

TUGAS AKHIR - MO184804

**ANALISIS PENGARUH VARIASI *HEAT TREATMENT*
PADA PENGELASAN SMAW TERHADAP SIFAT MEKANIK
SAMBUNGAN BAJA KARBON MEDIUM JIS G 4051
GRADE S45C**

PUTRI HANA OCTAVIANI NASUTION
NRP 04311840000103

Dosen Pembimbing
Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D
NIP 19730602 199903 1 002
Dr. Eng. Yeyes Mulyadi, S.T., M.Sc.
NIP 19731207 200112 1 001

Program Studi Teknik Kelautan
Departemen Teknik Kelautan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2022

TUGAS AKHIR - MO184804

**ANALISIS PENGARUH VARIASI *HEAT TREATMENT*
PADA PENGELASAN SMAW TERHADAP SIFAT MEKANIK
SAMBUNGAN BAJA KARBON MEDIUM JIS G 4051
GRADE S45C**

PUTRI HANA OCTAVIANI NASUTION
NRP 04311840000103

Dosen Pembimbing
Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D
NIP 19730602 199903 1 002
Dr. Eng. Yeyes Mulyadi, S.T., M.Sc.
NIP 19731207 200112 1 001

Program Studi Teknik Kelautan
Departemen Teknik Kelautan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2022

FINAL PROJECT - MO184804

**ANALYSIS OF HEAT TREATMENT VARIATION IN
AFFECTING THE SMAW WELD JOINT ON MECHANICAL
PROPERTIES OF MEDIUM CARBON STEEL JIS G 4051
GRADE S45C**

PUTRI HANA OCTAVIANI NASUTION
NRP 04311840000103

Advisor

Nur Syahrone, S.T., M.T., Ph.D

NIP 19730602 199903 1 002

Dr. Eng. Yeyes Mulyadi, S.T., M.Sc.

NIP 19731207 200112 1 001

Study Program Ocean Engineering
Departement of Ocean Engineering
Faculty of Marine Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2022

LEMBAR PENGESAHAN

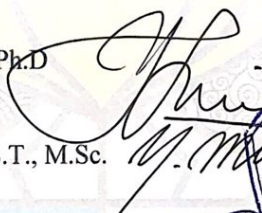
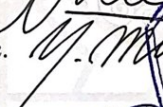
ANALISIS PENGARUH VARIASI *HEAT TREATMENT* PADA PENGELASAN SMAW TERHADAP SIFAT MEKANIK SAMBUNGAN BAJA KARBON MEDIUM JIS G 4051 GRADE S45C

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarjana Teknik di
Program Studi Teknik Kelautan
Departemen Teknik Kelautan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh: **PUTRI HANA OCTAVIANI NASUTION**
NRP. 04311840000103

Disetujui oleh Tim Penguji Proposal Tugas Akhir:

1. Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.  (Pembimbing I)
2. Dr. Eng. Yeyes Mulyadi, S.T., M.Sc.  (Pembimbing II)
3. Herman Pratikno, S.T., M.T., Ph.D.  (Penguji I)
4. Ir. Handyanu, M.Sc., Ph.D.  (Penguji II)
5. Yoyok Setyo Hadiwidodo, S.T., M.T., Ph.D.  (Penguji III)



SURABAYA
JULI, 2022

APPROVAL SHEET

ANALYSIS OF HEAT TREATMENT VARIATION IN AFFECTING THE SMAW WELD JOINT ON MECHANICAL PROPERTIES OF MEDIUM CARBON STEEL JIS G 4051 GRADE S45C

FINAL PROJECT

Submitted to fulfill one of the requirements
for obtaining a degree in Ocean Engineering at
Undergraduate Study Program of Ocean Engineering
Department of Ocean Engineering
Faculty of Marine Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

By: **PUTRI HANA OCTAVIANI NASUTION**

NRP. 04311840000103

Approved by Final Project Examiner Team:

1. Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D



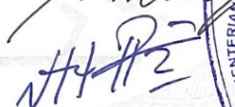
(Advisor I)

2. Dr. Eng. Yeyes Mulyadi, S.T., M.Sc



(Advisor II)

3. Herman Pratikno, S.T., M.T., Ph.D



(Examiner I)

4. Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D



(Examiner II)

5. Yoyok Setyo Hadiwidodo, S.T., M.T., Ph.D



(Examiner III)



SURABAYA

JULY, 2022

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Putri Hana Octaviani Nasution/04311840000103

Departemen : Teknik Kelautan

Dosen pembimbing / NIP : Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D/19730602 199903 1 002

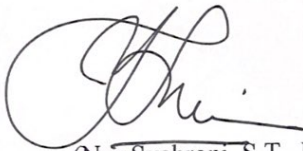
Dengan ini menyatakan bahwa tugas akhir dengan judul “Analisis Pengaruh Variasi *Heat Treatment* pada Pengelasan SMAW Terhadap Sifat Mekanik Sambungan Baja Karbon Medium JIS G 4051 Grade S45C” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 14 Juli 2022

Mengetahui

Dosen Pembimbing



(Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D)

NIP. 19730602 199903 1 002

Mahasiswa,



(Putri Hana Octaviani Nasution)

NRP.04311840000103

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student / NRP : Putri Hana Octaviani Nasution/04311840000103
Department : Ocean Engineering
Advisor / NIP : Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D/19730602 199903 1 002

Hereby declare that the Final Project with the title of "Analysis of Heat Treatment Variation in Affecting The SMAW Weld Joint on Mechanical Properties of Medium Carbon Steel JIS G 4051 Grade S45C" is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 14 Juli 2022

Acknowledged

Advisor



(Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D)

NIP. 19730602 199903 1 002

Student,



(Putri Hana Octaviani Nasution)

NRP.04311840000103

ANALISIS PENGARUH VARIASI HEAT TREATMENT PADA PENGELASAN SMAW TERHADAP SIFAT MEKANIK SAMBUNGAN BAJA KARBON MEDIUM JIS G 4051 GRADE S45C

Nama / NRP : Putri Hana Octaviani Nasution / 04311840000103

Departemen : Teknik Kelautan FTK - ITS

**Dosen Pembimbing : Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.
Dr. Eng. Yeyes Mulyadi, S.T., M.Sc.**

ABSTRAK

Pengelasan merupakan metode penggabungan material yang sudah sangat umum digunakan di hampir seluruh cabang industri dan konstruksi. Salah satu material yang sering digunakan sebagai material pokok dalam pengelasan adalah baja. Baja JIS G 4051 Grade S45C merupakan salah satu baja karbon medium yang umum ditemui di industri kemaritiman. Hasil akhir dari pengelasan dapat dipengaruhi oleh banyak faktor. Salah satu faktor yang dapat mempengaruhi hasil pengelasan adalah *heat treatment* atau perlakuan panas yang terdiri dari *pre-heating* dan *post-weld heat treatment*. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh perlakuan panas terhadap ketahanan tekuk, kekuatan tarik, nilai kekerasan, dan struktur makro serta mikro pada pengelasan baja JIS G 4051 Gr. S45C menggunakan metode pengelasan *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW). Suhu *pre-heating* yang digunakan sebesar 150°C serta variasi suhu *post-weld heat treatment* (PWHT) yang digunakan adalah 300°C dan 400°C. Pada hasil pengujian tarik, pengelasan tanpa PWHT mempunyai rata-rata nilai *ultimate tensile strenght* terbesar yaitu 556,71 MPa dan material dengan PWHT sebesar 400°C memiliki nilai keuletan terbesar yaitu 0,525%. Hasil pengujian kekerasan menunjukkan material pengelasan tanpa PWHT memiliki rata-rata nilai kekerasan terbesar yaitu 166,5 HV. Hasil pengamatan struktur makro pada spesimen pengelasan dengan PWHT 400°C menunjukkan daerah HAZ terbesar dengan lebar 5,1 mm sedangkan daerah HAZ terkecil dimiliki oleh spesimen tanpa PWHT dengan 2,83 mm. Hasil pengamatan struktur mikro menunjukkan seluruh spesimen memiliki fasa pearlite dan ferrite. Spesimen pengelasan dengan PWHT 400°C memiliki kandungan struktur ferrite yang paling banyak yaitu 60,7%. Sedangkan spesimen pengelasan tanpa PWHT memiliki kandungan struktur ferrite yang paling sedikit yaitu 48,7%.

Kata kunci : *Baja JIS G 4051 Grade S45C, Heat Treatment, Shielded Metal Arc Welding (SMAW)*

ANALYSIS OF HEAT TREATMENT VARIATION IN AFFECTING THE SMAW WELD JOINT ON MECHANICAL PROPERTIES OF MEDIUM CARBON STEEL JIS G 4051 GRADE S45C

Name / NRP : Putri Hana Octaviani Nasution / 04311840000103

Department : Ocean Engineering

**Advisor : Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.
Dr. Eng. Yeyes Mulyadi, S.T., M.Sc.**

ABSTRACT

Welding is a method of joining materials that is very commonly used in almost all branches of industry and construction. JIS G 4051 Grade S45C steel is one of the most common medium carbon steels found in the maritime industry. The final result of welding can be affected by many factors. One of the factors that can affect the results of welding is heat treatment or heat treatment which consists of pre-heating and post-weld heat treatment. This study aims to determine the effect of heat treatment on buckling resistance, tensile strength, hardness value, and macro and micro structure of JIS G 4051 Gr steel welding. S45C uses Shielded Metal Arc Welding (SMAW) welding method. The pre-heating temperature used is 150°C and the post-weld heat treatment (PWHT) temperature variations used are 300°C and 400°C. In the tensile test results, welding without PWHT has the largest average ultimate tensile strength value of 556,71 MPa and material with PWHT of 400°C has the largest ductility value of 0.525%. The results of the hardness test show that the welding material without PWHT has the largest average hardness value of 166.5 HV. The results of macro-structure observations on welding specimens with PWHT 400°C showed the largest HAZ area with a width of 5.1 mm while the smallest HAZ area was owned by specimens without PWHT with 2.83 mm. The results of microstructure observations showed that all specimens had pearlite and ferrite phases. Welding specimens with PWHT 400°C had the highest ferrite structure content of 60.7%. While the welding specimen without PWHT has the least ferrite structure content of 48.7%.

Keyword : *JIS G 4051 Grade S45C Steel , Heat Treatment, Shielded Metal Arc Welding (SMAW)*

KATA PENGANTAR

Segala puja dan puji syukur kehadiran Allah SWT, karena dengan ridha dan karunia-Nya yang sungguh besar kepada penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “Analisis Pengaruh Variasi *Heat Treatment* pada Pengelasan SMAW Terhadap Sifat Mekanik Sambungan Baja Karbon Medium JIS G 4051 Gr S45C” dengan baik serta sesuai dengan waktu yang telah direncanakan.

Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan dalam menyelesaikan studi sarjana (S1) di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya. Secara garis besar, penelitian ini akan membahas mengenai pengaruh perlakuan panas terhadap sifat mekanik sambungan las pada suatu material baja.

Penulis tentu sangat menyadari bahwa pada penelitian Tugas Akhir ini masih terdapat banyak kekurangan serta jauh dari kata sempurna. Sehingga penulis sangat mengharapkan adanya kritik dan saran dari pembaca sebagai bentuk evaluasi dan sebagai proses perkembangan diri penulis. Penulis berharap penelitian Tugas Akhir ini dapat membawa dampak yang bermanfaat bagi peneliti yang membutuhkan ilmu serta teknologi yang serupa, pembaca, maupun penulis sendiri.

Surabaya, Juli 2022

Penulis,

Putri Hana Octaviani Nasution

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	ii
APPROVAL SHEET.....	iii
PERNYATAAN ORISINALITAS.....	iv
STATEMENT OF ORIGINALITY.....	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Manfaat	3
1.5 Batasan Masalah	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Tinjauan Pustaka.....	5
2.2 Dasar Teori	6
2.2.1 Baja.....	6
2.2.2 Jenis Baja.....	6
2.2.3 Diagram Fasa.....	8
2.2.4 Fasa Baja Karbon.....	9
2.2.5 Diagram <i>Continuous-Cooling Temperature</i> (CCT)	9
2.2.6 Pengelasan SMAW.....	11
2.2.7 <i>Preheating</i>	11
2.2.8 <i>Post Weld Heat Treatment</i>	12
2.2.9 Parameter Pengelasan.....	13
2.2.10 Pengujian Tidak Merusak (<i>Non-Destructive Test</i>)	14
2.2.11 Pengujian Merusak (<i>Destructive Test</i>)	15
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	23
3.1 Metode Penelitian	23
3.2 Prosedur Penelitian	25
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN.....	37

4.1	<i>Welding Procedure Specification (WPS)</i>	37
4.2	<i>Non-Destructive Test (NDT)</i>	37
4.2.1	Inspeksi Visual.....	38
4.2.2	<i>Radiography Test</i>	38
4.3	<i>Destructive Test (DT)</i>	41
4.3.1	Uji Tarik.....	41
4.3.2	Analisa Hasil Uji Tarik.....	43
4.3.3	Hasil Uji Tekuk	46
4.3.4	Analisa Hasil Uji Tekuk	48
4.3.5	Hasil Uji Kekerasan.....	49
4.3.6	Analisa Hasil Uji Kekerasan	53
4.3.7	Hasil Uji Metalografi	54
4.3.8	Analisa Hasil Uji Metalografi	59
4.3.9	Hubungan Antara Pengujian Tarik, Tekuk, Kekerasan, dan Metalografi ...	61
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		63
5.1	Kesimpulan	63
5.2	Saran	63
DAFTAR PUSTAKA		65
LAMPIRAN		
UCAPAN TERIMA KASIH		

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Diagram Fasa Baja Karbon.....	8
Gambar 2.2 Diagram CCT Baja JIS G 4051 Gr. S45C	10
Gambar 2.3 <i>Shielded Metal Arc Welding</i> (SMAW)	11
Gambar 2.4 Uji Radiografi	15
Gambar 2.5 Rules Pengujian Tekuk Side Bend	16
Gambar 2.6 Rules Pengujian Tekuk Root dan Face Bend	17
Gambar 2.7 Diagram Tegangan dan Regangan.....	18
Gambar 2.8 Rules Pengujian Tarik	19
Gambar 2.9 Bentuk Indentor Pengujian Vickers.....	20
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.....	24
Gambar 3.2 Material JIS G 4051 Gr. S45C.....	25
Gambar 3.3 Gerinda	25
Gambar 3.4 <i>Stopwatch</i> dan <i>Thermogun</i>	26
Gambar 3.5 Mesin Las SMAW	26
Gambar 3.6 Elektroda E-7018.....	26
Gambar 3.7 Oven.....	27
Gambar 3.8 <i>Heating Torch</i>	27
Gambar 3.9 Spidol Marker	28
Gambar 3.10 Proses <i>Preheating</i>	29
Gambar 3.11 (a) Suhu A1 (b) Suhu A2 (c) Suhu A3	29
Gambar 3.12 Proses Pengelasan SMAW	30
Gambar 3.13 (a) Suhu PWHT 300°C (b) Suhu PWHT 400°C	30
Gambar 3.14 Gergaji Hidrolik.....	31
Gambar 3.15 Proses Pemotongan <i>Test piece</i>	32
Gambar 3.16 Spesimen Uji <i>Test Piece</i> A1	32
Gambar 3.17 Spesimen Uji <i>Test Piece</i> A2	32
Gambar 3.18 Spesimen Uji <i>Test Piece</i> A3	33
Gambar 3.19 Proses Pengujian Tarik	33
Gambar 3.20 Proses Pengujian Tekuk.....	34
Gambar 4.1 Welding Procedure Specification (WPS)	37
Gambar 4.2 (a) Hasil Pengelasan A1 (b) Hasil Pengelasan A2.....	38
Gambar 4.3 Hasil Uji Radiografi <i>Test Piece</i> A1	39

Gambar 4.4 Hasil Uji Radiografi <i>Test Piece</i> A2	39
Gambar 4.5 Hasil Uji Radiografi <i>Test Piece</i> A3	40
Gambar 4.6 <i>Breaking Point Test Piece</i> A1	41
Gambar 4.7 <i>Breaking Point Test Piece</i> A2	42
Gambar 4.8 <i>Breaking Point Test Piece</i> A3	43
Gambar 4.9 Grafik Hasil Uji Tarik.....	44
Gambar 4.10 Grafik Hasil Uji Keuletan.....	45
Gambar 4.11 Grafik Hubungan Kekuatan Tarik & Elongation.....	45
Gambar 4.12 Hasil Pengujian Tekuk <i>Test Piece</i> A1	47
Gambar 4.13 Hasil Pengujian Tekuk <i>Test Piece</i> A2	47
Gambar 4.14 Hasil Pengujian Tekuk <i>Test Piece</i> A3	48
Gambar 4.15 Grafik Nilai Kekerasan <i>Test Piece</i> A1.....	50
Gambar 4.16 Grafik Nilai Kekerasan <i>Test Piece</i> A2.....	51
Gambar 4.17 Grafik Nilai Kekerasan <i>Test Piece</i> A3.....	52
Gambar 4.18 Grafik Nilai Rata-Rata Kekerasan Tiap Spesimen	53
Gambar 4.19 Grafik Hasil Uji Kekerasan	54
Gambar 4.20 Hasil Uji Makro Spesimen ME.A1.....	55
Gambar 4.21 Hasil Uji Makro Spesimen ME.A2.....	56
Gambar 4.22 Hasil Uji Makro Spesimen ME.A3.....	57
Gambar 4.23 Hasil Struktur Mikro <i>Test Piece</i> A1 (<i>Base Metal</i> , HAZ, dan <i>Weld Metal</i>)	58
Gambar 4.24 Hasil Struktur Mikro <i>Test Piece</i> A2 (<i>Base Metal</i> , HAZ, dan <i>Weld Metal</i>)	58
Gambar 4.25 Hasil Struktur Mikro <i>Test Piece</i> A3 (<i>Base Metal</i> , HAZ, dan <i>Weld Metal</i>)	58
Gambar 4.26 Lebar Daerah HAZ Setiap Spesimen.....	60
Gambar 4.27 Persentase Struktur <i>Pearlite</i> dan <i>Ferrite</i> Setiap Spesimen.....	61

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Komposisi Kimia Baja JIS G 4051 Gr. S45C	7
Tabel 2.2 Material Properties Baja JIS G 4051 Gr. S45C	7
Tabel 2.3 Suhu Pemanasan Baja Karbon	12
Tabel 2.4 Suhu Pemanasan Baja Karbon Berdasarkan Karbon Ekuivalen	12
Tabel 2.5 Formula Vickers	20
Tabel 3.1 Rancangan Penelitian (<i>Test Piece</i>)	35
Tabel 3.2 Rancangan Penelitian (Spesimen Uji)	35
Tabel 4.1 Hasil Uji Tarik Test Piece A1	41
Tabel 4.2 Hasil Uji Tarik <i>Test Piece</i> A2	42
Tabel 4.3 Hasil Uji Tarik Test Piece A3	42
Tabel 4.4 Hasil Pengujian Tarik	43
Tabel 4.5 Hasil Uji Keuletan	43
Tabel 4.6 Hasil Pengujian Tekuk	49
Tabel 4.7 Hasil Uji Kekerasan Test Piece A1	50
Tabel 4.8 Hasil Uji Kekerasan Test Piece A2	51
Tabel 4.9 Hasil Uji Kekerasan Test Piece A3	52
Tabel 4.10 Hasil Uji Kekerasan.....	53
Tabel 4.11 Hasil Pengukuran Lebar HAZ ME.A1	55
Tabel 4.12 Hasil Pengukuran Lebar HAZ ME.A2	56
Tabel 4.13 Hasil Pengukuran Lebar HAZ ME.A3	57
Tabel 4.14 Persentase Kandungan Struktur Pada Setiap Bagian Spesimen Uji.....	58

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam dunia industri keteknikan, pengelasan merupakan salah satu hal yang penting karena pengaplikasian pengelasan dalam suatu industri bisa mempengaruhi nilai dari industri tersebut. Menurut Hofe dan Middeldorf (2014) beberapa industri yang mengalami kenaikan nilai setelah melakukan pengelasan adalah konstruksi pipa baja dengan kenaikan nilai sebesar 3%, konstruksi baja dengan kenaikan nilai sebesar 5%, dan pembangunan kapal dengan kenaikan nilai sebesar 8%. Selain itu, Hofe (2015) juga menyatakan bahwa penggunaan teknik pengelasan mampu meningkatkan pendapatan negara. Pada tahun 2012, China berhasil menghasilkan 3,468,000,000 dolar AS karena penjualan barang dengan penggunaan teknik pengelasan. Pada tahun yang sama Jerman juga mampu menghasilkan 172,000,000 dolar AS.

Pengelasan merupakan metode penggabungan material yang sudah sangat umum digunakan di hampir seluruh cabang industri dan konstruksi (Asadi *et al.*, 2020). Teknik pengelasan juga menjadi salah satu opsi terbaik dalam penggabungan material di Indonesia. Proses pengelasan sendiri sudah dikenal dan digunakan sejak lama, perkembangan dari teknik pengelasan juga terjadi secara terus-menerus seiring dengan berjalannya waktu. Berkembangnya pengelasan secara pesat di industri keteknikan disebabkan karena pengelasan bisa dibilang sebagai metode yang cukup murah, cepat dalam pengaplikasiannya, ringan, dan memiliki variasi bentuk yang dapat menyesuaikan dengan kebutuhan konstruksi (Pratomo, *et al.*, 2020). Selain untuk memotong dan menyambung material, pengelasan juga bisa digunakan untuk mengisi lubang-lubang pada coran, membuat lapisan keras pada perkakas, mempertebal bagian-bagian yang sudah aus, dan macam-macam reparasi lainnya (Naharuddin *et al.*, 2015).

Dalam dunia pengelasan, baja merupakan material yang sering digunakan sebagai material pokok. Beberapa kelebihan baja dibandingkan dengan material logam lainnya adalah baja mudah dicari, memiliki sifat ketahanan dan kekuatan korosi yang tinggi sehingga dapat menekan pengeluaran biaya perawatan untuk melakukan pengecatan (Baredwan, 2021). Sama halnya dengan dunia industri kemaritiman. Mengingat banyaknya kelebihan baja dibandingkan dengan material logam yang lain, menjadikan baja sebagai salah satu pilihan utama dalam menentukan jenis material. Salah satu jenis baja yang bisa dijumpai dalam industri kemaritiman adalah baja JIS G 4051 Gr. S45C. Material ini sering digunakan sebagai bahan dari *boilers* yang ada di *offshore structure*, poros *propeller*, dan baling-baling kapal (Sardjono, 2009).

Pada proses pengelasan, terdapat metode-metode yang dapat digunakan antara lain: SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*), GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), FCAW (*Flux Cored Arc Welding*), SAW (*Submerged Arc Welding*), dan ESW (*Electroslag Welding*). Hadi (2015) dalam penelitiannya mengatakan bahwa metode pengelasan SMAW dan FCAW merupakan metode pengelasan yang sering digunakan dalam industri kemaritiman. Beberapa alasan metode pengelasan SMAW merupakan metode yang sangat umum digunakan karena biaya yang dibutuhkan bisa dibilang lebih murah, pengoperasiannya yang mudah, lebih praktis, dan dapat digunakan di berbagai macam posisi untuk penggabungan material (Ramadhan, 2018). Selain itu, dalam penelitian yang dilakukan oleh Naharuddin *et al.* (2015) dijelaskan bagaimana pengaruh metode pengelasan SMAW dan SAW terhadap kekuatan tarik dan tekuknya. Dari penelitian ini didapatkan bahwa rata-rata kekuatan tarik dan tekuk metode pengelasan SMAW lebih baik dibandingkan kekuatan tarik dan tekuk dari pengelasan SAW. Beberapa contoh penggunaan pengelasan SMAW ada pada konstruksi jembatan, Gedung bertingkat, industri perpipaan, tangki penyimpanan, *pressure vessels*, dan industri lain seperti pengiriman, transportasi, dan lain-lain.

Bird (1993) mengatakan bahwa terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi hasil pengelasan yaitu temperatur, bentuk kampuh, debit gas pelindung, dan lain sebagainya. Berkaitan dengan temperatur, proses *preheating* merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi kualitas hasil pengelasan karena proses *preheating* memiliki fungsi untuk memperlambat laju pendinginan. Semakin lambat laju pendinginan maka distorsi akibat pengelasan berkurang dan meningkatkan kekuatan antara logam induk dengan hasil pengelasan. Penelitian yang dilakukan Hadi (2015) menjelaskan bahwa proses *preheating* berpengaruh terhadap struktur mikro pada pengelasan FCAW baja ASTM A36. Di antara 4 variasi temperatur *preheat* yang diujikan, temperatur tertinggi memiliki hasil yang paling optimal. Selain itu, penelitian yang dilakukan oleh Baredwan (2021) juga menjelaskan bahwa proses *preheating* berpengaruh terhadap sifat-sifat mekanik pada pengelasan FCAW sambungan baja ASTM A53 dan A36.

Selain proses *preheating*, perlakuan panas berupa proses *post weld heat treatment*, selanjutnya disebut PWHT juga merupakan suatu hal yang akan mempengaruhi kualitas hasil pengelasan. Sama halnya dengan proses *preheating*, PWHT juga berperan untuk memperlambat laju pendinginan pada hasil pengelasan. Pada baja karbon, proses pendinginan harus dijaga dengan baik agar tidak terjadi pembentukan struktur martensit yang keras, yang nantinya akan mengakibatkan material menjadi getas dan retak (Augustino, 2015). Penelitian yang dilakukan Ariesta *et al.* (2014) menjelaskan bahwa proses PWHT – *tempering* mempengaruhi nilai kekerasan hasil pengelasan pada baja karbon medium. Nilai kekerasan akan meningkat saat dilakukan proses PWHT, namun nilai kekerasan cenderung menurun seiring dengan bertambah tingginya temperatur PWHT yang digunakan. Penelitian lain yang dilakukan oleh Darsin *et al.* (2010) menunjukkan bahwa perlakuan panas pada pengelasan MIG akan meningkatkan nilai kekuatan tarik pada material. Nilai kekuatan tarik terbesar terjadi saat perlakuan panas *preheating* dan PWHT dilakukan secara bersamaan.

Pada penelitian-penelitian tersebut, dapat diketahui bahwa parameter *preheating* dan PWHT serta variasinya yang diujikan memiliki pengaruh terhadap sifat mekanik hasil pengelasan. Namun dalam penelitian yang dilakukan saat ini masih jarang yang meneliti tentang pengaruh *preheating* dan PWHT terhadap sifat mekanik hasil pengelasan terutama pada sambungan baja karbon sedang. Oleh karena itu pada penelitian tugas akhir ini, akan dilakukan analisis pengaruh temperatur *preheating* dan juga temperatur PWHT dengan metode SMAW yang diterapkan pada pengelasan material baja karbon sedang JIS G 4051 Gr. S45C. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui sifat mekanik yaitu kekerasan, kekuatan tarik, serta struktur makro dan mikro yang terbentuk dari hasil pengelasan tersebut.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang pada bagian sebelumnya, maka dapat dirumuskan pokok permasalahan yang akan dibahas dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi *heat treatment* pada pengelasan SMAW terhadap sifat mekanik sambungan las baja JIS G 4051 Gr. S45C?
2. Bagaimana pengaruh variasi *heat treatment* pada pengelasan SMAW terhadap struktur mikro dan makro sambungan las baja JIS G 4051 Gr. S45C?
3. Bagaimana hubungan antara sifat mekanik dan struktur makro mikro pada sambungan las SMAW baja JIS G 4051 Gr. S45C dengan *heat treatment*?

1.3 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah pada bagian sebelumnya, maka tujuan yang ingin dicapai pada Tugas Akhir ini meliputi:

1. Mendapatkan hasil pengaruh variasi *heat treatment* pada sambungan las baja JIS G 4051 Gr. S45C terhadap sifat mekanik.
2. Mendapatkan hasil pengaruh variasi *heat treatment* pada sambungan las baja JIS G 4051 Gr. S45C terhadap struktur makro mikro.
3. Mendapatkan hubungan antara sifat mekanik dan struktur makro mikro pada sambungan las baja JIS G 4051 Gr. S45C dengan *heat treatment*.

1.4 Manfaat

Adapun manfaat yang ingin diperoleh dan diberikan melalui Tugas Akhir ini antara lain:

1. Memberikan informasi dan pengetahuan terkait pengaruh variasi *heat treatment* pada pengelasan SMAW terhadap sifat mekanik dan struktur makro mikro sambungan las baja JIS G 4051 Gr. S45C.
2. Hasil pengujian ini dapat dijadikan informasi yang saling melengkapi dan komprehensif dengan hasil penelitian-penelitian sebelumnya.
3. Dari data-data yang ada dapat menjadi referensi bagi peneliti selanjutnya dan bagi perusahaan yang bekerja sama dengan penulis.

1.5 Batasan Masalah

Untuk mendapatkan hasil yang maksimal dan pembahasan yang jelas, maka Batasan masalah perlu diberikan dalam Tugas Akhir ini. Batasan-batasan masalah dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Jenis material yang digunakan adalah baja JIS G 4051 Gr. S45C dengan ketebalan 12 mm.
2. Proses pengelasan menggunakan metode SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*).
3. Bentuk kampuh yang digunakan adalah kampuh *single v*.
4. Jenis elektroda yang digunakan adalah E-7018 dengan diameter 3,2 mm.
5. Temperature *preheating* yang digunakan adalah 150°C.
6. Variasi temperatur *post-heating* yang digunakan adalah 300°C dan 400°C.
7. Proses *post-heating* menggunakan *holding time* selama 45 menit.
8. Parameter pengujian yang dilakukan adalah *Non-Destructive Test (Radiography Test)*, *Bending Test* (Uji Tekuk), *Tensile Test* (Uji Tarik), *Hardness Test* (Uji Kekerasan), dan *Metallography Test* (Uji Metalografi)

(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka

Metode pengelasan sering digunakan pada konstruksi jembatan, gedung bertingkat, industri perpipaan, tangki penyimpanan, dan industri lain. Untuk saat ini, material yang sering digunakan dalam pengaplikasian metode pengelasan adalah baja. Beberapa faktor yang dapat mempengaruhi hasil akhir pengelasan adalah proses *preheating*, *postheating*, bentuk kampuh, kekuatan arus, debit gas pelindung, sudut, dan bahkan pemilihan metode pengelasan.

