PENGARUH VARIASI ARUS DAN PERLAKUAN *ANNEALING* TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR MIKRO HASIL PENGELASAN GMAW PADA BAJA SM490

SKRIPSI

Oleh
AULIA IRELIN SEKAR REMON
NIM: 116210065

PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI
JURUSAN TEKNIK PERTAMBANGAN
FAKULTAS TEKNOLOGI MINERAL DAN ENERGI
UNIVERSITAS PEMBANGUNAN NASIONAL "VETERAN"
YOGYAKARTA

2025

PENGARUH VARIASI ARUS DAN PERLAKUAN *ANNEALING* TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR MIKRO HASIL PENGELASAN GMAW PADA BAJA SM490

SKRIPSI

Oleh
AULIA IRELIN SEKAR REMON
NIM: 116210065

PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI
JURUSAN TEKNIK PERTAMBANGAN
FAKULTAS TEKNOLOGI MINERAL DAN ENERGI
UNIVERSITAS PEMBANGUNAN NASIONAL "VETERAN"
YOGYAKARTA
2025

LEMBAR PENGESAHAN

PENGARUH VARIASI ARUS DAN PERLAKUAN *ANNEALING* TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR MIKRO HASIL PENGELASAN GMAW PADA BAJA SM490

Disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Metalurgi, Fakultas Teknologi Mineral dan Energi, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta

oleh

Aulia Irelin Sekar Remon

NIM: 116210065

Menyetujui

Yogyakarta, Oktober 2025

Dosen Pembimbing

Dr. Atik Setyani, S.Si., M.T

NIP. 19940824 202203 2 017

Koordinator Program Studi Sarjana Teknik Metalurgi

M. Syukron, S.T., M.Eng., Ph.D

NIP. 19810124 202012 1 001

PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH

Saya yang bertandatangan di bawah ini :

Nama : Aulia Irelin Sekar Remon

NIM : 116210065

Menyatakan bahwa judul dan keseluruhan isi dari skripsi ini adalah asli karya ilmiah saya. Selama penyusunan karya ilmiah ini, saya selalu berkonsultasi dengan dosen pembimbing hingga menyelesaikan karya ilmiah ini dan tidak melakukan penjiplakan (plagiasi) terhadap karya ilmiah orang atau pihak lain baik karya lisan maupun tulisan, baik secara sengaja maupun tidak sengaja.

Apabila kemudian hari terbukti bahwa skripsi saya mengandung unsur penjiplakan (plagiasi) dari karya orang atau pihak lain, maka sepenuhnya menjadi tanggung jawab saya, bukan tanggung jawab dosen pembimbing saya. Oleh karena itu saya bersedia bertanggung jawab secara hukum dan bersedia dibatalkan/dicabut gelar kesarjanaan saya oleh Rektor Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta dan diumumkan pada khalayak ramai.

Yogyakarta, Oktober 2025

Yang menyatakan

(materai Rp 10.000)

Aulia Irelin Sekar Remon

HALAMAN PERSEMBAHAN

Dengan penuh rasa syukur dan hormat, karya sederhana ini kupersembahkan untuk orang tuaku tercinta yang selalu memberikan doa, kasih sayang, dan semangat tiada henti, adikku tersayang dan nenekku yang senantiasa memberi doa dan dukungan, sahabat-sahabat yang selalu hadir memberi semangat di setiap Langkah, teman-teman seperjuangan yang membantu dan mendampingi dalam proses penelitian, serta semua orang yang dengan tulus hadir dan membantu dalam setiap perjalanan hingga terselesaikannya skripsi ini.

PRAKATA

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala limpahan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga dapat menyelesaikan Skripsi dengan judul "Pengaruh Variasi Arus dan Perlakuan *Annealing* terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Hasil Pengelasan GMAW pada Baja SM490" dapat terselesaikan dengan baik. Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Juni hingga Agustus 2025 di PT INKA (Persero). Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan guna memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Metalurgi, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta.

Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Mohammad Irhas Effendi, M. Si., selaku Rektor Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta;
2. Prof. Dr. Ir. RM Basuki Rahmad, M.T., selaku Dekan Fakultas Teknologi UPN "Veteran" Yogyakarta;
3. Dr. Ir. Rika Ernawati, S.T., M.Si., selaku Ketua Jurusan Teknik Pertambangan UPN "Veteran" Yogyakarta;
4. Muhammad Syukron, S.T., M.Eng, Ph.D., selaku Koordinator Program Studi Teknik Metalurgi UPN "Veteran" Yogyakarta;
5. Ir. Yasmina Amalia, S.T., M.T. selaku Dosen Wali;
6. Dr. Atik Setyani, S.Si., M.T., selaku dosen pembimbing tugas akhir;
7. Keluarga, sahabat, serta seluruh pihak yang telah memberikan bantuan dalam penyusunan laporan ini, yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Akhir kata penulis berharap semoga tulisan ini dapat bermanfaat, khususnya bagi penulis dan umumnya bagi pembaca.

Yogyakarta, Oktober 2025

Aulia Irelin Sekar Remon

ABSTRAK

PENGARUH VARIASI ARUS DAN PERLAKUAN *ANNEALING* TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR MIKRO HASIL PENGELASAN GMAW PADA BAJA SM490

Oleh
Aulia Irelin Sekar Remon
NIM: 116210065
(Program Studi Sarjana Teknik Metalurgi)

Kualitas sambungan las berperan krusial dalam menunjang kekuatan dan keselamatan konstruksi, khususnya pada industri perkeretaapian. Baja SM490 merupakan material struktural yang umum digunakan karena memiliki kekuatan tinggi dan kemampuan las yang baik. Namun, proses pengelasan dapat menyebabkan perubahan struktur mikro dan sifat mekanik akibat pengaruh panas. Penelitian sebelumnya umumnya hanya mengkaji pengaruh variasi arus atau perlakuan panas secara terpisah. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh simultan variasi arus pengelasan dan perlakuan annealing terhadap sifat mekanik dan struktur mikro hasil pengelasan GMAW pada baja SM490. Metode yang digunakan adalah *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) dengan arus 210, 235, dan 260 A, serta perlakuan *annealing* pada suhu 635°C selama 4 jam. Pengujian meliputi uji tarik, uji kekerasan *Vickers*, dan pengamatan struktur mikro. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan arus menyebabkan pertumbuhan butir pada *weld metal* dan *Heat Affected Zone* (HAZ) akibat peningkatan panas input, sedangkan perlakuan *annealing* memperhalus struktur mikro dan menurunkan kekerasan melalui pelepasan tegangan sisa. Kekerasan tertinggi tercatat pada arus 210 A tanpa *annealing* (185 VHN), sedangkan kekuatan tarik tertinggi diperoleh pada arus 260 A tanpa *annealing* (542,6 MPa). Kombinasi terbaik diperoleh pada arus 235 A dengan perlakuan *annealing*, yang menghasilkan keseimbangan optimal antara kekuatan, keuletan, dan stabilitas struktur.

Kata kunci: *Annealing*, Arus Pengelasan, GMAW, Baja SM490, Kekerasan, Struktur Mikro, Kekuatan Tarik

ABSTRACT

THE INFLUENCE OF CURRENT VARIATION AND ANNEALING TREATMENT ON THE MECHANICAL PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE OF GMAW WELDED SM490 STEEL

By
Aulia Irelin Sekar Remon
NIM: 116210065
(*Metallurgical Engineering Undergraduated Program*)

The quality of welded joints plays a crucial role in ensuring the strength and safety of structural components, particularly in the railway industry. SM490 steel is commonly used due to its high strength and good weldability. However, welding processes can alter the microstructure and mechanical properties of the material due to heat input. Previous studies have mostly investigated the effects of welding current or post-weld heat treatment (PWHT) separately. Therefore, this study aims to simultaneously analyze the influence of welding current variation and annealing treatment on the mechanical properties and microstructure of GMAW-welded SM490 steel. The Gas Metal Arc Welding (GMAW) method was employed with current settings of 210, 235, and 260 A. Annealing was conducted at 635°C for 4 hours. The welded specimens were tested using tensile testing, Vickers hardness testing, and optical microscopy for microstructure observation. The results showed that higher welding currents led to grain growth in both the weld metal and heat-affected zone (HAZ) due to increased heat input. Annealing treatment refined the microstructure and reduced hardness by relieving residual stresses. The highest hardness value was recorded at 210 A without annealing (185 VHN), while the highest tensile strength was obtained at 260 A without annealing (542.6 MPa). The best balance of strength, ductility, and structural stability was achieved using a 235 A welding current combined with annealing treatment.

Keywords: Annealing, Welding Current, GMAW, SM490 Steel, Hardness, Microstructure, Tensile Strength

DAFTAR ISI

Halaman

HALAMAN JUDUL ..... **i**
LEMBAR PENGESAHAN ..... **ii**
PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH ..... **iii**
HALAMAN PERSEMBAHAN ..... **iv**
PRAKATA ..... **v**
ABSTRAK ..... **vi**
ABSTRACT ..... **vii**
DAFTAR ISI ..... **viii**
DAFTAR GAMBAR ..... **x**
DAFTAR TABEL ..... **xii**
DAFTAR LAMPIRAN ..... **xiii**
DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG ..... **xiv**
BAB I PENDAHULUAN **1**
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 3
1.3 Tujuan 3
1.4 Batasan Masalah 4
1.5 Luaran Penelitian 4
1.6 Manfaat Penelitian 4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI **5**
2.1 Tinjauan Pustaka 5
2.2 Landasan Teori 8
2.1.1. Baja 8
2.1.2. Baja SM490 9
2.1.3. Pengelasan 11
2.1.4. *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) 12
2.1.5. Pengujian NDT (*Non-Destructive Test*) 14
2.1.6. *Post Weld Heat Treatment* (PWHT) 18
2.1.7. Uji Tarik 20

2.1.8. Uji Kekerasan 21
2.1.9. Uji Struktur Mikro 22
BAB III METODOLOGI PENELITIAN 23
3.1 Metode Penelitian 23
3.2 Tahapan Penelitian dan Waktu 23
3.3 Alat dan Bahan Penelitian 24
3.4 Variabel Penelitian 31
3.5 Diagram Alir 32
3.6 Tahapan Penelitian 33
3.6.1. Persiapan Spesimen 33
3.6.2. Pengelasan *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) 33
3.6.3. Pengujian NDT (*Non-Destructive Test)* 34
3.6.4. Proses *Annealing* 35
3.6.5. Pemotongan Spesimen Uji 35
3.6.6. Pengujian Spesimen 35
BAB IV HASIL PENELITIAN 37
4.1 Hasil Pengelasan dan NDT 37
4.2 Data Hasil Uji Striktur Mikro 40
4.3 Data Hasil Uji Kekerasan 43
4.4 Data Hasil Uji Tarik 44
BAB V PEMBAHASAN 47
5.1 Analisis Hasil NDT dan Makro Terhadap Pengelasan SM490 47
5.2 Analisis Pengaruh Variasi Arus Terhadap Struktur Mikro 49
5.3 Analisis Pengaruh Variasi Arus Terhadap Uji Kekerasan 52
5.4 Analisis Pengaruh Variasi Arus Terhadap Uji Tarik 54
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN 57
6.1 Kesimpulan 57
6.2 Saran 57
DAFTAR PUSTAKA 59
LAMPIRAN 62

DAFTAR GAMBAR

Halaman

Gambar 2.1 (a) *Underframe* (b) *Bogie* 10
Gambar 2.2 *Gas Metal Arc Welding* (Natesan, 2023) 13
Gambar 2.3 Prinsip Kerja Pengujian *Penetrant Test* (Yunianto, 2023)..... 17
Gambar 2.4 Prinsip Kerja Pengujian *Ultrasonict Test* 17
Gambar 2. 5 Prinsip Kerja Pengujian *Magnetic Test* (Yunianto, 2023) 18
Gambar 3. 1 *Furnace* 24
Gambar 3. 2 Gerinda 24
Gambar 3. 3 Amperemeter 25
Gambar 3. 4 Mesin *Grinding* dan *Polishing* 25
Gambar 3. 5 Mesin Las *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) 26
Gambar 3. 6 Mesin *Bendsaw* 26
Gambar 3. 7 Mesin Uji Tarik 27
Gambar 3. 8 Mesin Uji Kekerasan 27
Gambar 3. 9 Mesin Uji Mikroskop Optik 28
Gambar 3. 10 Baja SM490 28
Gambar 3. 11 Gas Argon + CO_2 29
Gambar 3. 12 Elektroda 29
Gambar 3. 13 Autosol 30
Gambar 3. 14 HCl 30
Gambar 3. 15 HNO_3 31
Gambar 3. 16 *Flowchart* Penelitian 32
Gambar 3. 17 Proses Pemotongan Material 33
Gambar 3. 18 Proses Pengelasan GMAW 34
Gambar 4. 1 Hasil Proses Pengelasan (a) Arus 210 A (b) Arus 235 A (c) Arus 260 A 38
Gambar 4. 3 Hasil Uji NDT *Visual Test* 38
Gambar 4. 4 Hasil Uji NDT *Ultrasonic Test* 39
Gambar 4. 5 Hasil Uji NDT *Penetrant Test* 39

Gambar 4. 6 Hasil Uji NDT *Magnetic Test* 39
Gambar 4. 7 Struktur Mikro dengan Perlakuan *Non-Annealing* (a) Arus 210 A (b) Arus 235 A (c) Arus 260 A 41
Gambar 4. 8 Struktur Mikro dengan Perlakuan *Annealing* (a) Arus 210 A (b) Arus 235 A (c) Arus 260 A 42
Gambar 4. 9 Hasil Uji Tarik *Annealing* (a) Arus 210 A (b) Arus 235 A (c) Arus 260 A 45
Gambar 4. 10 Hasil Uji Tarik *Non-Annealing* (a) Arus 210 A (b) Arus 235 A (c) Arus 260 A..... 46
Gambar 5. 1 Hasil Pengujian NDT Pengelasan Baja SM490 (a) *Visual Test,* (b) *Ultrasonic Test,* (c) *Penetrant Test*, dan (d) *Magnetic Test*..... 47
Gambar 5. 3 Perbedaan Struktur Mikro pada Daerah Pengelasan..... 50
Gambar 5. 4 Grafik Hasil Uji Kekerasan..... 52
Gambar 5. 5 Grafik Hasil Tegangan Maksimum..... 55
Gambar 5. 6 Grafik Hasil Regangan..... 56

DAFTAR TABEL

Halaman

Tabel 2. 1 Penelitian Terdahulu 5

Tabel 2. 2 Keterkaitan Penelitian dengan Penelitian Terdahulu 8

Tabel 2. 3 Komposisi Baja SM490 10

Tabel 2. 4 Sifat Mekanik Baja SM490 10

Tabel 4. 1 Hasil Pengujian Kekerasan *Vickers Non-Annealing* 43

Tabel 4. 2 Hasil Pengujian Kekerasan *Vickers Annealing* 43

Tabel 4. 3 Hasil Pengujian Kekuatan Tarik 45

DAFTAR LAMPIRAN

Halaman

Lampiran A. *Welding Procedure Specification* (WPS) 63
Lampiran B. Data Hasil Uji Tarik 64
Lampiran C. Data Hasil Uji Kekerasan 76
Lampiran D. Perhitungan 78
Lampiran E. *Mill Test Certificate Baja SM490* 79
Lampiran F. *Mill Test Certificate Filler* ER 70S-6 80
Lampiran G. Standar ASTM E3 80
Lampiran H. Standar ASTM E92 82
Lampiran I. Standar ASTM E8 83
Lampiran J. Dokumentasi Kegiatan 84

DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG

SINGKATAN		Halaman
BM	*Base Metal*	2
EBW	*Electron Beam Welding*	14
FCAW	*Flux Core Arc Welding*	13
GMAW	*Gas Metal Arc Welding*	57
GTAW	*Gas Tungsten Arc Welding*	13
HAZ	*Heat Affected Zone*	66
LBW	*Laser Beam Welding*	14
MT	*Magnetic Test*	
NDT	*Non-Destructive Test*	47
OAW	*Oxy-Acytelene Arc Welding*	13
PT	*Penetrant Test*	18
PWHT	*Post Weld Heat*	12
SAW	*Submerged Arc Welding*	13
SMAW	*Shielded Metal Arc Welding*	12
UT	*Ultrasonic Test*	18
VHN	*Vickers Hardness Number*	57
VT	*Visual Test*	16
WPS	*Welding Procedure Specification*	10
LAMBANG		
I	Arus listrik (Ampere)	3
L	Panjang	22
P	Beban (kgf)	22
d	Diameter Jejak Indentasi (mm)	22
R	Hambatan listrik (Ohm)	2
t	Taktu arus mengalir (detik)	3
Q	Panas yang dihasilkan (Joule)	2

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Industri manufaktur modern, baja merupakan material utama yang digunakan dalam berbagai komponen struktural dan mekanikal karena sifatnya yang kuat, ulet, dan tahan terhadap keausan. Salah satu jenis baja yang banyak digunakan adalah baja SM490, termasuk dalam kategori baja karbon rendah yang memiliki keuletan yang tinggi. Hal tersebut, menjadikan baja SM490 sebagai pilihan utama dalam pembuatan komponen kereta api seperti *underframe* dan *bogie* (Prabawanto, 2018). Seiring dengan penggunaannya yang luas dalam industri manufaktur, terutama pada struktur yang membutuhkan sambungan permanen, penting untuk memahami bagaimana proses penyambungan seperti pengelasan dapat memengaruhi struktur mikro dan sifat mekanik material akibat paparan panas tinggi selama proses berlangsung. Salah satu metode yang banyak digunakan untuk menyambung baja karbon rendah adalah *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), karena mampu menghasilkan sambungan dengan penetrasi baik, efisiensi tinggi, dan distorsi minimal (Parmar, 2016).

Parameter pada proses GMAW meliputi arus listrik, tegangan listrik, dan laju gas pelindung sangat mempengaruhi hasil sambungan las. Variasi arus berperan penting dalam menentukan jumlah panas (*heat input*) yang diterima logam dasar dan daerah terpengaruh panas *Heat Affected Zone* (HAZ). Peningkatan arus menyebabkan peningkatan kedalaman penetrasi serta efek panas yang diterima logam, sehingga akan berpengaruh terhadap struktur mikro HAZ yang pada akhirnya akan berdampak terhadap sifat mekanis sambungan las, yang pada akhirnya memengaruhi kekerasan dan kekuatan tarik sambungan las (Al-saraireh, 2018). Sebaliknya, arus rendah memungkinkan solidifkasi terjadi lebih cepat pada daerah *weld metal*, struktur butir yang lebih halus, dan kekerasan yang lebih tinggi, tetapi dapat menurunkan keuletan sambungan.

Proses pengelasan baja karbon rendah, mikrostruktur sambungan las terbagi menjadi tiga zona utama, yaitu *Weld Metal* (WM), *Heat Affected Zone* (HAZ), dan *Base Metal* (BM). Zona *weld metal* merupakan hasil peleburan total yang kemudian mengalami pembekuan (Shafeek, 2024). HAZ mengalami perubahan struktur akibat panas tanpa mencair. Sementara itu, zona *base metal* tetap mempertahankan struktur aslinya. Proses pemanasan dan pendinginan tidak seragam pada ketiga zona ini menyebabkan terbentuknya tegangan sisa (*residual stress*) serta ketidakhomogenan sifat mekanik di sepanjang sambungan (Boumerzoug, 2010).

Dampak negatif pengelasan dapat dikurangi melalui perlakuan panas pasca pengelasan *Post Weld Heat Treatment* (PWHT) berupa *annealing* atau *stress relief annealing*. Proses ini dilakukan dengan memanaskan logam pada suhu di bawah titik kritis (A_1) untuk menghilangkan tegangan sisa, menormalkan kembali distribusi butir, dan meningkatkan homogenitas struktur mikro. Selama proses *annealing*, terjadi difusi atom dan rekristalisasi dimana pembentukan kembali butir-butir kristal baru yang lebih halus dan kekerasan logam di daerah HAZ dan *weld metal* berkurang. (Shafeek, 2024). Hubungan antara variasi arus dan perlakuan *annealing* menjadi sangat penting untuk dikaji, karena keduanya secara langsung memengaruhi pembentukan fasa, kekerasan, dan kekuatan tarik sambungan. Arus yang terlalu rendah dapat menyebabkan penetrasi tidak sempurna, sedangkan arus yang terlalu tinggi dapat menyebabkan *overheating* dan pertumbuhan butir kasar. Kombinasi parameter ini belum banyak dikaji secara mendalam, terutama untuk proses *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) yang memiliki karakteristik berbeda dari *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW). Dengan demikian, tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis secara bersamaan dampak kedua variabel tersebut terhadap karakteristik mekanik dan struktur mikro baja SM490 (Hardiansyah, 2018)

Oleh karena itu, pada penelitian ini akan dilakukan untuk menganalisis secara spesifik pengaruh variasi arus pengelasan GMAW dan proses *annealing* terhadap sifat mekanik, yaitu kekuatan tarik, kekerasan dan struktur mikro dari hasil pengelasan baja SM490. Arus listrik yang digunakan pada penelitian ini adalah 210, 235, dan 260 A mengacu pada *Welding Procedure Specification* (WPS). Hasil

penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar pertimbangan dalam menentukan parameter optimal dalam pengelasan, khususnya dalam pemilihan arus dan pelakuan pasca PWHT pada aplikasi nyata di industri manufaktur logam, khususnya di bidang perkeretaapian nasional. Penelitian ini memberikan pendekatan baru dalam menentukan parameter pengelasan yang optimal berdasarkan sifat mekanik dan struktur mikro sambungan las, pada penelitian ini studi pengaruh variasi arus pengelasan dan perlakuan *annealing* baja SM490, yang belum banyak dikaji secara mendalam dalam konteks pengelasa GMAW.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi arus 210, 235, 260 A terhadap struktur mikro pada daerah *weld metal*, HAZ, dan *base metal* hasil pengelasan baja SM490 yang diberi pelakuan *annealing* dan *non-annealing*?
2. Bagaimana pengaruh variasi arus 210, 235, 260 A terhadap kekuatan tarik hasil pengelasan baja SM490 yang diberi perlakuan *annealing* dan *non-annealing*?
3. Bagaiman pengaruh variasi arus 210, 230, 260 A terhadap sifat kekerasan hasil pengelasan baja SM490 yang diberi perlakuan *annealing* dan *non-annealing*?

