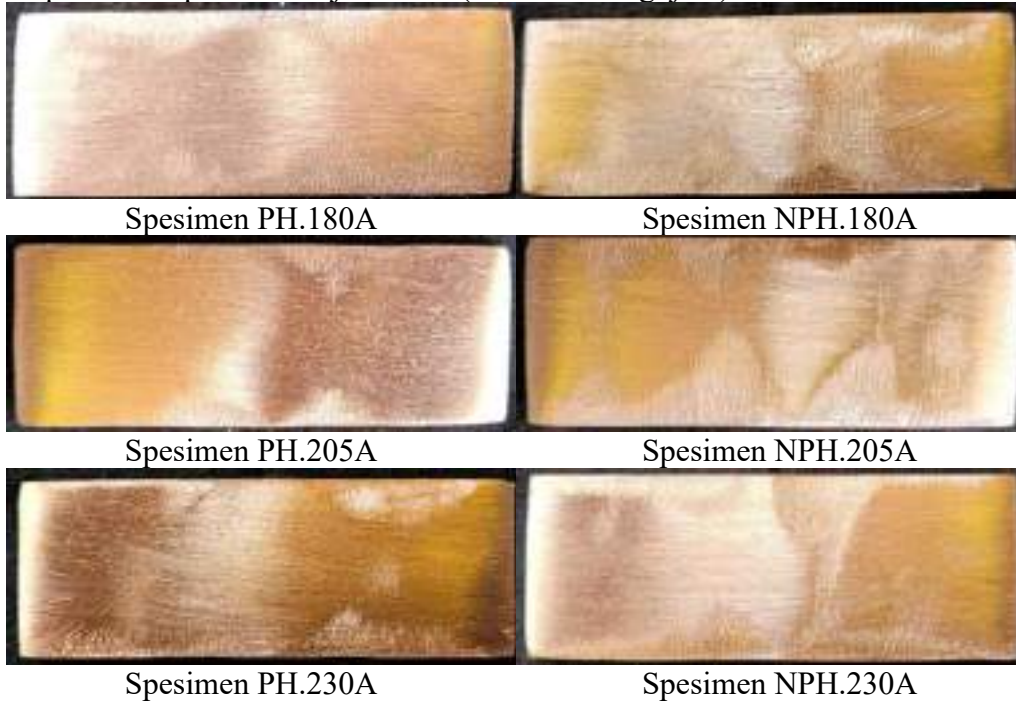
Diketahui =

- Total Luas Permukaan = 2707, 6429 mm²
- Rasio minimum volume larutan uji terhadap luas permukaan spesimen uji adalah 0,20 mL/mm²
- Maka Kebutuhan larutan untuk 1 spesimen = 2707, 6429 mm² x 0.20 mL/mm²
= 541,53 mL atau 600 mL
- Jadi, kebutuhan NaCl = 600 x 3,5% = 21g
- Kebutuhan total NaCl untuk 6 spesimen = 126g dan Aquades 3600 mL

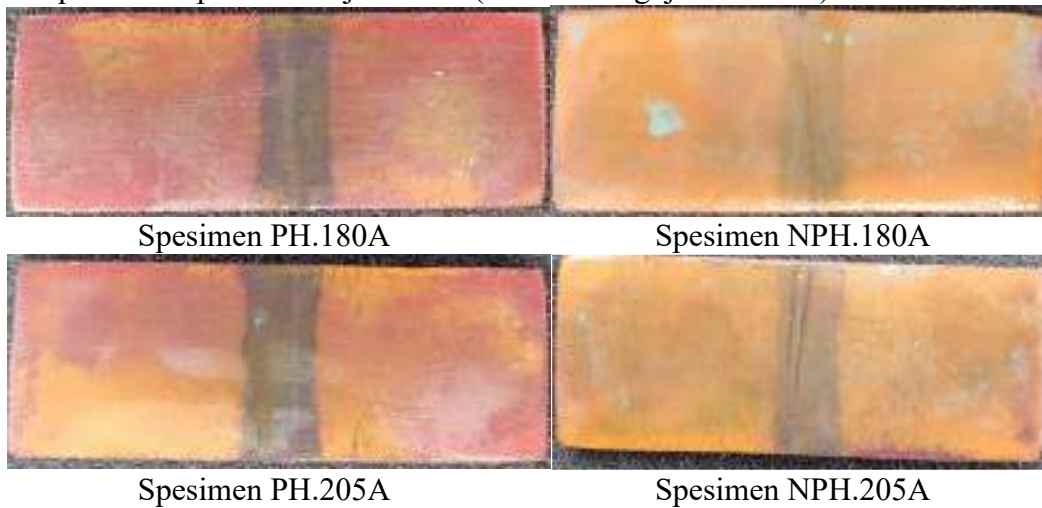
Lampiran H2 Alat dan Bahan Korosi



Lampiran H3 Spesimen Laju Korosi (Sebelum Pengujian)