Penelitian yang dilakukan oleh Naharuddin *et al.* (2015) membahas tentang pengaruh penggunaan metode pengelasan SMAW dan SAW pada material baja SM 490 terhadap kekuatan tarik dan tekuknya. Pada penelitian ini didapatkan hasil bahwa pengelasan SMAW memiliki nilai yang lebih tinggi pada kekuatan tarik dengan nilai rata-rata 666,05 MPa. Sedangkan pengelasan SAW memiliki nilai rata-rata tegangan tekuk yang lebih tinggi yaitu 76,68 MPa. Pada pengujian tekuk yang dilakukan, juga tidak ditemukan adanya keretakan pada hasil pengelasan SMAW ataupun SAW, namun pengelasan SMAW membutuhkan nilai tegangan lentur yang lebih besar untuk menekuk spesimen hasil pengelasan.

Hadi (2015) dalam penelitiannya membahas tentang pengaruh variasi suhu *preheat* terhadap distorsi, lebar HAZ, dan struktur mikro pada sambungan *butt joint single v* dengan metode pengelasan FCAW dan SMAW. Variasi temperatur suhu *preheat* yang digunakan dalam penelitian ini adalah 0°C, 50°C, 100°C, 150°C, dan 200°C. Didapatkan hasil bahwa pengelasan SMAW tanpa *preheat* menghasilkan lebar HAZ yang paling besar dengan nilai 0,367 cm dan 0,678 cm², diikuti dengan pengelasan FCAW tanpa *preheat* yang memiliki lebar HAZ 0,34 cm dan luas 0,589 cm². Namun, hasil yang didapatkan oleh peneliti berbanding terbalik dengan teori yang ada. Maka dari itu peneliti berpendapat bahwa pengelasan tanpa *preheat* memiliki lebar HAZ yang terbesar akibat efek *preheat* dari pengelasan layer sebelumnya.

Penelitian selanjutnya dilakukan oleh Baredwan (2021), menganalisis pengaruh proses *preheating* dan bentuk kampuh V menggunakan metode pengelasan FCAW pada sambungan baja ASTM A53 dan A36 terhadap sifat mekanik. Variasi temperatur suhu *preheat* yang digunakan adalah 0°C, 100°C, dan 150°C, dengan variasi kampuh *single v* dan *double v*. Dengan penelitian ini peneliti mendapatkan hasil bahwa semakin besar suhu *preheat* pada jenis kampuh yang tipis akan cenderung memiliki *open defect* pada pengujian tekuknya, dengan daerah HAZ yang terbentuk menjadi lebih lebar. Hal ini tentunya sudah sesuai dengan teori yang ada. Tidak hanya itu, semakin besar suhu *preheat* yang digunakan akan menambah kekuatan tariknya.

Selain proses *preheating*, faktor lain yang mampu mempengaruhi hasil akhir pengelasan adalah proses *post weld heat treatment*, selanjutnya disebut PWHT. Penelitian yang dilakukan Darsin *et al.* (2010) bertujuan untuk mengetahui pengaruh perlakuan panas *preheating* dan PWHT pada pengelasan aluminium 5083 terhadap sifat mekanik dan struktur mikro. Penelitian ini menggunakan pengujian tarik, pengujian kekerasan, dan pengujian mikro untuk mengetahui pengaruh dari perlakuan panas pada pengelasan. Hasil dari penelitian ini adalah bahwa pemberian perlakuan panas pada pengelasan akan menimbulkan nilai kekuatan tarik yang semakin besar. Nilai kekuatan tarik terbesar didapatkan saat dilakukan pemberian *preheating* dan PWHT di saat yang bersamaan. Selanjutnya, penelitian yang dilakukan oleh Rachmatullah (2020) bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi temperatur *preheating* dan *aging post weld heat treatment* pada sambungan las aluminium terhadap sifat mekanis yang diketahui melalui

pengujian tarik dan metalografi atau struktur mikro makro. Variasi yang digunakan pada penelitian ini adalah *preheating* temperatur 80°C, 100°C, dan 120°C. Untuk proses *aging* PWHT, variasi temperatur yang digunakan adalah 180°C dan 260°C. Hasil yang diperoleh pada penelitian ini yaitu, perlakuan panas yang diberikan pada material akan meningkatkan kekuatan tarik. Selain itu semakin tinggi temperatur *preheating* yang digunakan, maka semakin besar daerah HAZ. Terakhir, temperatur yang menghasilkan nilai paling optimal adalah *preheating* 120 °C dan *aging* PWHT 260 °C.

Penelitian lain yang dilakukan oleh Ariesta *et al.* (2014) bertujuan untuk mengetahui pengaruh PWHT – *tempering* terhadap nilai kekerasan pada sambungan baja karbon medium. Variasi temperatur yang digunakan pada penelitian ini adalah 425°C, 475°C, 525°C, dan 575°C. Penelitian ini memberikan kesimpulan bahwa material yang dikenai proses PWHT – *tempering* memiliki nilai kekerasan yang lebih besar dibandingkan material yang tidak di PWHT. Namun, nilai kekerasan yang dihasilkan akan menurun atau berkurang seiring dengan bertambahnya temperatur PWHT yang digunakan. Supriyanto (2016) juga melakukan penelitian yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh proses PWHT dengan temperatur 700°C dan 900°C pada sambungan las SMAW material SA 36 terhadap kekuatan tarik, kekerasan, dan metalografi. Hasil yang didapatkan pada penelitian ini sesuai dengan hasil yang ada dari penelitian sebelumnya. Nilai kekuatan tarik yang dihasilkan oleh material, akan bertambah seiring dengan kenaikan temperatur PWHT yang digunakan. Sedangkan, nilai kekerasan akan berkurang seiring dengan kenaikan temperatur PWHT yang digunakan.

Penelitian yang dilakukan oleh Ahmad *et al.* (2011) memiliki tujuan untuk mengetahui pengaruh PWHT terhadap sifat mekanik sambungan las AA6061 menggunakan metode pengelasan GMAW. Hasil dari penelitian tersebut adalah, proses PWHT meningkatnya kekuatan tarik material sebesar 3,8% dan meningkatkan kekerasan material sebesar 25,6% dibandingkan dengan material yang tidak diberikan perlakuan panas. Berdasarkan penelitian yang sudah ada, rata-rata pengujian yang digunakan untuk mengetahui pengaruh variasi pengelasan terhadap hasil akhir sambungan adalah pengujian tarik. Oleh karena itu, pada penelitian kali ini akan dilakukan pengujian tarik beserta pengujian kekerasan, pengujian metalografi, dan pengujian NDT berupa uji radiografi untuk dapat melakukan analisa tentang pengaruh variasi pengelasan terhadap hasil akhir sambungan agar mendapatkan hasil akhir yang lebih menyeluruh.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Baja

Baja merupakan logam paduan antara besi sebagai unsur dasar dengan karbon sebagai unsur paduan utama. Karbon pada baja memiliki fungsi sebagai unsur pengeras dengan kandungan antara 0,2% hingga 2,1% berat sesuai *grade* masing-masing. Selain karbon, unsur paduan lain yang dapat ditambahkan adalah krom, mangan, vanadium, dan nikel.

Kualitas baja dapat disesuaikan dengan melakukan variasi kandungan karbon dengan paduan lainnya. Keuntungan dari menambah kandungan karbon pada baja adalah mampu meningkatkan kekerasan (*hardness*) dan kekuatan tariknya (*tensile strength*). Namun menambah kandungan karbon akan mengakibatkan getas (*brittle*) dan dapat menurunkan keuletan (*ductility*).

2.2.2 Jenis Baja

Secara umum, baja dibagi menjadi 2 jenis, yaitu baja karbon dan baja paduan. Berikut merupakan penjelasan mengenai 2 jenis baja tersebut:

a. Baja Karbon

Baja karbon mengandung unsur karbon yang menjadi unsur utama serta silikon, belerang, dan fosfor. Ditinjau sesuai dengan kandungan karbonnya, baja karbon dibagi menjadi 3 yaitu:

- Baja Karbon Rendah (*Low Carbon Steel*)

Baja karbon rendah memiliki kandungan karbon di bawah 0,3%. Baja karbon rendah sering disebut juga dengan baja ringan (*mild steel*) atau baja perkakas. Jenis baja yang umum digunakan adalah jenis *cold roll steel* dengan kandungan karbon 0,08% - 0,30% yang biasa digunakan untuk badan kendaraan.

- Baja Karbon Sedang (*Medium Carbon Steel*)

Baja karbon sedang merupakan baja yang memiliki kandungan karbon 0,30% - 0,60%. Baja karbon sedang mempunyai kekuatan yang lebih dari baja karbon rendah dan mempunyai kualitas perlakuan panas yang tinggi, tidak mudah dibentuk oleh mesin, lebih sulit dilakukan untuk pengelasan, dan dapat dikeraskan dengan baik. Baja karbon sedang banyak digunakan untuk poros, rel kereta api, roda gigi, pegas, baut, komponen mesin yang membutuhkan kekuatan tinggi, dan lain-lain.

1. Baja JIS G 4051 Gr. S45C

Baja JIS G 4051 Gr. S45C merupakan salah satu jenis material yang sering diaplikasikan pada *boilers*, poros *propeller*, dan baling-baling kapal. Kadar karbon pada baja JIS G 4051 Gr. S45C adalah 0,42% - 0,48%, hal ini menempatkan baja JIS G 4051 Gr. S45C sebagai baja karbon sedang (*medium carbon steel*). Baja ini merupakan baja yang dapat diberikan *heat treatment*. Untuk lebih detail, pada Tabel 2.1 dan Tabel 2.2 akan ditampilkan komposisi kimia dan *mechanical properties* dari baja JIS G 4051 Gr. S45C:

Tabel 2.1 Komposisi Kimia Baja JIS G 4051 Gr. S45C (JIS G 4051, 2016)

Komposisi	Grade S45C (%)
Karbon	0,42
Mangan	0,60
Fosfor	0,03
Sulfur	0,035
Silikon	0,35
Nikel	0,20
Kromium	0,20
Tembaga	0,30

Tabel 2.2 Material Properties Baja JIS G 4051 Gr. S45C (JIS G 4051, 2016)

Properties	Grade S45C
<i>Tensile Strength, min, psi, [Mpa]</i>	81.900 [565]
<i>Yield Strength, min, psi, [Mpa]</i>	50.000 [343]

- Baja Karbon Tinggi (*High Carbon Steel*)

Baja karbon tinggi memiliki kandungan karbon paling tinggi dibandingkan dengan baja karbon rendah dan baja karbon sedang. Kandungan karbon yang dimilikinya adalah 0,60% - 1,7% dan memiliki tahan panas yang tinggi, kekerasan yang tinggi, namun memiliki keuletan yang bias dibilang cukup rendah. Baja karbon tinggi

mempunyai kuat Tarik paling tinggi dan banyak digunakan untuk material *tools*. Salah satu aplikasi dari baja ini adalah dalam pembuatan kawat dan kabel baja.

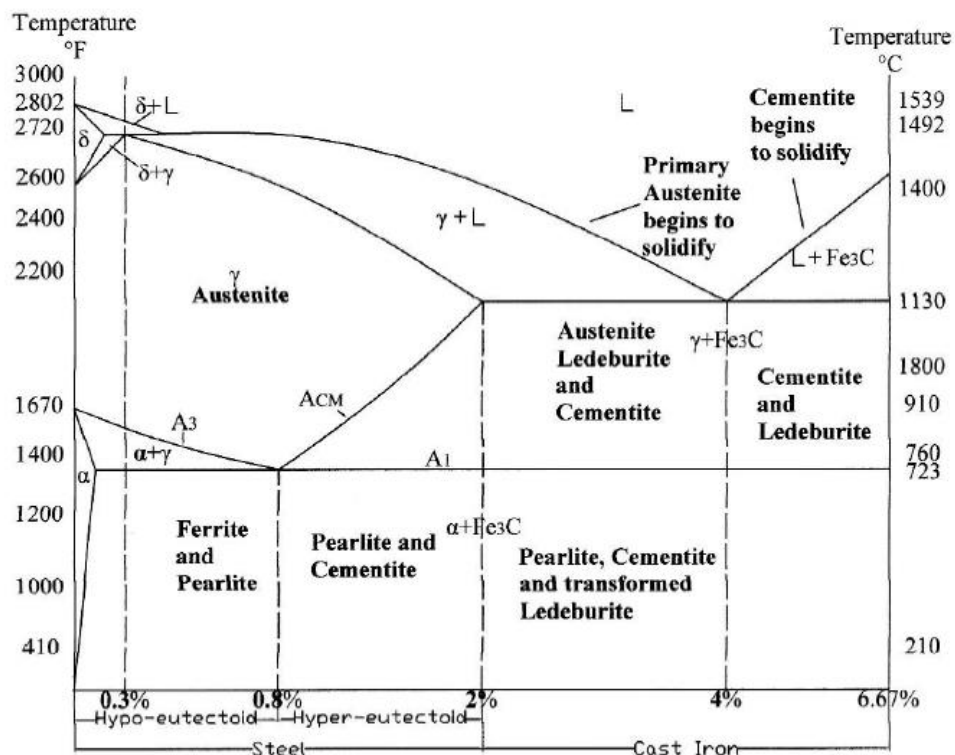
b. Baja paduan

Unsur yang paling sering digunakan untuk baja paduan adalah Cr, Mn, Si, W, Mo, Ti, Al, Cu, Nb, dan Zr. Baja paduan juga dibagi menjadi 3 yaitu:

- **Baja Paduan Rendah**
Baja paduan rendah memiliki elemen paduan kurang dari 2,5% wt. Baja paduan rendah sering digunakan untuk membuat gergaji, cetakan penarikan, mata pisau, pemotong kikir, dan gurdi batu.
- **Baja Paduan Menengah**
Baja paduan menengah memiliki elemen paduan sebesar 2,5% hingga 10% wt. Baja paduan menengah sering digunakan untuk membuat alat ukur dan mata gunting untuk pelat tebal.
- **Baja Paduan Tinggi**
Baja paduan tinggi memiliki elemen paduan lebih dari 10% wt. Baja paduan tinggi sering digunakan untuk membuat cetakan penarikan kawat, cetakan *trimmer*, dan pengukur.

2.2.3 Diagram Fasa

Gambar 2.1 merupakan diagram fasa besi karbon yang menunjukkan hubungan antara temperatur dengan perubahan fasa pada saat proses pemanasan dan pendinginan yang lambat (Wiryosumarto, 2000):



Gambar 2.1 Diagram Fasa Baja Karbon (Wiryosumarto & Okamura, 2000)

Berikut merupakan penjelasan dari Gambar 2.1:

A = Titik cair besi

B = Titik pada cairan yang ada hubungannya terkait reaksi *peritektik*

H = Larutan pada δ yang ada hubungannya dengan reaksi *peritektik* kelarutan maksimum adalah 0,10%

J = Titik *peritektik*

N = Titik transformasi dari besi δ dari dan ke besi γ , titik transformasi A_4 dari besi murni

C = Titik *eutik*

E = Titik yang menyatakan fasa γ , ada hubungannya dengan fase *eutik*

G = Titik transformasi besi γ dari dan ke besi α , titik transformasi A_3 untuk besi

P = Titik yang menyatakan ferrit

S = Titik *eutectoid*

GS = Garis yang menyatakan hubungan antara temperatur dengan komposisi, di mana mulai terbentuk ferrit dan *austenit*

ES = Garis yang menyatakan hubungan antara temperatur dengan komposisi, di mana mulai terbentuk *sementit* dan *austensit*

2.2.4 Fasa Baja Karbon

Jenis-jenis fasa yang terdapat pada diagram fasa besi karbon adalah sebagai berikut (Suratman, 1994):

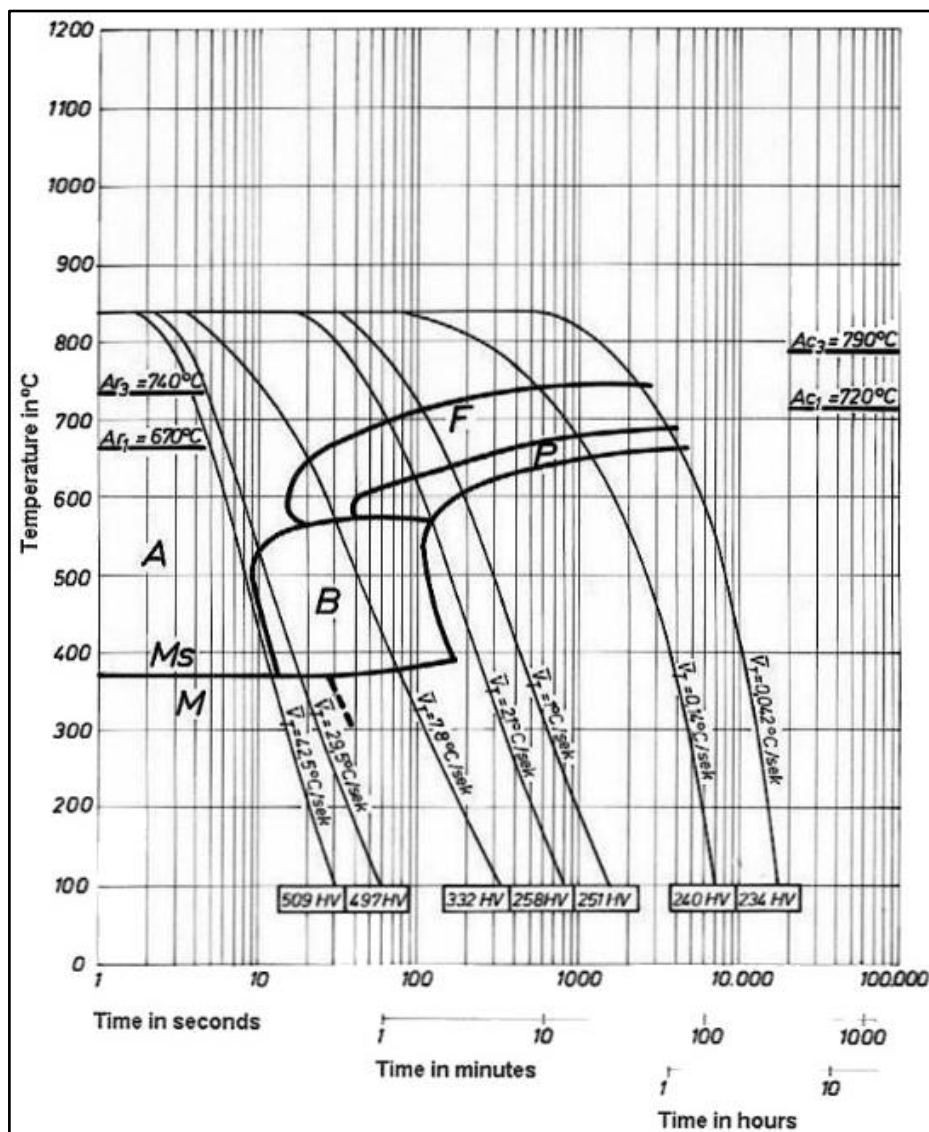
1. *Ferrite* (α)
Ferrite adalah fasa larutan padat yang mempunyai struktur *body centered cubic* (BCC). *Ferrite* terbentuk pada proses pendinginan lambat dari *astenite* baja *hipoutectoid* dimana baja dengan kandungan karbon kurang dari 0,8% yang bersifat lunak, ulet, memiliki kekerasan 70 – 100 BHN, dan konduktivitas *thermal* nya tinggi.
2. *Austenite* (γ)
Austenite mempunyai struktur atom *face centered cubic* (FCC). Pada keadaan setimbang, fasa *austenite* berada pada temperatur tinggi. Kelarutan atom karbon fasa *austenite* lebih besar dibandingkan dengan kelarutan fasa *ferrite*.
3. *Cementite* (Fe_3C)
Cementite merupakan senyawa kimia yang terdiri dari besi dan karbon dengan rumus kimia Fe_3C yang berbentuk sel satuan *ortorombik* dan memiliki kekerasan 65 – 68 HRC.
4. *Pearlite* ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$)
Pearlite merupakan campuran antara *ferrite* dan *cementite* berlapis dalam struktur butir, dengan nilai kekerasan 10 – 3- HRC. Untuk membentuk struktur *pearlite* yang kasar maka diperlukan proses pendinginan yang lambat, sedangkan untuk membentuk struktur *pearlite* yang halus maka diperlukan proses pendinginan yang cepat. Baja yang memiliki struktur mikro *pearlite* kasar memiliki kekuatan lebih rendah jika dibandingkan dengan baja dengan struktur mikro *pearlite* yang halus.
5. *Martensite*
Martensite terbentuk dari pendinginan cepat fasa *austensit* sehingga mengakibatkan sel satuan FCC bertransformasi secara cepat menjadi BCC. Unsur karbon yang larut dalam BCC mengakibatkan terjadinya distorsi sel satuan sehingga sel satuan BCC berubah menjadi BCT.

2.2.5 Diagram Continuous-Cooling Temperature (CCT)

Diagram CCT merupakan sebuah diagram yang menunjukkan perubahan austenit menjadi struktur yang terbentuk Ketika baja didinginkan dari temperatur austenisasi dengan

pendinginan kontinu (Avner, 1974). Penggunaan diagram CCT harus disesuaikan dengan material yang digunakan pada penelitian, karena kandungan yang berbeda pada material juga akan mempengaruhi kandungan dan perubahan struktur yang ada, sehingga menjadikan material satu dan yang lain memiliki diagram CCT yang berbeda. Diagram CCT untuk material JIS G 4051 Gr. S45C ditunjukkan pada Gambar 2.2.

Pada gambar di bawah, dapat dilihat bahwa saat material didinginkan menggunakan laju pendinginan yang lambat maka struktur mikro yang akan terbentuk adalah struktur *pearlite*. Proses pendinginan lambat ini biasa disebut sebagai proses *annealing* atau proses pendinginan baja di dalam dapur pemanas. Apabila laju pendinginan yang dilakukan lebih cepat, maka akan terbentuk mikro struktur *bainite*. Selanjutnya, apabila pendinginan dilakukan dengan sangat cepat maka struktur mikro yang akan terbentuk adalah struktur martensit. Pendinginan sangat cepat ini umumnya menggunakan media air sebagai pendingin dan proses ini disebut proses *quenching* atau *hardening*.

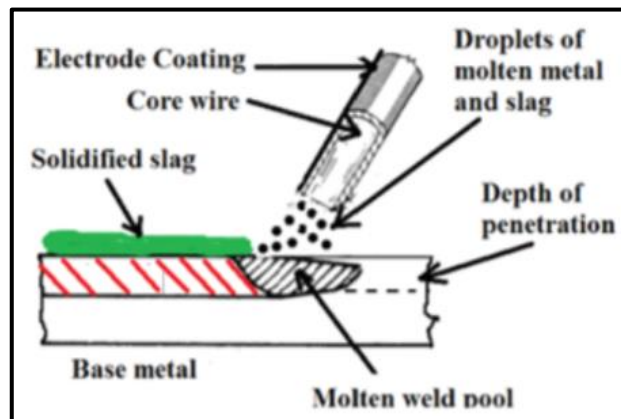


Gambar 2.2 Diagram CCT Baja JIS G 4051 Gr. S45C

2.2.6 Pengelasan SMAW

Shielded Metal Arc Welding (SMAW) merupakan salah satu metode pengelasan yang sangat populer yang digunakan untuk proses penyambungan baja struktural. Hal ini disebabkan karena sistem pengelasannya yang cukup sederhana. Kelebihan metode pengelasan SMAW terdapat pada elektroda yang terbungkus fluks yang bertujuan untuk menghindari pengaruh buruk dari udara sekitar terhadap kualitas manik las seperti debu, minyak, dan air. Pengaruh dari laur tersebut membuat hasil akhir pengelasan menjadi getas (*brittle*), keropos (*porous*), dan mudah berkarat (*corrosive*). Metode pengelasan SMAW cukup banyak digunakan pada masa ini karena penggunaannya yang praktis, mudah dioperasikan, cocok digunakan untuk segala posisi pengelasan, dan lebih efisiensi termasuk dalam hal biaya.

Mesin las SMAW menurut arusnya dibedakan menjadi 3 macam yaitu mesin las arus searah atau *direct current* (DC), mesin las arus bolak-balik atau *alternating current* (AC), dan mesin las arus ganda yang dapat digunakan untuk pengelasan DC maupun AC. Mesin las DC dapat digunakan dengan dua acara polaritas yaitu polaritas lurus dan polaritas terbalik. Polaritas lurus akan digunakan saat titik cair bahan induk tinggi dan kapasitas besar, sedangkan polaritas terbalik akan digunakan saat titik cair bahan induk rendah dan kapasitas kecil. Untuk lebih mudahnya, pada Gambar 2.3 merupakan ilustrasi proses pengelasan SMAW.



Gambar 2.3 *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) (Alkahla & Pervaiz, 2017)

2.2.7 Preheating

Proses *preheating* atau pemanasan mula merupakan proses pemanasan Sebagian atau seluruh logam yang akan dilas. Tujuan utama dari dilakukannya proses *preheating* adalah untuk mengurangi perbedaan suhu (*gradient temperature*) yang timbul antara daerah pengelasan dan daerah lain benda kerja. Lebih lanjut, Sharma *et al.* (2013) menjelaskan tujuan dan manfaat dari kelangsungan proses *preheating* yaitu:

1. Mampu memperlambat laju pendinginan pada material, sehingga akan menghasilkan struktur yang lebih ulet dan memiliki ketahanan retak yang lebih besar
2. Membantu hidrogen terdifusi keluar, sehingga akan mengurangi potensi terjadinya retak
3. Mengurangi tegangan sisa dalam material dan pada daerah HAZ
4. Mengurangi risiko patah getas dan meningkatkan kekuatan material

Proses *preheating* dilakukan dengan nyala api *oxygas*, dapur tempa, dan oven. Proses *preheating* dilakukan hingga baja memerah dan tidak mencapai titik kritis serta harus uniform diikuti dengan pendinginan yang merata. Jika proses *preheating* melebihi titik kritis, hal ini akan menyebabkan perubahan karakteristik bahan. Tabel 2.3 berisi informasi suhu *preheating*

yang boleh dilakukan pada baja dengan kandungan karbon tertentu, sedangkan pada Tabel 2.4 terapat informasi suhu preheating pada baja dengan nilai karbon ekuivalen tertentu.

Tabel 2.3 Suhu Pemanasan Baja Karbon (Wiryosumarto & Okamura, 2000)

Kadar Karbon (%)	Suhu Pemanasan Mula (°C)
0,20 (maks)	90 (maks)
0,20 – 0,30	90 – 150
0,30 – 0,45	150 – 260
0,45 – 0,85	260 - 420

Tabel 2.4 Suhu Pemanasan Baja Karbon Berdasarkan Karbon Ekuivalen

Karbon Ekuivalen	Weldability	Perlakuan Panas
0,40-0,49	Sukar	Pre-heat 150°C
0,50-0,59	Sangat Sukar	Pre-heat 150°C
0,60-0,69	Sangat Sukar	Pre-heat 200°C
0,70-0,79	Sangat Sukar	Pre-heat 120°C
>0,80	Sangat Sukar	Pre-heat 300°C

2.2.8 *Post Weld Heat Treatment*

Post Weld Heat Treatment, selanjutnya disebut PWHT merupakan perlakuan panas yang diberikan pada material uji setelah selesai digabungkan menggunakan pengelasan. PWHT merupakan panas yang diberikan pada material setelah pengelasan guna memperbaiki sifat mekanik dan struktur mikro pada daerah yang dipengaruhi panas dan daerah logam lasan (Augustino, 2015). PWHT biasanya dilakukan dengan cara memanaskan kembali material menggunakan temperatur di bawah temperatur kritis material yaitu pada suhu 723°C. PWHT yang diberikan pada material biasanya berkisar diantara temperatur 150°C - 600°C dengan penentuan temperatur bergantung pada ketebalan material.

Pada baja karbon, pendinginan harus dijaga kecepatannya agar tidak mengakibatkan terbentuknya struktur martensit yang keras, yang akan mengakibatkan material menjadi getas dan mudah retak. Beberapa manfaat atau tujuan dilakukannya PWHT di antara lain adalah untuk menghilangkan tegangan sisa terutama pada material dengan ketebalan yang tebal. Namun, pengaplikasian PWHT akan memberikan dampak berupa berkurangnya *yield strength*, berkurangnya nilai kekuatan tarik, berkurangnya nilai kekerasan, meningkatkan keuletan, dan mengurangi kekuatan pada sambungan las. (WTIA, 2003)

2.2.9 Parameter Pengelasan

Selain elektroda, beberapa parameter pengelasan juga akan mempengaruhi kualitas hasil pengelasan seperti tegangan, kuat arus, dan kecepatan pengelasan yang akan membuat suatu hubungan yang akan menghasilkan masukan panas atau *heat input* yang dapat dirumuskan seperti pada Persamaan 2.1:

$$H_i = \frac{\eta \cdot E \cdot I}{v} \quad (2.1)$$

dengan,

H_i = Heat Input (kJ/mm)

η = Efisiensi Pengelasan

E = Tegangan (V)

I = Arus (A)

v = Kecepatan Pengelasan (mm/s)

Selanjutnya, besar *heat input* yang mempengaruhi lebar HAZ dapat diketahui secara teoritis dengan menggunakan Persamaan 2.2 berikut:

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4,13 \cdot \rho \cdot C \cdot t \cdot Y}{H_i} + \frac{1}{T_m - T_0} \quad (2.2)$$

dengan,

T_p = Peak Temperature (°C) pada jarak (mm) dari batas sambungan las.