1.3 Tujuan

Adapun tujuan penelitian adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis perubahan struktur mikro pada daerah *weld metal*, HAZ, dan *base metal* setelah dilakukan proses *annealing* dan *non-annealing* pada masing-masing variasi arus pengelasan.
2. Menganalisis pengaruh variasi arus pengelasan terhadap kekuatan tarik hasil pengelasan baja SM490 yang diberi perlakuan *annealing* dan *non-annealing*.
3. Menganalisis pengaruh sifat kekerasan hasil pengelasan baja SM490 yang diberi perlakuan *annealing* dan *non-annealing*, pada masing-masing variasi arus pengelasan, untuk menentukan kombinasi parameter yang menghasilkan kualitas las terbaik.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Material yang digunakan dalam penelitian ini dibatasi hanya pada jenis baja karbon rendah SM490 dengan ketebalan 12 mm.
2. Proses pengelasan yang digunakan adalah metode GMAW pada bagian *bogie freame* kereta api.
3. Variasi arus pengelasan terbatas pada arus 210, 235, 260 A. Dengan acuan WPS yang sudah ada.
4. Perlakuan panas yang dikaji dalam penelitian ini hanya meliputi proses *annealing* dengan temperatur 635°C.
5. Sifat mekanik yang diuji hanya mencakup kekuatan tarik dan kekerasan.
6. Pengamatan struktur mikro dibatasi pada daerah *weld metal*, HAZ, dan *base metal* menggunakan stuktur mikro.
7. Sampel yang diuji dibatasi hanya pada spesimen hasil pengelasan yang telah melewati prosedur pengelasan dan perlakuan panas sesuai parameter yang telah ditentukan.

1.5 Luaran Penelitian

Adapun luaran dari penelitian ini berupa rekomendasi parameter optimal yang dapat digunakan pada proses pengelasan baja SM490 dengan perlakuan *annealing* dan *non-annealing* untuk produksi kereta di PT INKA, serta data perbandingan sifat mekanik dan struktur mikro baja SM490 hasil pengelasan pada setiap variasi arus pengelasan.

1.6 Manfaat Penelitian

Dalam penelitian ini diharapkan dapat memberikan data eksperimental pengelasan baja SM490 yang bermanfaat bagi perusahaan dalam meningkatkan kualitas dan efisiensi produksi, menambah referensi ilmiah bagi perguruan tinggi, serta menjadi sarana pembelajaran dan portofolio riset berharga bagi mahasiswa di bidang teknik material dan pengelasan.

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Tinjauan pustaka membahas berbagai penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan topik yang diteliti. Tujuan utamanya adalah untuk memperlihatkan perkembangan pengetahuan di bidang tersebut serta mengidentifikasi aspek-aspek atau celah penelitian yang belum banyak dikaji. Dengan cara ini, posisi penelitian ini dapat dipetakan dalam konteks ilmiah yang lebih luas, sekaligus memperjelas kontribusi yang ingin diberikan melalui penelitian ini. Berikut ini beberapa penelitian terdahulu yang telah dilakukan untuk hal sejenis dapat dilihat pada Tabel 2.1 berikut:

Tabel 2. 1 Penelitian Terdahulu

No	Nama Peneliti	Tahun	Jurnal	Hasil Penelitian
1.	Hardiansyah, dkk.	2018	*An Effect of Electric Current Variations and Wire Feed Rate on Low Carbon Steels Toward Tensile Strength on The Result of Gas Metal Arc Welding*	Pada arus 120 A, *tensile strength* tertinggi dicapai sebesar 52,67 kgf/mm² dengan *wire feed rate* 4 m/min, namun menurun menjadi 48,33 kgf/mm² pada 5 m/min akibat pencairan tidak optimal. Pada arus 140A, *tensile strength* mencapai 49,85 kgf/mm² (4 m/min) dan meningkat ke 51,86 kgf/mm² (5 m/min), meski masih di bawah performa optimal 120 A–4 m/min. Sementara itu, arus 160A menghasilkan kekuatan tarik terendah, yakni 48,62 kgf/mm² (4 m/min) dan 48,92 kgf/mm² (5 m/min), menunjukkan sambungan las paling lemah dan tidak homogen.
2.	Al-saraireh	2018	*The Effect Of Current And*	Seiring peningkatan arus dari 100 A hingga 160 A, sifat

			Voltage On Mechanical Properties Of Low Carbon Steel Products	mekanik material menunjukkan tren penurunan yang konsisten. Pada 100 A diperoleh kondisi terbaik dengan kekerasan 151 HB, UTS 388 MPa, *yield strength* 246 MPa, impak 64 J, serta struktur mikro halus dengan butiran kecil. Namun, setiap kenaikan arus menyebabkan penurunan kekerasan, UTS, *yield strength,* dan energi impak, diikuti pertumbuhan butiran struktur mikro yang semakin kasar. Pada 160 A, sifat mekanik mencapai titik terendah dengan kekerasan 118 HB, UTS 368 MPa, *yield strength* 213 MPa, impak 30 J, serta struktur mikro kasar dengan *grain size* besar, menandakan material menjadi lebih lunak dan kurang tahan beban maupun benturan.
3.	Parmar, dkk.	2016	*Effect of Welding speed, Welding current, Arc voltage and Torch angle on Bead geometry & Bead hardness*	Pada arus 190 A, nilai kekerasan atau *bead hardness* tercatat sebesar 211 HV, yang merupakan nilai tertinggi dari semua variasi arus. Kombinasi arus 190 A dengan tegangan 18 V, kecepatan pengelasan 35 cm/menit, dan sudut obor 90° menghasilkan sambungan las yang paling keras dan kuat. Hal ini menunjukkan bahwa *heat input* masih dalam kondisi ideal cukup untuk mencairkan logam, tapi tidak berlebihan hingga merusak struktur mikro. Pada arus 220 A, nilai kekerasan mulai menurun. Penurunan ini disebabkan oleh peningkatan *heat input* yang lebih tinggi menyebabkan pertumbuhan butir yang membuat logam menjadi lebih lunak dan

				kurang tahan terhadap deformasi. Pada arus 250 A, nilai kekerasan paling rendah, terjadi karena *heat input* yang terlalu tinggi menyebabkan logam mencair terlalu luas atau *overmelting*, dengan pendinginan lambat.
4.	Syukran, dkk.	2020	*The Effect of Holding Time on Stress Relief Annealing Process to Hardness of Carbon Steel SA.106 Grade B After Welding*	Holding time 15 menit menghasilkan nilai kekerasan rata-rata terendah (61,39 HRC) pada BM, HAZ, dan WM, menunjukkan proses belum optimal mengubah struktur mikro. Holding time 30 menit meningkatkan kekerasan (rata-rata 62,97 HRC), sedangkan 45 menit memberikan nilai kekerasan rata-rata tertinggi dan paling seragam (65,13 HRC). Peningkatan waktu penahanan memperbaiki homogenitas dan meningkatkan kekerasan
5.	Boumerzoug	2010	*Effect of Welding on Microstructure and Mechanical Properties of an Industrial Low Carbon Steel*	Proses pengelasan pada baja karbon rendah (0,19% C) menyebabkan perubahan signifikan pada struktur mikro dan kekerasan material. Zona las dan HAZ menunjukkan nilai kekerasan tertinggi, yaitu 178–250 HV, disertai struktur mikro kasar berupa ferit besar, ferit Widmanstätten, dan perlit. Sementara itu, logam dasar memiliki struktur mikro lebih halus dengan butir ferit kecil. Pertumbuhan butir dan orientasi kristal mengikuti arah aliran panas, menunjukkan pengaruh termal tinggi selama pengelasan. Meskipun kekerasan meningkat di area las, struktur mikro yang kasar dapat menurunkan ketangguhan material.

Berikut ini merupakan keterikatan dengan penelitian terdahulu seperti pada Tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Keterkaitan Penelitian dengan Penelitian Terdahulu

Penelitian	Uji Tarik	Uji Kekerasan	Struktur Mikro	*Annealing*
An Effect of Electric Current Variations and Wire Feed Rate on Low Carbon Steels Toward Tensile Strength on The Result of GMAW				
The Effect of Current and Voltage on Mechanical Properties of Low Carbon Steel Products				
Effect of Welding Speed, Current, Arc Voltage and Torch Angle on Bead Geometry & Hardness				
The Effect of Holding Time on Stress Relief Annealing Process to Hardness of Carbon Steel SA.106 Gr. B After Welding				
Effect of Welding on Microstructure and Mechanical Properties of an Industrial Low Carbon Steel				
Aulia Irelin Sekar Remon – UPN "Veteran" Yogyakarta				

2.2 Landasan Teori

2.1.1. Baja

Baja adalah logam paduan yang memiliki besi (Fe) sebagai unsur utama dan karbon (C) sebagai unsur paduan terpenting. Kandungan karbon dalam baja umumnya berada pada rentang 0,008% hingga 2%. Dalam proses pembuatan baja, sejumlah

unsur lain selain karbon, seperti mangan (Mn), silikon (Si), dan krom (Cr), sering kali tetap terkandung karena sulit dihilangkan sepenuhnya selama proses peleburan dan pemurnian.

Baja karbon merupakan jenis baja paduan yang tersusun dari unsur besi (Fe) sebagai komponen utama dan karbon (C) sebagai unsur paduannya. Selama proses pembuatannya, baja ini juga dapat mengandung unsur-unsur kimia tambahan seperti sulfur (S), fosfor (P), silikon (Si), mangan (Mn), serta elemen lainnya yang ditambahkan untuk memperoleh sifat tertentu sesuai kebutuhan. Kandungan karbon pada baja karbon berkisar antara 0,2% hingga 2,14%, di mana unsur karbon tersebut berperan penting sebagai unsur pengeras yang meningkatkan kekuatan dan kekerasan struktur baja. Baja karbon dapat dibedakan atau diklasifikasi berdasarkan persentase kandungan unsur karbon yang terdapat di dalam komposisi kimianya, yaitu sebagai berikut (Agung Prayogi, 2019).

1. Baja Karbon Rendah (*Low Carbon Steel*)
   Baja karbon rendah adalah jenis baja yang mengandung kurang dari 0,3% karbon dalam strukturnya. Baja ini memiliki keuletan dan ketangguhan yang tinggi, namun kekerasan ketahanan aus yang rendah
2. Baja Karbon Sedang (*Medium Carbon Steel*)
   Baja karbon sedang memiliki kandungan karbon sebesar 0,3% – 0,59%, dan dibandingkan dengan baja karbon rendah, baja karbon ini memiliki sifat mekanis yang lebih kuat serta tingkat kekerasan yang lebih tinggi.
3. Baja Karbon Tinggi (*High Carbon Steel*)
   Baja karbon tinggi mengandung karbon sebesar 0,6% - 1,4%, dengan ketahanan panas yang baik, namun memiliki keuletan yang rendah, sehingga cenderung lebih getas dibandingkan jenis baja karbon lainnya.

2.1.2. Baja SM490

Baja SM490 adalah baja struktural karbon rendah yang memiliki kombinasi sifat mekanik baik sepertai kekuatan tinggi, ketangguhan, serta kemampuan las yang baik. Karena karakteristik tersebut, baja ini banyak digunakan dalam konstruksi kereta api, khususnya pada bagian *underframe* dan *bogie*. *Underframe* merupakan struktur bagian bawah dari gerbong kereta yang berfungsi sebagai fondasi utama

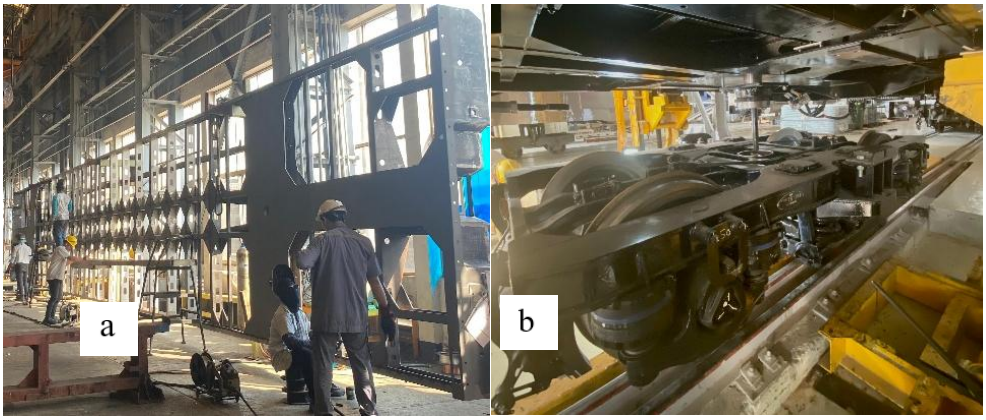
penyangga badan kereta (*carbody*), sementara *bogie* adalah rangka beroda yang terletak di bawah underframe dan berperan sebagai penghubung antara badan kereta dengan rel yang dapat dilihat pada Gambar 2.1. Baja SM490 tergolong dalam baja karbon rendah karena mengandung karbon (C) kurang lebih 0,20%, di mana baja karbon rendah umumnya memiliki kadar karbon di bawah 0,3% (Fatih, 2018). Karbon dalam baja berperan memberikan sifat keras, namun di sisi lain juga membuat material menjadi lebih rapuh atau getas. Selain itu, baja ini mengandung Mangan (Mn) kurang lebih 1,65%, yang berfungsi untuk meningkatkan ketahanan terhadap tekanan dan gesekan. Kandungan lainnya adalah Silikon (Si) kurang lebih 0,55%, yang dapat menambah kekerasan serta mempertajam struktur material baja. Pada baja SM490 dengan ketebalan ≤ 16 mm, nilai kekuatan luluh (*Yield Strength*) memiliki nilai ≥ 325 N/mm^2, dan nilai kekuatan tarik (*Tensile Strength*) antara 490-610 N/mm^2. Komposisi kimia dan sifat mekanik pada Baja SM490 dapat dilihat pada Tabel 2.3 – 2.4.

Tabel 2.3 Komposisi Kimia Baja SM490 (Bbn *Steel Plate*)

Grade Baja	Komposisi Kimia (%)				
	C	**Si**	**Mn**	**P**	**S**
SM490	≤0,20	≤0,55	≤1,65	≤0,035	≤0,035

Tabel 2. 4 Sifat Mekanik Baja SM490 (Bbn *Steel Plate*)

Sifat Mekanik	**Nilai**
Yield Strength	≥325 MPa
Tensile Strength	490-610 MPa



Gambar 2. 1 (a) *Underframe* (b) *Bogie*

2.1.3. Pengelasan

Pengelasan adalah proses penyambungan logam yang dilakukan dengan mencairkan bagian logam yang akan disambung menggunakan panas, tekanan, atau keduanya, dan biasanya disertai dengan logam pengisi. Dalam industri manufaktur kereta api, pengelasan digunakan secara luas dalam proses perakitan seperti pada pembuatan *bogie*, karena dapat menghasilkan sambungan yang kuat dan permanen, namun berpotensi menimbulkan tegangan sisa terutama di daerah HAZ (Prabawanto, 2018). Pengelasan memiliki jenis yang beragam sesuai dengan penggunaannya, seperti:

1. Pengelasan Busur Listrik (*Arc Welding*)
   - *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW)

     SMAW dilakukan dengan proses pengelasan yang memanfaatkan busur listrik antara elektroda berlapis fluks dan logam dasar untuk melelehkan serta menyatukan logam. Lapisan fluks menghasilkan gas pelindung dan terak yang mencegah oksidasi, sehingga menghasilkan sambungan las yang kuat. Metode ini populer karena peralatannya sederhana, fleksibel, dan cocok untuk berbagai jenis serta posisi pengelasan.
   - *Gas Metal Arc Welding* (GMAW)

     GMAW adalah proses pengelasan yang menggunakan kawat elektroda kontinu dan gas pelindung dari luar untuk melindungi logam cair dari kontaminasi udara, menghasilkan sambungan yang bersih dan efisien.
   - *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW)

     GTAW menggunakan elektroda tungsten tidak terumpan dan gas pelindung (biasanya argon) untuk menghasilkan las berkualitas tinggi dengan hasil yang halus, terutama pada logam tipis dan logam non-ferro.
   - *Flux Cored Arc Welding* (FCAW)

     FCAW mirip dengan GMAW, tetapi menggunakan kawat berinti fluks yang menghasilkan gas pelindung dan terak secara otomatis, cocok untuk pekerjaan luar ruangan atau material tebal.
   - *Submerged Arc Welding* (SAW)

SAW menggunakan busur listrik yang tersembunyi di bawah lapisan fluks granular, menghasilkan pengelasan dengan penetrasi dalam, efisiensi tinggi, dan percikan minimal, biasanya untuk pekerjaan industri besar.

2. Pengelasan Gas (*Gas Welding*)
   - *Oxy-Acetylene Welding* (OAW)

     OAW adalah proses pengelasan yang menggunakan nyala api hasil pembakaran gas asetilena dengan oksigen untuk melelehkan logam dan menyambungkannya, banyak digunakan karena peralatannya sederhana dan mudah dipindahkan.
   - *Oxy-Hydrogen Welding*

     OHW menggunakan campuran gas hidrogen dan oksigen sebagai sumber nyala api, menghasilkan panas tinggi dan nyala yang bersih, cocok untuk pengelasan logam tipis, perak, dan logam mulia lainnya.
3. *High-Energy Beam Welding*
   - *Electron Beam Welding* (EBW)

     EBW adalah proses pengelasan yang menggunakan berkas elektron berkecepatan tinggi dalam ruang hampa untuk melelehkan dan menyatukan logam dengan presisi tinggi, menghasilkan sambungan kuat dan dalam dengan distorsi minimal.
   - *Laser Beam Welding* (LBW)

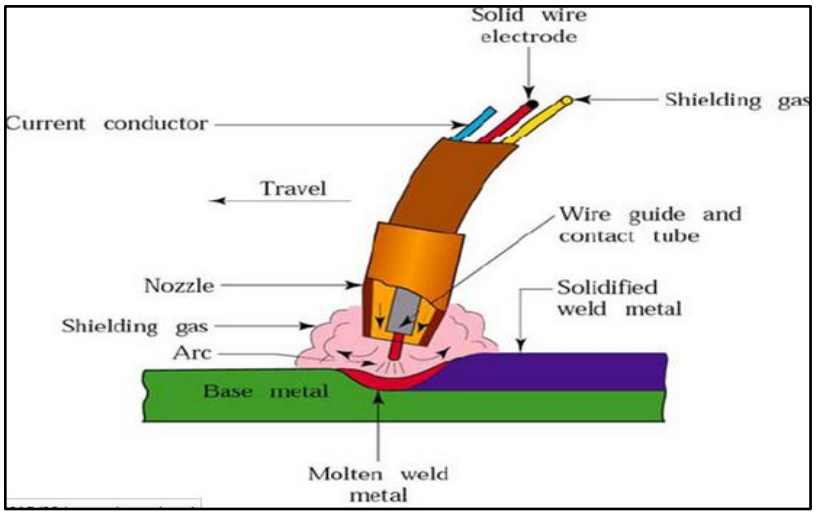
     LBW menggunakan sinar laser berenergi tinggi untuk melelehkan logam pada area sempit, memungkinkan pengelasan cepat, presisi tinggi, dan cocok untuk material tipis maupun komponen industri berteknologi tinggi.

Tujuan utama dari proses pengelasan adalah menghasilkan hasil las yang berkualitas. Namun, seringkali terdapat hasil pengelasan yang kurang optimal, seperti cacat las, kekuatan sambungan yang tidak memadai, dan sebagainya. Kualitas hasil pengelasan ini dipengaruhi oleh berbagai parameter, termasuk besar sudut kampuh, komposisi campuran elektroda, jenis material yang dilas, posisi pengelasan, dan faktor lainnya (Sopiyan, 2017).