Lampiran H4 Spesimen Laju Korosi (Setelah Pengujian 30 Hari)





Spesimen PH.230A

Spesimen NPH.230A

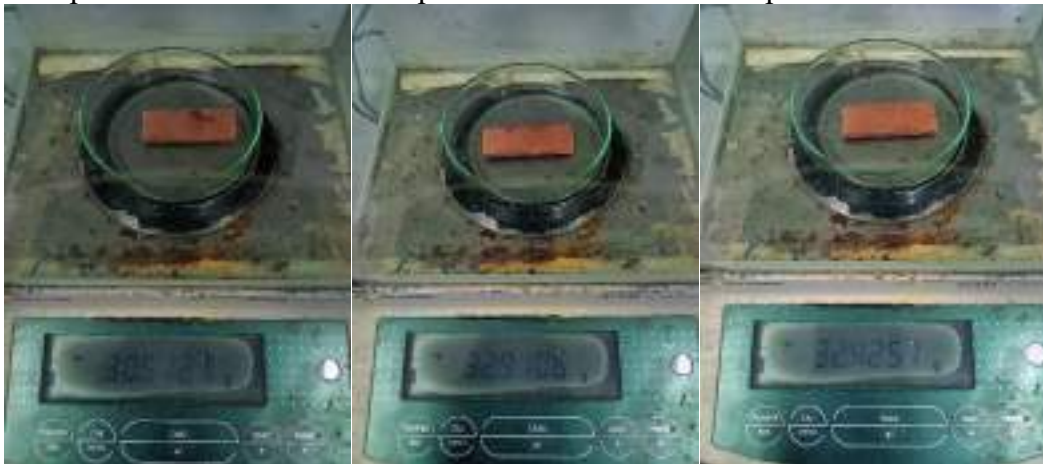
Lampiran H5 Hasil Penimbangan Berat Awal



Spesimen PH.180A

Spesimen PH.205A

Spesimen PH.230A



Spesimen NPH.180A

Spesimen NPH.205A

Spesimen NPH.230A

Lampiran H6 Hasil Penimbangan Berat Akhir 24 Jam



Spesimen PH.180A



Spesimen PH.205A



Spesimen PH.230A



Spesimen NPH.180A



Spesimen NPH.205A



Spesimen NPH.230A

Lampiran H7 Hasil Penimbangan Berat Akhir 72 Jam



Spesimen PH.180A



Spesimen PH.205A



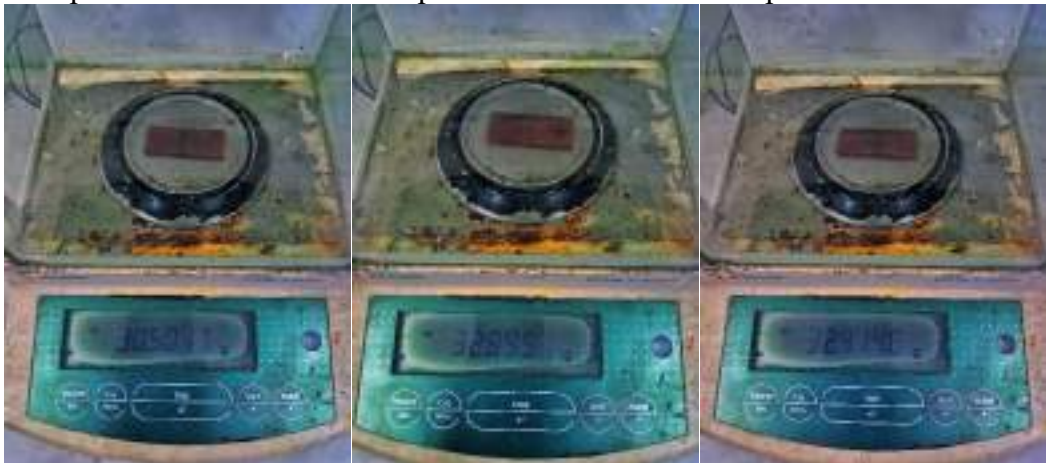
Spesimen PH.230A



Spesimen NPH.180A Spesimen NPH.205A Spesimen NPH.230A
 Lampiran H8 Hasil Penimbangan Berat Akhir 120 Jam