T_0 = Temperatur awal pelat (°C)

ρ = Massa jenis material (g/mm³)

C = Panas spesifik dari logam padar (J/g°C)

t = Tebal plat (mm)

T_m = Temperatur lebur (°C)

Pengaruh dari parameter di atas dapat diuraikan sebagai berikut:

a. Tegangan

Panjang busur las yang baik adalah yang kurang lebih sama dengan panjang elektroda yang digunakan. Namun, untuk besarnya tegangan yang digunakan pada masing-masing posisi tidaklah sama. Untuk penggunaan elektroda dengan diameter 3-6 mm, tegangan yang digunakan berkisar antara 20-30 volt pada posisi datar. Untuk posisi di atas kepala, tegangan yang digunakan akan dikurangi sekitar 2-5 volt.

b. Arus

Kekuatan arus pada pengelasan berpengaruh pada proses pelelehan dan penyambungan logam. Semakin besar arus yang digunakan, maka semakin cepat proses pelelehan yang terjadi. Namun, hal ini mampu mengakibatkan semakin besarnya *heat affected zone* (HAZ) dan persentase sambungan las dan perubahan struktur mikro pada daerah sambungan. Selain itu, kekuatan arus yang tinggi akan menghasilkan manik lebar, butiran percikan kecil, dan penetrasi dalam serta penguatan matriks las tinggi. Sebaliknya, semakin kecil kekuatan arus yang digunakan akan mengakibatkan proses pelelehan dan penyambungan yang tidak sempurna. Hal

ini akan mengakibatkan terbentuknya rigi-rigi las yang kecil dan tidak rata serta penembusan yang kurang dalam.

Besarnya kekuatan arus yang diperlukan pada pengelasan tergantung pada diameter elektroda yang digunakan, tebal dari material yang akan dilas, jenis elektroda, geometri sambungan, dan posisi pengelasan. Daerah pengelasan mempunyai kapasitas panas tinggi sehingga diperlukan arus yang tinggi. Arus las merupakan parameter las yang langsung mempengaruhi penembusan dan kecepatan pencairan logam induk.

c. *Travel Speed*

Travel speed atau kecepatan pengelasan di definisikan sebagai laju perjalanan elektroda sepanjang sambungan. Kecepatan pengelasan bergantung pada jenis elektroda, diameter elektroda yang digunakan, material yang akan dilas, geometri sambungan, ketelitian sambungan, dan lain-lain. Kecepatan pengelasan tidak memiliki hubungan dengan tegangan, namun berbanding lurus dengan arus yang digunakan pada proses pengelasan. Maka dari itu, pengelasan yang dilakukan secara cepat akan memerlukan arus yang tinggi. (Wiryosumarto & Okamura, 2000)

Apabila *heat input* dari suatu pengelasan semakin tinggi, maka temperatur puncak yang diperoleh akan semakin tinggi. Hal ini akan membuat *heat affected zone* (HAZ) menjadi semakin lebar dan akan tumbuh kristal dengan cepat yang membentuk butir yang besar dikarenakan laju pendinginan yang lambat.

2.2.10 Pengujian Tidak Merusak (*Non-Destructive Test*)

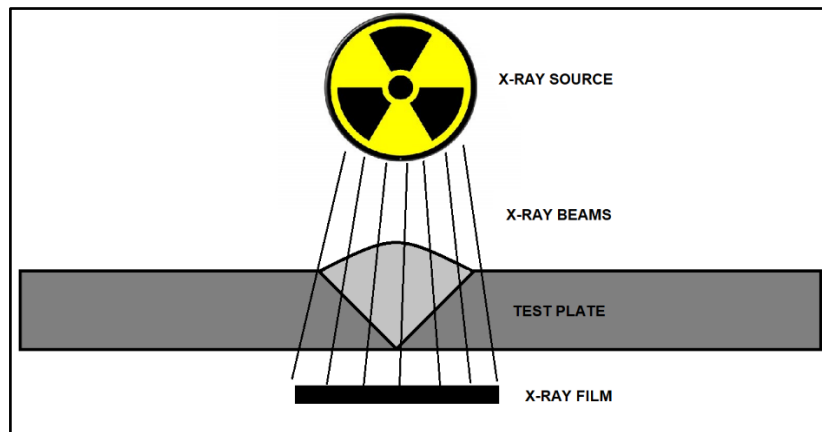
Pengujian tidak merusak atau *non-destructive test* merupakan pengujian yang dilakukan untuk mengetahui kualitas hasil pengelasan yang merusak bagian-bagian dari spesimen yang telah diuji. Pengujian ini dilakukan untuk mencari tahu apakah terdapat cacat di bagian permukaan maupun di dalam hasil pengelasan dari spesimen uji. Pengujian tidak merusak memiliki beberapa jenis pengujian yaitu inspeksi visual, *radiography test* (RT), *penetrant test* (PT), *magnetic test* (MT), dan *ultrasonic test* (UT).

a. Inspeksi Visual (*Visual Inspection*)

Inspeksi visual sejatinya merupakan salah satu metode pengujian tidak merusak yang paling awal diketahui oleh manusia. Inspeksi ini dilakukan menggunakan indra manusia seperti penglihatan, pendengaran, sentuhan, dan penciuman. Pada pengelasan, inspeksi visual yang sering digunakan adalah inspeksi penglihatan. Shafeek *et al.* (2004) mengatakan bahwa hingga saat ini inspeksi visual telah menghabiskan sedikitnya 10% dari biaya produksi suatu barang, selain itu inspeksi visual apabila dilakukan saat kondisi manusia sedang optimal akan menghasilkan tingkat keefektifitasan hingga 80%.

b. Uji Radiografi (*Radiography Test*)

Uji radiografi merupakan salah satu jenis pengujian yang sering digunakan pada NDT. Uji radiografi menggunakan sinar X dan sinar gamma yang mampu menembus logam. Hasil penyinaran dan penembusan sinar dapat diukur menggunakan penetrometer. Pada Gambar 2.4 disajikan ilustrasi proses pengujian radiografi.



Gambar 2.4 Uji Radiografi (Anwar et al., 2017)

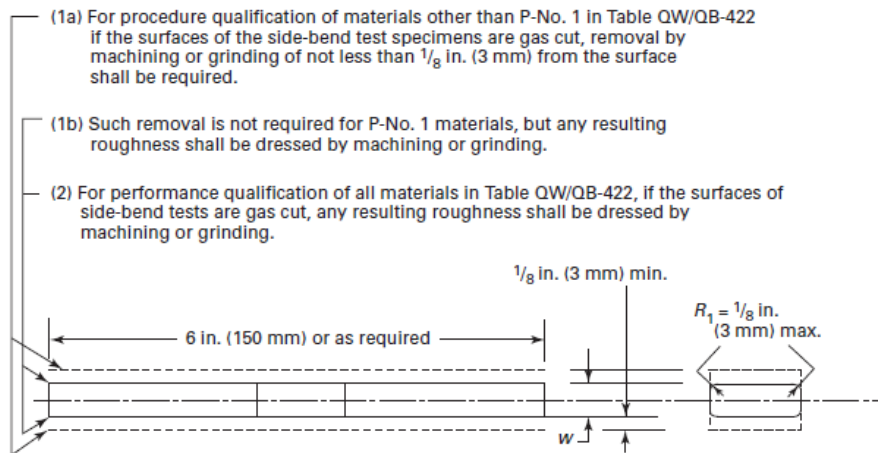
2.2.11 Pengujian Merusak (*Destructive Test*)

Destructive test merupakan pengujian yang dilakukan untuk mengetahui hasil pengelasan pada material dengan cara merusak bagian-bagian dari spesimen uji. Tujuan dari dilakukannya pengujian ini adalah untuk mengetahui kesamaan antara logam induk dengan logam pada area hasil pengelasan. *Destructive test* memiliki beberapa jenis pengujian yaitu uji tarik (*tensile test*), uji tekuk (*bending test*), uji metalografi (*metallography test*), dan uji kekerasan (*hardness test*).

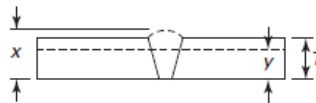
a. Uji Tekuk

Uji tekuk merupakan pengujian yang bertujuan untuk memeriksa kualitas dari hasil sambungan las. Pengujian ini dilakukan dengan cara menekuk sambungan pada material yang sudah dilas sehingga mencapai kelengkungan tertentu. Pengujian tekuk terdiri dari tiga jenis pengujian, yaitu *root bend*, *face bend*, dan *side bend*. *Side bend* atau menekuk bagian samping material memiliki kesempatan yang lebih baik untuk menemukan diskontinuitas yang bisa jadi tidak terdeteksi pada *face bend* maupun *root bend* (B.G. Satish dan Jeergi, 2016). Pada Gambar 2.5 dan Gambar 2.6 ditampilkan ukuran spesimen uji yang digunakan pada pengujian tekuk *side bend* maupun *root & face bend*.

**Figure QW-462.2
Side Bend**



T , in. (mm)	y , in. (mm)	w , in. (mm)	
		P-No. 23, F-No. 23, F-No. 26, or P-No. 35	All other metals
$\frac{3}{8}$ to $< 1\frac{1}{2}$ (10 to < 38)	T [Note (1)]	$\frac{1}{8}$ (3)	$\frac{3}{8}$ (10)
$\geq 1\frac{1}{2}$ (≥ 38)	Notes (1) and (2)	$\frac{1}{8}$ (3)	$\frac{3}{8}$ (10)

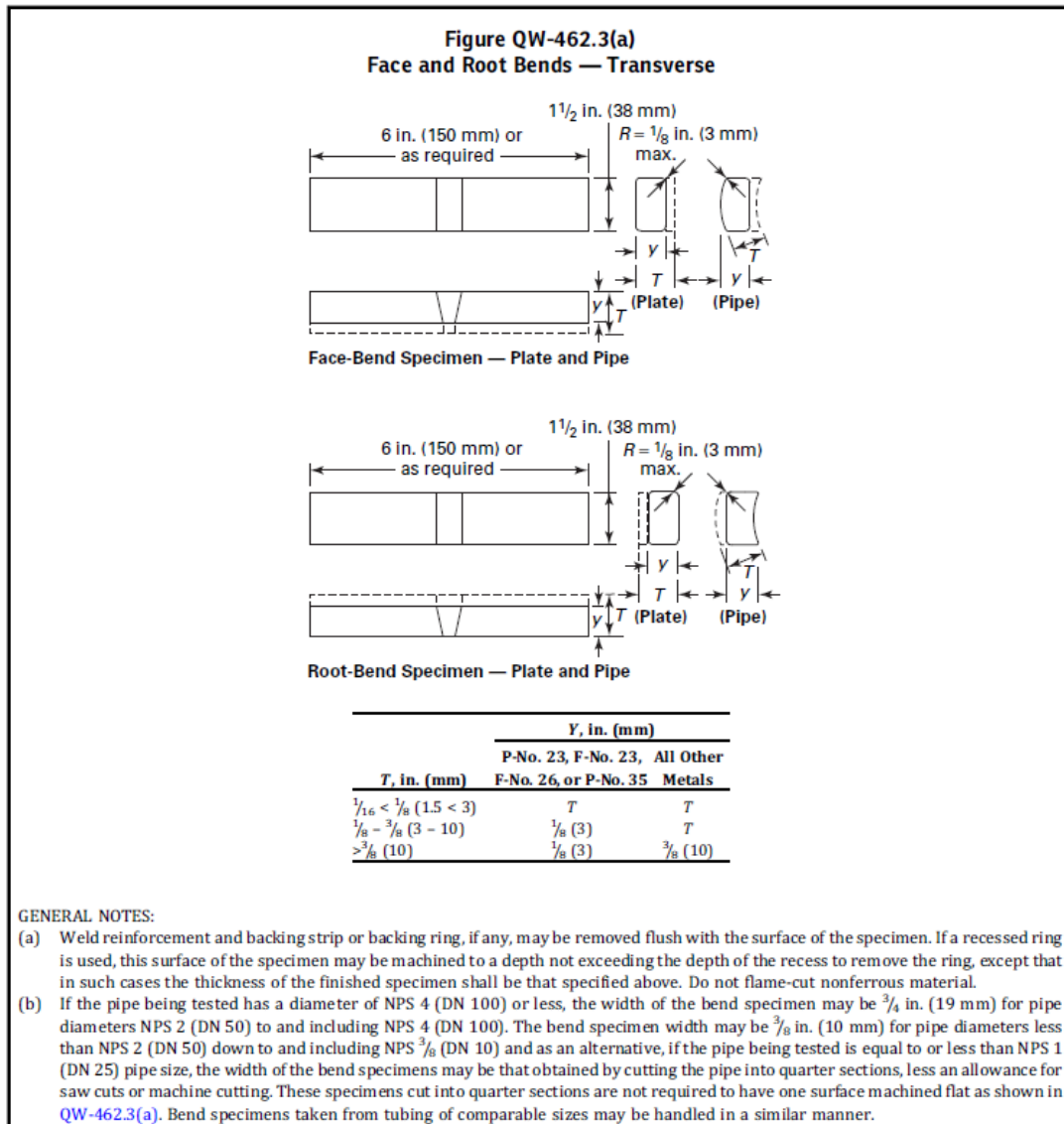


GENERAL NOTE: Weld reinforcement and backing strip or backing ring, if any, may be removed flush with the surface of the specimen. Thermal cutting, machining, or grinding may be employed. Cold straightening is permitted prior to removal of the reinforcement.

NOTES:

- (1) When weld deposit t is less than coupon thickness T , side-bend specimen thickness may be t .
- (2) When coupon thickness T equals or exceeds $1\frac{1}{2}$ in. (38 mm), use one of the following:
 - (a) Cut specimen into multiple test specimens of thickness y of approximately equal dimensions $\frac{3}{4}$ in. to $1\frac{1}{2}$ in. (19 mm to 38 mm).
 y = tested specimen thickness when multiple specimens are taken from one coupon.
 - (b) The specimen may be bent at full width. See requirements on jig width in QW-466.1.

Gambar 2.5 Rules Pengujian Tekuk Side Bend (ASME Sec. IX, 2019)



Gambar 2.6 Rules Pengujian Tekuk Root dan Face Bend (ASME Sec. IX, 2019)

b. Uji Tarik

Uji tarik merupakan pengujian tegangan tarik pada material yang bertujuan untuk mengetahui kekuatan dari spesimen yang diuji. Tegangan yang digunakan dalam uji tarik adalah tegangan aktual eksternal. Uji ini dilakukan dengan cara melakukan penarikan gaya tarik yang dilakukan secara terus menerus. Hal ini yang diharapkan akan mengakibatkan spesimen mengalami pertambahan panjang dan akan mengalami kelelahan (*fatigue*) yang diikuti dengan kegagalan (*failure*) pada material. Material yang mengalami deformasi plastis akan menjadi gagal karena adanya *yield point* dan jika beban yang bekerja pada material memiliki besar yang melebihi tegangan luluh (*yield point*). Pada persamaan 2.3 dan Persamaan 2.4 ditampilkan cara matematis perhitungan tegangan dan regangan (Wiruosumarto & Okamura, 2000):

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (2.3)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.4)$$

dengan,

σ = Tegangan (lb/in² atau Psi)

P = Beban (lb)

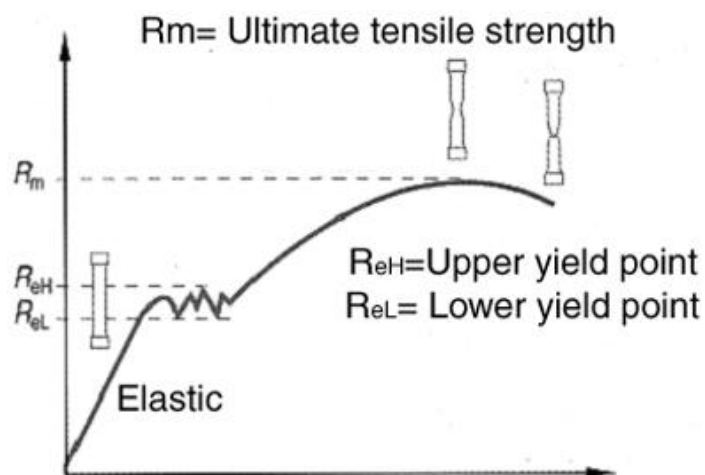
A_0 = Luas penampang melintang mula-mula (in²)

ε = Regangan

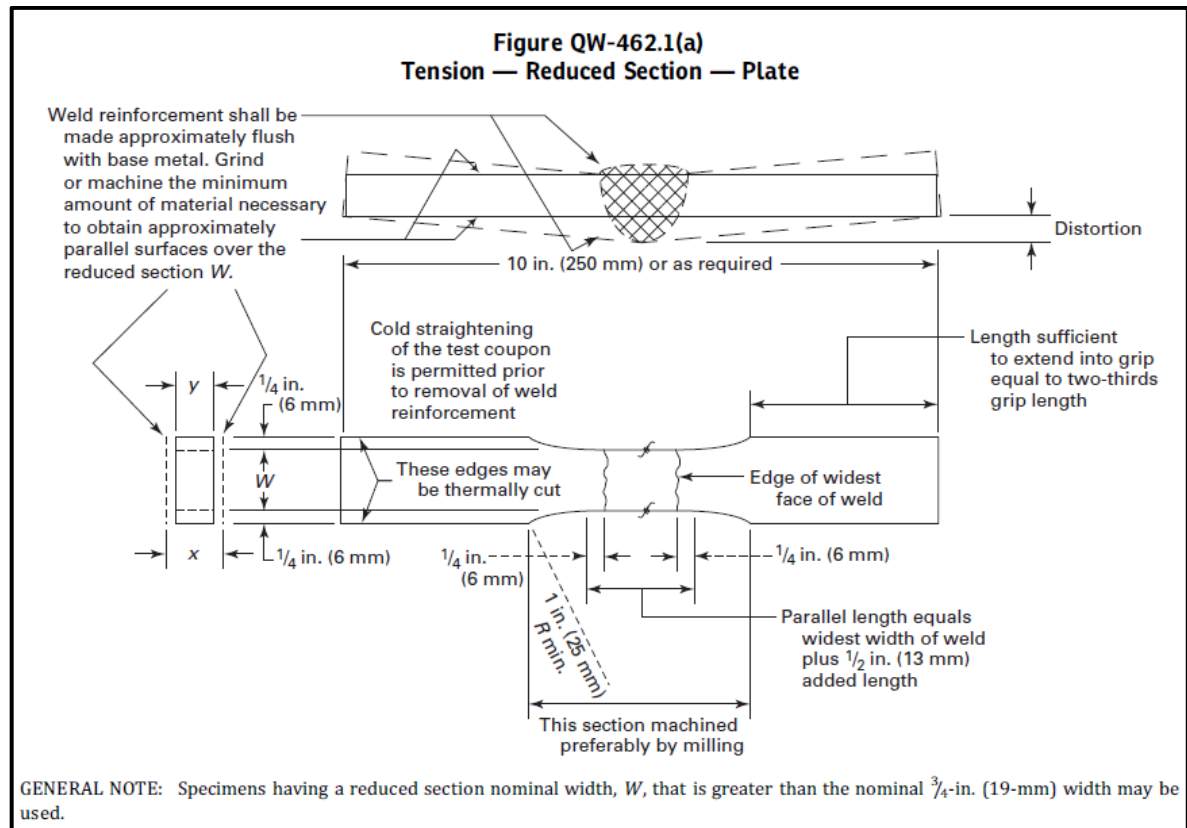
ΔL = Selisih panjang (in)

L_0 = Panjang mula-mula (in)

Hubungan antara tegangan dan regangan seperti pada Gambar 2.7 di bawah ini akan memberikan pengaruh pada hasil pengujian tarik yang dilakukan. Selanjutnya, pada Gambar 2.8 ditampilkan gambar spesimen pengujian yang digunakan pada pengujian tarik.



Gambar 2.7 Diagram Tegangan dan Regangan



Gambar 2.8 Rules Pengujian Tarik (ASME Sec. IX, 2019)

c. Uji Kekerasan

Uji Kekerasan atau *hardness test* merupakan sebuah pengujian yang dilakukan untuk mengetahui nilai kekerasan dari suatu material. Pada pengelasan, pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kekuatan di daerah *base metal*, *weld metal*, dan HAZ. Kekerasan suatu bahan merupakan sifat mekanik yang penting, karena kekerasan dapat digunakan untuk mengetahui sifat mekanik yang lain seperti kekuatan (*strength*) (Supriyanto, 2016). Terdapat beberapa metode pengujian kekerasan yang umum digunakan untuk menguji kekerasan pada logam yaitu:

2. Pengujian kekerasan metode *Brinell*
3. Pengujian kekerasan metode *Vickers*
4. Pengujian kekerasan metode *Rockwell*

Pada penelitian kali ini, metode pengujian yang akan digunakan adalah metode *Vickers*. Metode pengujian *Vickers* dilakukan dengan cara menekan indentor yang terdapat pada Gambar 2.9 terhadap permukaan logam atau spesimen uji dengan beban dan interval waktu tertentu lalu hasil pengujian akan didapatkan dengan pengukuran ukuran dan kedalaman indentor. Pada metode ini, indentor yang digunakan merupakan indentor berbentuk piramida dengan alas bujur sangkar dan dua sudut yang membentuk sudut 136° . Berikut merupakan cara matematis perhitungan kekuatan atau kekerasan suatu material (ASTM E 92, 2017):

$$HV = \frac{F}{A} \quad (2.5)$$

$$A = \frac{d^2}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{d^2}{1,8544} \quad (2.6)$$

$$HV = 1,8544 \times \frac{F}{d^2} \quad (2.7)$$

dengan:

HV = Vickers hardness number

F = Gaya (Kgf)

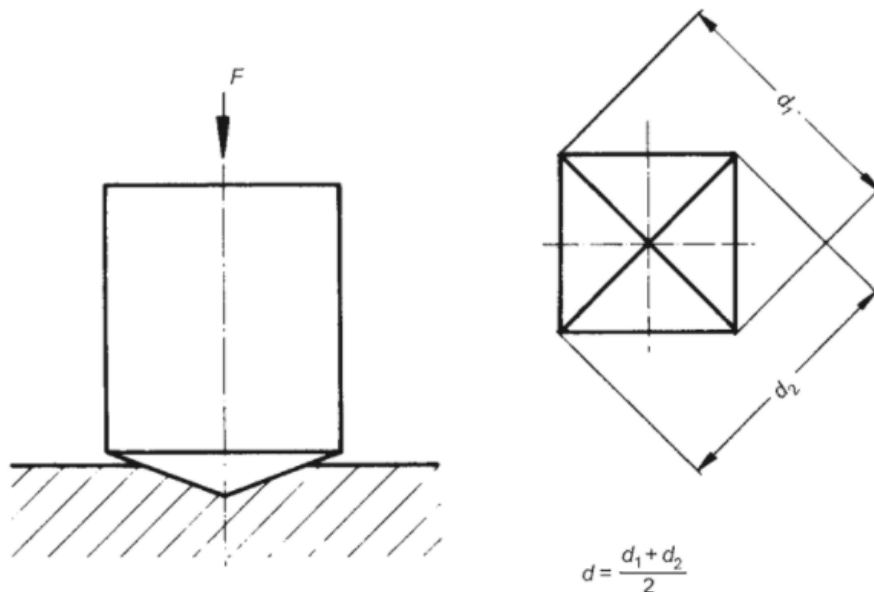
D = Diagonal (mm)

α = Sudut identor = 136°

Vickers hardness number juga bisa dicari menggunakan satuan lain seperti yang ditampilkan pada Tabel 2.5 berikut.

Tabel 2.5 Formula Vickers (ASTM E 92-17, 2017)

Vickers Hardness Number		
Force (F) unit	Diagonal (d) unit	Formula
Kgf	mm	$HV = 1,8544 \times F/d^2$
gf	μm	$HV = 1854,4 \times F/d^2$
N	mm	$HV = 0,1891 \times F/d^2$



Gambar 2.9 Bentuk Identor Pengujian Vickers (Herrmann, 2011)

c. Uji Metalografi

Uji metalografi merupakan pengujian yang dilakukan untuk mengetahui karakteristik struktur mikro dan struktur makro pada logam serta paduannya. Pengujian ini dilakukan dengan bantuan mikroskop untuk mengamati hasil pengelasan yang telah dilakukan. Terdapat dua jenis mikroskop yang dapat digunakan untuk menguji yaitu mikroskop optis dan mikroskop elektron.

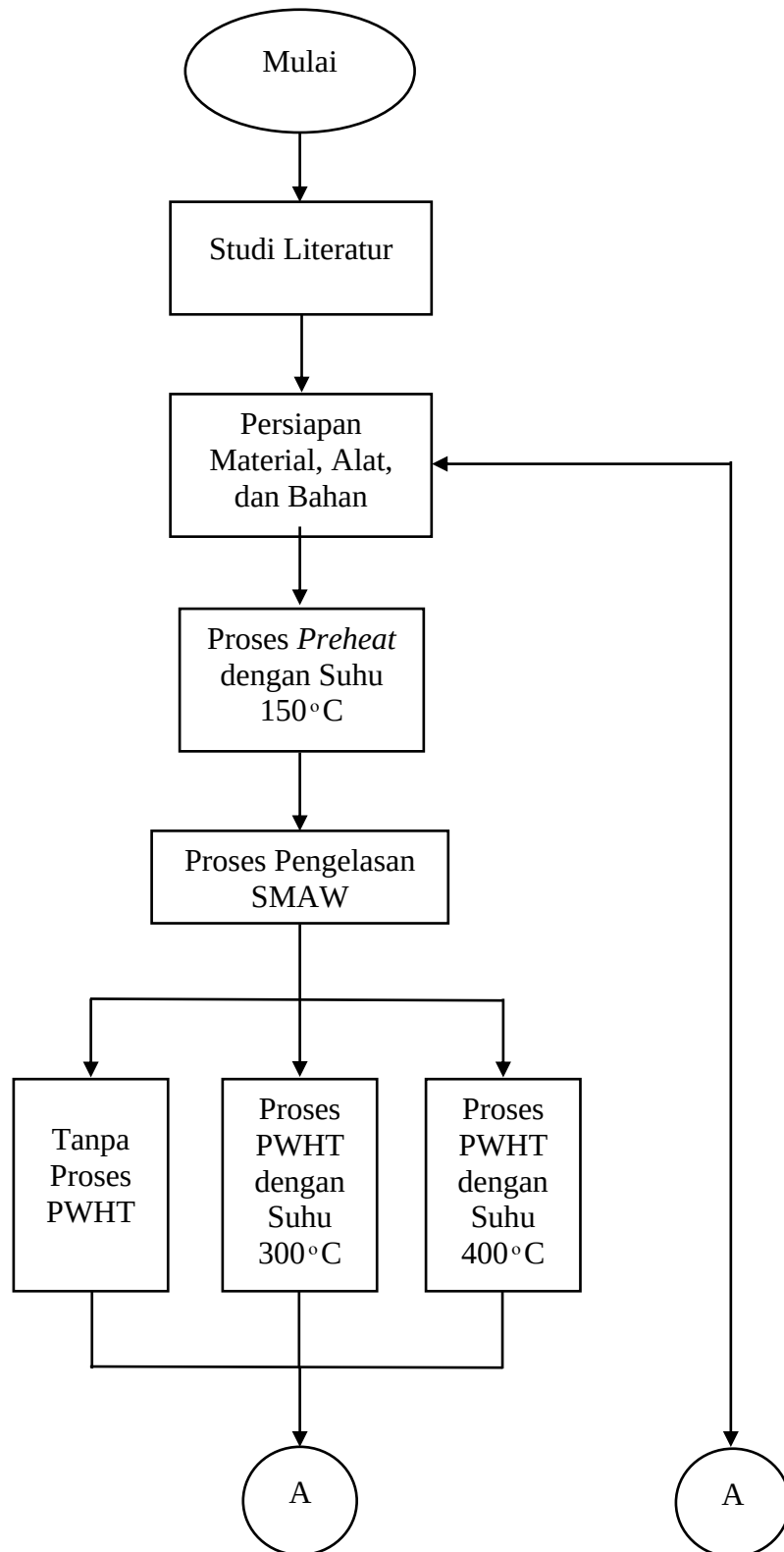
Pengujian makro merupakan proses pengujian dengan mata untuk mengamati morfologi hasil las, yakni pengukuran lebar HAZ serta untuk mengetahui adanya cacat pada hasil las akibat proses deformasi, perbedaan komposisi, dan proses perlakuan panas. Perbesaran yang digunakan pada pengujian makro ada di antara 7-100 kali.

Pengujian mikro merupakan pengujian yang menggunakan mikroskop khusus metalografi. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui bentuk dan struktur mikro akibat adanya perbuahan fasa. Pembesaran yang digunakan pada pengujian mikro mencapai 1000 kali.