2.1.4. *Gas Metal Arc Welding* (GMAW)

Gas Metal Arc Welding (GMAW) adalah proses pengelasan busur listrik yang menggunakan elektroda logam yang dapat mencair serta gas pelindung dari luar

untuk melindungi logam cair dari kontaminasi udara atau oksigen. Teknik ini sangat umum digunakan karena memiliki efisiensi tinggi, kontrol yang mudah, serta menghasilkan percikan yang minimal (Irfa'i, 2019). Proses GMAW umumnya dijalankan secara semi otomatis. Seiring dengan pesatnya perkembangan di dunia industri dan konstruksi, mulai dari pekerjaan ringan hingga berat, dibutuhkan metode pengelasan yang cepat serta menghasilkan kualitas tinggi. Oleh karena itu, GMAW menjadi salah satu alternatif yang tepat untuk memenuhi kebutuhan tersebut. (Kataren, 2019). Panas *input* (*heat input*) dalam proses pengelasan berperan penting dalam memengaruhi struktur fasa, ketangguhan material, kecepatan pendinginan, serta tingkat distorsi. Besarnya panas *input* juga menentukan laju pendinginan sambungan las, yang selanjutnya berdampak pada perubahan struktur mikro pada daerah las (Wibowo, 2016). Mekanisme pengelasan dapat dilihat pada Gambar 2.2 di bawah ini.



Gambar 2. 2 *Gas Metal Arc Welding* (Natesan, 2023)

Pada Gambar 2.2 menjelaskan tentang pengelasan GMAW dengan menggunakan busur listrik yang terbentuk antara kawat elektroda dan benda kerja. Kawat ini secara terus-menerus dimasukkan ke dalam busur dan mencair untuk membentuk las. Proses ini juga menggunakan gas pelindung seperti CO_2 atau campuran argon untuk menghindari reaksi dengan udara sekitar. Akibatnya pemanasan lokal yang tinggi, terbentuk HAZ yang rentan terhadap perubahan struktur mikro dan sifat mekanik (Salsabila, 2018). Beberapa parameter yang perlu diperhatikan yaitu:

1. Arus Listrik (*Welding Current*)

Menentukan jumlah panas yang dihasilkan saat pengelasan. Arus yang terlalu tinggi bisa menyebabkan penetrasi berlebih dan cacat, sedangkan arus terlalu rendah menyebabkan sambungan kurang kuat.

2. Tegangan Listrik (*Arc Voltage*)

   Bersama dengan arus, tegangan memengaruhi panjang busur dan lebar lelehan las. Tegangan yang terlalu tinggi dapat memperluas busur dan membuat lasan melebar, sedangkan tegangan terlalu rendah menghasilkan busur pendek dan lasan kasar.

3. Kecepatan Pengelasan (*Welding Speed*)

   Kecepatan mempengaruhi bentuk dan penetrasi las. Pengelasan terlalu cepat bisa menyebabkan kurang leleh, sedangkan terlalu lambat dapat menyebabkan panas berlebih dan cacat.

4. Kecepatan Umpan Kawat (*Wire Feed Speed*)

   Mengontrol jumlah logam pengisi yang masuk ke kolam las. Harus disesuaikan dengan arus agar tidak terjadi kawat menggumpal atau tidak terbakar sempurna.

5. Jenis dan Laju Aliran Gas Pelindung (*Shielding Gas Flow Rate*)

   Gas pelindung campuran Ar + CO_2 mencegah kontaminasi dari udara. Aliran yang tidak stabil dapat menyebabkan porositas atau cacat permukaan.

6. Jarak *Nozzle* ke Material (*Stick Out*)

   Jarak antara ujung kawat dan permukaan benda kerja memengaruhi stabilitas busur dan transfer logam. Jarak terlalu pendek atau terlalu panjang dapat mengganggu kualitas pengelasan.

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

Non-Destructive Test (NDT) merupakan teknik pemeriksaan yang bertujuan mengevaluasi kualitas material atau sambungan las tanpa merusak bentuk maupun fungsi aslinya. Metode ini sangat penting dalam memastikan bahwa komponen yang digunakan memenuhi standar, seperti yang diatur dalam AWS atau ASME. Berbagai metode NDT yang umum digunakan meliputi *penetrant testing, magnetic testing,* dan *ultrasonic testing*, yang masing-masing memiliki kemampuan mendeteksi cacat di permukaan maupun di dalam material (Tito, 2017). Kelebihan NDT adalah mampu mendeteksi cacat secara cepat dan akurat tanpa mengurangi

kekuatan komponen, sehingga metode ini banyak digunakan pada industri perminyakan, penerbangan, dan konstruksi yang membutuhkan keandalan tinggi. NDT sangat relevan diterapkan dalam proses pengelasan karena mampu mendeteksi cacat seperti retakan, pori-pori, atau rongga yang dapat mempengaruhi kekuatan sambungan (Ratna, 2022). Selain untuk mendeteksi cacat, NDT juga berperan penting dalam proses *quality control* selama tahap produksi maupun perawatan (*maintenance*) komponen. Melalui pemeriksaan berkala menggunakan NDT, potensi kegagalan komponen dapat diidentifikasi lebih awal sehingga perbaikan dapat dilakukan sebelum terjadi kerusakan fatal. Pengujian dilakukan secara bertahap dengan empat metode utama, yaitu *visual test, magnetic test, penetrant test* dan *ultrasonic test*, sesuai prosedur inspeksi dan standar yang berlaku.

a. *Visual Test* (VT)

   Pengecekan visual ini dilakukan sebelum dan sesudah proses pengelasan. Sebelum pengelasan, dilakukan *fit-up inspection* untuk memeriksa kesesuaian jarak antar sambungan (*root gap*) menggunakan alat seperti *welding taper gaunge* dan *mal gap.* Setelah pengelasan, inspeksi dilakukan untuk memeriksa permukaan sambungan apakah terdapat cacat seperti *undercut, underfill, spatter*, atau ketidaksesuaian bentuk. Alat bantu yang digunakan antara lain *welding gauge cambridge* untuk mengukur ukuran kaki las, *multipurpose gauge* untuk ketebalan leher las, dan *taper gauge* untuk jarak akar sambungan. Jika ditemukan cacat, daerah tersebut akan ditandai oleh *welding inspector* dengan simbol W (*welding* ulang), G (gerinda), R (*reamer*), dan SS (*spatter*). Penandaan ini penting sebagai acuan perbaikan oleh *welder,* berikut penjelasan pada tiap simbol tersebut:

   1. W (*welding* ulang)

      Simbol W menunjukkan bahwa area las mengalami cacat serius yang memerlukan *welding* ulang atau pengelasan kembali. Cacat seperti retak, porositas besar, atau tidak adanya fusi yang sempurna biasanya menjadi alasan utama. Bagian ini harus digerinda atau dibersihkan terlebih dahulu sebelum dilakukan pengelasan ulang agar sambungan baru dapat merekat kuat dan hasil las menjadi lebih baik.

2. G (gerinda)

   Simbol G berarti area tersebut perlu dilakukan proses gerinda untuk menghaluskan permukaan atau menghilangkan cacat ringan seperti percikan las, tonjolan, atau ketidakteraturan pada hasil pengelasan. Proses ini membantu memperbaiki tampilan serta memastikan permukaan las sesuai dengan standar kualitas yang ditentukan.

3. R (*reamer*)

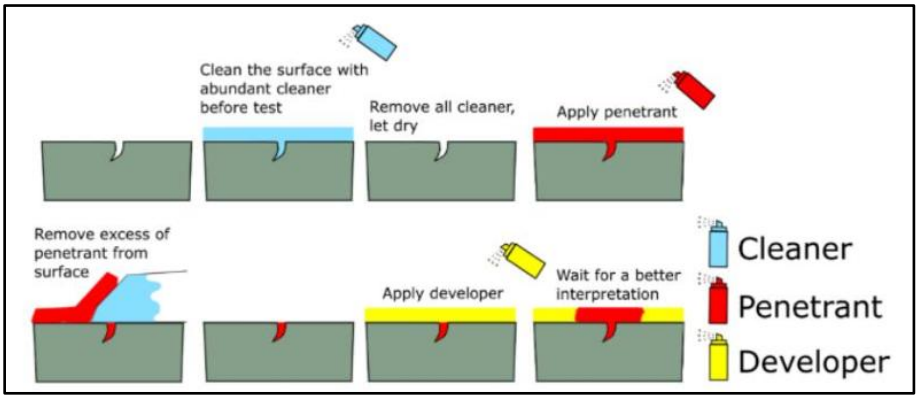
   Simbol R menandakan perlunya proses *reamer*, yaitu pelebaran atau perataan kembali pada lubang atau bagian tertentu yang tidak sesuai ukuran akibat proses pengelasan. Tujuannya agar dimensi sesuai dengan spesifikasi gambar kerja dan komponen dapat dirakit dengan presisi yang baik.

4. SS (*spatter*)

   Simbol SS digunakan untuk menunjukkan adanya *spatter* atau percikan logam kecil yang menempel di sekitar area las. Meskipun tidak memengaruhi kekuatan sambungan secara signifikan, *spatter* perlu dibersihkan agar permukaan logam lebih rapi, estetis, dan siap untuk proses *finishing* selanjutnya seperti pengecatan atau pelapisan.

b. Penetrant Test (PT)

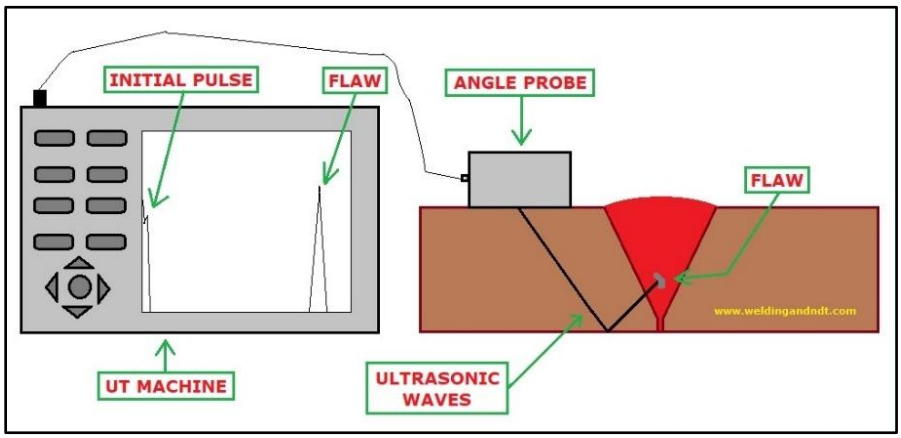
Metode ini digunakan untuk mendeteksi cacat halus seperti retakan mikro, pori, atau kebocoran di permukaan dengan memanfaatkan kapilaritas cairan. Langkahnya dimulai dengan pembersihan permukaan menggunakan *cleaner*, lalu disemprotkan *penetrant* dan didiamkan selama 7-10 menit (*dwell time*) agar cairan dapat meresap ke dalam cacat. Setelah itu, permukaan dibersihkan kembali secara hati-hati agar *penetrant* yang masuk ke cacat tidak ikut hilang. Terakhir, disemprotkan *developer* yang berfungsi menarik *penetrant* keluar dari rongga cacat, sehingga terbentuk pola indikasi. Hasil indikasi bisa berupa cacat *rounded* atau *linier*, dan ditandai oleh operator untuk diperbaiki. Berikut gambar mekanisme pengujian *penetrant test* ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.3 Prinsip Kerja Pengujian *Penetrant Test* (Yunianto, 2023).

c. *Ultrasonic Test* (UT)

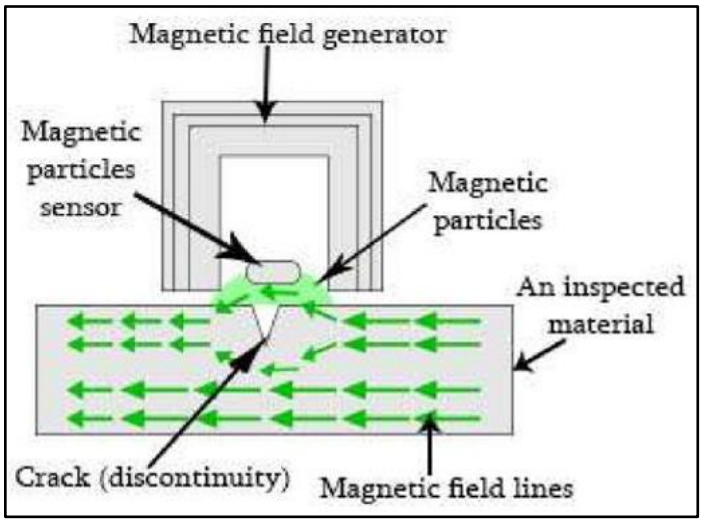
Ultrasonic test (UT) digunakan untuk mendeteksi cacat internal yang tidak dapat dilihat secara langsung. Metode ini berkerja berdasarkan pantulan gelombang ultrasonik. *Prope ultrasonic* digunakan untuk mengirim dan menerima gelombang, dibantu oleh *couplant* (gel atau minyak) yang menghilangkan celah udara antara *prope* dan permukaan logam. Terdapat dua jenis *prope*: normal (0°) untuk inspeksi lurus dan *angle beam* (45°, 60°, 75°) untuk area yang sulit dijangkau. Pantulan gelombang yang diterima ditampilkan dalam bentuk grafik di *ultrasonic flaw detector*. Jika terdapat perubahan gelombang abnormal atau nilai dB rating di atas batas standar, maka bagian tersebut ditandai sebagai cacat. Batas toleransi cacat umumnya adalah dB rating masih di atas 8. Berikut gambar mekanisme pengujian *ultrasonic test* ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.4 Prinsip Kerja Pengujian *Ultrasonict Test* (Anonim)

d. *Magnetic Test* (MT)

Pengujian ini bertujuan untuk mendeteksi cacat di permukaan atau dekat permukaan menggunakan prinsip kebocoran *fluks* magnetik. Proses dimulai dengan menyemprotkan *white contrast paint* pada permukaan logam untuk memberikan kontras visual, lalu diberikan gaya magnet dari elektromagnet atau magnet permanen. Kemudian, disemprotkan *black magnetic particle oil.* Jika terdapat cacat, partikel hitam akan berkumpul dan membentuk pola yang menunjukkan jenis cacat *rounded* yang berbentuk titik atau lonjong dan *linier* yang berbentuk garis. Pengujian ini efektif, cepat, dan tidak memerlukan peralatan kompleks, namun interpretasi cacat harus dilakukan oleh operator yang berpengalaman. Berikut ilustrasi pengujian *Magnetic Test* ditunjukkan pada Gambar 2.5



Gambar 2. 5 Prinsip Kerja Pengujian *Magnetic Test* (Yunianto, 2023)

2.1.6. *Post Weld Heat Treatment* (PWHT)

Post Weld Heat Treatment (PWHT) merupakan proses perlakuan panas pasca pengelasan yang dilakukan dengan memanaskan logam hingga temperatur tertentu di bawah titik transformasi, menahannya selama waktu tertentu, kemudian mendinginkannya secara terkontrol. Tujuan utamanya adalah mengurangi atau menghilangkan tegangan sisa akibat siklus panas pengelasan yang dapat menyebabkan peningkatan kekerasan namun penurunan ketangguhan pada material. Selain itu, PWHT juga berfungsi memperbaiki sifat mekanis seperti

keuletan, menurunkan tegangan tarik, memperhalus ukuran butir, dan mencegah distorsi maupun retak pada sambungan las (Yustiasih Purwaningrum, 2006).

Variasi suhu pada PWHT dapat memengaruhi kehalusan struktur mikro di daerah *weld metal*, HAZ, dan *base metal*, serta mampu mengurangi kegetasan akibat tegangan sisa, sehingga sifat mekanik material kembali mendekati kondisi awal (Sawaldi, 2019). Dengan pengaturan suhu dan waktu penahanan yang tepat, PWHT dapat mencegah pertumbuhan butir berlebih yang berpotensi menurunkan kekuatan material. Perlakuan ini menjadi sangat penting pada baja konstruksi seperti SM490, karena mampu meningkatkan ketahanan sambungan dan umur pakai komponen. Beberapa jenis PWHT yang umum digunakan antara lain:

1. *Full Annealing*

   Full annealing adalah salah satu jenis perlakuan panas yang dilakukan dengan cara memanaskan logam hingga suhu di atas titik kritisnya, lalu mempertahankan suhu tersebut selama waktu tertentu sebelum didinginkan secara perlahan di dalam tungku. Tujuan utama dari proses ini adalah untuk melunakkan logam dan mengurangi kekerasan, sehingga logam menjadi lebih mudah dibentuk atau dikerjakan (Weriono, 2018).

2. *Stress Relief Annealing*

   Stress relief annealing merupakan salah satu metode perlakuan panas yang bertujuan untuk mengurangi tegangan sisa yang timbul akibat proses permesinan. Tegangan ini dapat menyebabkan peningkatan kekerasan logam sehingga berpotensi memicu terjadinya retak pada bagian yang mengalami pengerjaan dingin atau proses pemesinan. Melalui proses pemanasan pada suhu tertentu dan penahanan waktu yang terkontrol, metode ini dapat menurunkan kekerasan serta meningkatkan keuletan material, sehingga logam menjadi lebih tahan terhadap patah atau getas (Rudiyanto, 2022).

   Proses *stress relief annealing* memiliki prinsip kerja yang mirip dengan *full annealing*, hanya saja suhu yang digunakan tidak mencapai temperatur kritis A1. Pemilihan temperatur dan waktu penahanan dalam proses ini ditentukan oleh jenis material spesimen yang akan diberi perlakuan panas. Untuk paduan baja rendah dapat digunakan temperatur 550°C - 650°C

sedangkan untuk baja paduan tinggi menggunakan temperatur 600°C - 750°C. Pemanasan dilakukan di bawah batas suhu maksimum material untuk menghindari oksidasi berlebih yang dapat menurunkan ketahanan korosi, diikuti pendinginan perlahan agar tegangan termal baru tidak terbentuk (Harahap, 2017).

3. *Normalizing*

   Normalizing adalah salah satu metode perlakuan panas (*heat treatment*) yang dilakukan dengan cara memanaskan baja hingga mencapai suhu austenit atau di atas titik kritisnya, kemudian didinginkan di udara terbuka hingga suhu kamar. Proses ini bertujuan untuk menghasilkan struktur mikro austenit yang seragam sebelum terjadi pendinginan. Selama proses pendinginan, struktur mikro material akan berubah, biasanya menjadi ferit dan perlit yang lebih halus dan merata. Perubahan ini dapat memperbaiki sifat mekanik material, seperti meningkatkan keuletan, memperbaiki kekuatan, dan mengurangi tegangan sisa, sekaligus menghasilkan struktur mikro yang lebih stabil dan homogen (Renita, 2021).

4. *Tempering*

   Tempering adalah salah satu proses perlakuan panas (*heat treatment*) yang dilakukan setelah logam mengalami pengerasan (*quenching*), yaitu pendinginan cepat dari suhu austenit. Proses ini dilakukan dengan cara memanaskan kembali logam pada suhu di bawah titik kritis, lalu menahannya selama waktu tertentu, dan kemudian didinginkan secara terkendali, biasanya di udara. Tujuan dari *tempering* adalah untuk mengurangi kerapuhan yang terjadi akibat proses *quenching*, serta meningkatkan keuletan dan stabilitas struktur mikro tanpa menghilangkan seluruh kekerasan yang sudah diperoleh. Dengan kata lain, tempering bertujuan menyeimbangkan antara kekuatan dan keuletan agar material tidak mudah retak saat digunakan dalam aplikasi struktural.

2.1.7. Uji Tarik

Uji tarik adalah metode pengujian yang digunakan untuk mengetahui seberapa kuat dan tahan suatu material terhadap gaya tarik. Kekuatan tarik material dapat diukur ketika gaya yang diberikan sejajar dengan sumbu utama benda uji, sehingga

menghasilkan beban tarik yang lurus dan merata (Kataren, 2019). Uji Tarik bertujuan untuk mengetahui kekuatan terik maksimum material serta titik luluh dan elongasi. Pada baja *structural* seperti SM490, hasil uji tarik sangat penting untuk mengetahui batas beban maksimal sebelum mengalami defiormasi plastis atau parah (Fatih, 2018). Pengujian tarik dapat menghasilkan data-data berikut ini:

1. Kekuatan Tarik

   Kekuatan tarik adalah tegangan maksimum yang mampu ditahan oleh suatu material sebelum akhirnya putus saat dikenai beban tarik. Nilai ini menunjukkan seberapa kuat material menahan gaya tarik secara keseluruhan.

   $$\sigma = \frac{P}{A} \quad \text{..... (2.1)}$$

   Dimana:

   σ = Tegangan tarik (MPa)

   P = Beban (N)

   A = Luas penampang yang dibebankan (mm^2)

2. Kekuatan Luluh

   Kekuatan luluh adalah batas tegangan saat material mulai mengalami deformasi plastis permanen, yaitu perubahan bentuk yang tidak kembali ke bentuk semula meskipun beban dihilangkan.