Spesimen PH.180A Spesimen PH.205A Spesimen PH.230A



Spesimen NPH.180A Spesimen NPH.205A Spesimen NPH.230A

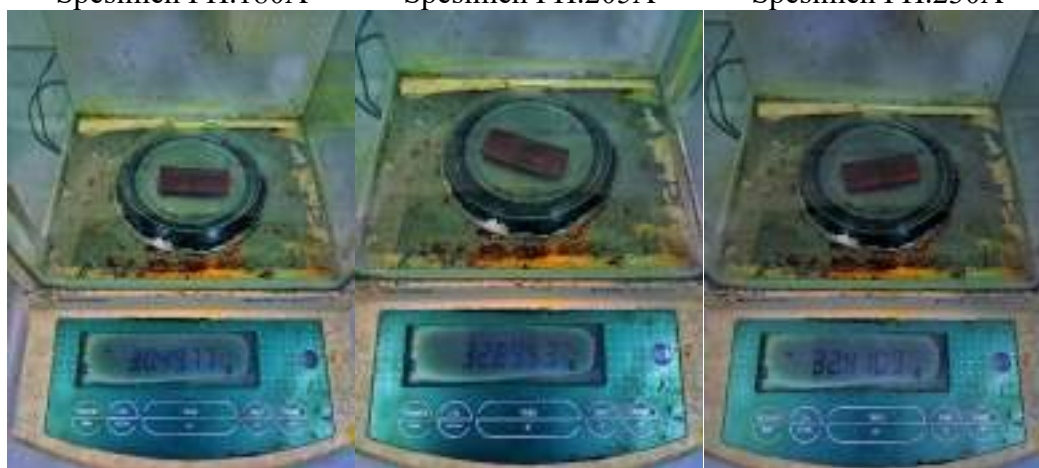
Lampiran H9 Hasil Penimbangan Berat Akhir 168 Jam



Spesimen PH.180A

Spesimen PH.205A

Spesimen PH.230A



Spesimen NPH.180A

Spesimen NPH.205A

Spesimen NPH.230A

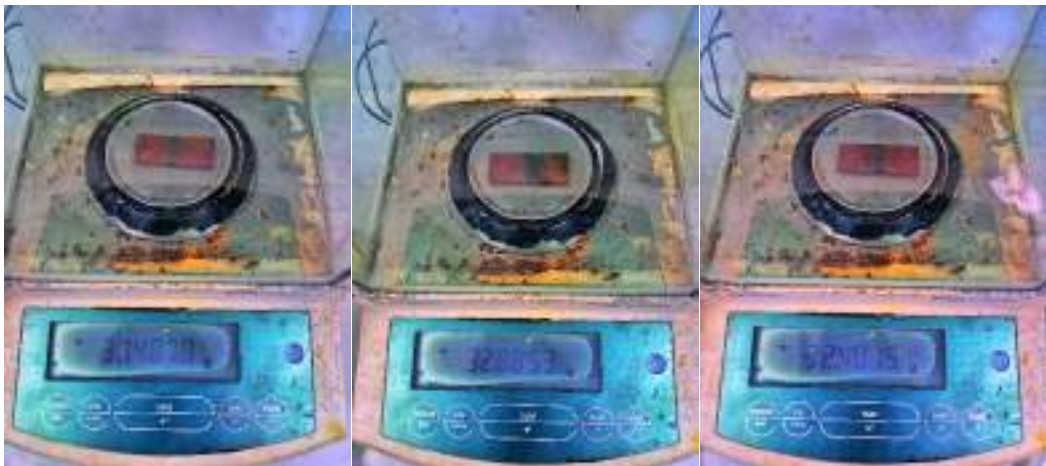
Lampiran H10 Hasil Penimbangan Berat Akhir 336 Jam