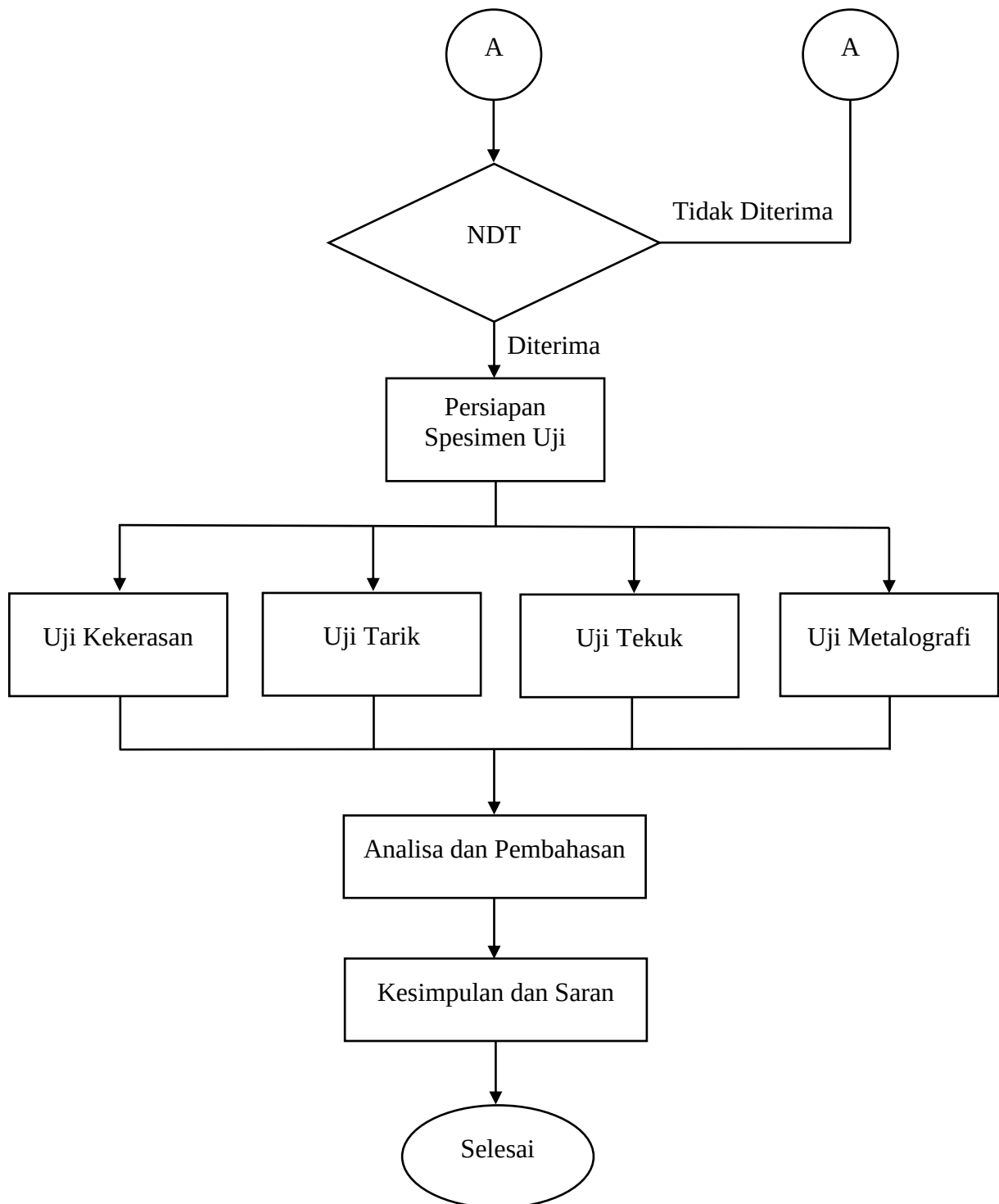
(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian (Lanjutan)

3.2 Prosedur Penelitian

Berdasarkan diagram alir pada Gambar 3.1, berikut merupakan penjelasan langkah-langkah dalam penelitian ini:

1. Studi Literatur

Dalam proses studi literatur penulis mencari dan mengumpulkan referensi yang berkaitan dan berhubungan dengan permasalahan yang ditemukan. Referensi yang digunakan oleh penulis dapat berupa buku, tugas akhir, jurnal, serta *rules* atau *codes* yang sesuai.

2. Persiapan Material, Alat, dan Bahan

Persiapan material, Alat, dan Bahan yang dilakukan penulis meliputi hal-hal sebagai berikut:

- a. Material pelat baja JIS G 4051 Gr. S45C berbentuk persegi panjang dengan ukuran 350 mm x 150 mm ketebalan ± 12 mm sebanyak 6 buah yang sudah di kampuh *single v* sesuai dengan WPS atau seperti yang dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Material JIS G 4051 Gr. S45C

- b. Gerinda atau alat pemotong seperti pada Gambar 3.3



Gambar 3.3 Gerinda

- f. Oven untuk melakukan proses *post-weld heat treatment* seperti pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Oven

- g. *Heating Torch* untuk proses pemanasan mula seperti pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 *Heating Torch*

h. Spidol Marker seperti pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9 Spidol Marker

3. Proses *Preheating*

Proses *preheating* dilakukan untuk mengurangi perbedaan suhu antara daerah pengelasan dan daerah kerja lain. Selain itu, proses ini mampu membantu hidrogen terdifusi keluar dan mengurangi tegangan sisa pada material. Pada akhirnya, proses ini bertujuan untuk mengurangi risiko terjadinya patah getas. Untuk mengetahui bahwa material memerlukan proses *preheating*, dilakukan perhitungan nilai karbon ekuivalen dengan rumus sebagai berikut:

$$C_{eq} = C + \frac{M_n}{6} + \frac{(C_r + M_o + V)}{5} + \frac{(N_i + C_u)}{15} (%) \quad (3.1)$$

$$C_{eq} = 0,42 + \frac{0,6}{6} + \frac{(0,2)}{5} + \frac{(0,2 + 0,3)}{15} (%) \quad (3.2)$$

$$C_{eq} = 0,42 + 0,1 + 0,04 + 0,03 (%) \quad (3.3)$$

$$C_{eq} = 0,59 (%) \quad (3.4)$$

Setelah dilakukan perhitungan menggunakan Persamaan 3.1 dengan nilai kandungan pada baja karbon JIS G 4051 Gr. S45C seperti yang tercantum pada Tabel 2.1, maka didapatkan nilai karbon ekuivalen material baja karbon medium JIS G 4051 Gr. S45C sebesar 0,59.

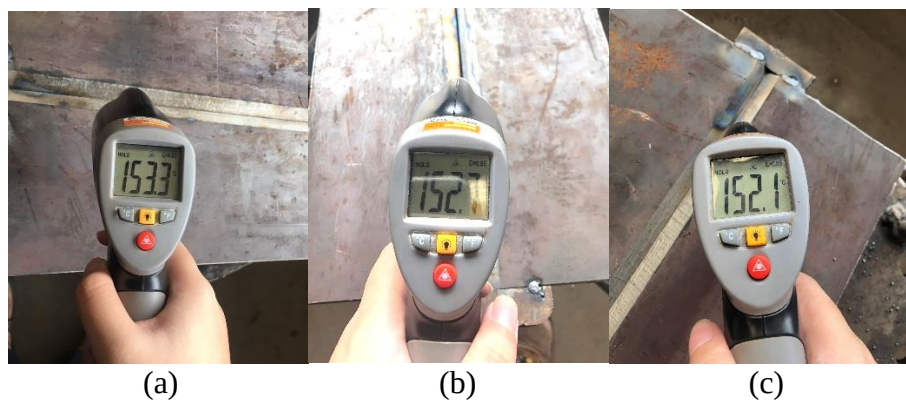
Material yang dikategorikan membutuhkan proses *heat treatment* adalah material dengan nilai karbon ekuivalen di antara 0,4 – 0,6. Maka dari itu, dapat disimpulkan bahwa material baja karbon JIS G 4025 Gr. S45C memerlukan adanya proses *heat treatment*. Lebih spesifik, material yang memiliki nilai karbon ekuivalen di antara 0,50 – 0,59 membutuhkan proses *preheating* dengan suhu 150°C. Berikut merupakan tahapan yang terjadi pada proses *preheating*:

1. Letakkan material yang akan di *preheating* pada posisi yang stabil dan tidak bergoyang.
2. Menggunakan *heating torch* arahkan api pada material yang akan di las, hal ini ditunjukkan pada Gambar 3.10. Proses pemanasan dilakukan secara merata pada seluruh bagian material sampai temperatur material relatif sama. Untuk mengetahui dan mengontrol temperatur *preheating* digunakan *thermogun* sampai temperatur mencapai yang diinginkan.



Gambar 3.10 Proses *Preheating*

3. Seperti yang sudah disampaikan, temperatur pemanasan mula yang digunakan pada penelitian ini adalah 150°C . Pastikan temperatur pemanasan mula sedikit lebih tinggi dari yang ditentukan karena diasumsikan akan terjadi sedikit penurunan temperatur ketika material akan di las. Saat temperatur di *thermogun* sudah menampilkan temperatur yang ditentukan, maka proses pemanasan mula dapat dicukupkan. Untuk pengukuran suhu menggunakan *thermogun* dapat dilihat pada Gambar 3.11.



Gambar 3.11 (a) Suhu A1 (b) Suhu A2 (c) Suhu A3

4. Proses Pengelasan

Proses pengelasan yang dilakukan adalah pengelasan dengan metode SMAW dan dikerjakan sesuai dengan WPS. Pengelasan SMAW ini dilakukan untuk menyambungkan dua material JIS G 4051 Gr. S45C dengan variasi temperatur *heat treatment*. Masing-masing spesimen akan diberikan perlakuan panas berupa *preheating* dengan temperatur 150°C . selanjutnya spesimen akan dilas

menggunakan metode pengelasan SMAW, dan diselesaikan dengan proses PWHT menggunakan variasi temperatur 300°C, 400°C, dan tanpa PWHT. Untuk proses pengelasan sendiri dapat dilihat pada Gambar 3.12. Proses pengelasan, material dilas oleh *welder* bersertifikat yang dapat dilihat pada Lampiran 1.

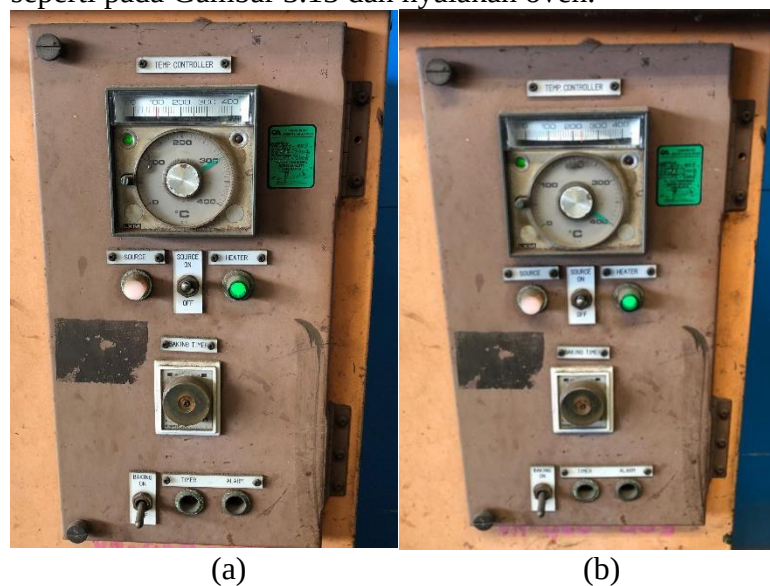


Gambar 3.12 Proses Pengelasan SMAW

5. Proses *Post Weld Heat Treatment*

Proses PWHT dilakukan untuk mengurangi tegangan sisa, memperbaiki sifat mekanik, dan memperbaiki struktur mikro pada daerah yang terpengaruh oleh panas akibat pengelasan (HAZ) dan juga logam las (*Weld Metal*). Proses PWHT yang diaplikasikan pada penelitian kali ini dilakukan menggunakan oven. Suhu PWHT yang digunakan adalah 300°C dan 400°C dengan *holding time* selama 45 menit. Berikut merupakan tahapan pada proses PWHT:

1. Masukkan material kedalam oven lalu atur oven sampai suhu yang diinginkan seperti pada Gambar 3.13 dan nyalakan oven.



Gambar 3.13 (a) Suhu PWHT 300°C (b) Suhu PWHT 400°C

2. Tunggu sampai material yang dipanaskan mencapai suhu yang diinginkan, pada penelitian ini adalah 300°C dan 400°C.
3. Setelah material mencapai suhu yang ditentukan, nyalakan *timer* atau *stopwatch* dan tunggu selama 45 menit.
4. Setelah selesai, keluarkan material dan letakkan di daerah yang tidak mudah dijangkau oleh orang, dan diamkan sampai material mencapai suhu ruangan.

6. Pengujian NDT (*Non-Destructive Test*)

Setelah proses pengelasan selesai, perlu diadakan pengujian terhadap kualitas hasil las tersebut untuk mengetahui apakah kualitas hasil pengelasan sudah sesuai dengan standar. Untuk mengetahui hal tersebut maka dilakukan pengujian NDT berupa inspeksi visual dan uji radiografi.

Pada pengujian NDT berupa inspeksi visual, dilakukan pemantauan visual pada material yang sudah selesai dilas untuk dilihat apakah proses pengelasan dapat diterima. Material yang dianggap lulus inspeksi visual adalah material yang memiliki hasil pengelasan tanpa cacat las yang dapat disadari oleh mata manusia.

Setelah material dinyatakan lolos inspeksi visual, maka proses NDT akan dilanjutkan menggunakan Uji Radiografi yang pada penelitian ini akan dilaksanakan di PT. Robutech, Surabaya. Sama halnya dengan inspeksi visual, uji radiografi juga dilakukan untuk mengetahui kualitas sambungan las. Keunggulan yang dimiliki oleh uji radiografi adalah bisa mengetahui cacat sambungan las yang berada di dalam sambungan tidak hanya yang berada di permukaan.

7. Persiapan Spesimen Uji

Setelah dilakukan uji NDT selesai dilakukan dan dinyatakan aman, maka proses berikutnya adalah pembuatan spesimen uji. Pada pembuatan spesimen uji, *test piece* dipotong menggunakan gergaji hidrolik yang dapat dilihat pada Gambar 3.14 dan Gambar 3.15. Masing-masing *test piece* akan dipotong dan dibentuk menjadi spesimen uji sesuai dengan standar ASME *section IX*. Spesimen ini kemudian akan dilakukan pengujian tarik, tekuk, kekerasan, dan metalografi. Spesimen uji yang sudah selesai dibentuk dan dipotong dapat dilihat pada Gambar 3.16, Gambar 3.17, dan Gambar 3.18.



Gambar 3.14 Gergaji Hidrolik



Gambar 3.15 Proses Pemotongan *Test piece*



Gambar 3.16 Spesimen Uji *Test Piece A1*



Gambar 3.17 Spesimen Uji *Test Piece A2*



Gambar 3.18 Spesimen Uji Test Piece A3

8. Uji Kekerasan

Uji kekerasan menggunakan metode *Vickers* dilakukan untuk mengetahui kekuatan atau kekerasan pada *base metal*, *weld metal*, dan HAZ. Pengujian kekerasan *Vickers* dilakukan mengacu pada standar ASTM E 92-17 “*Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials*”.

9. Uji Tarik

Uji tarik dilakukan untuk mengetahui kekuatan tarik maksimal (*ultimate tensile strength*) dan nilai kekuatan luluh (*yield strength*) dari material yang telah disambung menggunakan pengelasan SMAW. Pengujian tarik yang dilakukan mengacu pada standar ASME section IX. Untuk proses pengujian tarik dapat dilihat pada Gambar 3.19.



Gambar 3.19 Proses Pengujian Tarik

10. Uji Tekuk

Uji tekuk dilakukan untuk mengetahui kekuatan lengkung dari material yang telah disambung menggunakan pengelasan SMAW saat diberikan tekanan. Pengujian tekuk yang dilakukan mengacu pada standar ASME section IX. Untuk proses pengujian tarik dapat dilihat pada Gambar 3.20.



Gambar 3.20 Proses Pengujian Tekuk

11. Uji Metalografi

Uji metalografi dilakukan untuk mengetahui kondisi struktur permukaan hasil pengelasan secara makro dan mikro. Pada pengujian ini dilakukan pengambilan foto struktur mikro pada daerah logam hasil pengelasan, HAZ, dan logam induk. Ukuran makro struktur dilakukan dengan menggunakan pembesaran hingga 7x, sedangkan foto mikro dilakukan dengan pembesaran 100x dan 500x.

12. Analisa dan Pembahasan

Setelah dilakukan pengujian-pengujian tersebut, penulis akan melakukan analisis dan pembahasan guna menjawab permasalahan yang telah dirumuskan.

13. Kesimpulan dan Saran

Berdasarkan hasil Analisa dan pembahasan, dapat ditarik kesimpulan yang sesuai dengan perumusan masalah dalam penelitian ini. Setelah menjabarkan kesimpulan, penulis dapat menuliskan saran kepada pembaca untuk memberikan perbaikan dan penyempurnaan dalam melakukan penelitian berikutnya.

14. Rancangan Penelitian

Berdasarkan diagram alir, maka dapat dibuat sebuah rancangan penelitian seperti yang ditampilkan pada Tabel 3.1 dan Tabel 3.2 berikut guna mempermudah seluruh proses penelitian:

Tabel 3.1 Rancangan Penelitian (*Test Piece*)

Temperatur Preheating	Temperatur PWHT	Test Piece
150°C	Tanpa PWHT	A1
	300°C	A2
	400°C	A3

Tabel 3.2 Rancangan Penelitian (Spesimen Uji)

Temperatur Preheating	Temperatur PWHT	Nama Spesimen	Uji Kekerasan	Uji Tarik	Uji Tekuk	Uji Metalografi
150°C	Tanpa PWHT	MEA1	√			√
		TSA1.1		√		
		TSA1.2		√		
		FBA1.1			√	
		FBA1.2			√	
		RBA1.1			√	
		RBA1.2			√	
	300°C	MEA2	√			√
		TSA2.1		√		
		TSA2.2		√		
		FBA2.1			√	
		FBA2.2			√	
		RBA2.1			√	
		RBA2.2			√	
	400°C	MEA3	√			√
		TSA3.1		√		
		TSA3.2		√		

Tabel 3.2 Rancangan Penelitian (Spesimen Uji) (Lanjutan)

Temperatur Preheating	Temperatur PWHT	Nama Spesimen	Uji Kekerasan	Uji Tarik	Uji Tekuk	Uji Metalografi
150°C	400°C	FBA3.1			√	
		FBA3.2			√	
		RBA3.1			√	
		RBA3.2			√	

Cara membaca nama spesimen:

b. MEA1

- A1 = Spesimen tanpa proses PWHT
 - Variasi lain adalah → A2 = Temperatur PWHT 300°C
A3 = Temperatur PWHT 400°C
- ME = Spesimen untuk uji kekerasan atau *hardness test* dan uji metalografi

c. TSA1.1

- A1 = Spesimen tanpa proses PWHT
 - Variasi lain adalah → A2 = Temperatur PWHT 300°C
A3 = Temperatur PWHT 400°C
- TS = Spesimen untuk uji tarik atau *tensile test*
- 1 = Spesimen ke-1 untuk pengujian tarik
 - Variasi lain adalah → 2 = Spesimen ke-2 untuk pengujian tarik

d. FBA1.1

- A1 = Spesimen tanpa proses PWHT
 - Variasi lain adalah → A2 = Temperatur PWHT 300°C
A3 = Temperatur PWHT 400°C
- FB = Spesimen untuk uji tekuk atau *bending test* metode *face bend*
- 1 = Spesimen ke-1 untuk pengujian tekuk
 - Variasi lain adalah → 2 = Spesimen ke-2 untuk pengujian tekuk

e. RBA1.1

- A1 = Spesimen tanpa proses PWHT
 - Variasi lain adalah → A2 = Temperatur PWHT 300°C
A3 = Temperatur PWHT 400°C
- RB = Spesimen untuk uji tekuk atau *bending test* metode *root bend*
- 1 = Spesimen ke-1 untuk pengujian tekuk
 - Variasi lain adalah → 2 = Spesimen ke-2 untuk pengujian tekuk

BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1 Welding Procedure Specification (WPS)

Welding Procedure Specification, selanjutnya disebut WPS merupakan sebuah dokumen yang dijadikan acuan oleh *welder* atau operator pengelasan dalam mengerjakan suatu pengelasan. WPS yang digunakan dalam pengelasan haruslah WPS yang sudah ter verifikasi atau sudah terbukti valid oleh verifikatur. Pada penelitian Tugas Akhir kali ini, penulis menggunakan WPS yang dimiliki oleh PT. PAL Indonesia (Persero). Proses pengelasan pada penelitian Tugas Akhir ini dilaksanakan di Bengkel Fabrikasi Pipa PT. PAL Indonesia (Persero), Surabaya. WPS yang digunakan pada penelitian Tugas Akhir ini adalah seperti yang ditampilkan pada Gambar 4.1 sebagai berikut.

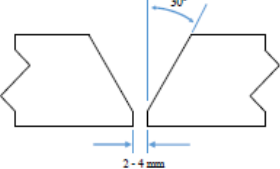


DEPARTEMEN ENERGI DAN SUMBER DAYA MINERAL REPUBLIK INDONESIA
DIREKTORAT JENDRAL MINYAK DAN GAS BUMI

LAPORAN PENGUJIAN KUALIFIKASI PROSEDUR URU LAS OPERATOR LAS

Nama Juru Las Welder Name	: FAKHRUDIN	No. Ujian Test Number	: 02
Kontraktor Contractor	: PT MOELADI	Konsultan Pengelasan Welding Consultant	: PT ALLPRO MIRAI INDONESIA
Tempat Pengujian Place of Testing	: Workshop PT ALLPRO MIRAI INDONESIA	Tanggal Pengujian Testing Date	: January 14, 2022
Standar yang dipakai standard & Code	: AWS D1.1 2020	No. WPS WPS No.	: 002/WPS/AWS/MLD/2022
Jenis Mesin Las Welding Machine Type	: MULTIPRO ADC 315	No. PQR PQR No.	: 002/PQR/AWS/MLD/2022
Proses Pengelasan Welding Process	: SMAW	Amper Ampere	: See weld parameters
Jenis Arus Listrik Polarity	: DCEN & DCEP	Voltase Voltage	: See weld parameters
Gas Pelindung Shielding Gas	: N/A	Batas Aliran Flow Rate	: N/A
Serbuk Las Pelindung Flux Type	: N/A	Pabrik Manufacture of Flux	: N/A
Posisi Pengelasan Welding Position	: 2G	Arah Pengelasan Weld Progression	: NA
Spesifikasi Jenis Bahan Base Metal Specification	: SS400 to SS400	Pabrik Manufacture of Base Metal	: -
(pipa / pelat) (pipe / plate)	: Plate		
Diameter Nominal Nominal Diameter	: -	Tebal Dinding Thickness	: 10 mm
Jenis Bahan Pengisi Filler Metal Type	: E7016 & E7018	Pabrik Manufacture of Filler Metal	: KOBE
Panjang Pengelasan Length of Joint	: 300 mm	Pembersihan Cleaning Methode	: Grinding and Brush
Jenis Klem Clamp Type	: Tack Weld	Melepaskan Klem Clamp Released Method	: Grinding
Tipe Kampuh Bevel Type	: Single V Groove	Sudut Kampuh Groove Angle	: ± 60°
Bukaan Akar Root Opening / Gab	: 2 - 4 mm	Tinggi Las Akar Root Reinforcement	: 2 mm max.
Tinggi Muka Akar Root Face	: 1 - 2 mm	Tinggi Las Muka Face Reinforcement	: 3 mm max.
Pemanasan Mula Preheating Temperature	: N/A	Pemanasan Akhir PWHT	: N/A
Jarak suhu antar lapisan Interpass Temp Range	: See Weld Parameters	Las Belakang Back Welding	: N/A

SKETCH



SEQUENCE



Run Sheet Lembar 1 dari 3

Gambar 4.1 Welding Procedure Specification (WPS) (PT. PAL Indonesia (Persero))

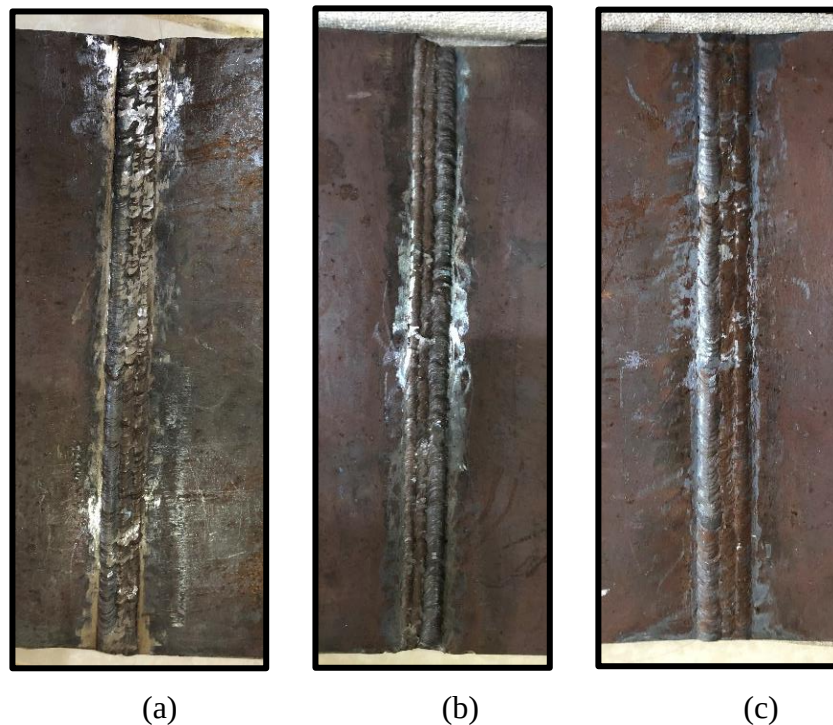
4.2 Non-Destructive Test (NDT)

Non-Destructive Test (NDT) atau pengujian tidak merusak merupakan pengujian yang dilakukan untuk mengetahui apakah hasil sambungan las memenuhi syarat *codes* untuk dilanjutkan ke pengujian selanjutnya yaitu pengujian merusak atau *destructive test* atau memiliki cacat las yang menyebabkan sambungan las tidak bisa di uji lebih lanjut. NDT terdiri

dari berbagai macam jenis pengujian, pada penelitian kali ini digunakan 2 metode untuk menentukan kualitas hasil pengelasan, yaitu inspeksi visual dan uji radiografi.

4.2.1 Inspeksi Visual

Pada pengujian NDT berupa inspeksi visual, dilakukan pemantauan visual menggunakan mata manusia pada material yang sudah selesai dilas untuk dilihat apakah proses pengelasan dapat diterima. Material akan dianggap lulus inspeksi visual apabila material memiliki hasil sambungan las tanpa cacat seperti laminasi, *spalling*, atau *crack* yang dapat disadari oleh mata manusia atau memiliki cacat yang masih memenuhi standar *codes*. Pada Gambar 4.2 berikut ditampilkan hasil inspeksi visual dari sambungan las:



Gambar 4.2 (a) Hasil Pengelasan A1 (b) Hasil Pengelasan A2
(c) Hasil Pengelasan A3

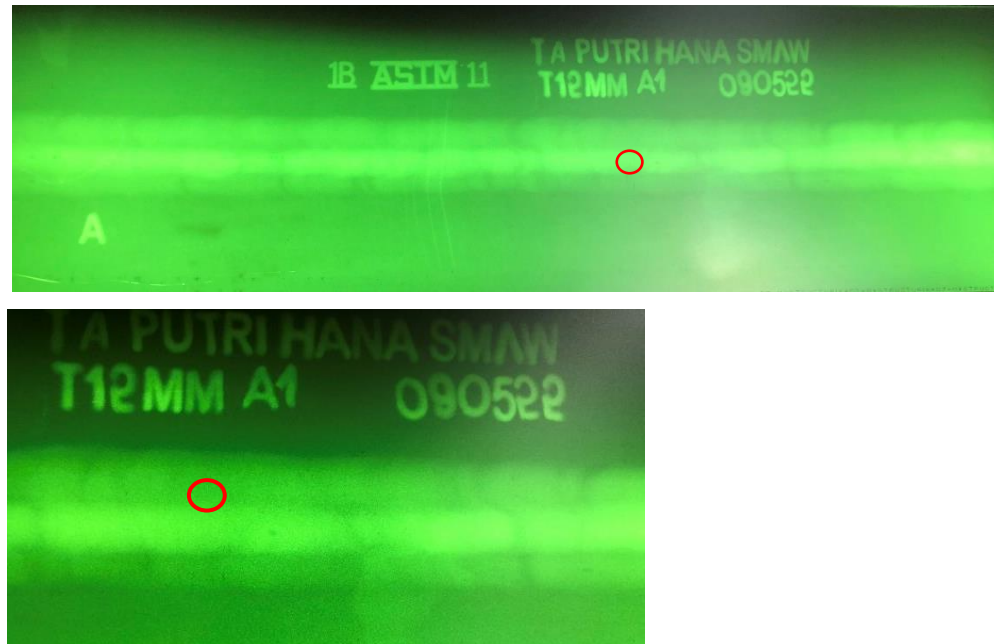
Berdasarkan hasil inspeksi visual, atau seperti yang terlihat di Gambar 4.2 tidak ditemukan adanya cacat pada permukaan sambungan las, baik pada *test piece* A1, A2, maupun A3. Maka dari itu, dapat disimpulkan bahwa sambungan las yang digunakan pada penelitian ini telah lolos uji NDT inspeksi visual.