3. Keuletan (% Elongasi)

   Keuletan menunjukkan kemampuan material untuk meregang sebelum patah. Nilainya dinyatakan dalam persentase pertambahan panjang spesimen setelah uji tarik.

   $$\text{Elongasi (\%)} = \frac{L_f - L_0}{L_0} \times 100 \quad \text{..... (2.2)}$$

   Dimana :

   L_f = Panjang akhir setelah ditarik

   L_0 = Panjang awal sebelum ditarik

2.1.8. Uji Kekerasan

Uji kekerasan dilakukan untuk mengukur ketahuan suatu material terhadap deformasi plastis lokal. Metode *Vickers Hardness Test* biasa digunakan pada baja structural, termasuk SM490, karena memberikan hasil cepat dan akurat. Nilai

kekerasan dapat dipengaruhi panas seperti *annealing* dan *tempering* (Kurniawan, 2014). Nilai *Vickers Hardness Number* (VHN) dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$\text{VHN} = \frac{2P\left(\frac{\theta}{2}\right)}{d^2} = \frac{1{,}854\text{P}}{d^2} \quad \text{.....(2.3)}$$

Dimana :

VHN : Nilai kekerasan *Vickers* (kgf/mm^2)

P : Beban (kgf)

d : Diameter Jejak Indentasi (mm)

1,854 : Ketetapan besar sudut 136° pada sudut Indentor Piramida Intan

2.1.9. Uji Struktur Mikro

Uji mikrografi merupakan metode pengujian visual pada material yang bertujuan untuk memperoleh gambar yang menunjukkan struktur mikro dari logam atau paduannya (Kataren, 2019). Uji struktur mikro dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik untuk mengamati fasa-fasa mikro dalam baja seperti ferrit, perlit, bainit, atau martensit. Perubahan temperature dan *holding time* selama perlakuan panas sangat memengaruhi ukuran dan distribusi butiran mikrostruktur ini, yang pada akhirnya memengaruhi kekuatan, kekerasan, dan ketangguhan baja (Azmy & Daniel Saragih, 2020).

BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Metode analisis data dalam penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dan semi kualitatif, dengan fokus pada pengolahan data hasil eksperimen. Analisis dilakukan terhadap efek proses *annealing* pada hasil pengelasan baja SM490 dengan variasi arus pengelasan. Data yang dikumpulkan bersifat numerik dan mencakup hasil dari uji tarik, uji kekerasan, serta pengamatan struktur mikro, yang kemudian diolah untuk mengetahui hubungan antara perlakuan *annealing*, variasi arus, dan perubahan sifat material.

3.2 Tahapan Penelitian dan Waktu

Penelitian ini dilaksanakan di PT Industri Kereta Api (Persero), Madiun – Jawa Timur, khususnya di bagian Divisi Pengelolaan Kualitas dan Dukungan Produk (PKDP), yang berada di Jalan Yos Sudarso 71, Madiun Lor, Kec. Mangunharjo, Kota Madiun, Jawa Timur. Adapun waktu penelitian yang akan dilakukan dapat dilihat pada Tabel 3.1 berikut.

Tabel 3. 1 Jadwal Penelitian

Tahapan Penelitian	**JADWAL PENELITIAN**															
	2025															
	Juni				**Juli**				**Agustus**				**September**			
Minggu ke	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Tahapan Persiapan																
Studi Literatur																
Pembuatan Proposal																
Seminar Proposal																
Pengambilan Data																
Percobaan penelitian																
Pengambilan Data																
Analisis Data																
Penulisan Skripsi																

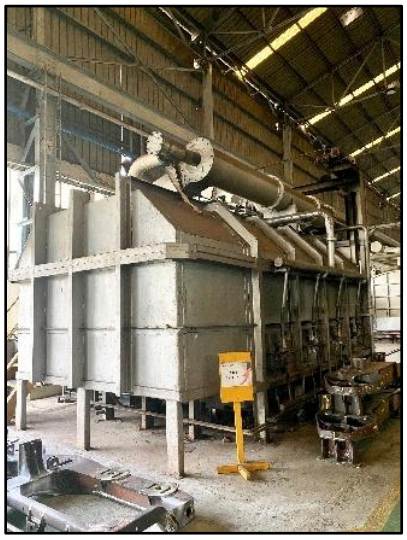
3.3 Alat dan Bahan Penelitian

1. Alat

Adapun peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. *Furnace*

   Furnace pada penelitian ini digunakan untuk proses pemanasan spesimen dalam perlakuan panas *stress relief annealing*, dan alat yang digunakan dapat terlihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3. 1 *Furnace*

2. Gerinda

   Proses penghalusan dan perataan permukaan spesimen setelah dilakukan pemotongan ditunjukkan pada Gambar 3.2.

Gambar 3. 2 Gerinda

3. *Amperemeter*

   Amperemeter pada penelitian ini digunakan untuk mengukur besar arus listrik selama proses pengelasan, dan peralatan tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.3.

Gambar 3. 3 *Amperemeter*

4. Mesin *grinding* dan *polishing*

   Dalam penelitian ini, mesin *grinding* dan *polishing* digunakan untuk menghaluskan serta memoles permukaan spesimen, dan peralatan tersebut ditampilkan pada Gambar 3.4.

Gambar 3. 4 Mesin *Grinding* dan *Polishing*

5. Mesin Las GMAW

   Alat las yang digunakan dalam penelitian ini berupa mesin las GMAW. Mesin las GMAW tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.5.

Gambar 3. 5 Mesin Las *Gas Metal Arc Welding* (GMAW)

6. Mesin *Bendsaw*

   Untuk memperoleh spesimen dengan ukuran sesuai kebutuhan, digunakan mesin *bandsaw* sebagai alat pemotong material. Mesin *bandsaw* yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.6.

Gambar 3. 6 Mesin *Bendsaw*

7. Mesin Uji Tarik

   Pengujian kekuatan tarik pada material hasil sambungan las dilakukan menggunakan mesin uji tarik, dan alat yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.7.

Gambar 3. 7 Mesin Uji Tarik

8. Mesin Uji Kekerasan

   Pengujian kekerasan material dilakukan menggunakan mesin *vickers hardness,* dan alat yang digunakan dalam penelitian ini ditampilkan pada Gambar 3.8.

Gambar 3. 8 Mesin Uji Kekerasan

9. Mesin Uji Mikroskop Optik

   Spesimen stuktur mikro diamati menggunakan mikroskop optik, dimana peralatan mikroskop optik yang dipakai dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.9.

Gambar 3. 9 Mesin Uji Mikroskop Optik

2. Bahan

1. Baja SM490

   Spesimen yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja SM490. Baja SM490 yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.10.

Gambar 3. 10 Baja SM490

2. Gas Argon 82% + CO_2 18%

   Gas pelindung yang digunakan dalam penelitian ini adalah campuran Argon 82% dan CO_2 18%, yang berfungsi menjaga stabilitas busur dan melindungi logam cair dari oksidasi. Kombinasi gas tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.11.

Gambar 3. 11 Gas Argon + CO_2

3. Elektroda

   Elektroda yang digunakan dalam penelitian ini adalah kawat las ER70S-6, yang berfungsi sebagai logam pengisi pada proses pengelasan GMAW. Jenis elektroda tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.12.

Gambar 3. 12 Elektroda

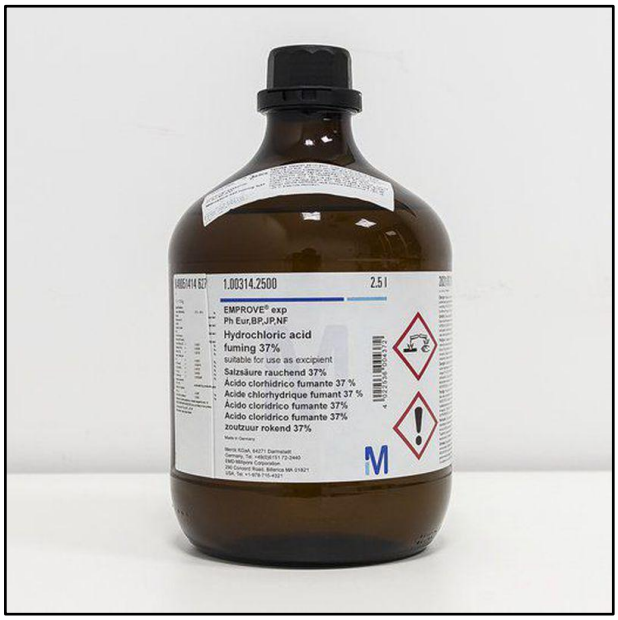
4. Autosol

   Autosol adalah bahan yang digunakan untuk menghaluskan dan memoles permukaan spesimen sebelum dilakukan pengujian struktur mikro. Tampilan Autosol dapat dilihat pada Gambar 3.13.

Gambar 3. 13 Autosol

5. HCL

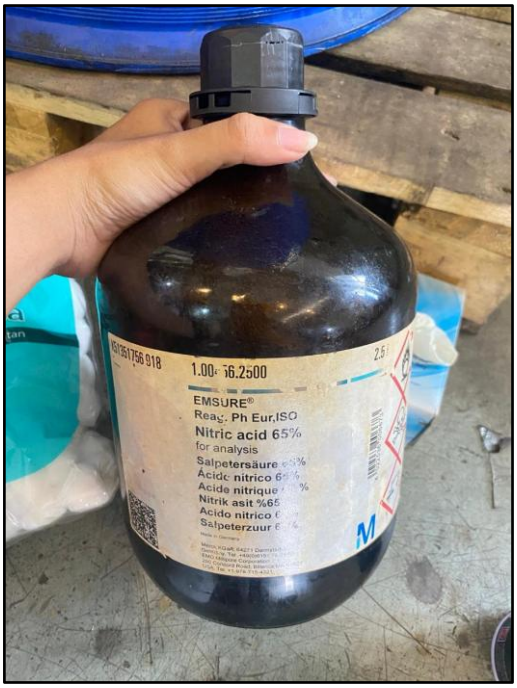
   HCl digunakan sebagai campuran larutan etsa untuk menampakkan struktur mikro spesimen agar terlihat jelas di mikroskop optik. Pada penelitian ini, HCl ditunjukkan pada Gambar 3.14.



Gambar 3. 14 HCl

6. HNO_3

   HNO_3 digunakan sebagai campuran larutan etsa untuk menampakkan struktur mikro spesimen agar terlihat jelas di mikroskop optik. Bentuk HNO_3 ditunjukkan pada Gambar 3.15.



Gambar 3. 15 HNO_3

3.4 Variabel Penelitian

Penelitian ini menggunakan tiga jenis variabel, yaitu:

1. Variabel Bebas

   Variabel bebas pada penelitian ini yaitu variasi arus pengelasan GMAW sebesar 210, 235, dan 260 A, serta perlakuan PWHT (*annealing dan non-annealing*).

2. Variabel Tetap

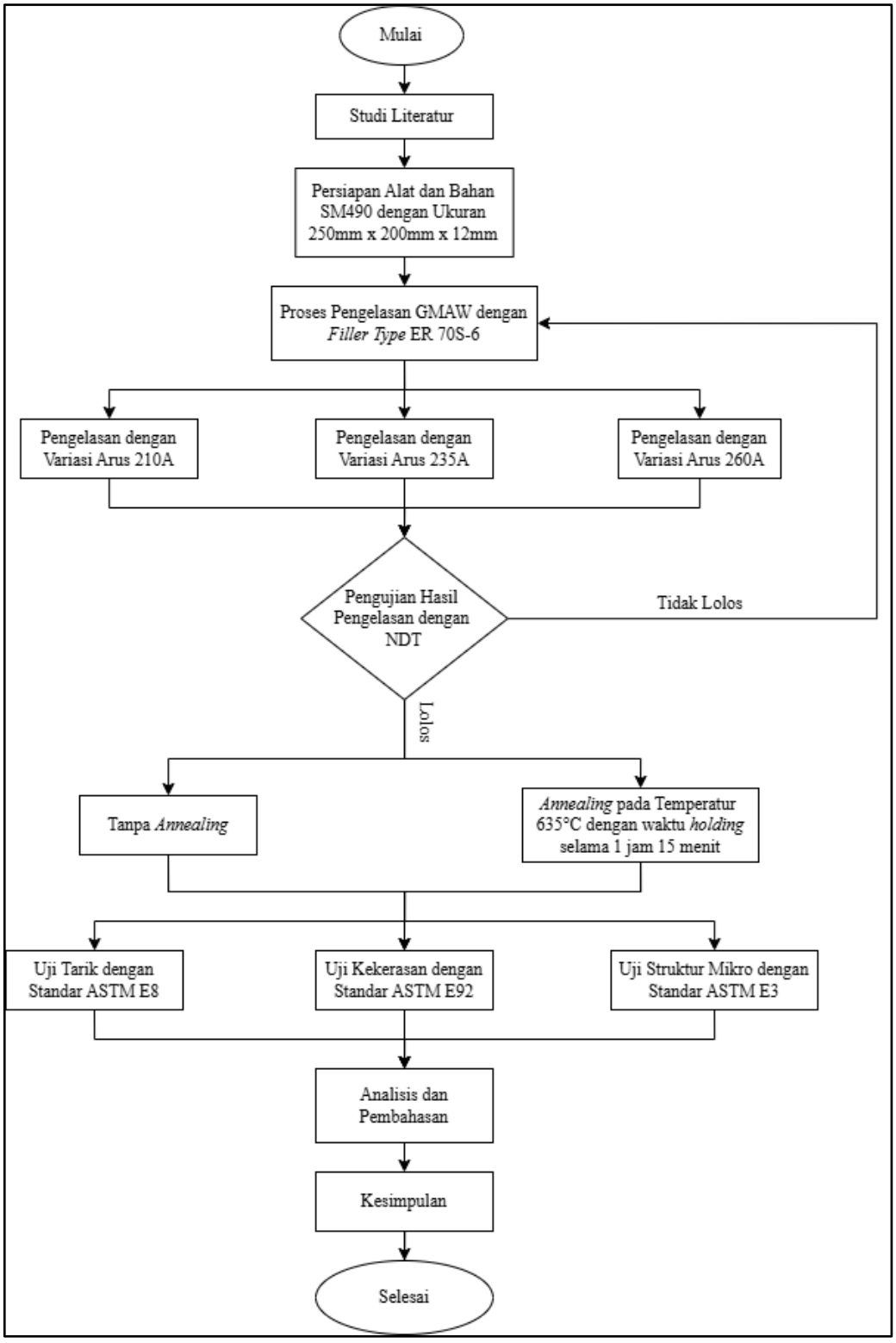
   Variabel tetap yaitu penggunaan material baja SM490, metode pengelasan GMAW dengan kawat las dan gas pelindung yang sama sesuai *Welding Procedure Specification* (WPS), posisi pengelasan yang seragam, suhu *annealing* 635°C selama 4 jam dengan pendinginan secara perlahan di dalam *furnace*.

3. Variabel Terikat

   Variabel terikat meliputi sifat mekanik yaitu kekuatan tarik dan kekerasan, serta struktur mikro pada HAZ, *base metal* dan *weld metal*, serta metode pengujian yang meliputi pengujian NDT untuk memastikan kualitas sambungan las.

3.5 Diagram Alir

Adapun diagram alir yang akan dilakukan pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.16 berikut.



Gambar 3. 16 *Flowchart* Penelitian

3.6 Tahapan Penelitian

Penelitian ini dimulai dengan studi literatur dan observasi untuk memahami masalah pada sifat mekanik dan struktur mikro hasil pengelasan baja SM490. Setelah persiapan alat dan bahan, pelat SM490 dilas dengan pengelasan GMAW, kemudian setelah pengelasan dilakukan pengujian NDT untuk memastikan tidak adanya cacat internal atau permukaan pada material, lalu material yang lolos pada pengujian NDT diberi perlakuan panas *annealing* dan *non-annealing*. Selanjutnya plat dipotong sesuai standar pengujian masing-masing dan dilakukan uji kekerasan, uji struktur mikro, dan uji tarik. Hasil dari ketiga pengujian dianalisis untuk menilai pengaruh *annealing* terhadap sifat mekanik dan struktur mikro, kemudian disimpulkan untuk menjawab tujuan penelitian.

3.6.1. Persiapan Spesimen

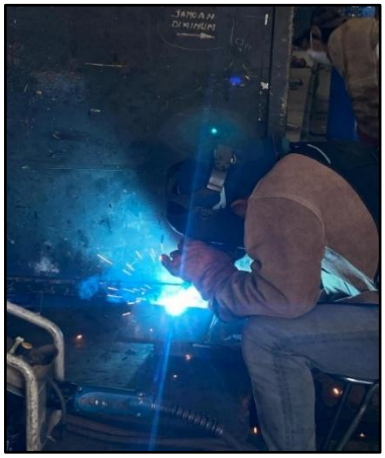
Material baja SM490 disiapkan dalam bentuk plat dengan ukuran 250 mm x 200 mm x 12 mm, yang nantinya akan dilakukan pengelasan GMAW dan proses *annealing*, kemudian nantinya dipotong sesuai dimensi spesimen uji berdasarkan standar ASTM E8, ASTM E92, dan ASTM E3. Proses pemotongan material dapat dilihat pada Gambar 3.17.

Gambar 3. 17 Proses Pemotongan Material

3.6.2. Pengelasan *Gas Metal Arc Welding* (GMAW)

Proses pengelasan dilakukan pada pelat baja SM490 menggunakan metode *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) dengan parameter pengelasan yang seragam untuk memastikan kualitas sambungan yang konsisten sesuai dengan *Welding Procedure Specification* (WPS). Pengelasan dilakukan menggunakan kawat las ER70S-6

berdiameter 1,2 mm dengan polaritas DC+. Untuk *root pass*, arus yang digunakan seragam berkisar 120–150 A dengan tegangan 18–20 V. Sedangkan untuk *filling* dan *cap pass*, menggunakan arus bervariasi yaitu 210, 235 dan 260 A dengan tegangan seragam 26–30 V. Setelah pengelasan selesai, spesimen didinginkan secara alami di udara terbuka tanpa pendinginan paksa. Proses pengelasan GMAW dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.18.



Gambar 3. 18 Proses Pengelasan GMAW

3.6.3. Pengujian NDT (Non-Destructive Test)

Metode *Non-Destructive Testing* (NDT) digunakan dalam penelitian ini untuk mengevaluasi kualitas hasil pengelasan tanpa merusak bentuk maupun struktur material. Pengujian dilakukan secara bertahap dengan empat metode utama, yaitu *visual test* dengan menggunakan alat bantu seperti *welding gauge cambridge, welding taper gaung, multipurpose gauge,* kemudian ada *magnetic test* yang menggunakan alat yang dilengkapi dengan magnet serta dua kaleng cat semprot yang berisi cairan *white contrast paint* dan *black oxide magnetic particle oil,* selanjutnya melakukan *penetrant test* yang menggunakan tiga jenis cairan yaitu menggunakan cairan *cleaner, penetrant*, dan *developer,* kemudian yang terakhir mengguankan metode *ultrasonic test*, yang melibatkan beberapa komponen yaitu *probe, ultrasonic flaw detector* dan *couplant,* sesuai prosedur inspeksi dan standar yang berlaku.

3.6.4. Proses Annealing

Spesimen hasil las dibagi menjadi beberapa kelompok untuk perlakuan *annealing* dan *non-annealing*. Spesimen yang sudah di lakukan pengelasan, dipanaskan dalam *furnace* pada suhu 635°C selama 4 jam, kemudian ditahan pada suhu 635°C selama 1 jam 15 menit. Setelah proses *holding* selesai, pendinginan dilakukan secara perlahan di dalam *furnace* selama 4 jam guna menghindari distorsi dan retak akibat perubahan suhu yang mendadak.

3.6.5. Pemotongan Spesimen Uji

Setelah proses *annealing* selesai, sampel dipotong menjadi beberapa bagian untuk keperluan pengujian. Spesimen uji tarik disiapkan sesuai standar ASTM E8, spesimen uji kekerasan mengacu pada standar ASTM E92, dan spesimen untuk pengamatan struktur mikro dipersiapkan berdasarkan standar ASTM E3, sehingga masing-masing pengujian dapat dilakukan secara akurat dan terstandarisasi.

3.6.6. Pengujian Spesimen

- **Uji Struktur Mikro (*Microstrukture*)**

  Pengujian struktur mikro dilakukan pada spesimen baja SM490 yang telah melalui proses pengelasan GMAW dan perlakuan *annealing*. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengamati perubahan fasa dan morfologi butiran pada daerah HAZ akibat pengaruh temperatur dan waktu tahan selama proses *annealing*. Pengujian dilakukan menggunakan mikroskop optik sesuai dengan standar ASTM E3, dengan tahapan sebagai berikut:

  1. Permukaan spesimen di *grinding* secara bertahap menggunakan amplas dengan ukuran 100, 180, 400, 600, 800, dan 1000 hingga permukaannya halus dan rata.
  2. Selanjutnya dilakukan proses pemolesan (*polishing*) menggunakan autosol hingga permukaan mengkilap, lalu dibersihkan dengan kain flanel.
  3. Proses etsa dilakukan menggunakan larutan untuk menonjolkan struktur mikro.
  4. Setelah etsa, spesimen dicuci dengan air bersih dan dikeringkan sebelum diamati di bawah mikroskop optik.

- **Uji Kekerasan (*Hardness Test*)**

  Pengujian kekerasan dilakukan sebelum uji tarik, karena uji tarik bersifat destruktif dan akan merusak spesimen secara permanen. Uji kekerasan pada penelitian ini menggunakan alat uji *Makro Vickers* dengan beban yang digunakan sebesar 30 kgf, sesuai dengan standar ASTM E92 untuk mengukur kekerasan pada daerah HAZ dari spesimen hasil pengelasan GMAW dan perlakuan *annealing*. Langkah-langkah pengujiannya meliputi:

  1. Meletakkan spesimen pada meja uji kekerasan, kemudian mengarahkan lensa mikroskop ke permukaan spesimen.
  2. Mengatur ketinggian meja agar fokus antara mikroskop dan permukaan spesimen tepat dan jelas.
  3. Menekan tombol *start* untuk menurunkan indentor berbentuk piramida ke permukaan spesimen.
  4. Memilih dan menandai area yang akan diuji kekerasannya melalui tampilan monitor.
  5. Setelah proses indentasi selesai, hasil pengujian kekerasan akan ditampilkan secara otomatis pada layar monitor.