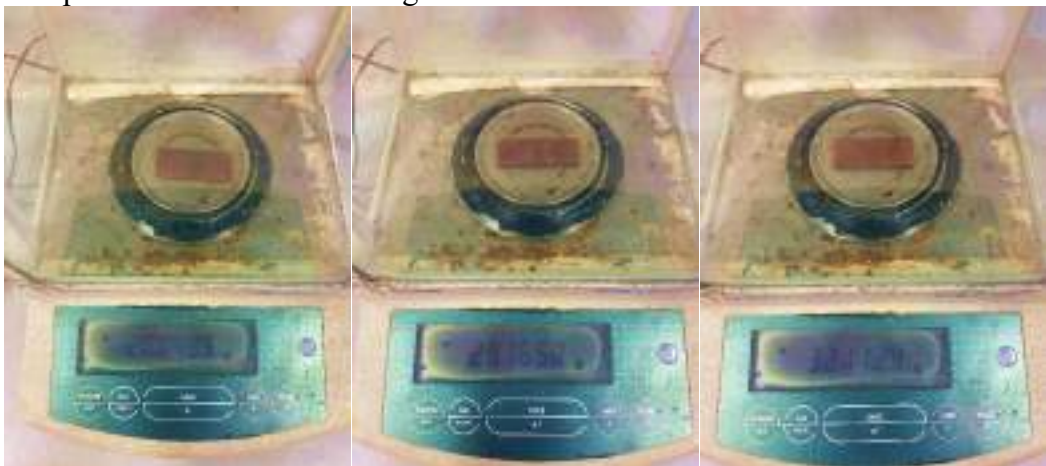
Spesimen PH.180A

Spesimen PH.205A

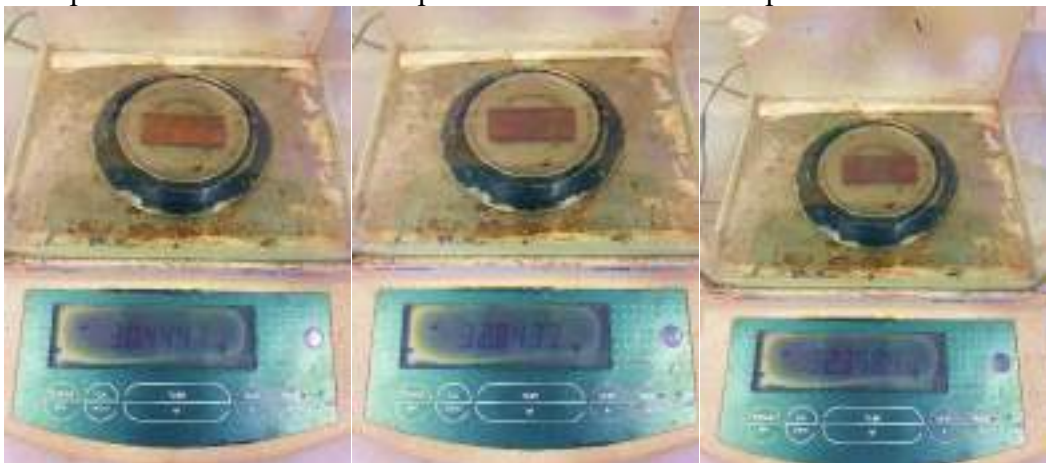
Spesimen PH.230A



Spesimen NPH.180A Spesimen NPH.205A Spesimen NPH.230A
 Lampiran H11 Hasil Penimbangan Berat Akhir 720 Jam



Spesimen PH.180A Spesimen PH.205A Spesimen PH.230A



Spesimen NPH.180A Spesimen NPH.205A Spesimen NPH.230A

Lampiran H12 Hasil Penimbangan Berat Akhir Setelah Pembersihan



Spesimen PH.180A

Spesimen PH.205A

Spesimen PH.230A



Spesimen NPH.180A

Spesimen NPH.205A

Spesimen NPH.230A

Lampiran H13 Perhitungan Laju Korosi

Persamaan:

$$CR = \frac{(K \times W)}{(A \times T \times D)}$$

Dimana:

$$K = 8,76 \times 10^4$$

W = Kehilangan Massa (g)

- $W_0 = 0$ Jam
- $W_1 = 720$ Setelah Pembersihan

A = Luas Permukaan (cm^2)

T = 720 jam

D = 8,94 g/cm^3 ,

PH. 180A

Diketahui:

- Berat awal (W_0) = 20,1097 g
- Berat akhir (W_1) = 20,0380 g
- Luas permukaan = 24,561 cm² Densitas = 8,94 g/cm³
- Waktu = 720 jam

Ditanya:

- Laju korosi (CR)?