4.2.2 Radiography Test

Pengujian *non-destructive test* yang selanjutnya adalah uji radiografi. Pada pengujian ini, hasil sambungan las akan dibaca menggunakan alat radiografi dengan memanfaatkan sinar x yang mampu menembus logam. Intensitas dari sinar tersebut akan berkurang seiring dengan jumlah sinar yang diserap oleh material dan intensitas akhir dari sinar tersebut akan direkam pada film sensitif. Apabila terdapat cacat atau diskontinuitas pada sambungan las, hal itu akan terlihat pada film sensitif. Selain film sensitif, hasil akhir dari uji radiografi juga berbentuk laporan hasil pengujian. Laporan hasil pengujian pada uji radiografi dapat dilihat pada Lampiran 2. Sedangkan untuk foto film sensitif pada pengujian ini dapat dilihat di bawah.

a. Hasil Uji Radiografi pada *Test Piece* A1

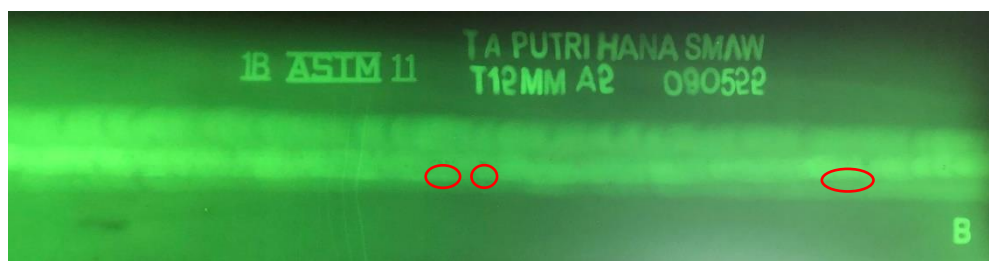
Pengujian radiografi dilakukan menggunakan *rules* dari ASME Section IX. Hasil pengujian pada *test piece* A1 ditunjukkan pada Gambar 4.3. *Test piece* ini merupakan spesimen pengelasan dengan perlakuan *preheat* sebesar 150°C dan tanpa perlakuan *post-weld heat treatment* ditemukan adanya cacat pada sambungan las berupa porositas sebesar 1,0 mm. Berdasarkan laporan hasil pengujian, disimpulkan bahwa *test piece* A1 dapat diterima dan dilanjutkan ke pengujian selanjutnya.



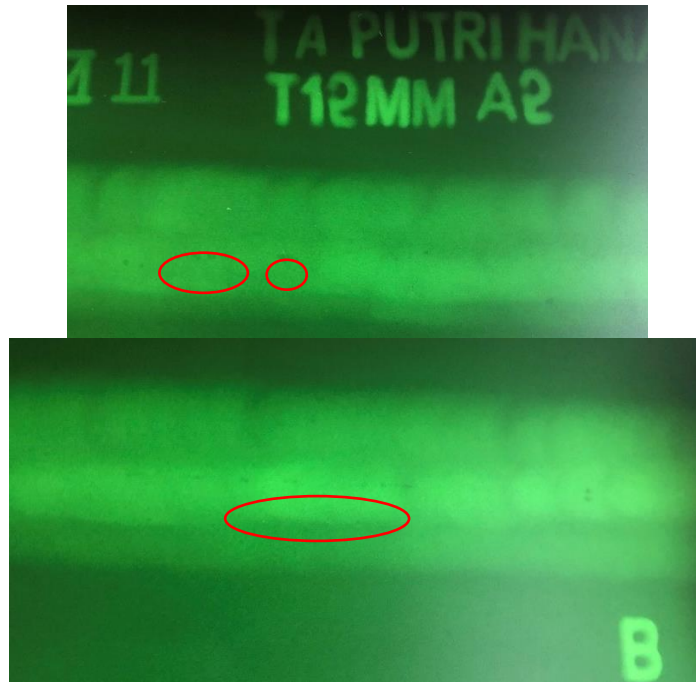
Gambar 4.3 Hasil Uji Radiografi *Test Piece* A1

b. Hasil Uji Radiografi pada *Test Piece* A2

Pengujian radiografi dilakukan menggunakan *rules* dari ASME Section IX. Hasil pengujian pada *test piece* A2 ditunjukkan pada Gambar 4.4. *Test piece* ini merupakan spesimen pengelasan dengan perlakuan *preheat* sebesar 150°C dan perlakuan *post-weld heat treatment* sebesar 300°C ditemukan adanya cacat pada sambungan las berupa porositas sebesar 1,0 mm dan *wormhole* (WH) sebesar 3,0 mm. Berdasarkan laporan hasil pengujian, disimpulkan bahwa *test piece* A2 dapat diterima dan dilanjutkan ke pengujian selanjutnya.



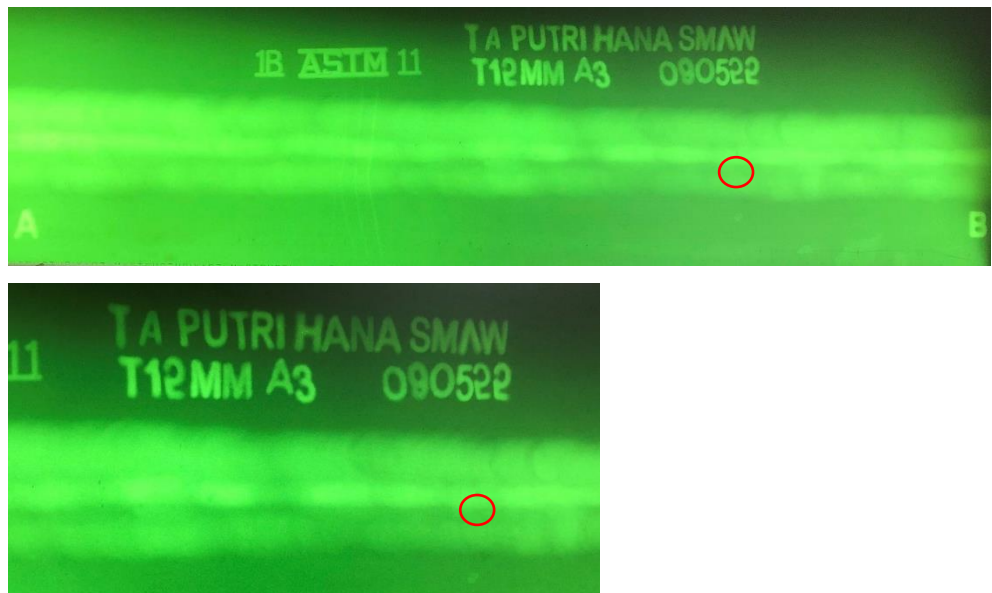
Gambar 4.4 Hasil Uji Radiografi *Test Piece* A2



Gambar 4.4 Hasil Uji Radiografi *Test Piece A2* (Lanjutan)

c. Hasil Uji Radiografi pada *Test Piece A3*

Pengujian radiografi dilakukan menggunakan *rules* dari ASME Section IX. Hasil pengujian pada *test piece A3* ditunjukkan pada Gambar 4.5. *Test piece* ini merupakan spesimen pengelasan dengan perlakuan *preheat* sebesar 150°C dan perlakuan *post-weld heat treatment* sebesar 400°C ditemukan adanya cacat pada sambungan las berupa porositas sebesar 1,0 mm. Berdasarkan laporan hasil pengujian, disimpulkan bahwa *test piece A3* dapat diterima dan dilanjutkan ke pengujian selanjutnya.



Gambar 4.5 Hasil Uji Radiografi *Test Piece A3*

4.3 Destructive Test (DT)

Destructive Test (DT) atau pengujian merusak merupakan pengujian yang dilakukan untuk mengetahui sifat mekanik dan juga metalografi dari sambungan las. DT terdiri dari berbagai macam jenis pengujian, pada penelitian kali ini digunakan 4 pengujian untuk menentukan sifat mekanik hasil pengelasan, yaitu uji tarik, uji tekuk, uji kekerasan, dan uji metalografi.

4.3.1 Uji Tarik

Uji tarik merupakan pengujian yang bertujuan untuk mengetahui nilai *yield strength* dan *ultimate strength* dari spesimen uji hasil pengelasan. Pada penelitian ini, uji tarik dilakukan di Laboratorium Konstruksi & Kekuatan Kapal, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Pengujian ini dilakukan menggunakan standar ASME *section IX* dan masing-masing *test piece* memiliki 2 spesimen uji yang akan di tarik. Pada ASME *section IX* disampaikan bahwa pengujian tarik akan dikatakan memenuhi kriteria apabila memiliki *break point* pada daerah *base metal* atau logam induk. Selain itu, apabila *break point* terdapat pada daerah *base metal*, maka kekuatan *ultimate strength* harus lebih besar dari 95% minimum *specified tensile* pada *base metal*. Laporan serta grafik hasil pengujian tarik dapat dilihat pada Lampiran 3 dan Lampiran 4. Sedangkan untuk hasil yang lebih jelas dan ringkas dapat dilihat pada penjelasan di bawah ini.

a. Hasil Uji Tarik pada Test Piece A1

Test Piece A1 merupakan *test piece* yang mendapatkan perlakuan panas berupa *pre-heating* sebesar 150°C dan tanpa *post-weld heat treatment*. Nilai rata-rata *yield force* dan *ultimate force* pada *test piece A1* secara berturut-turut adalah 89,5 kN dan 126 kN. Sedangkan nilai rata-rata *yield strength* dan *ultimate strength* secara berturut-turut adalah 395,48 MPa dan 556,71 MPa. Sedangkan semua spesimen uji memiliki *breaking point* pada *base metal* atau logam induk seperti pada Gambar 4.6. Untuk hasil *elongation* atau keuletan, *test piece A1* memiliki rata-rata nilai *elongation* sebesar 3,85%. Untuk lebih jelasnya hasil pengujian tekuk *test piece A1* ditampilkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Hasil Uji Tarik Test Piece A1

Kode	Spesifikasi Spesimen			Hasil Uji Tarik				Avg Yield (MPa)	Avg Ult (MPa)	ϵ (%)
	Lebar (mm)	Tebal (mm)	Luas (mm ²)	F Yield (kN)	F Ult (kN)	Yield Strength (Mpa)	Ult Strength (MPa)			
TS A1.1	19,13	11,91	227,84	89	127	390,63	557,41	395,48	556,71	4,0
TS A1.2	19,02	11,82	224,82	90	125	400,32	556,00			3,7



Gambar 4.6 Breaking Point Test Piece A1

b. Hasil Uji Tarik pada *Test Piece* A2

Test Piece A2 merupakan *test piece* yang mendapatkan perlakuan panas berupa *pre-heating* sebesar 150°C dan *post-weld heat treatment* sebesar 300°C. Nilai rata-rata *yield force* dan *ultimate force* pada *test piece* A2 secara berturut-turut adalah 81 kN dan 121,5 kN. Sedangkan nilai rata-rata *yield strength* dan *ultimate strength* secara berturut-turut adalah 363,13 MPa dan 543,72 MPa. Sedangkan semua spesimen uji memiliki *breaking point* pada *base metal* atau logam induk seperti yang ditampilkan pada Gambar 4.7. Untuk hasil *elongation* atau keuletan, *test piece* A2 memiliki rata-rata nilai *elongation* sebesar 4,55%. Untuk lebih jelasnya hasil pengujian tekuk *test piece* A1 ditampilkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Hasil Uji Tarik *Test Piece* A2

Kode	Spesifikasi Spesimen			Hasil Uji Tarik				Avg Yield (MPa)	Avg Ult (MPa)	ϵ (%)
	Lebar (mm)	Tebal (mm)	Luas (mm ²)	F Yield (kN)	F Ult (kN)	Yield Strength (Mpa)	Ult Strength (MPa)			
TS A2.1	19,03	11,70	222,65	82	120	368,30	538,96	363,17	544,72	4,3
TS A2.2	19,00	11,76	223,44	80	123	358,04	550,48			4,8



Gambar 4.7 Breaking Point *Test Piece* A2

c. Hasil Uji Tarik pada *Test Piece* A3

Test Piece A3 merupakan *test piece* yang mendapatkan perlakuan panas berupa *pre-heating* sebesar 150°C dan *post-weld heat treatment* sebesar 400°C. Nilai rata-rata *yield force* dan *ultimate force* pada *test piece* A2 secara berturut-turut adalah 89,5 kN dan 121 kN. Sedangkan nilai rata-rata *yield strength* dan *ultimate strength* secara berturut-turut adalah 395,48 MPa dan 543,20 MPa. Sedangkan semua spesimen uji memiliki *breaking point* pada *base metal* atau logam induk dan dapat dilihat pada Gambar 4.8. Untuk hasil *elongation* atau keuletan, *test piece* A3 memiliki rata-rata nilai *elongation* sebesar 5,25%. Untuk lebih jelasnya hasil pengujian tekuk *test piece* A1 ditampilkan pada Tabel 4.3

Tabel 4.3 Hasil Uji Tarik Test Piece A3

Kode	Spesifikasi Spesimen			Hasil Uji Tarik				Avg Yield (MPa)	Avg Ult (MPa)	ϵ (%)
	Lebar (mm)	Tebal (mm)	Luas (mm ²)	F Yield (kN)	F Ult (kN)	Yield Strength (Mpa)	Ult Strength (MPa)			
TS A3.1	19,31	11,65	224,96	90	123	400,07	546,76	395,03	543,20	5,3
TS A3.2	19,01	11,60	220,52	86	119	389,99	539,63			5,2



Gambar 4.8 Breaking Point Test Piece A3

4.3.2 Analisa Hasil Uji Tarik

Salah satu tujuan yang ingin dicapai pada penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh *heat treatment* terhadap sifat mekanik sambungan las. Salah satu faktor yang mempengaruhi sifat mekanik sambungan las adalah kekuatan tarik. Selain untuk mencari nilai kekuatan tarik atau *ultimate tensile strength*, melaksanakan uji tarik juga akan memberikan pemahaman terhadap nilai keuletan atau *ductility* dari sambungan las. Hasil yang didapatkan dari pengujian pada masing-masing spesimen akan ditampilkan pada Tabel 4.4 dan Tabel 4.5 seperti yang tertera di bawah ini:

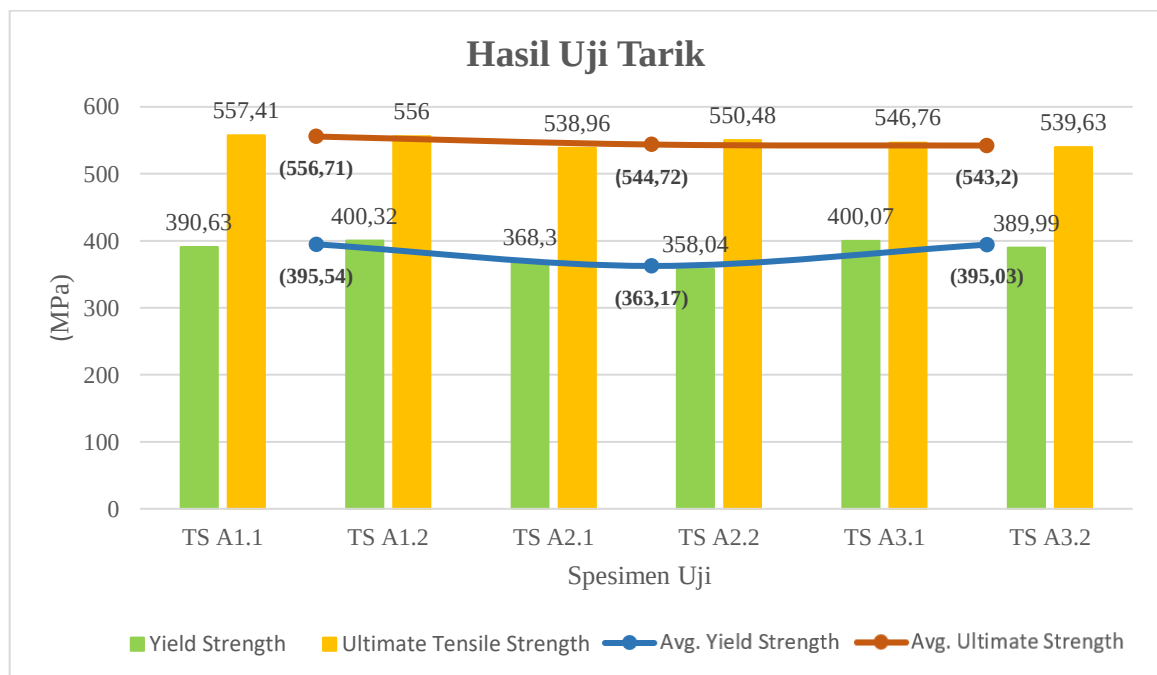
Tabel 4.4 Hasil Pengujian Tarik

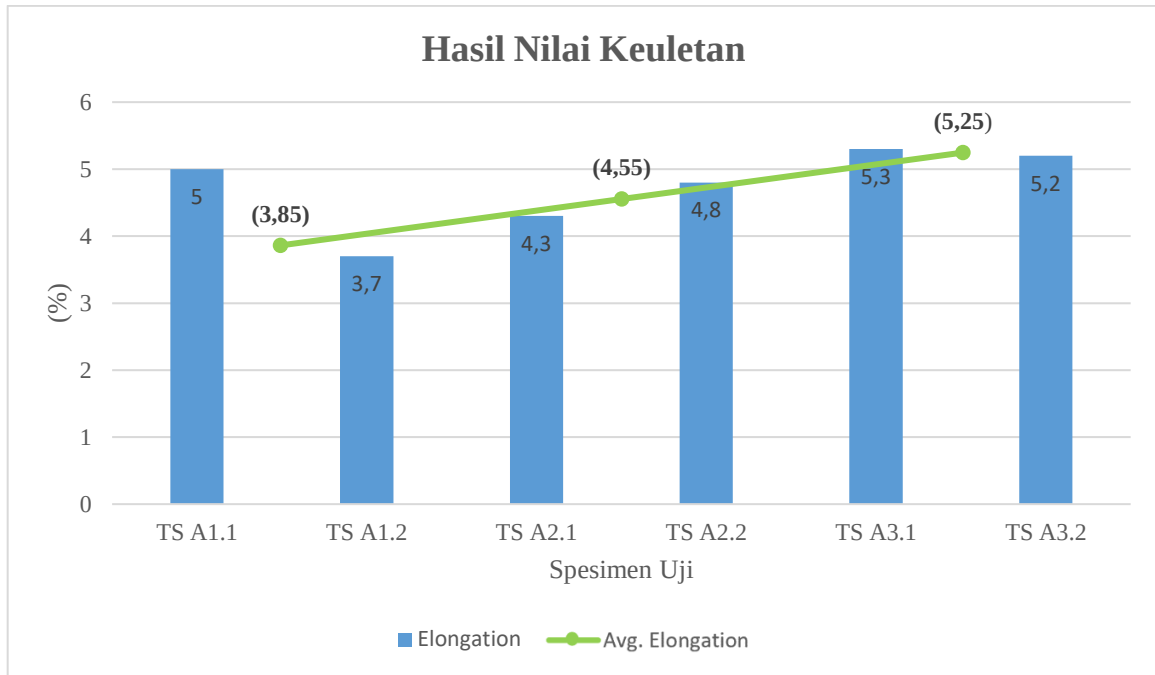
Spesimen	Breaking Point	Yield Strength (MPa)	Ultimate Strength (MPa)	Average Yield Strength (MPa)	Average Ult. Strength (MPa)
TS A1.1	Base Metal	390,63	557,41	395,48	556,71
TS A1.2	Base Metal	400,32	556,00		
TS A2.1	Base Metal	368,30	538,96	363,17	544,72
TS A2.2	Base Metal	358,04	550,48		
TS A3.1	Base Metal	400,07	546,76	395,03	543,20
TS A3.1	Base Metal	389,99	539,63		

Tabel 4.5 Hasil Uji Keuletan

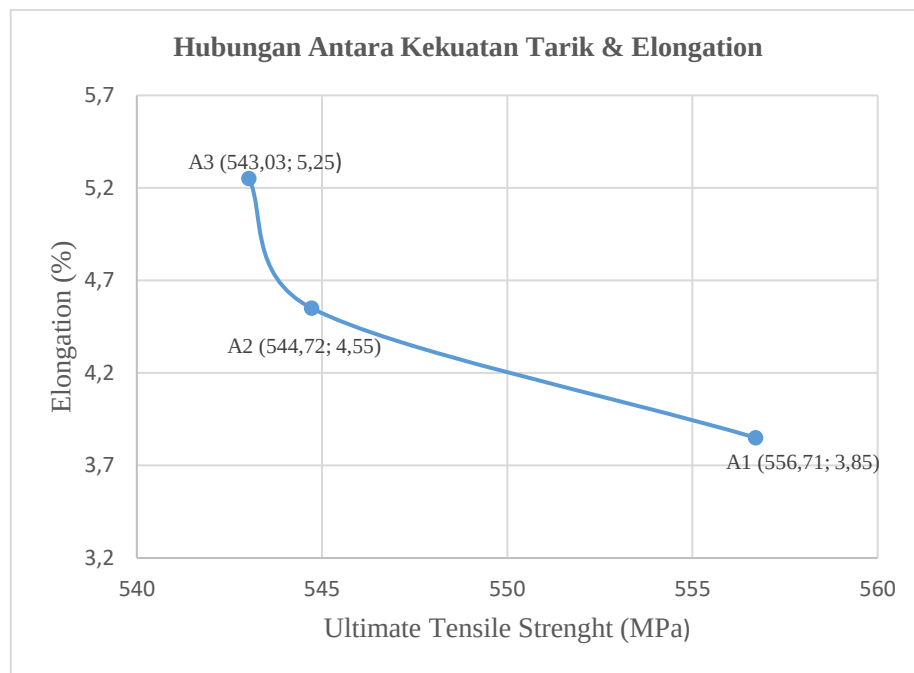
Spesimen	L0 (mm)	ΔL (mm)	ϵ (%)	Average ϵ (%)
TS A1.1	300,51	12,0	5,0	3,85
TS A1.2	300,51	11,0	3,7	
TS A2.1	300,37	13,0	4,3	4,55
TS A2.2	300,37	14,5	4,8	
TS A3.1	300,23	16,0	5,3	5,25
TS A3.2	300,23	15,5	5,2	

Untuk memudahkan, hasil pengujian yang terdapat pada Tabel 4.4 dan Tabel 4.5 akan dikonversikan menjadi grafik yang tercantum pada Gambar 4.9 dan Gambar 4.10 seperti yang tertera di bawah ini.

**Gambar 4.9** Grafik Hasil Uji Tarik



Gambar 4.10 Grafik Hasil Uji Keuletan



Gambar 4.11 Grafik Hubungan Kekuatan Tarik & Elongation

Pengujian tarik memiliki *acceptance criteria* berdasarkan ASME sec. IX berupa *breaking point* pada *base metal* dan memiliki nilai kekuatan tarik atau *ultimate tensile strength* tidak kurang dari 95% *minimum specified tensile* dibandingkan dengan *base metal*. *Base metal* JIS G 4051 Gr. S45C memiliki *minimum specified tensile* sebesar 565 MPa, maka dari itu, spesimen uji akan dikatakan lolos apabila memiliki nilai *ultimate strength* tidak kurang dari 536,75 MPa.

Hasil pengujian tarik yang dilakukan terhadap *test piece* A1 atau material yang diberi perlakuan panas berupa *pre-heating* sebesar 150°C dan tidak diberikan *post-weld heat treatment* mendapatkan hasil rata-rata *ultimate tensile strength* dengan nilai sebesar 556,71 MPa, dengan

kedua spesimen uji memiliki *breaking point* atau titik patah pada bagian *base metal*. Selanjutnya untuk *test piece* A2 atau material yang diberi perlakuan panas berupa *pre-heating* sebesar 150°C dan *post-weld heat treatment* sebesar 300°C mendapatkan hasil rata-rata *ultimate tensile strength* sebesar 544,72 MPa, dengan kedua spesimen uji memiliki *breaking point* pada bagian *base metal*. Sedangkan untuk *test piece* A3 atau material yang diberi perlakuan panas berupa *pre-heating* sebesar 150°C dan *post-weld heat treatment* sebesar 400°C memiliki nilai rata-rata *ultimate tensile strength* sebesar 543,03 MPa, dengan kedua spesimen uji memiliki titik patah pada bagian *base metal*.

Selain untuk mengetahui kekuatan tarik atau *ultimate tensile strength*, pengujian tarik juga akan mengakomodasi data yang dibutuhkan untuk mengetahui nilai keuletan dari masing-masing *test piece*. Nilai keuletan atau *ductility* sendiri dapat diketahui dengan memperhatikan *elongation* atau penambahan panjang dari spesimen uji setelah selesai diuji. Hasil nilai keuletan yang dimiliki oleh *test piece* A1 setelah dilakukan perhitungan adalah sebesar 0,385%. Selanjutnya untuk *test piece* A2 memiliki nilai keuletan sebesar 0,455%, sedangkan *test piece* A3 memiliki nilai keuletan sebesar 0,525%.

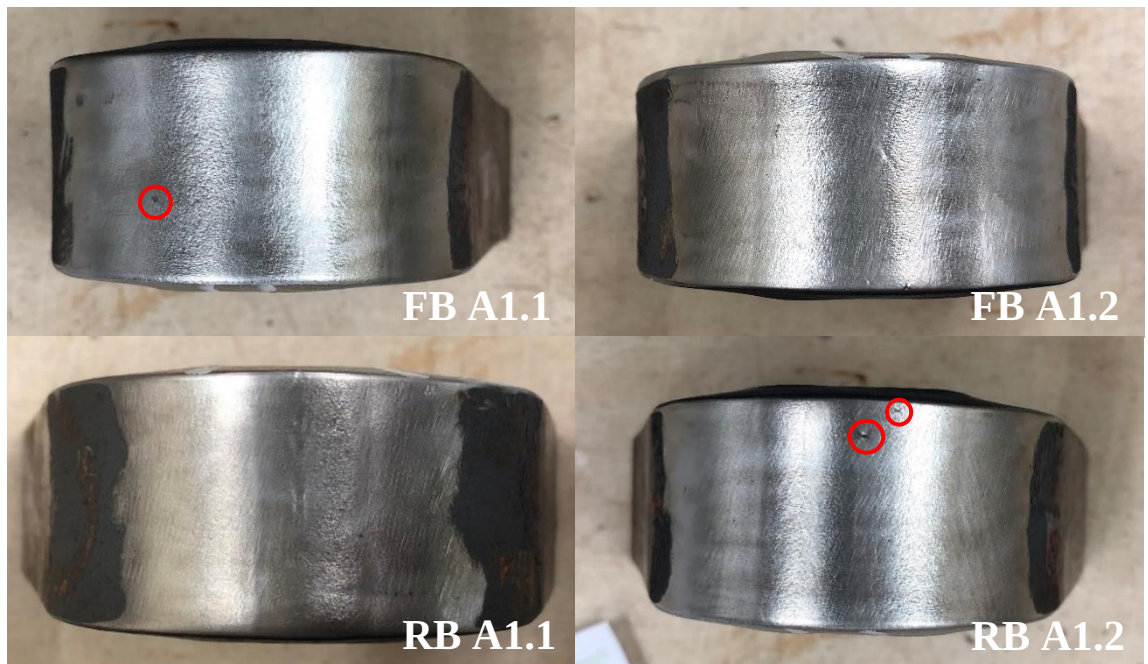
Berdasarkan uraian di atas dan dengan grafik yang tertera pada Gambar 4.9 dan Gambar 4.10, dapat disimpulkan bahwa pada penelitian ini, spesimen tanpa perlakuan panas berupa PWHT memiliki rata-rata nilai kekuatan tarik tertinggi sebesar 556,71 MPa. Sedangkan spesimen dengan perlakuan panas berupa PWHT dengan suhu yang lebih tinggi memiliki rata-rata nilai kekuatan tarik terendah sebesar 543,03 MPa. Namun meskipun terjadi sedikit penurunan nilai pada kekuatan tarik, seluruh spesimen uji tetap dinyatakan lolos pengujian tarik karena memiliki *breaking point* pada *base metal* dan tidak ada nilai kekuatan tarik yang lebih rendah dari 536,75 MPa. Selanjutnya, spesimen dengan perlakuan panas berupa PWHT dengan suhu yang lebih tinggi memiliki nilai keuletan terbesar yaitu sebesar 0,525%, sedangkan spesimen tanpa perlakuan panas berupa PWHT memiliki nilai keuletan terkecil sebesar 0,385%. Hal ini disebabkan oleh semakin bertambahnya suhu PWHT maka semakin berkurang juga nilai kekuatan tarik yang didapatkan, karena semakin tinggi suhu PWHT akan mengakibatkan proses pendinginan yang semakin lambat. Mengikuti sifatnya, maka semakin kecil nilai kekuatan tariknya akan semakin ulet atau semakin besar juga nilai keuletan dari spesimen tersebut.

4.3.3 Hasil Uji Tekuk

Pada penelitian ini, uji tekuk atau *bending test* dilakukan di Laboratorium Konstruksi dan Kekuatan Kapal, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Pengujian ini dilakukan menggunakan standar ASME section IX dan masing-masing *test piece* memiliki 4 spesimen uji dengan rincian 2 spesimen uji di tekuk menggunakan metode *face bend* dengan kode spesimen FB dan 2 spesimen uji menggunakan metode *root bend* dengan kode spesimen RB. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan *former* berdiameter 50 mm dengan *angle of bend* sebesar 180°. Tujuan dari pengujian tekuk adalah untuk memeriksa dan mengetahui kualitas dari sambungan las.

a. Hasil Uji Tekuk *Test Piece* A1

Test Piece A1 merupakan *test piece* yang mendapatkan perlakuan panas berupa *pre-heating* sebesar 150°C dan tanpa *post-weld heat treatment*. Hasil pengujian tekuk pada spesimen FB A1.1 terdapat *open defect* sebesar 1,17 mm. Pada spesimen FB A1.2 dan RB A1.1 tidak ditemukan adanya *open defect* maupun *crack*. Sedangkan pada spesimen RB A1.2 ditemukan adanya 2 *open defect* dengan ukuran sebesar 0,36 mm dan 1,91 mm. Lebih jelas, gambar hasil pengujian dapat dilihat pada Gambar 4.12.