- **Uji Tarik (*Tensile Test*)**

  Uji tarik dilakukan setelah pengujian mikrostruktur karena sifatnya *destruktif* dan akan merusak spesimen secara permanen. Pengujian ini mengacu pada standar ASTM E8, yang digunakan untuk mengevaluasi kekuatan tarik dari material baja SM490 hasil pengelasan GMAW dan perlakuan *annealing*. Langkah-langkah pelaksanaan uji tarik meliputi:

  1. Spesimen terlebih dahulu dipersiapkan dan dipasang pada mesin uji tarik.
  2. Mesin kemudian diaktifkan, dan parameter uji seperti ukuran penampang spesimen dimasukkan ke dalam perangkat lunak (*software*) pengujian.
  3. Spesimen dijepit di antara kedua *grip* mesin uji tarik, kemudian penarikan dilakukan secara perlahan hingga spesimen mengalami patah.

  Selama proses uji, data seperti beban maksimum dan regangan terekam secara otomatis dan digunakan untuk menghitung nilai kekuatan tarik material.

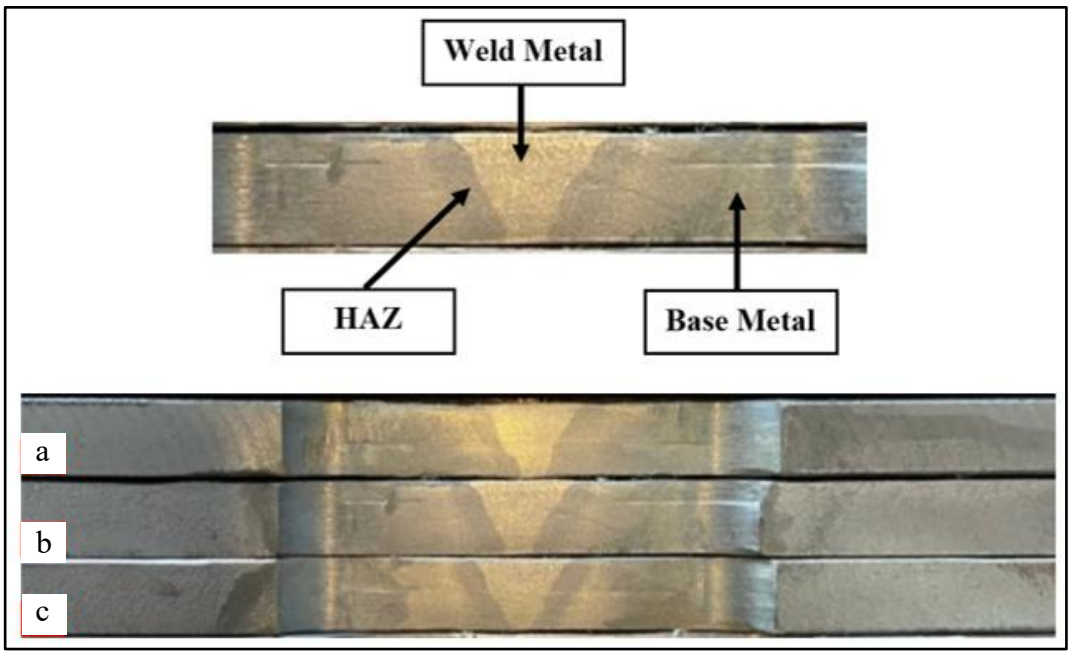
BAB IV
HASIL PENELITIAN

Berdasarkan hasil penelitian yang diperoleh dari serangkaian pengujian yang telah dilakukan, yang meliputi dokumentasi foto makro pengelasan, hasil pengujian *non-destruktif test* (NDT), pengamatan struktur mikro, pengujian kekerasan, serta uji tarik. Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja karbon rendah tipe SM490 yang dilas menggunakan variasi arus listrik, kemudian diberi perlakuan panas pasca las (*post weld heat treatment*) dengan metode *stress relief annealing* pada suhu 635 °C selama 4 jam dan waktu penahanan selama 1 jam 15 menit. Tahap berikutnya adalah pelaksanaan serangkaian pengujian terhadap spesimen uji. Pengujian struktur mikro dilakukan untuk mengamati dan mengidentifikasi fasa-fasa yang terbentuk sebagai akibat dari proses pengelasan GMAW dan perlakuan panas. Pengujian kekerasan *Vickers* digunakan untuk menentukan distribusi dan nilai kekerasan pada daerah *weld metal*, HAZ, maupun *base metal*. Sementara itu, uji tarik dilakukan untuk memperoleh parameter mekanik, meliputi tegangan maksimum, tegangan luluh, dan persen regangan spesimen. Selain pengujian destruktif, dilakukan pula pengujian NDT yang mencakup *visual test*, *ultrasonic test*, *magnetic test*, dan *penetrant test*. Pengujian NDT ini bertujuan untuk mendeteksi kemungkinan adanya cacat permukaan maupun cacat internal, seperti retak, porositas, dan inklusi, tanpa menimbulkan kerusakan pada spesimen uji.

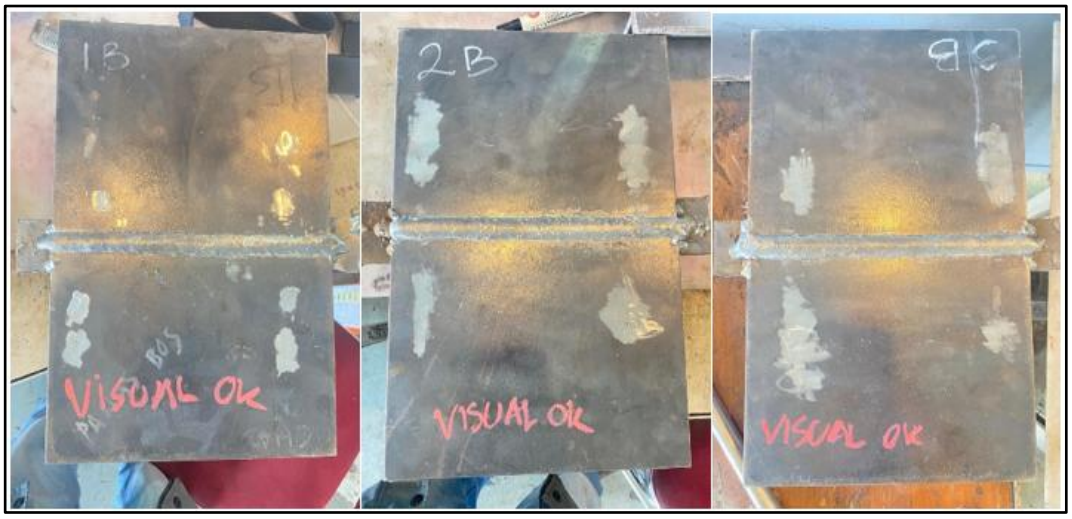
4.1 Hasil Pengelasan dan NDT

Pengujian NDT ini bertujuan untuk mengetahui kualitas hasil las, baik dari segi penampakan visual maupun kemungkinan adanya cacat internal yang terjadi akibat variasi arus pengelasan dan perlakuan panas. Proses pengelasan dilakukan dengan menggunakan metode GMAW pada arus 210, 235, dan 260A, kemudian hasil sambungan diuji menggunakan beberapa metode NDT, yaitu *visual test, ultrasonic test, magnetic test*, dan *penetrant test*. Hasil dari pengujian ini memberikan gambaran mengenai kualitas sambungan las, jenis dan letak cacat yang muncul,

serta pengaruh variasi arus dan perlakuan *annealing* terhadap integritas sambungan. Hasil proses pengelasan dan pengujian NDT dapat dilihat pada Gambar 4.1 – 4.5.



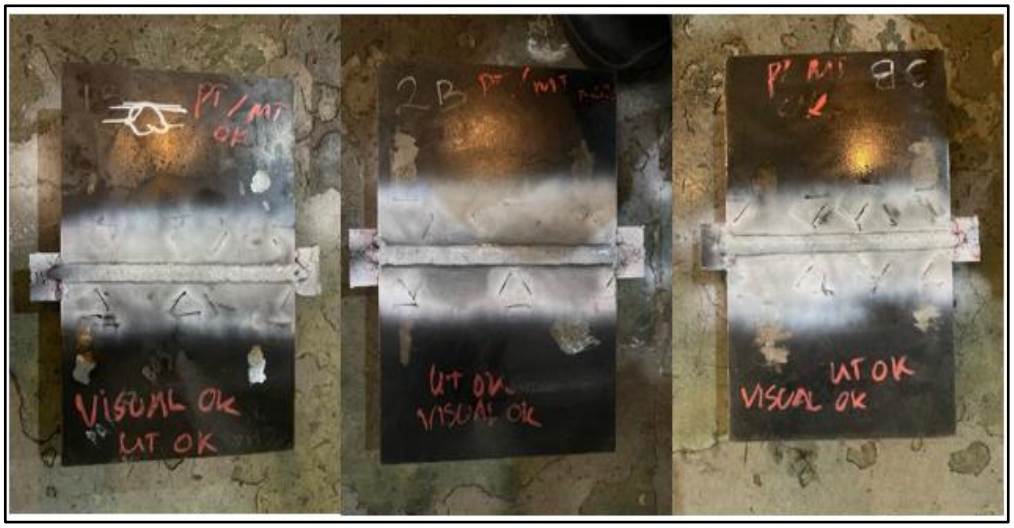
Gambar 4. 1 Hasil Proses Pengelasan (a) Arus 210 A (b) Arus 235 A (c) Arus 260 A



Gambar 4. 2 Hasil Uji NDT *Visual Test*

Gambar 4. 3 Hasil Uji NDT *Ultrasonic Test*

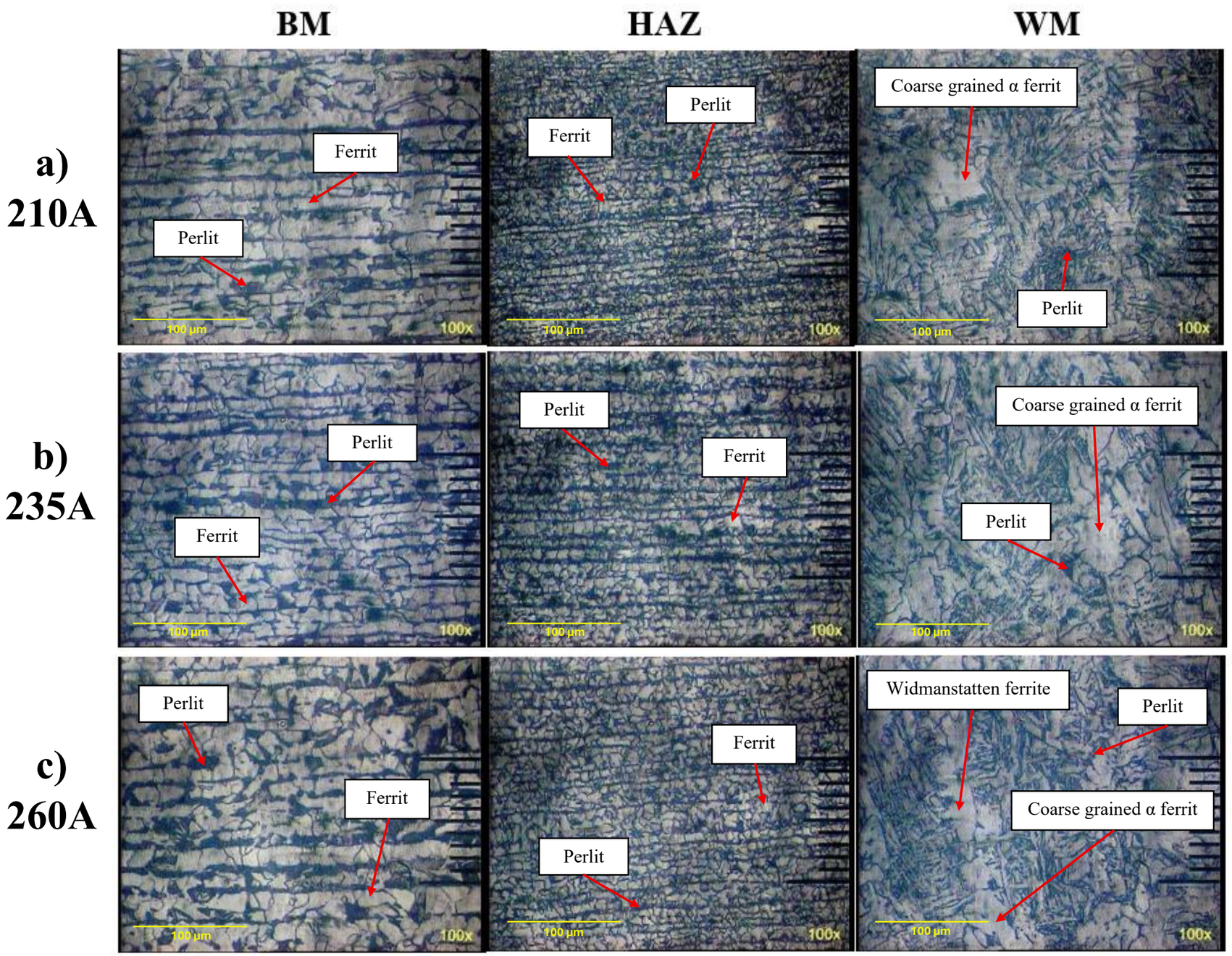
Gambar 4. 4 Hasil Uji NDT *Penetrant Test*



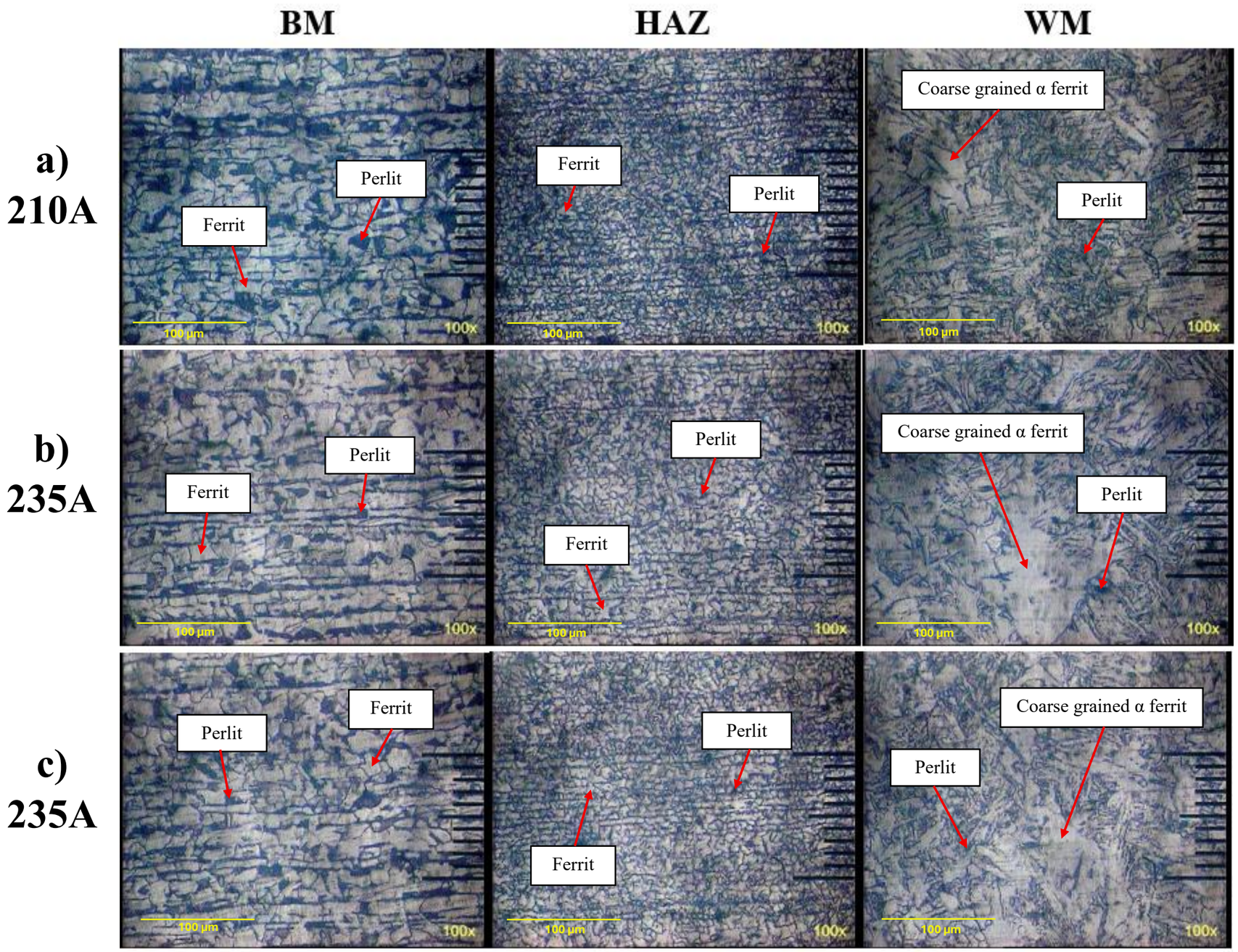
Gambar 4. 5 Hasil Uji NDT *Magnetic Test*

4.2 Data Hasil Uji Striktur Mikro

Pengematan struktur mikro dilakukan dengan mengambil gambar dan menganalisis struktur mikro spesimen baja karbon rendah SM490 dengan perbesaran 100x. Pengujian struktur mikro pada penelitian ini dilakukan menggunakn mikroskop optik Olympus PME 3 yang tersedia di laboratorium Bahan, Teknik Sekolah Vokasi, Universitas Gadjah Mada. Dalam pengujian ini menggunakan dua jenis spesimen, yaitu diberi perlakuan *annealing* dan *non-annealing* dengan variasi arus pengelasan 210, 235, dan 260 A. Tujuan pengamatan ini adalah untuk mengetahui perubahan struktur mikro yang ditimbulkan oleh perbedaan arus pengelasan serta adanya perlakuan *annealing* maupun tanpa perlakuan *annealing*. Hasil pengujian struktur mikro ditampilkan pada Gambar 4.6 - 4.7.



Gambar 4. 6 Struktur Mikro dengan Perlakuan *Non-Annealing* (a) Arus 210 A (b) Arus 235 A (c) Arus 260 A



Gambar 4. 7 Struktur Mikro dengan Perlakuan *Annealing* (a) Arus 210 A (b) Arus 235 A (c) Arus 260 A

4.3 Data Hasil Uji Kekerasan

Pengujian kekerasan pada penelitian ini dilakukan untuk mengetahui nilai kekerasan spesimen baja karbon rendah dengan variasi arus 210, 235, dan 260A, baik dengan perlakuan *annealing* maupun *non-annealing*. Proses pengujian menggunakan mesin *vickers*. Hasil pengujian kekerasan disajikan pada Tabel 4.1 dan 4.2.