Dijawab:

$$W = W_0 - W_1$$

$$= 20,1097 - 20,0380$$

$$= 0,0717 \text{ g}$$

$$CR = (8,76 \times 10^4 \times 0,0717) / (24,561 \times 720 \times 8,94)$$

$$CR = 0,0397 \text{ mm/tahun}$$

PH. 205A

Diketahui:

- Berat awal (W_0) = 29,8311 g
- Berat akhir (W_1) = 29,7593 g
- Luas permukaan = 24,363 cm²
- Densitas = 8,94 g/cm³
- Waktu = 720 jam

Ditanya:

- Laju korosi (CR)?

Dijawab

$$W = W_0 - W_1$$

$$= 29,8311 - 29,7593$$

$$= 0,0718 \text{ g}$$

$$CR = (8,76 \times 10^4 \times 0,0718) / (24,363 \times 720 \times 8,94)$$

$$CR = 0,0401 \text{ mm/tahun}$$

PH. 230A

Diketahui:

- Berat awal (W_0) = 32,1829 g
- Berat akhir (W_1) = 32,1079 g
- Luas permukaan = 25,165 cm²
- Densitas = 8,94 g/cm³

- Waktu = 720 jam

Ditanya

- Laju korosi (CR)?

Dijawab

$$W = W_0 - W_1$$

$$= 32,1829 - 32,1079$$

$$= 0,0750 \text{ g}$$

$$CR = (8,76 \times 10^4 \times 0,0750) / (25,165 \times 720 \times 8,94)$$

$$CR = 0,0406 \text{ mm/tahun}$$

NPH. 180A

Diketahui:

- Berat awal (W_0) = 30,5127 g
- Berat akhir (W_1) = 30,4424 g
- Luas permukaan = 25,915 cm²
- Densitas = 8,94 g/cm³
- Waktu = 720 jam

Ditanya

- Laju korosi (CR)?

Dijawab

$$W = W_0 - W_1$$

$$= 30,5127 - 30,4424$$

$$= 0,0703 \text{ g}$$

$$CR = (8,76 \times 10^4 \times 0,0703) / (25,915 \times 720 \times 8,94)$$

$$CR = 0,0369 \text{ mm/tahun}$$

NPH. 205A

Diketahui:

- Berat awal (W_0) = 32,9106 g
- Berat akhir (W_1) = 32,8380 g
- Luas permukaan = 26,236 cm²
- Densitas = 8,94 g/cm³
- Waktu = 720 jam

Ditanya

- Laju korosi (CR)?

Dijawab

$$W = W_0 - W_1$$

$$= 32,9106 - 32,8380$$

$$= 0,0726 \text{ g}$$

$$CR = (8,76 \times 10^4 \times 0,0726) / (26,236 \times 720 \times 8,94)$$

$$CR = 0,0377 \text{ mm/tahun}$$

NPH. 230A

Diketahui:

- Berat awal (W_0) = 32,4257 g
- Berat akhir (W_1) = 32,3534 g
- Luas permukaan = 25,263 cm²
- Densitas = 8,94 g/cm³
- Waktu = 720 jam

Ditanya

- Laju korosi (CR)?

Dijawab

$$W = W_0 - W_1$$

$$= 32,4257 - 32,3534$$

$$= 0,0723 \text{ g}$$

$$CR = (8,76 \times 10^4 \times 0,0723) / (25,263 \times 720 \times 8,94)$$

$$CR = 0,0389 \text{ mm/tahun}$$

“Halaman ini sengaja dikosongkan”
This page is intentionally left blank

BIODATA PENULIS



Achmad Wildan Abrori		
Tempat Tanggal Lahir	Nama Panggilan	Jenis Kelamin
Sidoarjo, 14 Agustus 2003	Wildan	Laki-laki
Alamat	Kode Pos	Negara
Ds. Ketajen, Kec. Gedangan, Kab. Sidoarjo, Jawa Timur	61254	Indonesia
Email	No. Telepon	Agama
awildana1@gmail.com	089678240911	Islam
Riwayat Pendidikan		
Sekolah	Tahun	Jurusan
SDN Ketajen 2	2010 – 2016	-
SMP ASA Cendekia	2016 – 2019	-
SMKN 3 Buduran	2019 – 2022	Teknik Konstruksi Kapal Baja
Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya	2022 – 2026	Teknik Pengelasan