Gambar 4.12 Hasil Pengujian Tekuk *Test Piece A1*

b. Hasil Uji Tekuk *Test Piece A2*

Test Piece A2 merupakan *test piece* yang mendapatkan perlakuan panas berupa *pre-heating* sebesar 150°C dan *PWHT* sebesar 300°C . Hasil pengujian tekuk pada spesimen FB A2.1, FB A2.2 dan RB A2.2 tidak ditemukan adanya *open defect* maupun *crack*. Sedangkan pada spesimen RB A2.1 ditemukan adanya *open defect* dengan ukuran sebesar 1,27 mm. Lebih jelas, gambar hasil pengujian dapat dilihat pada Gambar 4.13.



Gambar 4.13 Hasil Pengujian Tekuk *Test Piece A2*

c. Hasil Uji Tekuk *Test Piece* A3

Test Piece A3 merupakan *test piece* yang mendapatkan perlakuan panas berupa *pre-heating* sebesar 150°C dan *PWHT* sebesar 400°C. Hasil pengujian tekuk pada spesimen FB A3.1, FB A3.2 dan RB A3.1 tidak ditemukan adanya *open defect* maupun *crack*. Sedangkan pada spesimen RB A3.2 ditemukan adanya *open defect* dengan ukuran sebesar 0,84 mm. Lebih jelas, gambar hasil pengujian dapat dilihat pada Gambar 4.14.



Gambar 4.14 Hasil Pengujian Tekuk *Test Piece* A3

4.3.4 Analisa Hasil Uji Tekuk

Pada standar ASME *Section IX* dijelaskan bahwa spesimen uji akan dinyatakan lolos pengujian tekuk apabila pada daerah *weld metal* dan atau HAZ tidak memiliki *crack* ataupun *open defect* dengan ukuran lebih dari 3 mm diukur dari segala arah. Selanjutnya, *crack* atau *open defect* yang terjadi pada bagian sudut permukaan yang telah ditekuk tidak perlu diperhitungkan, kecuali apabila disebabkan oleh *slag inclusion*, *lack of fusion*, dan atau cacat lainnya.

Berdasarkan *acceptance criteria* yang telah ditetapkan dalam ASME *Section IX* dapat disimpulkan bahwa meskipun terdapat beberapa spesimen yang memiliki *open defect*, namun secara keseluruhan hasil pengujian tekuk masih sesuai dengan *acceptance criteria* atau dapat dinyatakan lolos. Lebih mudah, seluruh hasil pengujian tekuk pada penelitian ini akan disampaikan pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Hasil Pengujian Tekuk

Spesimen	Metode	Letak Defect	Open Defect (mm)	Result
FB A1.1	Face Bend	Weld Metal	1,17	Accept
FB A1.2	Face Bend	-	-	Accept
RB A1.1	Root Bend	-	-	Accept
RB A1.2	Root Bend	Weld Metal	0,36 ; 1,91	Accept
FB A2.1	Face Bend	-	-	Accept
FB A2.2	Face Bend	-	-	Accept
RB A2.1	Root Bend	Weld Metal	1,27	Accept
RB A2.2	Root Bend	-	-	Accept
FB A3.1	Face Bend	-	-	Accept
FB A3.2	Face Bend	-	-	Accept
RB A3.1	Root Bend	-	-	Accept
RB A3.2	Root Bend	Weld Metal	0,84	Accept

4.3.5 Hasil Uji Kekerasan

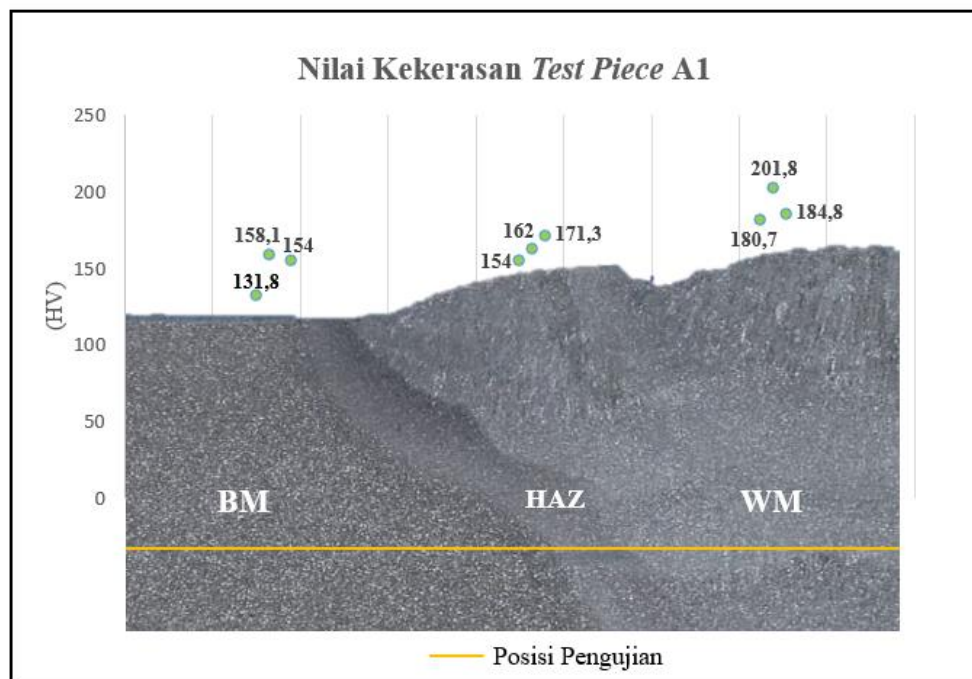
Pada penelitian ini, uji kekerasan atau *hardness test* dilakukan di Laboratorium Konstruksi dan Kekuatan Kapal, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Pengujian ini dilakukan menggunakan standar ASME section IX dan masing-masing *test piece* memiliki 1 spesimen uji dengan masing-masing spesimen akan ditusuk di 3 titik *base metal*, 3 titik HAZ, dan 3 titik *weld metal*. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan metode *vickers*. Tujuan dari pengujian kekerasan adalah untuk mengetahui nilai kekerasan pada spesimen uji.

a. Hasil Uji Kekerasan Test Piece A1

Test Piece A1 merupakan *test piece* yang mendapatkan perlakuan panas berupa *pre-heating* sebesar 150°C dan tanpa *post-weld heat treatment*. Hasil pengujian kekerasan pada *test piece A1* menunjukkan rata-rata nilai kekerasan pada bagian *base metal* sebesar 148,0 HV, rata-rata nilai kekerasan pada bagian HAZ sebesar 162,4 HV, dan nilai rata-rata kekerasan pada bagian *weld metal* sebesar 189,1 HV. Untuk detail hasil pengujian kekerasan *test piece A1* dapat dilihat pada Tabel 4.7 dan Gambar 4.15.

Tabel 4.7 Hasil Uji Kekerasan Test Piece A1

Titik Pengujian	Nilai Kekerasan (HV)	Rata-Rata Kekerasan (HV)
Base Metal 1	131,8	148,0
Base Metal 2	158,1	
Base Metal 3	154,0	
HAZ 1	154,0	162,4
HAZ 2	162,0	
HAZ 3	171,3	
Weld Metal 1	180,7	189,1
Weld Metal 2	201,8	
Weld Metal 3	184,8	



Gambar 4.15 Grafik Nilai Kekerasan Test Piece A1

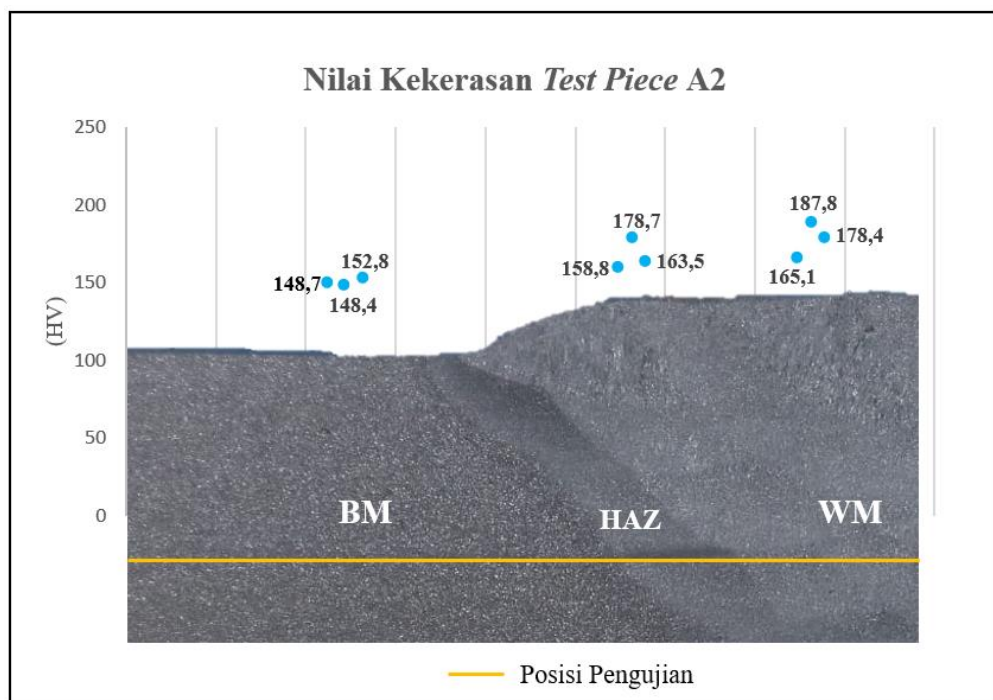
b. Hasil Uji Kekerasan Test Piece A2

Test Piece A2 merupakan *test piece* yang mendapatkan perlakuan panas berupa *pre-heating* sebesar 150°C dan PWHT sebesar 300°C. Hasil pengujian kekerasan pada *test*

piece A2 menunjukkan rata-rata nilai kekerasan pada bagian *base metal* sebesar 150,0 HV, rata-rata nilai kekerasan pada bagian HAZ sebesar 167,4 HV, dan nilai rata-rata kekerasan pada bagian *weld metal* sebesar 177,1 HV. Untuk detail hasil pengujian kekerasan *test piece A2* dapat dilihat pada Tabel 4.8 dan Gambar 4.16.

Tabel 4.8 Hasil Uji Kekerasan Test Piece A2

Titik Pengujian	Nilai Kekerasan (HV)	Rata-Rata Kekerasan (HV)
Base Metal 1	148,7	150,0
Base Metal 2	148,4	
Base Metal 3	152,8	
HAZ 1	158,8	167,0
HAZ 2	178,7	
HAZ 3	163,5	
Weld Metal 1	165,1	177,1
Weld Metal 2	187,8	
Weld Metal 3	178,4	



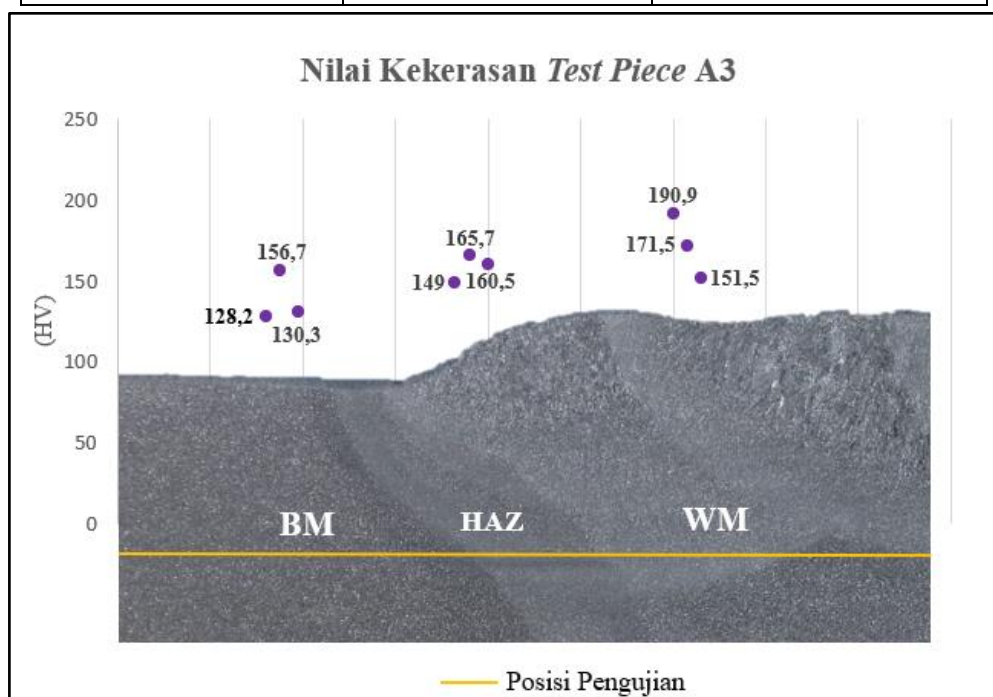
Gambar 4.16 Grafik Nilai Kekerasan Test Piece A2

c. Hasil Uji Kekerasan Test Piece A3

Test Piece A3 merupakan *test piece* yang mendapatkan perlakuan panas berupa *pre-heating* sebesar 150°C dan PWHT sebesar 400°C. Hasil pengujian kekerasan pada *test piece A3* menunjukkan rata-rata nilai kekerasan pada bagian *base metal* sebesar 138,4 HV, rata-rata nilai kekerasan pada bagian HAZ sebesar 158,4 HV, dan nilai rata-rata kekerasan pada bagian *weld metal* sebesar 171,3 HV. Untuk detail hasil pengujian kekerasan *test piece A2* dapat dilihat pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Hasil Uji Kekerasan Test Piece A3

Titik Pengujian	Nilai Kekerasan (HV)	Rata-Rata Kekerasan (HV)
Base Metal 1	128,2	138,4
Base Metal 2	156,7	
Base Metal 3	130,3	
HAZ 1	149,0	158,4
HAZ 2	165,7	
HAZ 3	160,5	
Weld Metal 1	190,9	171,3
Weld Metal 2	171,5	
Weld Metal 3	151,5	



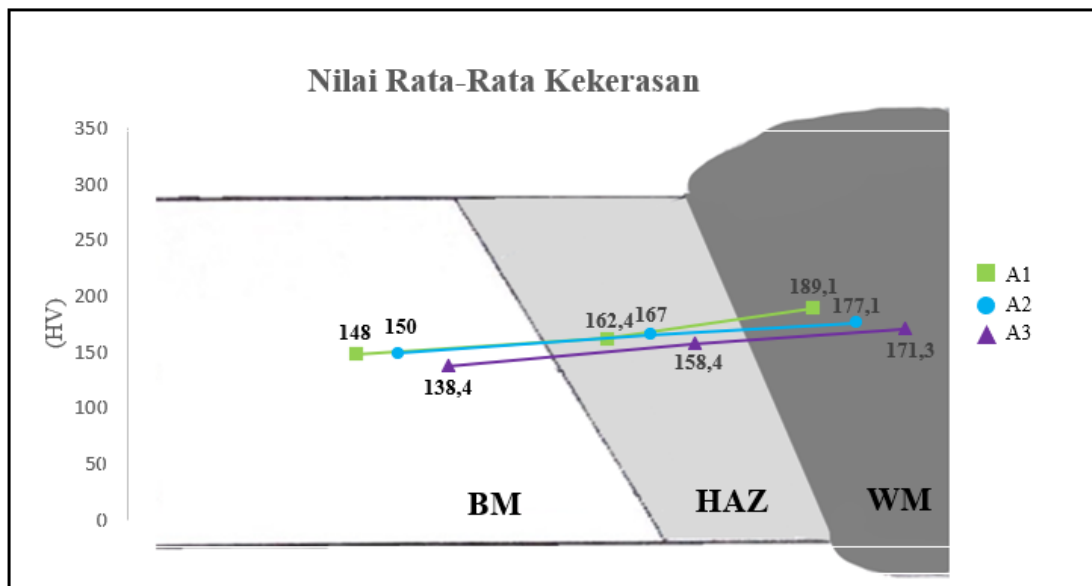
Gambar 4.17 Grafik Nilai Kekerasan Test Piece A3

4.3.6 Analisa Hasil Uji Kekerasan

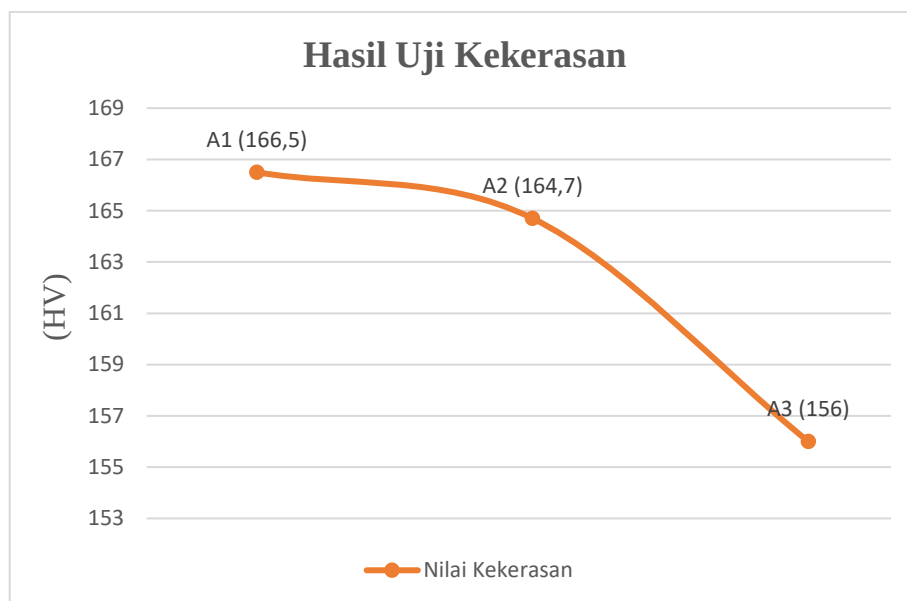
Salah satu tujuan yang ingin dicapai pada penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh *heat treatment* terhadap sifat mekanik sambungan las yang salah satunya adalah nilai kekerasan. Untuk memudahkan pemahaman pembaca, hasil yang didapatkan dari pengujian kekerasan pada masing-masing spesimen akan ditampilkan pada Tabel 4.10, Gambar 4.15 dan Gambar 4.16 seperti di bawah ini:

Tabel 4.10 Hasil Uji Kekerasan

<i>Test Piece</i>	Daerah Pengujian	Nilai Kekerasan (HV)	Rata-Rata Kekerasan (HV)
A1	Base Metal	148,0	166,5
	HAZ	162,4	
	Weld Metal	189,1	
A2	Base Metal	150,0	164,7
	HAZ	167,0	
	Weld Metal	177,1	
A3	Base Metal	138,4	156,0
	HAZ	158,4	
	Weld Metal	171,3	



Gambar 4.18 Grafik Nilai Rata-Rata Kekerasan Tiap Spesimen



Gambar 4.19 Grafik Hasil Uji Kekerasan

Hasil pengujian kekerasan yang dilakukan pada *test piece* A1 atau material yang diberikan perlakuan panas berupa *pre-heating* sebesar 150°C dan tanpa adanya *post-weld heat treatment*, memiliki nilai kekerasan pada daerah *base metal* sebesar 148,0 HV, daerah HAZ sebesar 162,4 HV, dan daerah *weld metal* sebesar 189,1 HV. Selanjutnya, pengujian yang dilakukan pada *test piece* A2 atau material yang diberikan perlakuan panas berupa *pre-heating* sebesar 150°C dan PWHT sebesar 300°C memiliki nilai kekerasan sebesar 150,0 HV pada *base metal*, 167,0 HV pada HAZ, dan 177,1 HV pada *weld metal*. Terakhir, pada *test piece* A3 atau material yang diberi perlakuan panas berupa *pre-heating* sebesar 150°C dan PWHT sebesar 400°C memiliki nilai kekerasan pada daerah *base metal* sebesar 138,4 HV, pada daerah HAZ sebesar 158,4 HV, dan pada *weld metal* sebesar 177,1 HV.

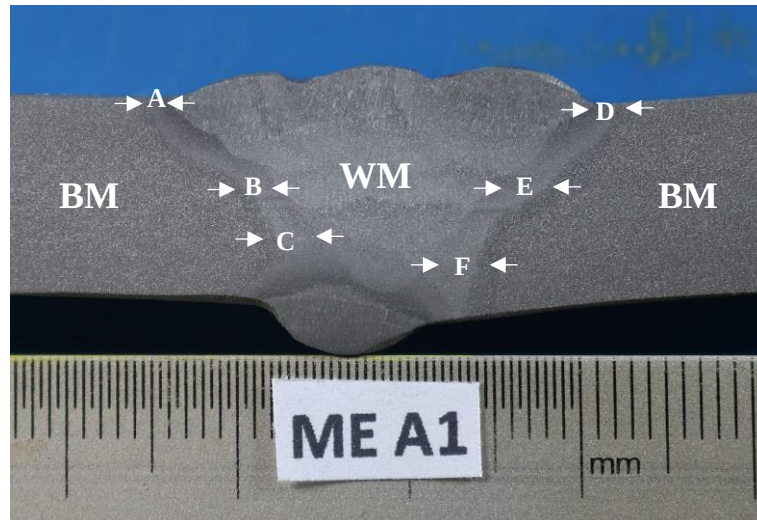
Berdasarkan hasil pengujian kekerasan secara keseluruhan, *test piece* A1 memiliki rata-rata nilai kekerasan terbesar yaitu sebesar 166,5 HV diikuti dengan *test piece* A2 dengan nilai kekerasan sebesar 164,7 HV, dan nilai kekerasan terkecil diperoleh oleh *test piece* A3 dengan nilai kekerasan sebesar 156,0 HV. Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa pemberian perlakuan panas berupa PWHT akan mempengaruhi kekerasan suatu material. Semakin besar suhu PWHT yang digunakan, maka semakin lunak pula material tersebut.

4.3.7 Hasil Uji Metalografi

Pada penelitian ini, uji metalografi berupa uji struktur makro dan mikro dilakukan di Lab Konstruksi dan Kekuatan Kapal, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Pada pengujian ini, dilakukan Analisa struktur makro dan mikro dari tiap-tiap spesimen uji yang nantinya diharapkan bisa mempermudah dan atau mendukung Analisa dari hasil uji yang lain.

a. Hasil Uji Struktur Makro

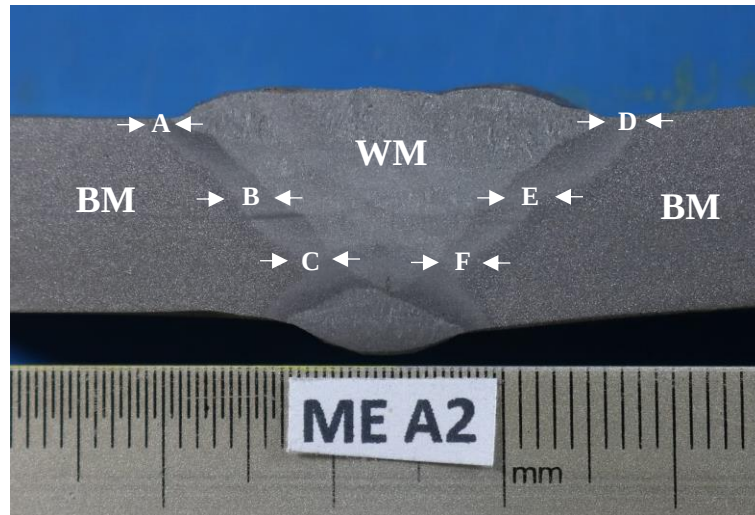
Pengujian struktur makro bertujuan untuk mengetahui di mana saja posisi dan ukuran dari *base metal* (BM), *heat affected zone* (HAZ), dan *weld metal* (WM). Pada pengujian ini, spesimen yang sudah dihaluskan akan difoto menggunakan kamera beresolusi tinggi seperti kamera DSLR. Hasil dari uji struktur makro dan pengukuran lebar HAZ dapat dilihat lebih lanjut pada Gambar 4.20, Gambar 4.21, dan Gambar 4.22 serta Tabel 4.11, Tabel 4.12, dan Tabel 4.13 di bawah ini.



Gambar 4.20 Hasil Uji Makro Spesimen ME.A1

Tabel 4.11 Hasil Pengukuran Lebar HAZ ME.A1

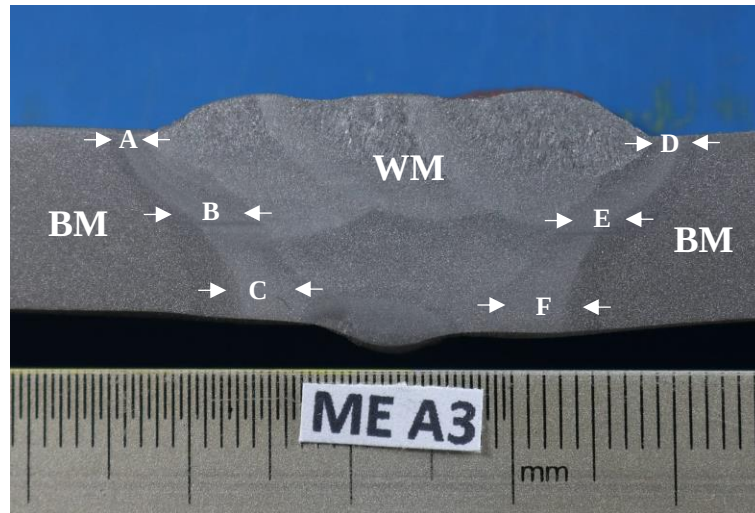
Pengukuran Lebar HAZ Spesimen ME.A1	
Titik Pengukuran	Lebar HAZ (mm)
A	1,5
B	3,0
C	3,45
D	1,5
E	4,0
F	3,5
Rata-Rata Lebar HAZ (mm)	2,83



Gambar 4.21 Hasil Uji Makro Spesimen ME.A2

Tabel 4.12 Hasil Pengukuran Lebar HAZ ME.A2

Pengukuran Lebarh HAZ Spesimen ME.A2	
Titik Pengukuran	Lebar HAZ (mm)
A	1,4
B	4,47
C	4,0
D	2,5
E	4,07
F	4,2
Rata-Rata Lebar HAZ (mm)	3,44



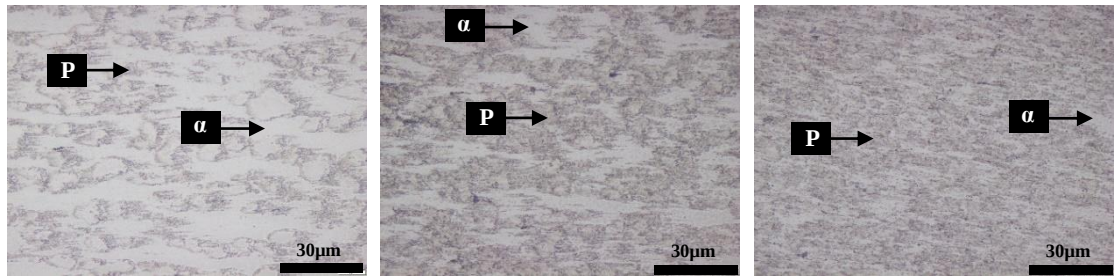
Gambar 4.22 Hasil Uji Makro Spesimen ME.A3

Tabel 4.13 Hasil Pengukuran Lebar HAZ ME.A3

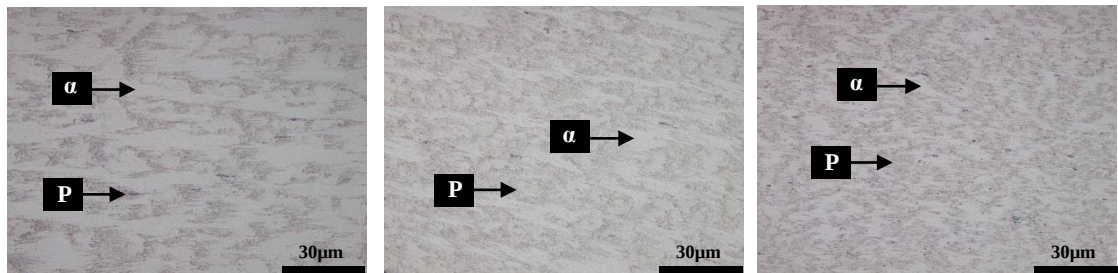
Pengukuran Lebarh HAZ Spesimen ME.A3	
Titik Pengukuran	Lebar HAZ (mm)
A	2,25
B	6,5
C	7,0
D	2,4
E	5,75
F	6,5
Rata-Rata Lebar HAZ (mm)	5,1

b. Hasil Uji Struktur Mikro

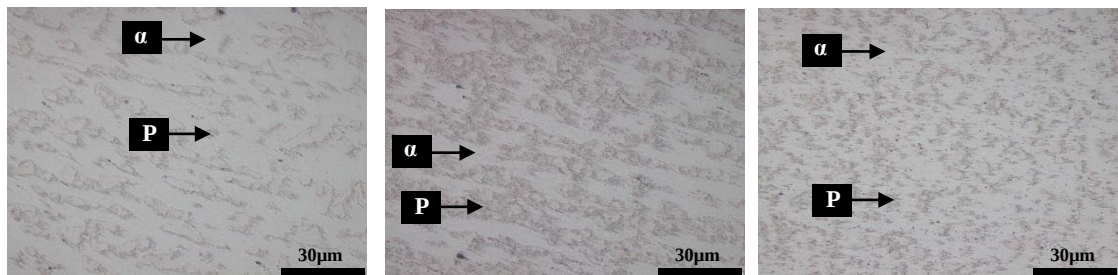
Pengujian struktur mikro bertujuan untuk mengetahui bagaimana bentuk struktur mikro dan juga fasa apa saja yang terdapat pada hasil pengelasan. Pada pengujian ini, spesimen akan dihaluskan dan diberikan cairan etsa. Setelah itu spesimen akan difoto menggunakan mikroskop dengan pembesaran 100x dan 500x. Hasil dari uji struktur mikro dapat dilihat lebih lanjut pada Gambar 4.20, Gambar 4.21, dan Gambar 4.22. Dengan kandungan fasa pada masing-masing bagian dapat dilihat pada Tabel 4.14.