Tabel 4. 1 Hasil Pengujian Kekerasan *Vickers Non-Annealing*

No	Variasi	Posisi Titik Uji	Kekerasan (VHN)	Kekerasan rata-rata
1	210 A (*Non-Annealing*)	*Weld Metal*	177,4	173,3
			174,3	
			168,3	
		HAZ	187,3	185,0
			183,9	
			183,9	
		Base Metal	159,8	159,8
			159,8	
			159,8	
2	235 A (*Non-Annealing*)	*Weld Metal*	165,4	161,8
			154,5	
			165,4	
		HAZ	177,4	177,4
			177,4	
			177,4	
		Base Metal	157,1	158,9
			159,8	
			159,8	
3	260 A (*Non-Annealing*)	*Weld Metal*	177,4	177,4
			177,4	
			177,4	
		HAZ	174,3	175,4
			171,2	
			180,6	
		Base Metal	159,8	156,3
			154,5	
			154,5	

Tabel 4. 2 Hasil Pengujian Kekerasan *Vickers Annealing*

No	Variasi	Posisi Titik Uji	Kekerasan (VHN)	Kekerasan rata-rata
1	210 A (*Annealing*)	*Weld Metal*	165,4	160,8
			162,6	
			154,5	

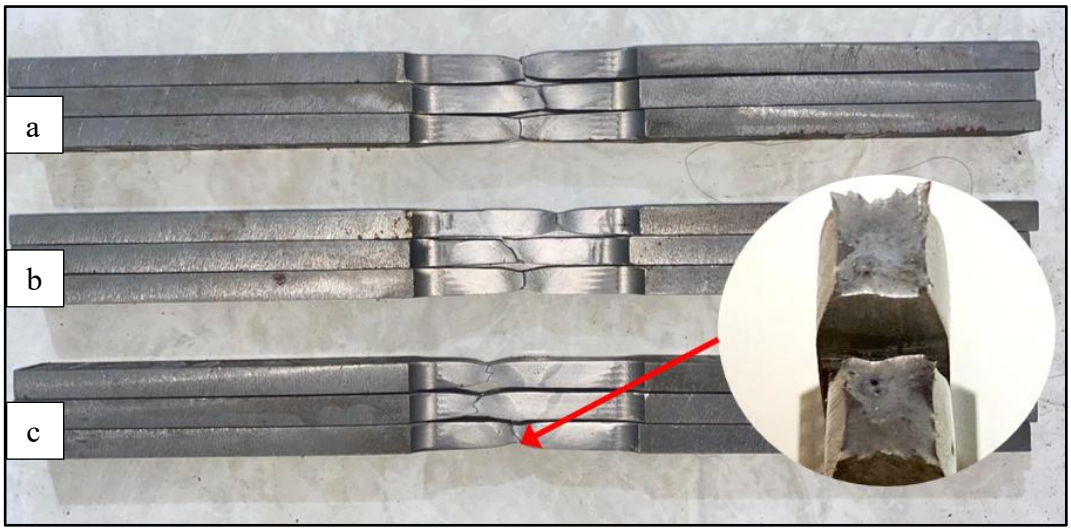
No	Variasi	Posisi Titik Uji	Kekerasan (VHN)	Kekerasan rata-rata
		HAZ	154,5	147,6
			154,5	
			133,7	
		Base Metal	144,7	143,9
			142,4	
			144,7	
2	235 A (*Annealing*)	*Weld Metal*	165,4	159,9
			159,8	
			154,5	
		HAZ	159,8	160,8
			165,4	
			157,1	
		Base Metal	144,7	144,7
			144,7	
			144,7	
3	260 A (*Annealing*)	*Weld Metal*	165,4	159,9
			159,8	
			154,5	
		HAZ	168,3	163,6
			162,6	
			159,8	
		Base Metal	144,7	144,7
			144,7	
			144,7	

4.4 Data Hasil Uji Tarik

Pengujian tarik pada penelitian ini menggunakan mesin merk Zwick Roell tipe Z330 dengan standar ASTM E8 yang dilaksanakan di PT. INKA. Tujuan pengujian ini adalah untuk mengetahui sifat mekanis baja karbon rendah SM490, khususnya dalam mengevaluasi kemampuan material menahan beban hingga mengalami kegagalan. Hasil pengujian tarik berupa nilai kekuatan tarik diperoleh dari spesimen dengan tiga variasi arus pengelasan, yaitu 210 , 235 , dan 260 A, baik dengan perlakuan *annealing* maupun *non-annealing,* spesimen dapat dilihat pada Gambar 4.8 dan 4.9. Data lengkap hasil pengujian tarik ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Hasil Pengujian Kekuatan Tarik

No	Variasi	No. Spesimen	Teg. Max (MPa)	Rata-rata Teg. Max (MPa)	Regangan (%)	Rata-rata Regangan (%)
1	210 A (*Non-Annealing*)	1	546,4	535,7	10,00%	8,96%
		2	549		9,50%	
		3	511,9		7,40%	
2	235 A (*Non-Annealing*)	1	540,8	537,7	6,60%	9,13%
		2	548,4		11,60%	
		3	524,1		9,20%	
3	260 A (*Non-Annealing*)	1	543,2	542,6	13,90%	13,43%
		2	535,8		13,20%	
		3	548,8		13,20%	
4	210 A (*Annealing*)	1	505,3	524,7	10,80%	11,60%
		2	532,1		12,50%	
		3	536,9		11,50%	
5	235 A (*Annealing*)	1	510,8	512,7	13,10%	12,67%
		2	513,8		11,40%	
		3	513,7		13,50%	
6	260 A (*Annealing*)	1	498,4	496,2	13,70%	13,30%
		2	487,6		13,80%	
		3	502,6		12,40%	



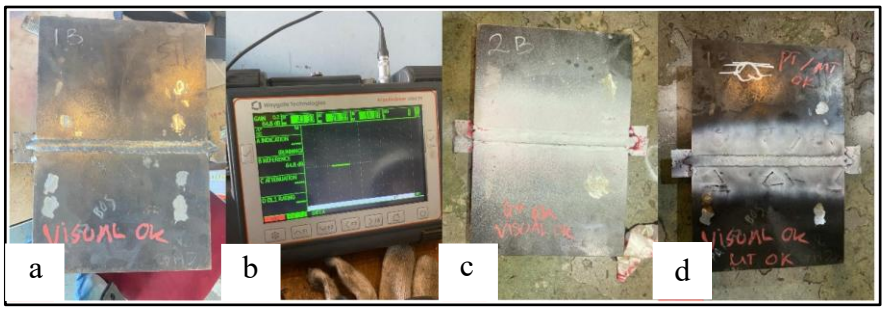
Gambar 4. 8 Hasil Uji Tarik *Annealing* (a) Arus 210 A (b) Arus 235 A (c) Arus 260 A

Gambar 4. 9 Hasil Uji Tarik *Non-Annealing* (a) Arus 210 A (b) Arus 235 A (c) Arus 260 A

BAB V
PEMBAHASAN

5.1 Analisis Hasil NDT dan Makro Terhadap Pengelasan SM490

Pengujian *non-destruktif* (*Non-Destructive Testing*/NDT) dan pengamatan struktur makro merupakan tahapan awal yang penting dalam proses evaluasi kualitas sambungan las. Tahap ini bertujuan untuk mendeteksi adanya cacat atau ketidaksempurnaan pada hasil pengelasan tanpa merusak spesimen, sehingga kondisi sambungan dapat diverifikasi sebelum dilakukan perlakuan panas maupun pengujian mekanik lanjutan. Pemeriksaan NDT secara komprehensif memungkinkan identifikasi dini terhadap cacat internal maupun eksternal yang berpotensi menurunkan integritas sambungan. Dalam penelitian ini, sambungan hasil pengelasan baja karbon rendah tipe SM490 menggunakan metode GMAW diuji menggunakan beberapa metode NDT, yaitu *visual test*, *ultrasonic test*, *magnetic test*, dan *penetrant test*. Penggunaan kombinasi metode tersebut dimaksudkan untuk memperoleh gambaran menyeluruh terhadap kondisi sambungan, baik pada permukaan maupun bagian dalam logam las. Berdasarkan hasil pengujian, seluruh metode menunjukkan bahwa sambungan las berada dalam kondisi baik, tanpa indikasi adanya cacat yang signifikan, seperti retak, porositas, *undercut*, maupun inklusi pada daerah las. Hal ini menunjukkan bahwa parameter pengelasan yang digunakan telah menghasilkan sambungan dengan kualitas yang baik dan memenuhi standar kelayakan untuk dilanjutkan ke tahap perlakuan panas *stress relief annealing* serta pengujian sifat mekanik. Gambar visual hasil pengelasan dan hasil uji NDT ditampilkan pada Gambar 5.1.



Gambar 5. 1 Hasil Pengujian NDT Pengelasan Baja SM490 (a) *Visual Test*, (b) *Ultrasonic Test*, (c) *Penetrant Test*, dan (d) *Magnetic Test*

Pengujian menggunakan *visual test*, pemeriksaan dilakukan terhadap permukaan hasil las untuk memastikan tampilan fisik sambungan sesuai dengan standar pengelasan yang berlaku. Hasil pengujian yang dapat dilihat pada Gambar 5.1 (a) menunjukkan bahwa permukaan las tampak rata dan halus, tidak terdapat cacat visual seperti retak permukaan, *undercut, spatter, porosity*. Penetrasi las juga terlihat merata di sepanjang sambungan. Hasil ini menunjukkan bahwa parameter pengelasan yang digunakan sudah sesuai, dan operator melakukan kontrol proses dengan baik. Keberhasilan pada tahap ini juga menjadi indikasi awal bahwa tidak ada indikasi yang bisa mempengaruhi integritas sambungan saat proses lanjutan dilakukan.

Selanjutnya, pada pengujian *ultrasonic test*, pemeriksaan dilakukan untuk mendeteksi adanya cacat internal seperti retak di dalam logam (*internal crack*), *slag inclusion*, atau *lack of fusion* yang tidak bisa terlihat secara visual. Hasil pengujian yang diperlihatkan pada Gambar 5.1 (b) menunjukkan bahwa gelombang ultrasonik yang dipantulkan kembali memiliki pola yang seragam tanpa adanya pantulan abnormal yang menandakan adanya cacat dalam sambungan. Dengan hasil *ultrasonic test* yang bersih, dapat disimpulkan bahwa proses pengalasan berjalan sempurna, sehingga tidak ada daerah yang mengalami cacat internal.

Pada *penetrant test*, pengujian dilakukan menggunakan cairan penetran berwarna merah untuk mendeteksi adanya cacat terbuka pada permukaan logam seperti retak halus, porositas, atau celah pada hasil las. Prinsipnya, apabila terdapat cacat terbuka pada permukaan, maka cairan penetran akan masuk ke celah tersebut dan ketika diberi *developer*, akan muncul bercak warna merah sebagai tanda adanya cacat. Berdasarkan hasil pengujian yang dapat dilihat pada Gambar 5.1 (c), tidak ditemukan adanya indikasi warna merah pada permukaan sambungan las. Hal ini menunjukkan bahwa tidak terdapat cacat terbuka seperti retak permukaan atau pori pada hasil pengelasan. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa hasil sambungan las sudah padat dan bebas dari cacat permukaan, serta memenuhi standar penerimaan pada uji penetran.

Pada *magnetic test*, metode ini digunakan untuk mendeteksi cacat permukaan seperti retak halus atau celah kecil. Hasil pengujian yang dapat dilihat pada Gambar

5.1 (d) menunjukkan bahwa tidak terdapa tindikasi garis atau pola partikel magnetik yang menumpuk, yang biasanya menjadi tanda adanya cacat seperti retak atau celah. Hal ini menunjukkan bahwa hasil pengelasan bebas dari retakan mikro di permukaan.

Hasil pengamatan makro pada Gambar 4.1 menunjukkan bahwa peningkatan arus pengelasan berpengaruh secara langsung terhadap besarnya *heat input* yang diterima selama proses pengelasan, yang kemudian berdampak pada ukuran dan bentuk *weld metal* serta HAZ. Pada arus 210 A, *heat input* yang relatif rendah menghasilkan lebar *weld metal* yang sempit dan penetrasi sedang. Ukuran HAZ juga relatif kecil karena rambatan panas ke logam induk terbatas dan pendinginan berlangsung lebih cepat. Ketika arus meningkat menjadi 235 A, *heat input* bertambah sehingga kolam las (*weld pool*) menjadi lebih besar. Hal ini menyebabkan lebar *weld metal* dan HAZ meningkat seiring dengan rambatan panas yang lebih luas ke daerah sekitar sambungan. Pada arus 260 A, *heat input* mencapai nilai tertinggi, menghasilkan kolam las yang lebih dalam dan lebar. Kondisi ini memperluas zona peleburan dan memperbesar area HAZ akibat durasi dan intensitas panas yang lebih tinggi.

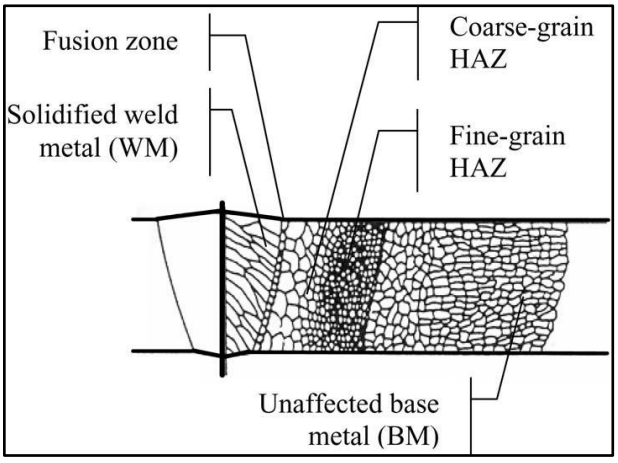
Secara umum, fenomena ini sesuai dengan teori pengelasan yang menyatakan bahwa semakin besar arus pengelasan, maka *heat input* yang dihasilkan semakin tinggi. Akibatnya, volume logam yang mengalami peleburan bertambah, penetrasi menjadi lebih dalam, dan zona yang terpengaruh panas menjadi lebih luas. Dengan demikian, variasi arus pengelasan memberikan pengaruh signifikan terhadap morfologi makro hasil las, khususnya ukuran dan bentuk *weld metal* serta HAZ. Sebagaimana dijelaskan dalam penelitian oleh (Parmar et al., 2016), peningkatan arus dari 190 A hingga 250 A menyebabkan peningkatan signifikan pada lebar dan kedalaman las, serta perluasan HAZ, akibat meningkatnya panas yang ditransfer ke material dasar selama pengelasan.

5.2 Analisis Pengaruh Variasi Arus Terhadap Struktur Mikro

Dari hasil pengamatan struktur mikro pada spesimen *non-annealing* dan *annealing*, terlihat adanya berbedaan yang cukup jelas di zona las, yaitu *base metal,* HAZ, dan *weld metal*. Pada dasarnya, karena baja yang digunakan merupakan baja karbon

rendah dengan kadar karbon di bawah 0,3% maka struktur mikro utamanya hanya terdiri dari ferrit dan perlit. Fasa martensit tidak terbentuk karena dua alasan utama, yaitu kandungan karbonnya yang rendah dan laju pendinginan yang tidak terlalu tinggi. Dengan kandungan karbon rendah, daerah austenit yang terbentuk akan langsung berubah menjadi ferrit dan perlit. Inilah sebabnya baja karbon rendah memiliki kemampuan las yang sangat baik dan tidak mudah retak karena tidak ada martensit yang keras dan getas.

Hasil dari kondisi *non-annealing*, dapat dilihat bahwa struktur mikro di setiap zona las, *base metal,* ~~HAZ,~~HAZ, dan *weld metal* menunjukkan perubahan bentuk butir dan komposisi fasa yang jelas akibat pengaruh panas pengelasan. *Base metal* masih menunjukkan struktur mikro asli baja karbon rendah berupa ferrit dan perlit karena tidak terkena pengaruh panas dari proses pengelasan. Pada bagian HAZ menunjukkan perbedaan ukuran fasa perlit dibandingkan dengan daerah *base metal* maupun *weld metal*. Daerah ini tidak mengalami peleburan, tetapi mengalami pemanasan tinggi akibat rambatan panas dari proses pengelasan. Secara umum perubahan struktur mikro pada setipa zona pengelasan sesuai dengan penelitian yang dilakukan (Boumerzoug, 2010), dimana pada daerah *weld zone* didominasi oleh ferrit dengan morfologi yang cukup besar jika dibandingkan dengan HAZ~~,~~, kemudian bagian HAZ yang menunjukan ukuran kecil dan *base metal* memiliki ukuran yang lebih besar. Secara teoritis perbedaan struktur mikro pada daerah pengelasan dapat dilihat pada Gambar 5.~~1~~2



Gambar 5. 2 Perbedaan Struktur Mikro pada Daerah Pengelasan (Gordon, 2004)

Hasil pengamatan pada HAZ dengan arus 210 A, struktur mikro menunjukkan ferrit yang lebih kecil, perlit yang lebih dominan seperti ditunjukkan pada Gambar 4.6. Ukuran fasa ferrit lebih kecil karena arus rendah menghasilkan panas *input* yang tidak terlalu besar, sehingga pendinginan berlangsung cepat dan menghasilkan lebih banyak perlit serta butir yang halus. Sedangkan pada arus 235 A dan 260 A, butir ferritnya terlihat lebih besar dan jarak antar butir melebar, dikarenakan semakin besar arus listrik, semakin tinggi panas yang diterima, maka laju pendinginannya lebih lambat. Semakin lama paparan panas dan semakin tinggi suhunya, semakin besar ukuran butir yang terbentuk. Kemudian pada daerah *weld metal* masih terdiri fasa ferrit dan perlit, tidak ada fasa martensit yang terbentuk, berkaitan dengan penelitian (Boumerzoug, 2010). Struktur mikro pada *weld metal* terlihat lebih heterogen dimana terdapat *coarse* ferit. Struktur mikro yang terbentuk di *weld metal* dipengaruhi solidifikasi yang terjadi akibat perbedaan arus listrik yang diberikan saat pengelasan. Namun secera keseluruhan menunjukkan bahwa fasa yang terbentuk masih sama yaitu fasa ferrit dan perlit.

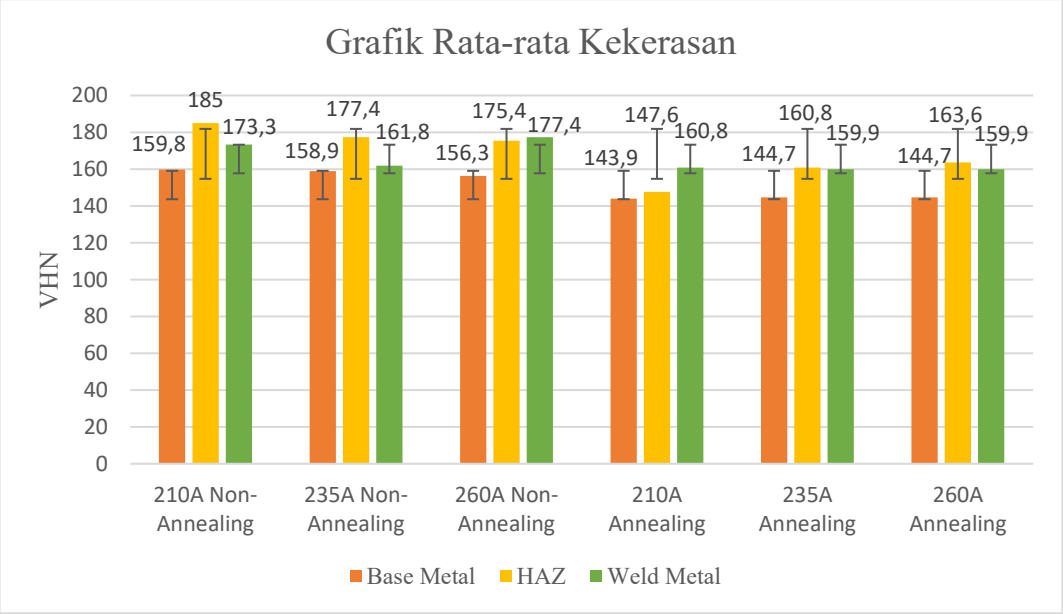
Setelah dilakukan perlakuan a*nnealing*, terlihat bahwa struktur mikro menunjukan perubahan dari keadaan *non-annealing* khususnya pada daerah HAZ dan *weld metal*. Proses *annealing* menyebabkan penurunan tegangan sisa dan redistribusi panas secara bertahap pada area sambungan, sehingga mengurangi gradien termal yang tajam. Kondisi ini memungkinkan terjadinya rekristalisasi parsial dan pertumbuhan butir secara lebih terkendali, sehingga menghasilkan struktur yang lebih stabil, homogen dan halus. Pada *base metal*, perubahan tidak menunjukkan perbedaan. Namun hal berbeda terlihat pada HAZ, ukuran butir yang semula besar menjadi lebih seragam akibat selama proses *annealing*. Struktur ferrit dan perlit tampak lebih halus dengan jarak antar butir yang lebih rapat dibandingkan kondisi sebelum perlakuan panas. Fenomena ini terjadi karena selama proses *annealing* berlangsung, terjadi difusi atom dan pengurangan densitas dislokasi, sehingga logam mencapai kondisi energi yang lebih stabil. Pada daerah HAZ, penyusutan ukuran butir kemungkinan besar disebabkan oleh terjadinya rekristalisasi parsial akibat pemanasan selama proses *annealing*, yang menghasilkan butir baru berukuran lebih kecil dan lebih seragam. Sedangkan pada *weld metal*, semakin tinggi arus listrik yang digunakan, maka ukuran butir menjadi lebih kasar dan lebar

besar dibandingkan pada arus rendah, karena proses solidifikasinya berlangsung lebih lambat akibat panas *input* yang lebih besar.

Secara keseluruhan, dapat disimpulkan bahwa *annealing* memperhalus struktur mikro, memperkecil tegangan sisa. Struktur ferrit dan perlit menjadi seragam dibandingkan pada kondisi *non-annealing*.

5.3 Analisis Pengaruh Variasi Arus Terhadap Uji Kekerasan

Pengujian kekerasan dalam penelitian ini adalah untuk mempengaruhi nilai kekerasan material yang diberi pelakuan *annealing* dan *non-annealing* dengan variasi arus 210 A, 235 A, 260 A. Pengujian dilakukan pada permukaan sambungan pengelasan yang mencakup *base metal*, HAZ, dan *weld metal*, dengan pengambilan data di 3 titik pada masing-masing zonanya. Grafik hasil dari perngujian kekerasan di sajikan pada Gambar 5.3.



Gambar 5. 3 Grafik Hasil Uji Kekerasan

Hasil pengujian kekerasan pada baja karbon rendah SM490 dengan variasi arus pengelasan 210 A, 235 A, dan 260 A serta perlakuan *annealing* dan *non-annealing* menunjukkan adanya perbedaan pada nilai kekerasan rata-rata di setiap zona, yaitu *base metal*, HAZ, dan *weld metal*. Perbedaan tersebut dipengaruhi oleh besarnya arus pengelasan yang digunakan serta perlakuan panas setelah pengelasan.

Nilai kekerasan tertinggi diperoleh pada daerah HAZ arus 210 A dengan kondisi *non-annealing*, sebesar 185,0 VHN, kemudian nilai pada *weld metal* sebesar 173,3 VHN, dan nilai *base metal* sebesar 159,8 VHN. Kekerasan yang tinggi pada daerah HAZ ini disebabkan oleh ukuran butir yang kecil dan jumlah fasa perlit yang lebih banyak. Adanya fasa perlit yang lebih banyak meningkatkan kekerasan karena perlit memiliki struktur campuran ferrit + sementit yang lebih keras dibanding ferrit murni. Namun setelah diberi perlakuan *annealing*, terjadi penurunan kekerasan yang cukup besar, yang dimana proses *annealing* membuat tegangan sisa berkurang. *Base metal* memiliki nilai sebesar 143,9 VHN, HAZ 147,6 VHN, dan *weld metal* 160,8 VHN. Dengan demikian daerah HAZ pada arus 210 A *non-annealing*, menjadi daerah paling keras karena pendinginan cepat dan jumlah perlit paling banyak.

Nilai kekerasan HAZ pada arus 235 A *non-annealing*, memiliki nilai sebesar 177,4 VHN, lebih rendah dibandingkan dengan variasi arus 210 A. Kemudian pada *weld metal* memiliki nilai sebesar 161,8 VHN dan pada *base metal* memiliki nilai dan 158,9 VHN. Penurunan kekerasan pada HAZ dibandingkan 210 A dikarenakan peningkatan arus menghasilkan *input* panas yang lebih besar, sehingga laju pendinginan menjadi lebih lambat. Pendinginan yang lebih lambat membuat difusi atom karbon berjalan lebih sempurna, sehingga jumlah perlit yang terbentuk menjadi berkurang dan ukuran butir ferrit membesar. Akibatnya, nilai kekerasan pada HAZ turun. Setelah pelakuan *annealing*, kekerasan menurun dengan nilai *base metal* 144,7 VHN, kemudian nilai HAZ sebesar 160,8 VHN, dan *weld metal* sebesar 159,9 VHN. Walaupun demikian, nilai kekerasan HAZ masih lebih tinggi dibandingkan zona lainnya, menunjukkan bahwa pengaruh termal tetap dominan di daerah ini.

Kemudian pada arus 260 A *non-annealing*, nilai kekerasan tertinggi terdapat pada *weld metal* setal sebesar 177,4 VHN, sedikit lebih tinggi dibandingkan HAZ sebesar 175,4 VHN, sedangkan *base metal* memiliki nilai sebesar 156,3 VHN. Peningkatan kekerasan pada *weld metal* di arus tinggi disebabkan oleh adanya tegangan sisa di dalam daerah *weld metal* yang terbentuk akibat perbedaan laju solidifikasi di setiap bagian logam las. Setelah dilakukan proses *annealing*, kekerasan menurun pada semua zona, yaitu pada *base metal* memiliki nilai 144,7 VHN, kemudian nilai pada

bagian HAZ sebesar 163,6 VHN, dan pada *weld metal* mempunyai nilai sebesar 159,9 VHN. Meskipun terjadi penurunan, nilai kekerasan HAZ tetap relatif tinggi, menunjukkan bahwa pada arus besar efek *annealing* tidak sepenuhnya mampu menghilangkan kekerasan akibat energi termal yang tinggi.

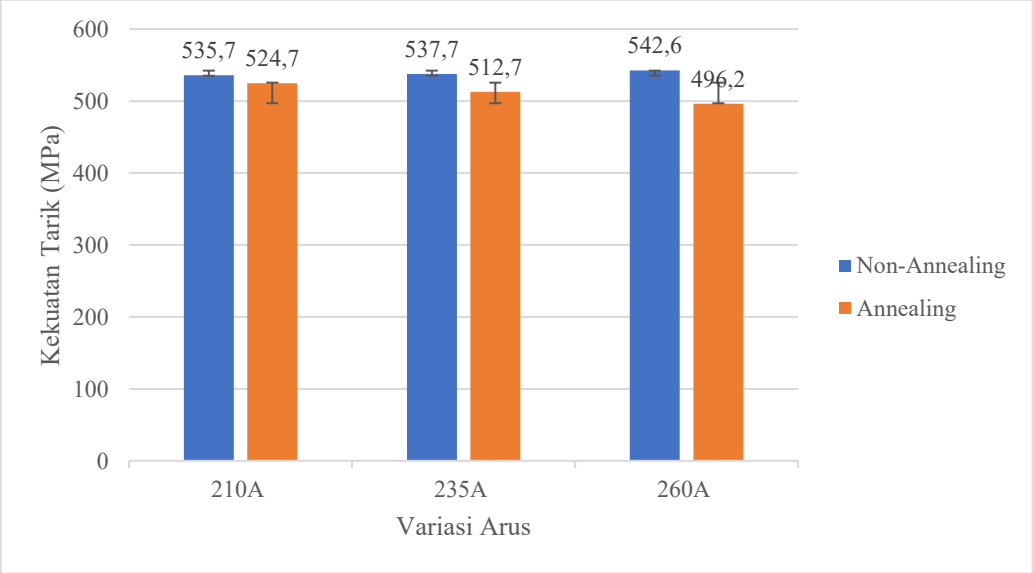
Secara umum, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa perlakuan *non-annealing* menghasilkan kekerasan yang lebih tinggi di semua variasi arus, terutama pada daerah HAZ. Penurunan kekerasan setelah annealing sejalan dengan teori bahwa proses *stress relief annealing* mengurangi tegangan sisa dan menghomogenkan struktur mikro, seperti disampaikan oleh (Syukran, 2020), bahwa *annealing* sangat memengaruhi nilai kekerasan material las, dengan kecenderungan penurunan kekerasan akibat homogenisasi struktur mikro dan pelepasan tegangan sisa. Nilai kekerasan tertinggi terdapat pada HAZ arus 210 A *non-annealing* sebesar 185,0 VHN, sedangkan nilai terendah diperoleh pada *base metal* arus 210 A *annealing* sebesar 143,9 VHN.

Analisa lebih lanjut pada hasil pengujian kekerasan *weld metal non-annealing* menunjukan nilai yang cukup fluktuatif, dimana berdasarkan teori apabila arus lebih tinggi akan menghasilkan panas yang tinggi dan pendinginan lebih lambat. Pada *non-annealing*, *weld metal* 260 A menunjukkan kekerasan paling tinggi dibandingkan dengan kondisi *non-annealing weld metal* pada 210 dan ~~235.~~235A. Analisa struktur mikro menunjukan fasa ferrit memiliki morfologi yang cukup beragam dan terindikasi adanya widmanstatten ferrit yang terbentuk. Hal ini dimungkinkan karena perbedan gradien termal yang cukup tinggi.

5.4 Analisis Pengaruh Variasi Arus Terhadap Uji Tarik

Hasil uji tarik pada baja karbon rendah SM490 dengan variasi arus pengelasan 210, 235, dan 260 A menunjukkan perbedaan sifat mekanik pada kondisi *non-annealing* maupun *annealing*. Pada parameter tegangan maksimum, nilai tertinggi diperoleh pada spesimen 260 A *non-annealing* sebesar 542,6 MPa, sedangkan nilai terendah terdapat pada 260 A *annealing* dengan 496,2 Mpa. Nilai kekuatan tarik yang tinggi pada arus 260 A *non-annealing* disebabkan karena arus besar menghasilkan *heat input* meningkat sehingga sambungan lebih homogen dan lebih kuat secara mekanik. Namun, setelah dilakukan *annealing*, nilai kekuatan tarik menurun.

Penurunan ini terjadi karena selama proses *annealing*, struktur mikro mengalami rekristalisasi dan pelunakan akibat difusi atom, sehingga tegangan sisa berkurang. Akibatnya, material menjadi lebih homogen tetapi tidak sekeras sebelumnya. Hal ini sejalan dengan teori yang dikemukakan oleh (Boumerzoug, 2010), bahwa proses pemanasan ulang setelah pengelasan mampu menurunkan kekerasan karena tegangan sisa di dalam logam telah hilang. Selain itu, (Hardiansyah, 2018) menyatakan bahwa *heat input* yang tinggi dapat menyebabkan pertumbuhan butir dan penurunan kekuatan tarik karena sambungan menjadi terlalu lebar dan kurang merata. Sementara itu, (Al-saraireh, 2018) juga menjelaskan bahwa peningkatan arus listrik menyebabkan penurunan kekuatan tarik dan kekerasan akibat pertumbuhan butir mikrostruktur yang menyebabkan logam menjadi lebih lunak dan ulet.Berikut merupakan grafik hasil kekuatan tarik hasil pengujian tarik yang dapat dilihat pada Gambar 5.4.



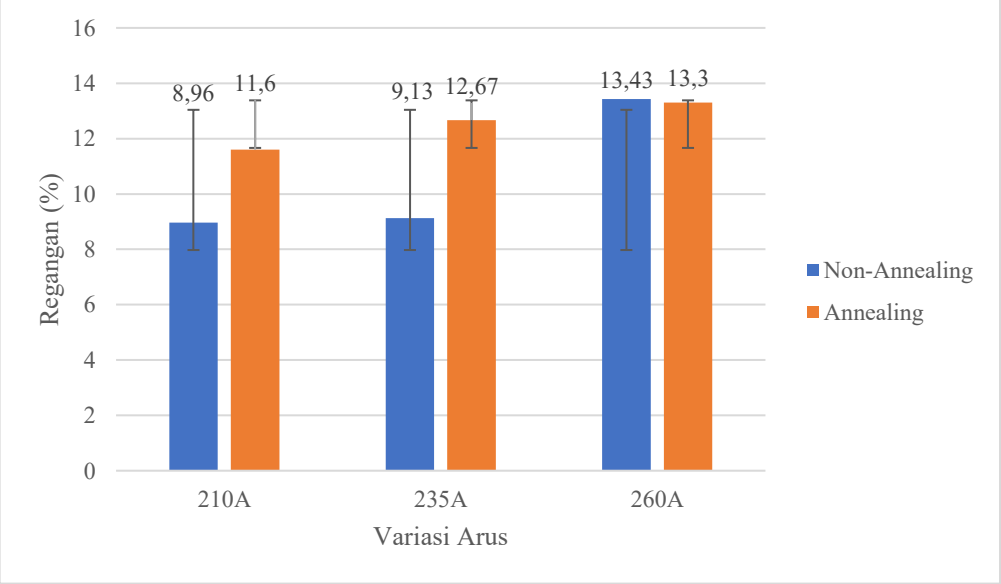
Gambar 5. 4 Grafik Hasil Tegangan Maksimum

Sementara itu, pada regangan nilai tertinggi terdapat pada spesimen 260 A *non-annealing* sebesar 13,43%. Sedangkan nilai terendah pada 210 A *non-annealing* sebesar 8,96%. Hal ini menujukkan bahwa arus tinggi menghasilkan pendinginan lebih lambat sehingga butir lebih besar, meningkatkan keuletan material. Perlakuan *annealing* juga meningkatkan regangan pada semua variasi arus karena tegangan sisa berkurang dan struktur mikro lebih homogen. Secara keseluruhan, hasil ini sesuai dengan teori bahwa *annealing* menurunkan tegangan maksimum namun

meningkatkan keuletan, semantara *non-annealing* menghasilkan kekuatan lebih tinggi tetapi regangan lebih rendah. Teori ini sejalan dengan hasil penelitian (Syukran, 2020) yang menyatakan bahwa *stress relief annealing* mampu menurunkan kekerasan dan mereduksi tegangan sisa, serta membuat distribusi kekerasan lebih seragam pada area *base metal*, HAZ, dan *weld metal*.

Berdasarkan hasil pengujian kekerasan dan pengamatan terhadap permukaan patahan pada sampel kondisi *annealing*, diketahui bahwa dari tiga sampel yang diuji terdapat satu sampel yang mengalami porositas pada daerah las. Keberadaan porositas ini berpengaruh terhadap pola dan lokasi patahan yang terjadi. Pada salah satu sampel, patahan terlihat berada di daerah *weld metal*, yang menunjukkan bahwa daerah ini memiliki kekerasan lebih rendah. Hal ini juga diperparah oleh adanya porositas yang dapat dilihat pada Gambar 4.8. Porositas tersebut yang berperan sebagai titik konsentrasi tegangan, sehingga retakan mudah terbentuk dan menjalar dari area tersebut.

Sedangkan pada dua sampel lainnya, patahan terjadi di *base metal*, yang mengindikasikan bahwa kekuatan sambungan las lebih tinggi dibandingkan logam induk. Kondisi ini menunjukkan bahwa proses pengelasan dan perlakuan *annealing* berjalan dengan baik, menghasilkan fusi logam yang kuat dan stabil di daerah *weld metal.* Berikut merupakan grafik nilai regangan hasil pengujian tarik yang dapat dilihat pada Gambar 5.5.



Gambar 5. 5 Grafik Hasil Regangan

BAB VI
KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai pengaruh variasi arus pengelasan terhadap struktur mikro, kekerasan dan kekuatan tarik pada baja SM490 dengan perlakuan *annealing* dan *non-annealing*, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Struktur mikro pada daerah las mengalami perubahan akibat variasi arus dan perlakuan *annealing*, di mana semakin besar arus listrik maka ukuran butir cenderung meningkat, namun perlakuan *annealing* menyeragamkan dan menstabilkan struktur ferrit dan perlit baja SM490.
2. Hasil pengujian kekerasan menunjukkan bahwa variasi arus listrik berpengaruh terhadap nilai kekerasan pada setiap daerah las. *Non-annealing* menghasilkan kekerasan lebih tinggi, sedangkan *annealing* menurunkan kekerasan tetapi memperhalus dan menstabilkan struktur logam pada baja SM490.
3. Dari hasil pengujian tarik dapat disimpulkan bahwa peningkatan arus pengelasan berpengaruh terhadap tegangan maksimum dan regangan pada baja SM490. Pada kondisi *non-annealing* menghasilkan kekuatan tarik lebih tinggi, sedangkan *annealing* menurunkan kekuatan namun meningkatkan keuletan dan kestabilan struktur mikro hasil pengelasan.

6.2 Saran

Beberapa saran diberikan sebagai tindak lanjut dari penelitian ini, yang dapat dijadikan referensi bagi penelitian selanjutnya agar memperoleh hasil yang lebih optimal:

1. Melakukan pengujian tarik dengan jumlah sampel yang lebih banyak agar hasil yang diperoleh lebih representatif dan deviasi data dapat diminimalkan. Hal ini penting untuk meningkatkan validitas data mekanik yang diperoleh.

2. Melakukan pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD) guna menghitung tegangan sisa yang tersisa pada material setelah perlakuan panas. Informasi ini dapat membantu memahami efek perlakuan terhadap distribusi tegangan internal yang mungkin memengaruhi performa material.
3. Melakukan analisis fraktografi untuk mengamati morfologi patahan. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui mode kegagalan *ductile, brittle* yang terjadi pada spesimen pasca uji tarik.
4. Melakukan variasi temperatur *annealing* yang lebih beragam**,** sehingga dapat diperoleh pemahaman lebih luas mengenai pengaruh suhu perlakuan terhadap perubahan struktur mikro dan sifat mekanik material.

DAFTAR PUSTAKA

Agung Prayogi. (2019). Analisa pengaruh variasi media pendingin pada perlakuan panas terhadap kekerasan dan struktur mikro baja karbon rendah. *Jurnal Polimesin*, *17*, 2.

Al-saraireh, F., & Mustafa Al-Saraireh, F. (2018). The Effect of Current and Voltage on Mechanical Properties of Low Carbon Steel Products. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET*, *9*(3), 134–142.

Andri Rudiyanto, R. D. A. V. N. (2022). Analisis Proses Stress Relieving Annealing Terhadap Sambungan Las Gas Metal Arc Welding (Gmaw) Material Baja SS 400. *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*, *8*(22), 84–93.

Azmy, I., & Daniel Saragih, A. (2020). Pengaruh Variasi Hold Time pada Proses Annealing Terhadap Sifat Mekanik dan Mikrostruktur Baja Mangan Austenitik. *Jurnal Teknik Mesin*, *10*(2), 97–101.

Boumerzoug, Z., Derfouf, C., & Baudin, T. (2010). Effect of Welding on Microstructure and Mechanical Properties of an Industrial Low Carbon Steel. *Engineering*, *02*(07), 502–506. https://doi.org/10.4236/eng.2010.27066

Fatih, A. M. (2018). *Pengaruh Variasi Suhu Tempering Yang Diikuti Proses Peening Dan Dicelup Pada Campuran Air Dan Garam Terhadap Struktur Mikro Dan Sifat Mekanik Pada Baja Sm490 Yang Digunakan Pada Underframe Kereta Api.*

Gordon, A. P., & McDowell, D. L. (2004). Mixed mode loading of an interface crack between graded creeping solids. *Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME*, *126*(4), 478–484. https://doi.org/10.1115/1.1804200

Harahap, R. P., & Rahmat, B. (2017). Analisa Pengaruh Stress Relief Annealing Terhadap Perubahan Sifat Mekanik Baja Tahan Karet Type SUS 304. In *Zona Mesin ISSN 2087-698X* (Vol. 8, Issue 2).

Hardiansyah, T., Imron, M. R., Handoko, J., Solichin, & Qolik, A. (2018). An Effect of Electric Current Variations and Wire Feed Rate on Low Carbon Steels Toward Tensile Strength on the Result of Gas Metal Arc Welding. *MATEC Web of Conferences*, *204*. https://doi.org/10.1051/matecconf/201820406010

Irfa'i, M. (2019). Pengaruh Temperature Annealing Terhadap Kekuatan Mekanis Pada Daerah Haz Pengelasan Gmaw Semi Otomatis Baja Ss 400 Pada Bogie Kereta Api. *Jurnal Teknik Mesin Unesa*, *7*(1), 111–116.

Kataren. (2019). Analisa Pengaruh Variasi Kampuh Las dan Arus Listrik Terhadap Kekuatan Tarik Dan Struktur Mikro Sambungan Las GMAW (Gas Metal ARC Welding) Pada Aluminium 6061. *Jurnal Teknik Perkapalan*, *7*(4), 345–354.

Kurniawan. (2014). Pengaruh variasi Holding Time Pada Perlakuan Panas Quench Annealing Terhadap Sifat mekanik dan Mikro Struktur Pada Baja mangan AISI 3401. *JURNAL TEKNIK POMITS*, *3*(1), 113–116.

Natesan, N., Jegadeeshwaran, R., Sakthivel, G., & Arunkumar, V. (2023). Design and analysis of robot and fixture pedestal for OTC FD-V8 MAG welding robot. *Journal of Physics: Conference Series*, *2601*. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2601/1/012008

Parmar, K. C., Desai, J. V, Patel, T. M., Scholar, M. E., & Professor, A. (2016). Effect of Welding speed, Welding current, Arc voltage and Torch angle on Bead geometry & Bead hardness. *International Journal of Engineering Development and Research*, *4*(2). www.ijedr.org

Prabawanto, B., Hafizh, A., & Rasyid, A. (2018). Pengaruh Annealing Terhadap Sifat Mekanis Daerah Haz Pengelasan Gmaw Baja Sm490 Normalizing Dan Tanpa Normalizing Pada Bogie Kereta Api Di Pt.Inka Madiun. *Jurnal Teknik Mesin Unesa*, *6*(1), 75–82.

Ratna Dewi Anjani, D. T. S. R. P. S. (2022). Pelatihan Uji Kekuatan Las Menggunakan Non Destructive Test (NDT) di Bengkel Las Rasyid. *Journal of Character Education Society)*, *5*(2). https://doi.org/10.31764/jces.v3i1.8046

Renita. (2021). Pengaruh Perlakuan Panas (Heat Treatment) Normalizing Terhadap Kekuatan Impak Aluminium 6061 Pengelasan MIG dengan Variasi Posisi dan Bentuk Kampuh. *Jurnal Teknik Perkapalan*, *9*(1), 70.

Salsabila, G. A. (2018). *Pengaruh Variasi Temperatur Tempering Yang Diikuti Proses Peening Terhadap Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro Baja Sm490 Yang Digunakan Pada Underframe Kereta Api*.

Sawaldi, A., Fathier, A., & Ibrahim, A. (2019). Pengaruh PWHT terhadap struktur mikro pada lasan pipa baja ASTM A106 grade B. In *Journal of Welding Technology* (Vol. 1, Issue 2).

Shafeek, M., Suranjan, S., Doreswamy, D., & Sachidananda, H. K. (2024). Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of GMAW welded S275 steel welded zone. *Discover Materials*, *4*(1). https://doi.org/10.1007/s43939-024-00169-4

Syukran, Azwinur, & Ferdiyansyah. (2020). *THE EFFECT OF HOLDING TIME ON STRESS RELIEF ANNEALING PROCESS TO HARDNESS OF CARBON STEEL SA.106 GRADE B AFTER WELDING*. *14*(1).

Tito. (2017). Aplikasi Non Destructive Test Penetrant Testing (NDT-PT) Untuk Analisis Hasil Pengelasam SMAW 3G Butt Joint. *Jurnal Teknologi Terapan |*, *3*(2).

Weriono. (2018). *Karekteristik Proses Full Annealing Dengan Variasi Media Quench Terhadap Kekuatan Mekanik Aisi 1045*. *11*(2).

Wibowo, H., Noer Ilman, M., & Iswanto, P. (2016). Analisa Heat Input Pengelasan terhadap Distorsi, Struktur Mikro dan Kekuatan Mekanis Baja A36. *Jurnal Rekayasa Mesin*, *7*(1), 5–12.

Yunianto, B., Wicaksana, P., Sudharto, J., UNDIP Tembalang, K., & Tengah, J. (2023). *Analisis Cacat Hasil Pengelasan Pada Pipa ASTM A106 Grade B Menggunakan Magnetic Particle Test dan Liquid Penetrant Test di Workshop Las dan Inspeksi PPSDM Migas Cepu* (Vol. 25, Issue 2).