Gambar 4.23 Hasil Struktur Mikro *Test Piece* A1 (*Base Metal*, HAZ, dan *Weld Metal*)



Gambar 4.24 Hasil Struktur Mikro *Test Piece* A2 (*Base Metal*, HAZ, dan *Weld Metal*)



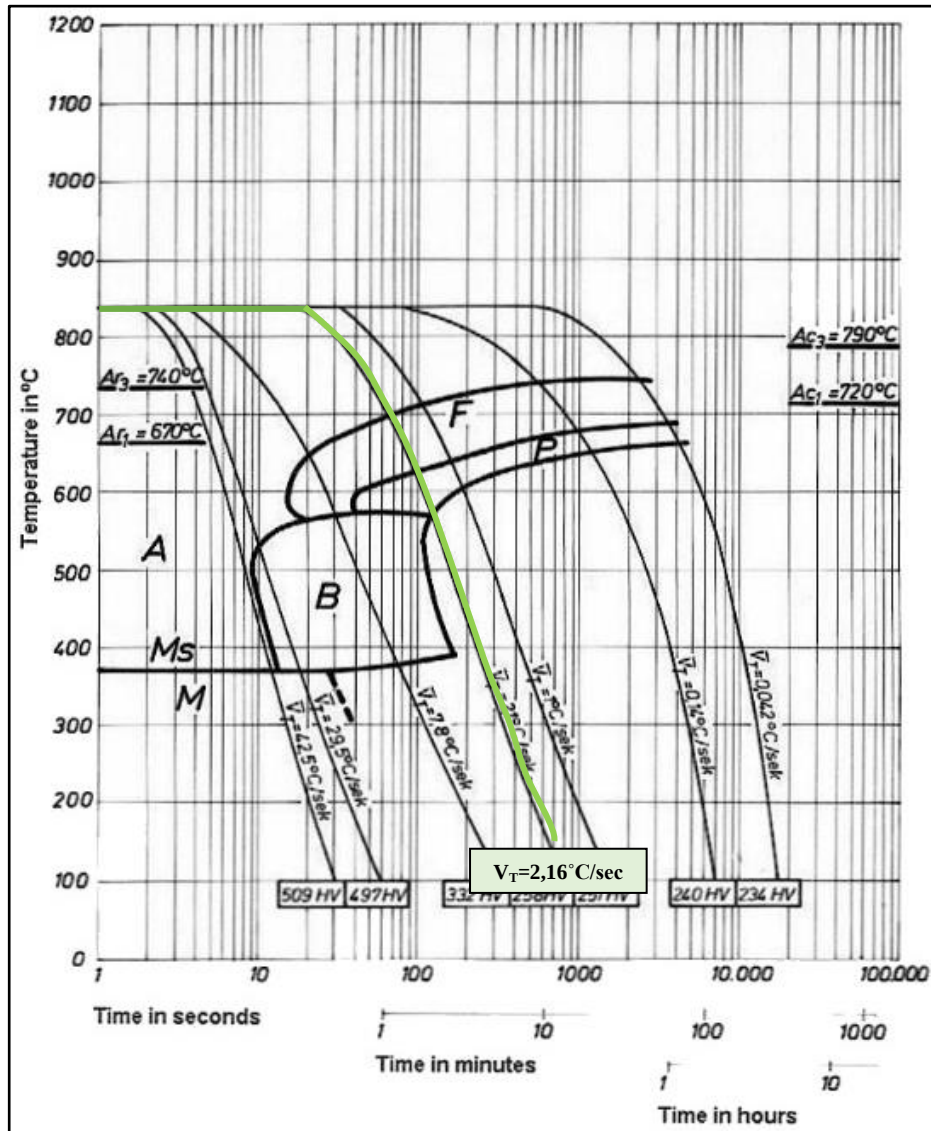
Gambar 4.25 Hasil Struktur Mikro *Test Piece* A3 (*Base Metal*, HAZ, dan *Weld Metal*)

Tabel 4.14 Persentase Kandungan Struktur Pada Setiap Bagian Spesimen Uji

Spesimen	Persentase Kandungan Struktur (%)					
	Base Metal		Heat Affected Zone		Weld Metal	
	Pearlite	Ferrite	Pearlite	Ferrite	Pearlite	Ferrite
ME.A1	20	80	65	35	69	31
ME.A2	23	77	70	30	56	44
ME.A3	16	84	57	43	45	55

Setelah diketahui persentasi kandungan struktur pada masing-masing bagian spesimen uji, dilakukan pengecekan menggunakan diagram CCT yang terdapat pada Gambar 2.2 untuk melihat kecocokan hasil foto struktur mikro dengan dasar teori. Pada bagian ini, Gambar 2.2 akan diberikan informasi tambahan berupa *cooling rate* yang akan disajikan pada Gambar 4.26. Untuk proses pendinginan setelah pengelasan dilaksanakan menggunakan proses *normalising* dengan *cooling time* selama 5 menit dengan

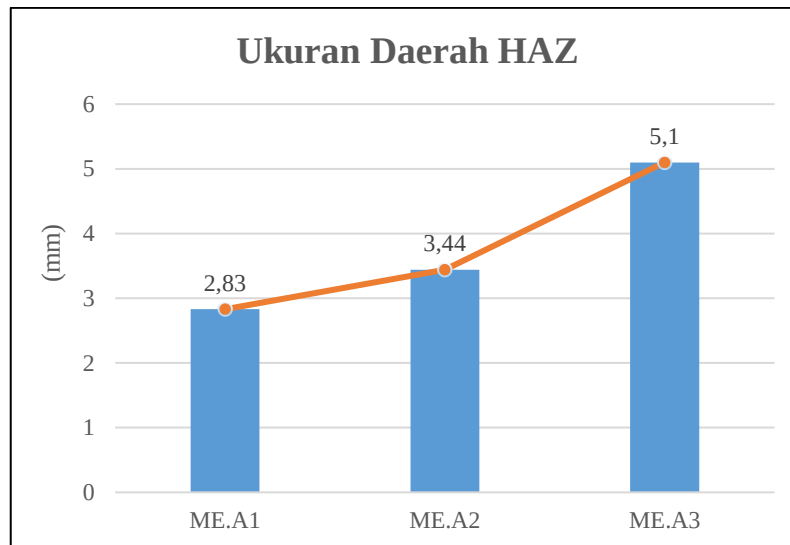
penurunan suhu sebanyak 650°C. Berdasarkan informasi tersebut, didapatkan nilai *cooling rate* adalah 130°C/min atau setara dengan 2,16°C/detik.



Gambar 4.26 Pengaplikasian Diagram CCT

4.3.8 Analisa Hasil Uji Metalografi

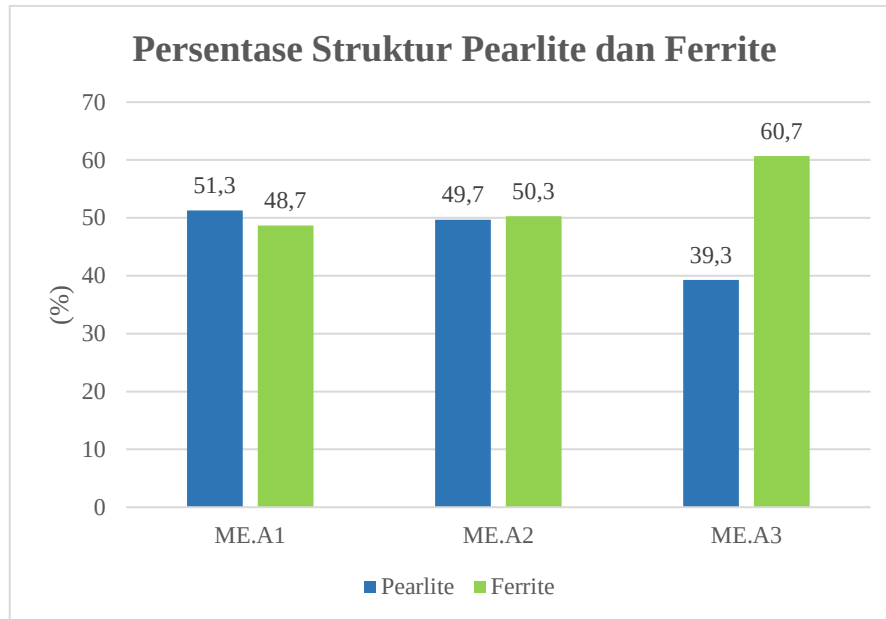
Berdasarkan hasil pengujian struktur makro, didapatkan ukuran rata-rata daerah HAZ pada spesimen uji ME.A1, ME.A2, dan ME.A3 seperti pada Gambar 4.27 di bawah ini.



Gambar 4.27 Lebar Daerah HAZ Setiap Spesimen

Pada Gambar 4.26 di atas, dapat diketahui bahwa spesimen ME.A1 memiliki daerah HAZ dengan lebar 2,83 mm, diikuti dengan Spesimen ME.A2 dengan ukuran daerah HAZ selebar 3,44 mm, dan terakhir spesimen ME.A3 memiliki daerah HAZ dengan ukuran selebar 5,1 mm. Hasil pengujian tersebut tentunya sesuai dengan dasar teori yang menyatakan bahwa semakin lambat laju pendinginan maka semakin lebar daerah HAZ yang akan terbentuk. Hal ini berarti, semakin besar suhu PWHT yang digunakan, maka akan membuat laju pendinginan pada material semakin lambat.

Berikutnya, pada hasil pengujian struktur mikro didapatkan bahwa seluruh bagian pada masing-masing spesimen memiliki struktur *ferrite* dan *pearlite*. Struktur *ferrite* merupakan struktur yang memiliki sifat lunak. Maka dari itu, semakin banyak kandungan *ferrite* akan membuat spesimen menjadi lebih lunak dan mudah patah. Sedangkan struktur *pearlite* merupakan struktur yang memiliki sifat keras. Maka dari itu, semakin banyak kandungan *pearlite* akan membuat spesimen menjadi lebih keras. Pada saat proses pendinginan logam las, semakin lambat waktu pendinginan yang dibutuhkan akan mengakibatkan struktur *pearlite* berubah menjadi *ferrite*. Kandungan *pearlite* dan *ferrite* masing-masing spesimen dapat dilihat pada Gambar 4.28. di bawah ini.



Gambar 4.28 Persentase Struktur *Pearlite* dan *Ferrite* Setiap Spesimen

Pada Gambar 4.28 di atas terlihat bahwa kandungan *pearlite* terbanyak dimiliki oleh spesimen ME.A1 dengan 51,3%, diikuti oleh spesimen ME.A2 dengan 49,7%, dan terakhir kandungan *pearlite* terendah dimiliki oleh spesimen ME.A3 dengan 39,3%. Sedangkan untuk kandungan struktur *ferrite* terbanyak dimiliki oleh spesimen ME.A3 dengan persentase 60,7%, diikuti oleh spesimen ME.A2 dengan 50,3%, dan kandungan *ferrite* terkecil dimiliki oleh spesimen ME.A1 dengan 48,7%. Berdasarkan itu, maka dapat ditarik kesimpulan bahwa semakin tinggi suhu PWHT akan menyebabkan proses pendinginan menjadi semakin lambat. Akibatnya spesimen akan memiliki lebih banyak struktur *ferrite* sehingga spesimen menjadi lebih lunak dan mudah patah.

4.3.9 Hubungan Antara Pengujian Tarik, Tekuk, Kekerasan, dan Metalografi

Pada bagian-bagian di atas, telah dibahas dan disampaikan analisis terkait hasil ketahanan tekuk, kekuatan tarik, nilai kekerasan, dan pengamatan struktur makro-mikro. Berdasarkan analisis tersebut, dapat ditarik kesimpulan bahwa proses *heat treatment* berpengaruh pada sifat mekanik maupun struktur makro-mikro hasil pengelasan.

Test Piece A1 yang diberikan perlakuan berupa *pre-heating* dengan suhu 150°C dan tanpa proses PWHT memiliki daerah HAZ terkecil yaitu 2,83 mm. Semakin kecil daerah HAZ menandakan proses pendinginan yang lebih cepat. Hal ini tentunya juga menjadikan *test piece A1* memiliki struktur *pearlite* terbanyak yaitu 51,3% dan memiliki nilai kekerasan serta kekuatan terbesar apabila dibandingkan dengan 2 *test piece* lain yang memiliki daerah HAZ yang lebih besar dan struktur *pearlite* yang lebih sedikit.

Berbalikan dari struktur *pearlite*, semakin banyak struktur *ferrite* yang dimiliki oleh *test piece* akan menyebabkan *test piece* menjadi semakin lunak dan mudah patah. Hal ini dibuktikan oleh *test piece A3* yang diberikan perlakuan panas berupa *pre-heating* dengan suhu 150°C dan PWHT dengan suhu 400°C. *Test piece A3* memiliki kandungan struktur *ferrite* terbanyak dibandingkan dengan *test piece A1* dan *A2* yaitu sebanyak 60,7%, hal ini menyebabkan nilai kekerasan dan kekuatan tarik dari *test piece A3* menjadi yang paling kecil. Namun, tingginya suhu PWHT yang diberikan, memberikan dampak berupa semakin lamanya proses pendinginan material, hal inilah yang menyebabkan *test piece A3* memiliki daerah HAZ terlebar dan nilai keuletan tertinggi.

Di antara ketiga *test piece*, *test piece* A2 dengan perlakuan panas berupa *pre-heating* dengan suhu 150°C dan PWHT dengan suhu 300°C selalu memiliki nilai di antara ke2 *test piece* lainnya. *Test piece* A2 memiliki lebar HAZ yang lebih kecil dari A3 namun lebih besar dari A1. *Test piece* A2, memiliki kekuata tarik dan nilai kekerasan yang lebih baik dari A3 namun tidak lebih baik dari A1. *Test piece* A2 memiliki nilai keuletan yang lebih baik dari A1 namun tidak sebaik A3. Terakhir, *test piece* A2 memiliki kandungan *ferrite* lebih banyak dari A1 namun tidak sebanyak A3.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dengan memberikan variasi *heat treatment* berupa pemberian perlakuan panas PWHT dengan suhu 300°C dan 400°C terhadap kekuatan tarik, ketahanan tekuk, nilai keuletan, nilai kekerasan, dan pengamatan struktur makro dan mikro, didapatkan tiga poin kesimpulan yang menjawab rumusan masalah pada penelitian ini. Adapun tiga poin kesimpulan pada penelitian ini adalah:

1. Hasil pengujian tarik dan pengujian kekerasan dengan nilai terbesar didapatkan oleh *test piece* A1 yaitu material dengan perlakuan panas berupa *pre-heating* sebesar 150°C dan tanpa PWHT dengan nilai pengujian secara berturut-turut sebesar 556,71 MPa dan 166,5 HV. Sedangkan nilai kekuatan tarik dan kekerasan terkecil didapatkan oleh *test piece* A3 yaitu material dengan perlakuan panas berupa *pre-heating* sebesar 150°C dan PWHT sebesar 400°C dengan nilai pengujian secara berturut-turut sebesar 543,20 MPa dan 156,0 HV. Selanjutnya nilai keuletan dan ketahanan tekuk terbesar didapatkan oleh *test piece* A3 dengan nilai pengujian berturut-turut sebesar 5,25% dan ditemukan 1 *open defect* sebesar 0,84 mm. Sedangkan nilai keuletan dan ketahanan tekuk terkecil didapatkan oleh *test piece* A1 dengan nilai pengujian sebesar 3,85% dan ditemukan 3 *open defect* sebesar 0,36 mm, 1,17 mm, dan 1,91 mm. Maka dari itu, semakin besar suhu PWHT yang diberikan pada material akan sedikit mengurangi kekuatan tarik dan kekerasan namun akan menambahkan keuletan dan ketahanan tekuk.
2. Pada hasil pengujian metalografi, semakin tinggi suhu PWHT mengakibatkan proses pendinginan yang semakin lambat. Semakin lambat pendinginan yang terjadi, mengakibatkan daerah HAZ yang semakin lebar. Terbukti, *test piece* A1 memiliki daerah HAZ terkecil dengan 2,83 mm, diikuti oleh *test piece* A2 dengan 3,44 mm, dan *test piece* A3 dengan 5,1 mm. Selain mengakibatkan daerah HAZ yang semakin lebar, lambatnya pendinginan juga menyebabkan struktur *ferrite* menjadi semakin banyak. Hal ini dapat dilihat dari hasil struktur mikro *test piece* A3 yang memiliki struktur *ferrite* paling banyak yaitu 60,7%, diikuti dengan *test piece* A2 dengan 50,3%, dan kandungan *ferrite* terkecil dimiliki oleh *test piece* A1 dengan 48,7%.
3. Semakin kasar *grain* yang ada pada daerah HAZ dan semakin banyak struktur *ferrite* yang dimiliki oleh *test piece*, menyebabkan berkurangnya nilai kekuatan tarik dan membuat material semakin lunak. Namun, semakin kasar *grain* yang ada pada daerah HAZ dan bertambahnya struktur *ferrite* juga mengakibatkan material menjadi lebih ulet dan memiliki ketahanan tekuk yang lebih baik. Hal ini dibuktikan oleh *test piece* A3 yang *grain* paling kasar pada daerah HAZ dan struktur *ferrite* terbanyak. Sifat mekanik *test piece* A3 menunjukkan spesimen ini merupakan spesimen dengan nilai kekuatan tarik dan kekerasan yang paling rendah, namun memiliki nilai keuletan dan ketahanan tekuk terbaik.

5.2 Saran

Setelah dilakukan penelitian ini, penulis hendak menyampaikan beberapa saran untuk penyempurnaan dan penelitian yang lebih lanjut untuk penelitian selanjutnya sebagai berikut:

1. Pada penelitian selanjutnya perlu adanya penelitian mendalam tentang variasi *pre-heating* dan *post-weld heat treatment*.

2. Pada penelitian selanjutnya dapat ditambahkan analisa pembiayaan agar dapat mengambil keputusan yang lebih variatif.
3. Pada penelitian selanjutnya dapat ditambahkan variasi pemilihan suhu yang lebih variatif agar mengetahui pengaruh *heat treatment* dengan lebih mendalam lagi.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, R. & Bakar, M.A. (2011). Effect of a Post-Weld Heat Treatment on The Mechanical and Microstructure Properties of AA6061 Joints Welded by The Gas Metal Arc Welding Cold Metal Transfer Method. *International Journal of Material and Design*, 32: 5120-5126. DOI:[10.1016/j.matdes.2011.06.007](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.06.007)
- Alkahla, I. & Pervaiz, S. (2017). Sustainability Assessment of Shielded Metal Arc Welding (SMAW) Process. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering (ICMIM)*, 244: 1-8. DOI:[10.1088/1757-899X/244/1/012001](https://doi.org/10.1088/1757-899X/244/1/012001)
- Anwar, M., Ahmed, M.Y., Riyaz, M., Siddiqui, M.S. & Pasha, S.A. (2017). Testing by Radiography on Welded Mild Steel (NDT Method). *International Journal of Science Technology & Engineering (IJSTE)*, 3 (8): 31-35.
<https://ijste.org/Article.php?manuscript=IJSTEV3I8017>
- Ariesta, K., Haryadi, G.D. & Umardani, Y. (2014). Pengaruh Post Weld Heat Treatment (PWHT) – Tempering Pada Sambungan Medium Carbon Steel NP-42 Dengan Las Thermit Terhadap Nilai Kekerasan dan Struktur Mikro. *Jurnal Teknik Menin (JTM) S-1*, 2(2): 138-145. <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/jtm/article/view/5585>
- Asadi, P., Alimohammadi, S., Kohantorabi, O., Fazli, A. & Akbari, M. (2020). Effects of Material Type, Preheating and Weld Pass Number on Residual Stress of Welded Steel Pipes by Multi-pass TIG Welding (C-Mn, SUS304, SUS316). *Thermal Science and Engineering Progress*, 16: 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2019.100462>
- ASME Section IX. (2019). *ASME Boiler and Pressure Vessel Code an International Code*. The American Society of Mechanical Engineers
- ASTM E 92-17. (2017). *Standard Test Method for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Material*. ASTM International
- Augustino, I.F. (2015). *Pengaruh Lama Waktu Tunggu Pada Proses PWHT Terhadap Sifat Mekanik, Struktur Mikro dan Tegangan Sisa Pada Pengelasan Baja AAR M201 Gr.B+*. Tugas Akhir Departemen Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Avner, S.H. (1974). *Introduction to Physical Metallurgy*, 2nd ed. McGraw-Hill Book Company.
[https://sku.ac.ir/Datafiles/BookLibrary/46/Introduction%20to%20Physical%20Metallurgy%20\(1974\).pdf](https://sku.ac.ir/Datafiles/BookLibrary/46/Introduction%20to%20Physical%20Metallurgy%20(1974).pdf)
- B. G., Satish, & Jeergi, A. (2016). Study on Welding Procedure Specifications as Per ASME Sec IX. *JSRD - International Journal for Scientific Research & Development*. 4: 1354-1359. <https://www.ijsrd.com/Article.php?manuscript=IJSRDV4I40867>
- Baredwan, A.H. (2021). *Analisis Pengaruh Proses Preheating dan Bentuk Kampuh V Hasil Pengelasan FCAW Pada Sambungan Baja ASTM A53 Dengan A36 Terhadap Sifat Mekanik*. Tugas Akhir Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Bird, J. (1993). Improving the toughness of high strength GMA welds. *Marine structures*, 6 (6): 461-474. [https://doi.org/10.1016/0951-8339\(93\)90032-X](https://doi.org/10.1016/0951-8339(93)90032-X)

- Darsin, M., Junus, S. & Triawan, Y.I. (2010). Analisis Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Paduan Aluminium 5083 Akibat Pengelasan Metal Inert Gas (MIG) Dengan Variasi Preheat dan Post Heat. *Jurnal ROTOR*, 3(2): 67-75.
- Guidance Note 6. (2003). *Post Weld Heat Treatment of Welded Structures*. Welding Technology Institute of Australia.
- Hadi, W.B. (2015). *Analisis Pengaruh Variasi Suhu Preheat terhadap Distorsi, Lebar HAZ, dan Struktur Mikro pada Sambungan Butt Joint Single V dengan Metode Pengelasan FCAW dan SMAW*. Tugas Akhir Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Herrmann, K. (2011). *Hardness Testing: Principles and Applications*. ASM International.
- Hofe, D.V. (2015). Significance of welding and joining technology in a modern industrial structure. *German Welding Society (DVS)*, 16-21.
https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/30904/1/sid_2014_02.pdf
- Hofe, D.V. & Middeldorf, K. (2014). The Importance of Welding and Joining Technology in a Modern Industrial Structure. *Vestnik of Don State Technical University*, (3): 21-28.
<https://doi.org/10.12737/5719>
- JIS G 4051, (2016). *Carbon Steel for Machine Structural Use*. Japanese Standards Association.
- Kou, S. (2003). *Welding metallurgy*. John Wiley & Sons, Inc.
- Naharuddin, N., Sam, A. & Nugraha, C. (2015). Kekuatan tarik dan bending sambungan las pada material baja SM 490 dengan metode pengelasan SMAW dan SAW. *Jurnal Mekanikal*, 6 (1): 550-555. <https://core.ac.uk/download/pdf/298951281.pdf>
- Pratomo, M.A., Jasman, J., Erizon, N. & Fernanda, Y. (2020). The Variation Effect of Electric Current Toward Tensile Strength on Low Carbon Steel Welding with Electrode E7018. *Teknomekanik*, 3 (1): 9-16.
- Rachmatullah, T. (2020). *Analisis Pengaruh Variasi Suhu Pre-Weld Heat Treatment dan Aging Post Weld Heat Treatment Pada Sambungan Las Aluminium Seri 6061 Terhadap Sifat Mekanis*. Tugas Akhir Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Ramadhan, R.J. (2018). *Pengaruh Variasi Arus dan Jenis Elektroda Las terhadap Struktur Mikro dan Kekerasan Hasil Pengelasan Biscrad 600 Menggunakan Metode SMAW*. Tugas Akhir Departemen Teknik Material & Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Sardjono, K. (2009). Pengaruh Hardening pada Baja JIS G 4051 Grade S45C terhadap Sifat Mekanis dan Struktur Mikro. *Jurnal Sains dan Teknologi Indonesia*, 11 (2): 95-100. DOI: [10.29122/jsti.v11i2.822](https://doi.org/10.29122/jsti.v11i2.822)
- Shafeek, H.I., Gadelmawla, E.S., Abdel-Shafy, A.A., & Elewa, I.M. (2004). Assessment of Welding Defects for Gas Pipeline Radiographs Using Computer Vision. *International Journal of NDT&E International*, 37 : 291-299. DOI:[10.1016/j.ndteint.2003.10.003](https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2003.10.003)
- Sharma, S.D., Saluja, R., & Moeed, K.M. (2013). A Review on Effect of Preheating and/or Post Weld Heat Treatment (PWHT) on Hardened Steel. *International Journal of Technical Research and Applications*, 1 (2): 05-07. <https://www.ijtra.com/view/a-review-on->

[effect-of-preheating-andor-post-weld-heat-treatment-pwht-on-hardened-steel-.pdf?paper=a-review-on-effect-of-preheating-andor-post-weld-heat-treatment-pwht-on-hardened-steel-.pdf](#)

- Supriyanto, W. (2016). *Pengaruh Post Heat 700° dan 900° Selama 5 Jam Pada Sambungan Las SMAW, Elektroda E7016, Material SA 36 Terhadap Kekuatan Tarik, Kekerasan dan Metalografi*. Tugas Akhir Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Wirjosumarto, H. & Okumura, T. (2000). *Teknologi pengelasan logam*. PT. Pradnya Paramita

(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)

Lampiran 1 - Sertifikat *Welder*



WELDER QUALIFICATION CERTIFICATE

Certificate No.	: PAL QA/WDC/WDKN/0036
Welder Name	: MUHAMMAD LUTHFI AZIZ
Address	: Jl. Sultan Agung Barat RT 04 RW 06 Bungah Gresik
Identification No.	: 09 MLA
Manufacturer Name	: PT PAL Indonesia
WPS No.	: WPS 17-16
Date of Initial Approval	: March 23, 2020



This is to certify that the welder has passed the qualification test [and re-validation record audit] according to the rules of ABS, and is qualified to undertake welding operation specified in range of qualification of this certificate.

ITEMS	TEST PIECE	RANGE OF QUALIFICATION
Welding process	GTAW+SMAW (141+111)	GTAW+SMAW (141+111)
Base metal	Group I	Group I steels with a specified minimum yield strength ReH $\leq$ 460 N/mm ² (67 ksi)
Filler metal type	Basic	Basic, acid, rutile
Material thickness	Pipe 2" sch XXS (T = 11 mm)	1.5 ~ 22 mm
Deposit thickness	GTAW 3 mm ; SMAW 8 mm	Max. weld deposit thick of GTAW 6 mm ; SMAW 16 mm
Type of welded joint	Butt weld Single sided without backing	GTAW : Butt weld single sided without/with backing or double sided weld without/with gouging, and fillet weld (single run) SMAW : Butt weld single sided with backing or double sided weld with gouging, and fillet weld (multi run)
Welding position	6G - (H-LQ45)	Butt welds : All position except vertical downwards Fillet welds : All position except vertical downwards

TEST RECORD		
TYPE OF TEST	PERFORMED AND ACCEPTED	NOT REQUIRED
Visual examination	√	—
Radiographic examination	√	—
Surface examination	—	√
Macro examination	—	√
Fracture test	—	√
Bend test	—	√

This certificate is issued at	: Surabaya
issued on	: March 27, 2020
Valid until *)	: March 22, 2023
Examining body	: American Bureau of Shipping
Rule	: 2020 ABS rules

Signature/seal of examiner :

American Bureau of Shipping



 3/14/20

*) Provided welder continuously weld in accordance with range of qualification above.

Lampiran 1.1 Sertifikat Welder

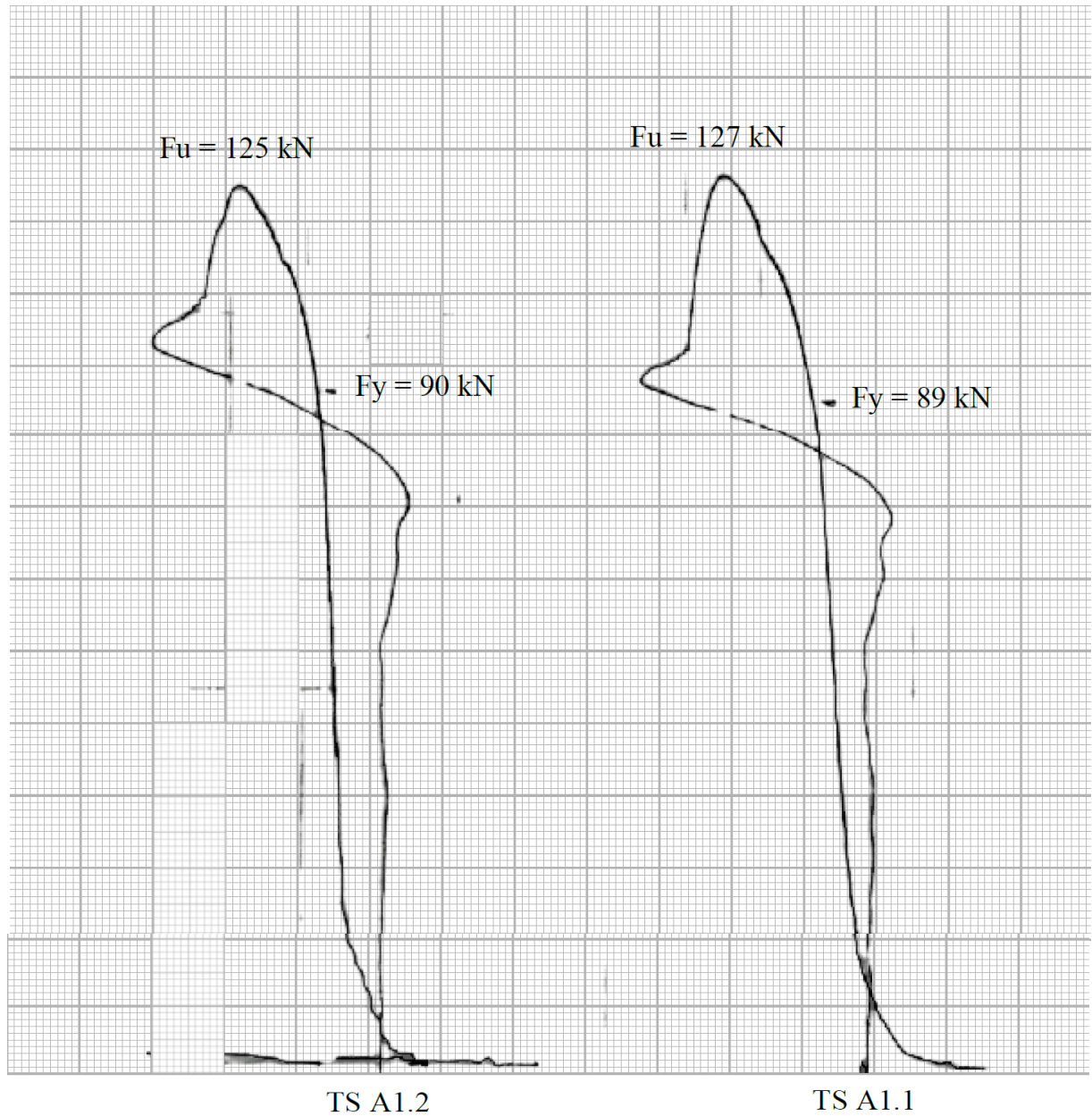
Lampiran 2 - NDT Report

[illegible]

Lampiran 2.1 NDT Report Test Piece A1

Lampiran 2.3 NDT Report Test Piece A3

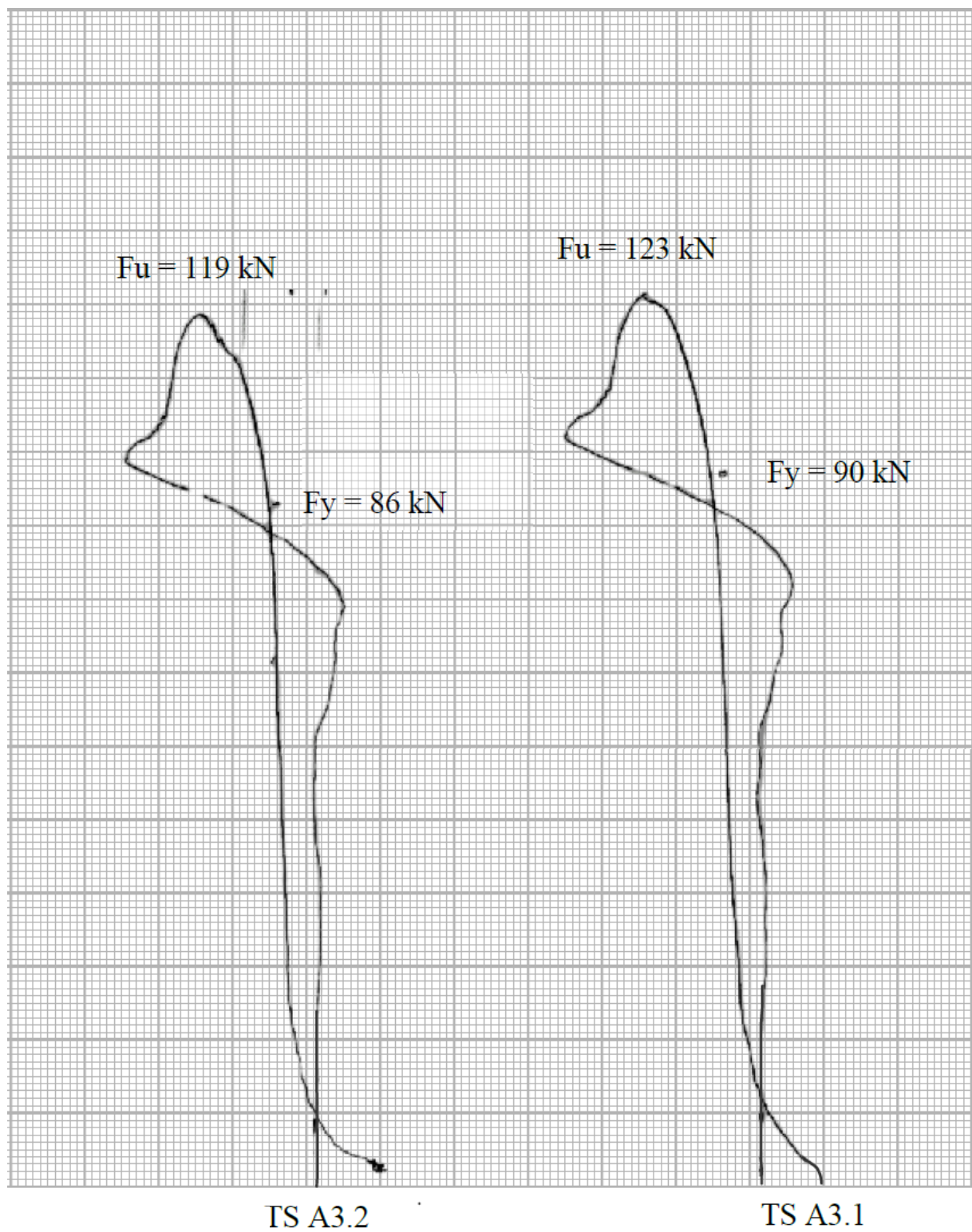
Lampiran 3 - Tensile Graph



Lampiran 3.1 Grafik Uji Tarik Test Piece A1



Lampiran 3.2 Grafik Uji Tarik *Test Piece* A2



Lampiran 3.3 Grafik Uji Tarik *Test Piece* A3

Lampiran 4 - Form Uji Tarik, Uji Tekuk, Uji Kekerasan dan Uji Makro



ITS
Institut Teknologi
Sepuluh Nopember

LABORATORIUM KONSTRUKSI DAN KEKUATAN KAPAL
DEPARTEMEN TEKNIK PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
 Gedung W – Lantai 1, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111
 Telp./Fax. 031 599 4933

REPORT ON TEST RESULT NO. : /IT2.4.1.1/PM.05.02/20

DATE : 20/06/2022

ORDER FROM :

TEST STANDARD : ASME K

MATERIAL SPECS. : Butt Joint Plate JIS G4051 ϕ 12mm
 <SMAW : Pre-heating 100°C; Tanpa PWHT>

PROJECT :

1. TENSION TEST								
NO	CODE MATERIAL	SPECIFICATION SAMPLE				TENSILE TEST RESULTS		
		WIDTH	THICK	DIA	CSA	YIELD STRENGTH	ULTIMATE STRENGTH	BREAKING
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm ²)	MPa	MPa	
1	TS A1.1	19,13	11,91	—	227,84	390,63	557,41	Base Metal
2	TS A1.2	19,02	11,82	—	224,82	400,82	556,0	Base Metal

NO	F. YIELD		F. ULTIMATE	
	KN	N	KN	N
1	89	89.000	127	127.000
2	90	90.000	125	125.000

II. BENDING TEST, ANGLE OF BEND : 180° DIAMETER of FORMER : 50 mm						
NO	SAMPLE MARK	IDENTIFICATION	WIDTH (mm)	THICK (mm)	TEST RESULTS	
					OPEN DEFECT (mm)	CRACK (mm)
	FB A1.1		36,91	12,42	1,17	None
	FB A1.2		34,99	12,62	None	None
	RB A1.1		36,43	12,24	None	None
	RB A1.2		37,66	12,27	936; 1,91	None

Witnessed by :

1.	
2.	
3.	
4.	
5.	

The Laboratory Of Ships Strength And Construction
FT. Kelautan ITS

Tester



Lampiran 4.1 Hasil Uji Tarik dan Uji Tekuk Test Piece A1



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

LABORATORIUM KONSTRUKSI DAN KEKUATAN KAPAL
DEPARTEMEN TEKNIK PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
Gedung W – Lantai 1, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111
Telp./Fax. 031 599 4933

REPORT ON TEST RESULT NO. :

/IT2.4.1.1/PM.05.02/20

DATE : 20 / 06 / 2022
ORDER FROM :
TEST STANDARD : ASME IX
MATERIAL SPECS. : Butt Joint - Plate JIS S 40SI ϕ 12mm
<SP1AW ; Preheating 150°C ; PWHT 300°C>
PROJECT :

1. TENSION TEST								
NO	CODE MATERIAL	SPECIFICATION SAMPLE				TENSILE TEST RESULTS		
		WIDTH	THICK	DIA	C S A	YIELD STRENGTH	ULTIMATE STRENGTH	BREAKING
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm ²)	MPa	MPa	
1	TS A2.1	19,03	11,70	—	222,65	368,30	539,96	Base Metal
2	TS A2.2	19,00	11,76	—	223,44	358,04	550,48	Base Metal
NO	F. YIELD				F. ULTIMATE			
	KN	N			KN	N		
1	82	82.000			120	120.000		
2	80	80.000			123	123.000		
II. BENDING TEST, ANGLE OF BEND : 180° DIAMETER of FORMER : 60 mm								
NO	SAMPLE MARK	IDENTIFICATION	WIDTH (mm)	THICK (mm)	TEST RESULTS			
					OPEN DEFECT (mm)	CRACK (mm)		
	FB A2.1		37,88	13,10	None	None		
	FB A2.2		37,44	12,63	None	None		
	RB A2.1		39,90	12,13	1,27	None		
	RB A2.2		38,70	12,09	None	None		
Witnessed by :					The Laboratory Of Ships Strength And Construction FT. Kelautan ITS			
1.								
2.								
3.								
4.								
5.								

Lampiran 4.2 Hasil Uji Tarik dan Uji Tekuk Test Piece A2



Lampiran 4.3 Hasil Uji Tarik dan Uji Tekuk *Test Piece* A3



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

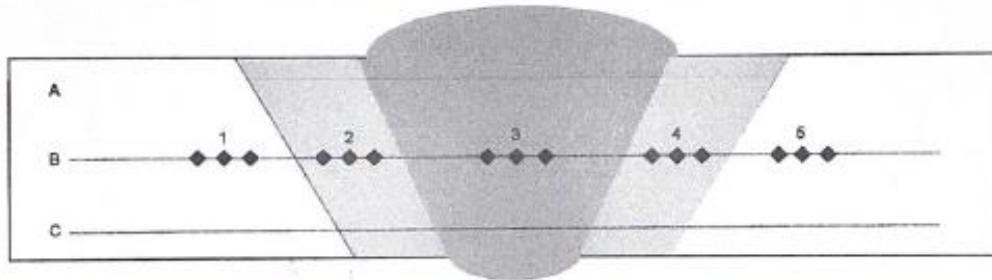
LABORATORIUM KONSTRUKSI DAN KEKUATAN KAPAL
JURUSAN TEKNIK PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
Gedung W – Lantai 1, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111
Telp./Fax. 031 599 4933, Email: labkonjtp@gmail.com

REPORT ON TEST RESULT NO. :

/IT2.4.1.1/PM.05.02/20

DATE : 21/06/22 .
ORDER FROM :
TEST STANDARD : ASME IX
MATERIAL SPEC. : STEEL PLATE JIS S 40SI
<Pre-heating 150°C ; Tempa PWHT>
THICKNESS : 12 mm
WELDING PROCESS : SMAW
TEST POSITION :
WELDER :

HARDNESS TEST



Location	Vickers Hardness Number (HV. 1)				
	Base Metal	HAZ	Weld Metal	HAZ	Base Metal
	1	2	3	4	5
B	131,8	158,1	154,0	154,0	162,0
Average	148,0	162,4	189,1		

Equipment: Micro Vickers Hardness Tester, Model: TH 712, Time Group INC, China

Witnessed by :

The Laboratory of Ship Strength and Construction
FT. Kelautan - ITS



Lampiran 4.4 Hasil Uji Kekerasan *Test Piece* A1



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

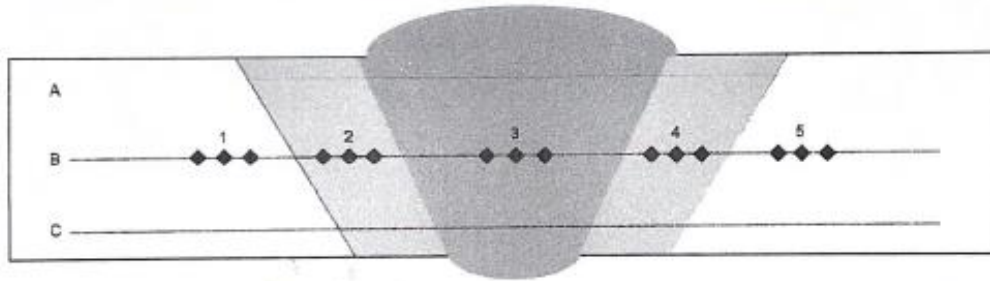
LABORATORIUM KONSTRUKSI DAN KEKUATAN KAPAL
JURUSAN TEKNIK PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
Gedung W – Lantai 1, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111
Telp./Fax: 031 599 4933, Email: labkonjtp@gmail.com

REPORT ON TEST RESULT NO. :

/IT2.4.1.1/PM.05.02/20

DATE : 21 / 06 / 2022
ORDER FROM :
TEST STANDARD : ASME IX
MATERIAL SPEC. : STEEL PLATE JIS S 40S1
< Pre-heating 150°C; PWHT 300°C
THICKNESS : 12 mm
WELDING PROCESS : SMAW
TEST POSITION :
WELDER :

HARDNESS TEST



Location	Vickers Hardness Number (HV. 1)										
	Base Metal		H A Z		Weld Metal		H A Z		Base Metal		
	1		2		3		4		5		
B	148,7	148,4	152,8	158,8	178,7	163,5	165,1	157,8	178,4		
Average	150,0		167,0		177,1						
Equipment: Micro Vickers Hardness Tester, Model: TH 712, Time Group INC, China											
Witnessed by :						The Laboratory of Ship Strength and Construction FT. Kelautan - ITS					
											

Lampiran 4.5 Hasil Uji Kekerasan *Test Piece* A2



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

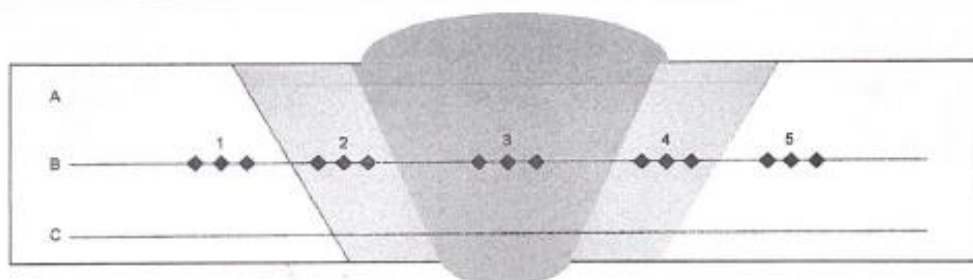
LABORATORIUM KONSTRUKSI DAN KEKUATAN KAPAL
JURUSAN TEKNIK PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
Gedung W – Lantai 1, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111
Telp./Fax. 031 599 4933, Email: labkonjtp@gmail.com

REPORT ON TEST RESULT NO. :

/IT2.4.1.1/PM.05.02/20

DATE : 21 / 06 / 2022
ORDER FROM :
TEST STANDARD : ASME IX
MATERIAL SPEC. : STEEL PLATE JIS S 4051
<Pre-heating 150°C; PWHT 400°C>
THICKNESS : 12 mm
WELDING PROCESS : SMAW
TEST POSITION :
WELDER :

HARDNESS TEST



Location	Vickers Hardness Number (HV. 1)										
	Base Metal		H A Z		Weld Metal		H A Z		Base Metal		
	1		2		3		4		5		
B	128.2	156.7	130.3	149.0	165.7	169.5	190.9	171.5	151.5		
Average	138.4		158.4		171.3						

Equipment: Micro Vickers Hardness Tester, Model: TH 712, Time Group INC, China

Witnessed by :

The Laboratory of Ship Strength and Construction
FT. Kelautan - ITS



Lampiran 4.6 Hasil Uji Kekerasan Test Piece A3



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

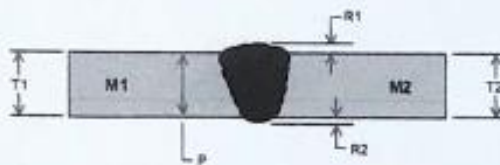
LABORATORIUM KONSTRUKSI DAN KEKUATAN KAPAL
DEPARTEMEN TEKNIK PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
Gedung W – Lantai 1, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111
Telp/Fax: 031 599 4933, Email: labkonjtp@gmail.com

REPORT ON TEST RESULT NO. : 0 /IT2.4.1.1/PM.05.02/201

Page of

DATE	: 21 /06 /2022	THICKNESS	: mm to mm
ORDER FROM	:	WELDING PROCESS	: SMAW
TEST STANDARD	: ASME IX	TEST POSITION	: G
PQR NUMBER	:	ELECTRODE	: E-308
JOINT DESIGN	: Butt	WELDER NAME	:
MATERIAL SPEC.	:	PROJECT	:

4. MACROETCH EXAMINATION



NOTES:

Magnification = 2,34 x

M1 = Material 1 : Plate

M2 = Material 2 : Plate

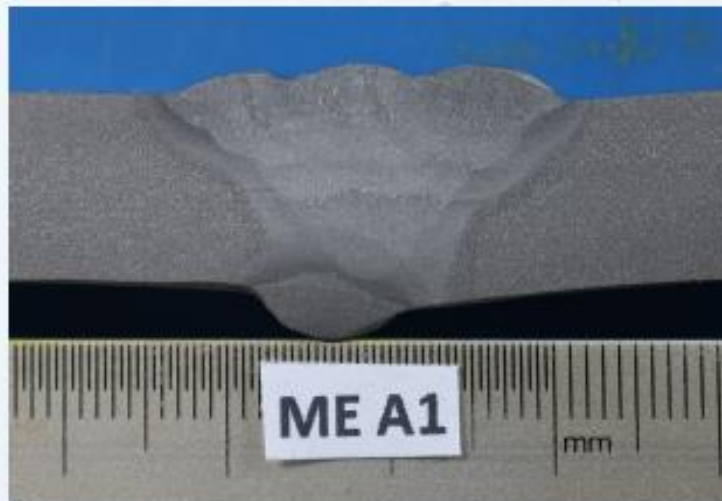
T1 = Thickness of material 1 : 11,67 mm

T2 = Thickness of material 2 : 11,80 mm

R1 = Height of face reinforcement

R2 = Height of root reinforcement

P = Joint penetration groove weld size



EXAMINATION RESULTS

VISUAL EXAMINATION			WELD SIZE MEASUREMENTS			
Material Code	Type of Discontinuities	Size (mm)	P (mm)	R1 (mm)	R2 (mm)	Remark
A1.	—	—	11,67	2,54	2,90	

NOTES : This report is valid only for the specimen tested on the Laboratory of Ships Strength and Construction

Witnessed by,

Tester of the Laboratory
Ships Strength and Construction



Lampiran 4.7 Hasil Uji Struktur Makro Test Piece A1



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

LABORATORIUM KONSTRUKSI DAN KEKUATAN KAPAL
DEPARTEMEN TEKNIK PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
Gedung W – Lantai 1, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111
Telp./Fax. 031 599 4933, Email: labkonjtp@gmail.com

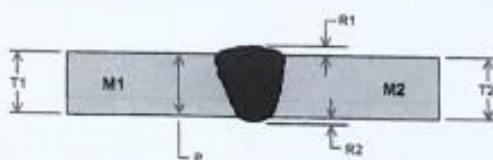
REPORT ON TEST RESULT NO. : 0

/IT2.4.1.1/PM.05.02/201

Page of

DATE	: 21 / 06 / 2022	THICKNESS	: mm to mm
ORDER FROM	:	WELDING PROCESS	: SMAW
TEST STANDARD	: ASME IX	TEST POSITION	: G
PQR NUMBER	:	ELECTRODE	: E-7018
JOINT DESIGN	: Butt	WELDER NAME	:
MATERIAL SPEC.	:	PROJECT	:

4. MACROETCH EXAMINATION



NOTES:

Magnification = 2,35 x

M1 = Material 1 : Plate

M2 = Material 2 : Plate

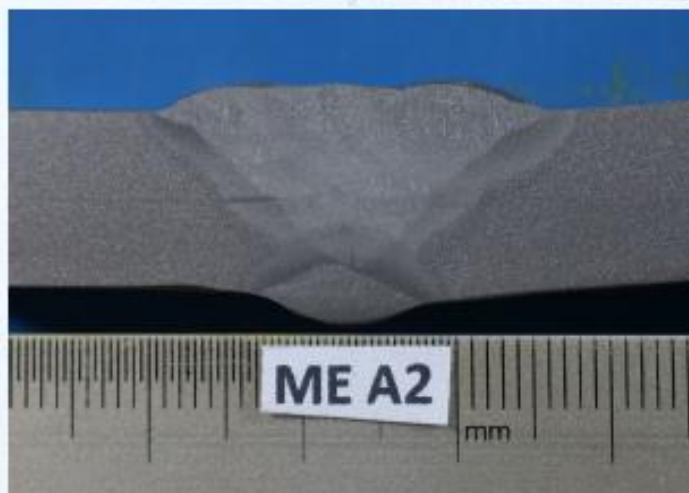
T1 = Thickness of material 1 : 11,37 mm

T2 = Thickness of material 2 : 12,03 mm

R1 = Height of face reinforcement

R2 = Height of root reinforcement

P = Joint penetration groove weld size



EXAMINATION RESULTS

VISUAL EXAMINATION			WELD SIZE MEASUREMENTS			
Material Code	Type of Discontinuities	Size (mm)	P (mm)	R1 (mm)	R2 (mm)	Remark
A2.	—	—	11,33	2,09	2,48	—

NOTES : This report is valid only for the specimen tested on the Laboratory of Ships Strength and Construction

Witnessed by,

Tester of the Laboratory
Ships Strength and Construction



Lampiran 4.8 Hasil Uji Struktur Makro Test Piece A2



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

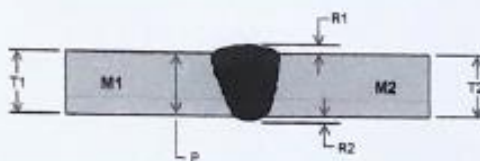
LABORATORIUM KONSTRUKSI DAN KEKUATAN KAPAL
DEPARTEMEN TEKNIK PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
Gedung W – Lantai 1, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111
Telp./Fax. 031 599 4933, Email: labkonjtp@gmail.com

REPORT ON TEST RESULT NO. : 0 /IT2.4.1.1/PM.05.02/201

Page of

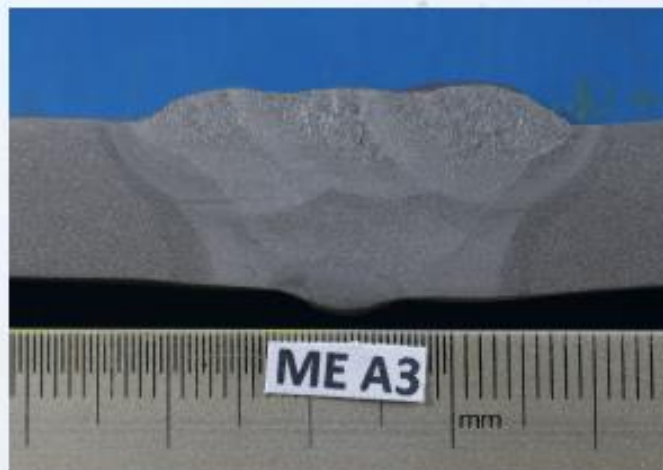
DATE	: 21 / 06 / 2022	THICKNESS	: mm to mm
ORDER FROM	:	WELDING PROCESS	: SMAW
TEST STANDARD	: ASME IX	TEST POSITION	: G
PQR NUMBER	:	ELECTRODE	: E-7018
JOINT DESIGN	: Butt	WELDER NAME	:
MATERIAL SPEC.	:	PROJECT	:

4. MACROETCH EXAMINATION



NOTES:

Magnification = 2,2 x
M1 = Material 1 : Plate
M2 = Material 2 : Plate
T1 = Thickness of material 1 : 11,46 mm
T2 = Thickness of material 2 : 11,71 mm
R1 = Height of face reinforcement
R2 = Height of root reinforcement
P = Joint penetration groove weld size



EXAMINATION RESULTS

VISUAL EXAMINATION			WELD SIZE MEASUREMENTS			
Material Code	Type of Discontinuities	Size (mm)	P (mm)	R1 (mm)	R2 (mm)	Remark
A3	—	—	11,24	3,25	1,52	

NOTES : This report is valid only for the specimen tested on the Laboratory of Ships Strength and Construction

Witnessed by,

Tester of the Laboratory
Ships Strength and Construction



Lampiran 4.9 Hasil Uji Struktur Makro Test Piece A3

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada seluruh pihak yang telah membantu dalam seluruh proses penyusunan Tugas Akhir ini. Terima kasih penulis ucapkan kepada:

1. Allah SWT, atas segala hikmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan baik.
2. Ibu Diana Puspitawati, Bapak Fahlewi Husin Nasution, serta Saudara Putra Akbar Prasetyo Nasution selaku keluarga penulis yang selalu mendoakan, memberikan dukungan baik moril dan moral selama pengerjaan Tugas Akhir.
3. Bapak Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D. dan Bapak Dr. Eng. Yeyes Mulyadi, S.T., M.Sc. selaku dosen pembimbing penulis atas segala bimbingan dan arahnya selama proses penyusunan Tugas Akhir ini.
4. Bapak Herman Pratikno, S.T., M.T., Ph.D., Bapak Yoyok Setyo Hadiwidodo, S.T., M.T., Ph.D., dan Bapak Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D. selaku dosen penguji siding Tugas Akhir yang telah memberikan kritik dan saran yang sangat membangun terhadap Tugas Akhir penulis sehingga Tugas Akhir ini menjadi jauh lebih baik.
5. Ibu Dr. Eng. Shade Rahmawati, S.T., M.T. selaku dosen wali penulis yang telah memberikan banyak bantuan dan bimbingan kepada penulis selama masa perkuliahan.
6. Bapak Sigit Budi Raharjo, S.T. selaku kepala Biro Warranty Rekumhar sekaligus pembimbing lapangan yang membantu dan memberikan saran dalam pengerjaan Tugas Akhir.
7. Seluruh pekerja dan teknisi PT. PAL Indonesia (Persero), Laboratorium Konstruksi & Kekuatan Kapal, ITS yang juga membantu pengerjaan Tugas Akhir ini.
8. Delvia Shinta Triestanti dan Dinda Aisyah Dzulfaida selaku sahabat penulis yang selalu ada di Yogyakarta.
9. Meilin Santika Diana, Meylania Anggraeini Anjelina, dan Yachya Rifqi Andiko selaku sahabat yang sedikit memberikan motivasi dan hiburan dalam pengerjaan Tugas Akhir.
10. Thariq Hadid Andana selaku teman, sahabat, kakak, dan manusia istimewa yang tidak pernah berhenti memberikan bantuan, motivasi, ketenangan, serta selalu siap mendengarkan keluh kesah penulis selama pengerjaan Tugas Akhir.
11. Seluruh teman-teman penulis yang lain, serta teman-teman Revastra (L-36) yang tidak bisa penulis sebutkan satu-persatu.



Putri Hana Octaviani Nasution lahir di Medan, 1 Oktober 2000, merupakan putri bungsu dari 2 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal pertama di KB-TK Surya Mentari Surakarta, kemudian melanjutkan jenjang Sekolah Dasar di SDI Al-Azhar 14 Semarang dan SDI Al-Azhar 11 Surabaya. Setelah itu penulis melanjutkan pendidikannya di SMP Muhammadiyah 5 Surabaya dan SMP Muhammadiyah 2 Yogyakarta. Selanjutnya, pada tahun 2015 penulis melanjutkan pendidikan di SMAI Al-Azhar 9 Yogyakarta. Setelah penulis lulus jenjang SMA pada tahun 2018, penulis melanjutkan ke jenjang pendidikan Strata 1 di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Selama menempuh masa perkuliahan di Departemen Teknik Kelautan, penulis aktif mengikuti organisasi dan berbagai kegiatan kemahasiswaan. Dalam berorganisasi, penulis menjadi bagian dari HIMATEKLA-FTK ITS sebagai staf dan kepala divisi Departemen Dalam Negeri. Selain itu penulis juga turut aktif dalam kepanitiaan yang di selenggarakan di lingkup ITS antara lain menjadi staf *Talk Show* dan *Liaison Officer* OCEANO 2019, staff ahli Konsumsi OCEANO 2020, dan staf ahli Konsumsi & Kesehatan IFC 2020. Selain organisasi & kepanitiaan, penulis juga aktif berpartisipasi dalam pelatihan dan seminar nasional maupun internasional yang berhubungan dengan bidang teknologi kelautan. Pada tahun 2021 penulis berkesempatan melaksanakan kerja praktik selama 2 bulan di PT. KSO WIKAJIND, Tuban. Selama masa kerja praktik inilah penulis mulai memiliki ketertarikan pada bidang pengelasan.

Ditetapkan di Surabaya
REKTOR INSTITUT TEKNOLOGI
SEPULUH NOPEMBER,

MOCHAMAD ASHARI
NIP 196510121990031003