Yustiasih Purwaningrum. (2006). Karakterisasi Sifat Fisis Dan Mekanis Sambungan Las SMAW Baja A-287 Sebelum Dan Sesudah PWHT. *Jurnal Teknoin*, *11*, 233–242.

LAMPIRAN

Lampiran A. *Welding Procedure Specification* (WPS)

1. WPS Variasi Arus 210 A

Passes	Welding Process	Filler		Current		Voltage	Travel Speed
		Class (AWS)	Size (mm)	Polarity	Amp	Volt	Cm/minute
1 (Root Pass)	GMAW	ER 70S-6	1.2	DC+	120-150	18-20	10-12
2 - N	GMAW	ER 70S-6	1.2	DC+	210	26-30	27-32

2. WPS Variasi Arus 235 A

Passes	Welding Process	Filler		Current		Voltage	Travel Speed
		Class (AWS)	Size (mm)	Polarity	Amp	Volt	Cm/minute
1 (Root Pass)	GMAW	ER 70S-6	1.2	DC+	120-150	18-20	10-12
2 - N	GMAW	ER 70S-6	1.2	DC+	235	26-30	27-32

3. WPS Variasi Arus 260 A

Passes	Welding Process	Filler		Current		Voltage	Travel Speed
		Class (AWS)	Size (mm)	Polarity	Amp	Volt	Cm/minute
1 (Root Pass)	GMAW	ER 70S-6	1.2	DC+	120-150	18-20	10-12
2 - N	GMAW	ER 70S-6	1.2	DC+	235	26-30	27-32

Lampiran B. Data Hasil Uji Tarik

1. Variasi Arus 210 A *Non-Annealing*

Zwick / Roell

Test report

Customer	:	AULIA IRELIN SEKAR REMON	Material	:	SM 490
Job no.	:	210 A	Pre-treatment	:	NON ANNEALING
Test standard	:	ASTM E 8/E8M			

Test speeds	:	Method A		Speed, yield point	:	100	kpsi/min
Pre-load	:	0,3	kpsi	Speed in the yield range	:	0,05	1/min
Speed, Young's modulus	:	100	kpsi/min	Test speed	:	0,5	1/min

Test results:

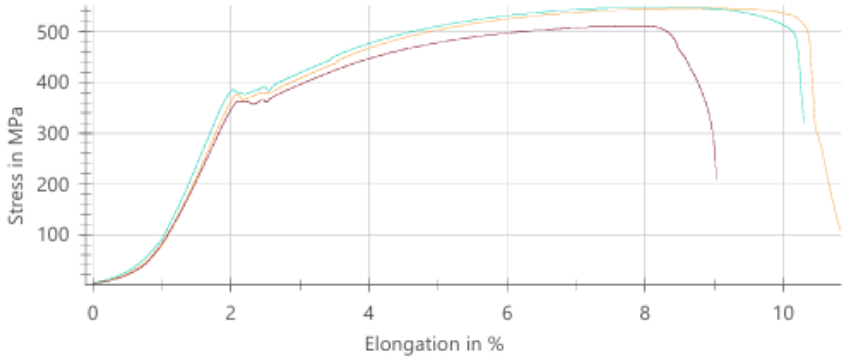
Legend	No.	Specimen no.	Clock time	L_c	m_E	$Y_{0.2}$	$EUL_{0.5}$	$Y_{0.2}/R_m$	UYS	UYS/R_m	LYS
				mm	MPa	MPa	MPa	%	MPa	%	MPa
	18	1	10:06:34	150	5000	506,7	22,7	92,74	375,7	68,75	365,4
	19	2	10:11:32	150	5000	499,8	27,1	91,04	384,7	70,09	376,9
	20	3	10:20:33	150	29000	362,6	20,5	70,83	363,6	71,02	357,5

Legend	No.	YPE	TS	F_{max}	El_u	$El_{u\ plateau}$	Elong. at break	L_0	L_c	T	W
		%	MPa	MPa	%	%	%	mm	mm	mm	mm
	18	0,11	546,4	546,41	8,7	8,6	10,8	150,00	150,00	12	12,49
	19	0,53	549,0	548,96	8,2	8,1	10,3	150,00	150,00	11,85	12,41
	20	0,31	511,9	511,90	7,1	6,9	8,2	150,00	150,00	12,26	12,63

Legend	No.	Cross-section	Elongation
		in^2	%
	18	0,23	-
	19	0,23	-
	20	0,24	-

Zwick / Roell

Series graph:



Statistics:

Series	Specimen no.	L_c	m_E	$Y_{0.2}$	$EUL_{0.5}$	$Y_{0.2}/R_m$	UYS	UYS/R_m	LYS	YPE
n = 3		mm	MPa	MPa	MPa	%	MPa	%	MPa	%
$\bar{x}$	2	150	13000	456,4	23,4	84,87	374,7	69,95	366,6	0,31
s	1	0,000	13800	81,3	3,4	12,19	10,6	1,14	9,7	0,21
ν [%]	50,00	0,00	106,27	17,81	14,41	14,36	2,84	1,63	2,66	65,62

Series	TS	F_{max}	El_u	$El_{u\ plateau}$	Elong. at break	L_0	L_c	T	W
n = 3	MPa	MPa	%	%	%	mm	mm	mm	mm
$\bar{x}$	535,8	535,75	8,0	7,9	9,8	150,00	150,00	12,04	12,51
s	20,7	20,70	0,9	0,9	1,3	0,00	0,00	0,2074	0,1114
ν [%]	3,86	3,86	10,77	11,26	13,77	0,00	0,00	1,72	0,89

Series	Cross-section	Elongation
n = 3	in^2	%
$\bar{x}$	0,23	-
s	0,01	-
ν [%]	2,62	-

2. Variasi Arus 235 A *Non-Annealing*

Zwick / Roell

Test report

Customer	:	AULIA IRELIN SEKAR REMON	Material	:	SM 490
Job no.	:	235 A	Pre-treatment	:	NON ANEALING
Test standard	:	ASTM E 8/E8M			

Test speeds	:	Method A		Speed, yield point	:	100 kpsi/min
Pre-load	:	0,3	kpsi	Speed in the yield range	:	0,05 1/min
Speed, Young's modulus	:	100	kpsi/min	Test speed	:	0,5 1/min

Test results:

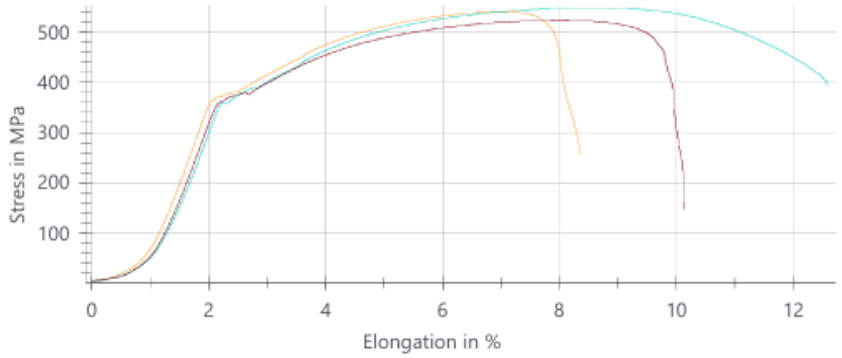
Legend	No.	Specimen no.	Clock time	L_c mm	m_E MPa	$Y_{0.2}$ MPa	$EUL_{0.5}$ MPa	$Y_{0.2}/R_m$ %	UYS MPa	UYS/R_m %	LYS MPa
	13	1	11:10:13	150	32600	374,1	18,5	69,18	-	-	-
	15	2	09:49:33	150	2600	-	14,2	-	390,2	71,17	388,2
	16	3	09:55:40	150	28000	6,4	13,0	1,21	-	-	-

Legend	No.	YPE %	TS MPa	F_{max} MPa	El_u %	$El_{u\ plateau}$ %	Elong. at break %	L_0 mm	L_c mm	T mm	W mm
	13	-	540,8	540,75	6,1	6,0	7,4	150,00	150,00	11,98	12,19
	15	0,05	548,4	548,35	8,6	8,5	12,6	150,00	150,00	12,03	12,18
	16	-	524,1	524,10	8,0	7,9	10,1	150,00	150,00	12,07	12,31

Legend	No.	Cross-section in^2	Elongation %
	13	0,22	-
	15	0,23	-
	16	0,23	-

Zwick / Roell

Series graph:



Statistics:

Series n = 3	Specimen no.	L_c mm	m_E MPa	$Y_{0.2}$ MPa	$EUL_{0.5}$ MPa	$Y_{0.2}/R_m$ %	UYS MPa	UYS/R_m %	LYS MPa	YPE %	TS MPa
x	2	150	21100	190,2	15,2	35,19	390,2	71,17	388,2	0,05	537,7
s	1	0,000	16100	260,0	2,9	48,06	-	-	-	-	12,4
ν [%]	50,00	0,00	76,52	136,70	19,19	136,55	-	-	-	-	2,31

Series n = 3	F_{max} MPa	El_u %	$El_{u\ plateau}$ %	Elong. at break %	L_0 mm	L_c mm	T mm	W mm	Cross-section in^2
x	537,73	7,6	7,5	10,1	150,00	150,00	12,03	12,23	0,23
s	12,41	1,3	1,3	2,6	0,00	0,00	0,04509	0,07234	0,00
ν [%]	2,31	17,27	17,41	25,62	0,00	0,00	0,37	0,59	2,06

Series n = 3	Elongation %
x	-
s	-
ν [%]	-

3. Variasi Arus 260 A *Non-Annealing*

Zwick / Roell

Test report

Customer	:	AULIA IRELIN SEKAR REMON	Material	:	SM 490
Job no.	:	260 A	Pre-treatment	:	NON ANNEALING
Test standard	:	ASTM E 8/E8M			

Test speeds	:	Method A		Speed, yield point	:	100	kpsi/min
Pre-load	:	0,3	kpsi	Speed in the yield range	:	0,05	1/min
Speed, Young's modulus	:	100	kpsi/min	Test speed	:	0,5	1/min

Test results:

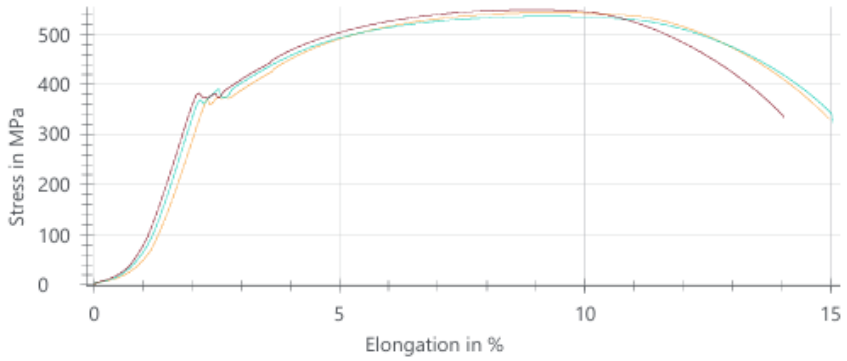
Legend	No.	Specimen no.	Clock time	L_c mm	m_E MPa	$Y_{0.2}$ MPa	$EUL_{0.5}$ MPa	$Y_{0.2}/R_m$ %	UYS MPa	UYS/R_m %	LYS MPa
	9	1	10:30:56	150	3600	464,2	14,9	85,46	370,3	68,17	359,9
	11	2	10:53:17	150	31600	371,5	17,8	69,34	368,7	68,83	361,8
	12	3	11:02:48	150	4500	504,8	21,4	91,98	382,5	69,69	371,9

Legend	No.	YPE %	TS MPa	F_{max} MPa	El_u %	$El_{u\ plateau}$ %	Elong. at break %	L_0 mm	L_c mm	T mm	W mm
	9	0,49	543,2	543,17	9,2	9,2	14,9	150,00	150,00	12,05	12,34
	11	0,10	535,8	535,76	8,3	8,3	14,1	150,00	150,00	12,02	12,35
	12	0,42	548,8	548,84	8,9	8,8	14,0	150,00	150,00	12,05	12,34

Legend	No.	Cross-section in^2	Elongation %
	9	0,23	-
	11	0,23	-
	12	0,23	-

Zwick / Roell

Series graph:



Statistics:

Series	Specimen no.	L_c	m_E	$Y_{0.2}$	$EUL_{0.5}$	$Y_{0.2}/R_m$	UYS	UYS/R_m	LYS	YPE
n = 3		mm	MPa	MPa	MPa	%	MPa	%	MPa	%
x	2	150	13200	446,8	18,0	82,26	373,8	68,89	364,5	0,34
s	1	0,000	15900	68,3	3,3	11,65	7,5	0,76	6,5	0,21
ν [%]	50,00	0,00	120,36	15,29	18,11	14,17	2,01	1,10	1,78	61,92

Series	TS	F_{max}	El_u	$El_{u\ plateau}$	Elong. at break	L_0	L_c	T	W
n = 3	MPa	MPa	%	%	%	mm	mm	mm	mm
x	542,6	542,59	8,8	8,8	14,3	150,00	150,00	12,04	12,34
s	6,6	6,56	0,5	0,5	0,5	0,00	0,00	0,01732	0,005774
ν [%]	1,21	1,21	5,45	5,33	3,38	0,00	0,00	0,14	0,05

Series	Cross-section	Elongation
n = 3	in^2	%
x	0,23	-
s	0,00	-
ν [%]	0,10	-

4. Variasi Arus 210 A *Annealing*

Zwick / Roell

Test report

Customer	:	AULIA IRELIN SEKAR REMON	Material	:	SM 490
Job no.	:	210 A	Pre-treatment	:	ANNEALING
Test standard	:	ASTM E 8/E8M	Machine data	:	

Test speeds	:	Method A	Speed, yield point	:	100 kpsi/min
Pre-load	:	0,3 kpsi	Speed in the yield range	:	0,05 1/min
Speed, Young's modulus	:	100 kpsi/min	Test speed	:	0,5 1/min

Test results:

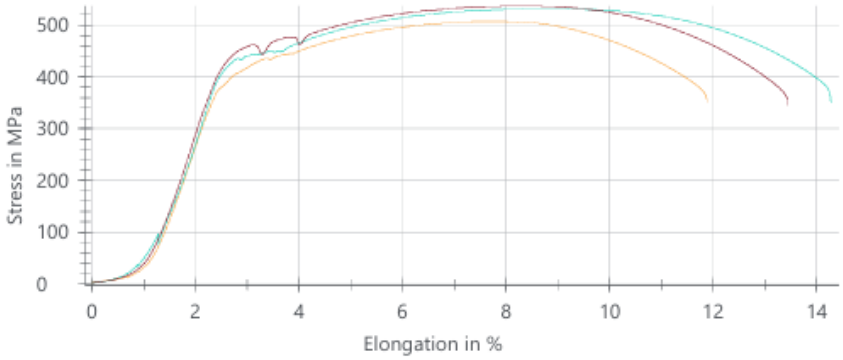
Legend	No.	Specimen no.	Clock time	L_c mm	m_E MPa	$Y_{0.5}$ MPa	$EUL_{0.5}$ MPa	$Y_{0.2}/R_m$ %	UYS MPa	UYS/R_m %	LYS MPa
	4	1	13:39:15	150	2000	-	9,5	-	507,0	100,32	504,1
	5	2	13:48:18	150	27600	442,8	11,4	81,84	435,7	81,88	432,7
	6	3	14:00:36	150	31500	460,6	10,1	81,40	-	-	-

Legend	No.	YPE %	TS MPa	F_{max} MPa	El_u %	$El_{u\ plateau}$ %	Elong. at break %	L_0 mm	L_c mm	T mm	W mm
	4	0,76	505,3	505,33	8,4	8,4	11,8	150,00	150,00	11,8	12,6
	5	0,07	532,1	532,08	7,8	7,7	13,2	150,00	150,00	7	7,3
	6	-	536,9	536,93	7,2	7,2	12,4	150,00	150,00	6,7	7,1

Legend	No.	Cross-section in^2	Elongation %
	4	0,09	-
	5	0,08	-
	6	0,07	-

Zwick / Roell

Series graph:



Statistics:

Series	Specimen no.	L_c	m_E	$Y_{0.5}$	$EUL_{0.5}$	$Y_{0.2}/R_m$	UYS	UYS/R_m	LYS	YPE
n = 3		mm	MPa	MPa	MPa	%	MPa	%	MPa	%
x	2	150	20400	451,7	10,3	81,62	471,3	91,10	468,4	0,41
s	1	0,000	16000	12,6	0,9	0,31	50,4	13,04	50,5	0,49
ν [%]	50,00	0,00	78,51	2,79	9,13	0,38	10,70	14,31	10,79	119,01

Series	TS	F_{max}	El_u	$El_{u\ plateau}$	Elong. at break	L_0	L_c	T	W	Cross-section
n = 3	MPa	MPa	%	%	%	mm	mm	mm	mm	in^2
x	524,8	524,78	7,8	7,8	12,5	150,00	150,00	8,5	9	0,08
s	17,0	17,01	0,6	0,6	0,7	0,00	0,00	2,862	3,119	0,01
ν [%]	3,24	3,24	8,22	8,34	5,65	0,00	0,00	33,67	34,66	10,55

Series	Elongation
n = 3	%
x	-
s	-
ν [%]	-

5. Variasi Arus 235 A *Annealing*

Zwick / Roell

Test report

Customer	:	AULIA IRELIN SEKAR REMON	Material	:	SM 490
Job no.	:	235 A	Pre-treatment	:	ANNEALING
Test standard	:	ASTM E 8/E8M			

Test speeds	:	Method A		Speed, yield point	:	100 kpsi/min
Pre-load	:	0,3 kpsi		Speed in the yield range	:	0,05 1/min
Speed, Young's modulus	:	100 kpsi/min		Test speed	:	0,5 1/min

Test results:

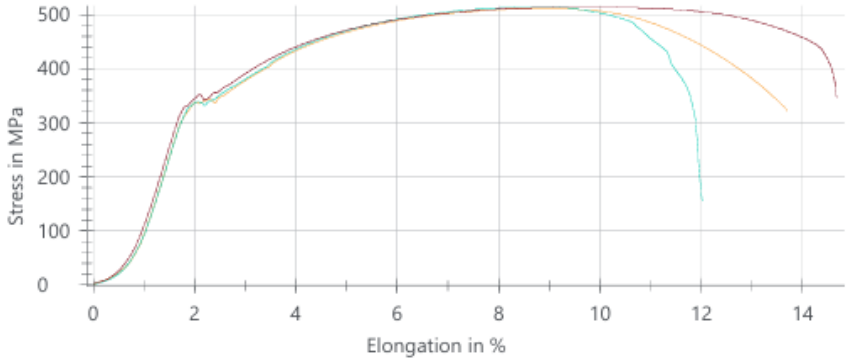
Legend	No.	Specimen no.	Clock time	L_c mm	m_E MPa	$Y_{0.2}$ MPa	$EUL_{0.5}$ MPa	$Y_{0.2}/R_m$ %	UYS MPa	UYS/R_m %	LYS MPa
	13	1	15:58:25	150	3100	391,7	22,5	76,68	338,0	66,17	335,2
	14	2	16:04:03	150	2200	262,8	21,0	51,15	338,9	65,96	331,9
	15	3	16:08:25	150	30900	343,6	26,5	66,88	352,2	68,56	341,8

Legend	No.	YPE %	TS MPa	F_{max} MPa	El_u %	$El_{u\ plateau}$ %	Elong. at break %	L_0 mm	L_c mm	T mm	W mm
	13	0,38	510,8	510,78	9,0	8,9	13,8	150,00	150,00	12,22	12,24
	14	0,15	513,8	513,80	8,9	8,7	12,1	150,00	150,00	12,37	12,16
	15	0,34	513,7	513,66	9,0	9,0	14,0	150,00	150,00	12,02	12,21

Legend	No.	Cross-section in^2	Elongation %
	13	0,23	-
	14	0,23	-
	15	0,23	-

Zwick / Roell

Series graph:



Statistics:

Series n = 3	Specimen no.	L_c mm	m_E MPa	$Y_{0.2}$ MPa	$EUL_{0.5}$ MPa	$Y_{0.2}/R_m$ %	UYS MPa	UYS/R_m %	LYS MPa	YPE %
x	2	150	12100	332,7	23,4	64,90	343,0	66,89	336,3	0,29
s	1	0,000	16300	65,1	2,9	12,88	7,9	1,45	5,0	0,12
v [%]	50,00	0,00	135,18	19,57	12,23	19,84	2,31	2,16	1,49	41,91

Series n = 3	TS MPa	F_{max} MPa	El_u %	$El_{u\ plateau}$ %	Elong. at break %	L_0 mm	L_c mm	T mm	W mm
x	512,7	512,74	9,0	8,9	13,3	150,00	150,00	12,2	12,2
s	1,7	1,71	0,1	0,2	1,0	0,00	0,00	0,1756	0,04041
v [%]	0,33	0,33	0,66	1,80	7,84	0,00	0,00	1,44	0,33

Series n = 3	Cross-section in^2	Elongation %
x	0,23	-
s	0,00	-
v [%]	1,28	-

6. Variasi Arus 260 A *Annealing*

Zwick / Roell

Test report

Customer	:	AULIA IRELIN SEKAR REMON	Material	:	SM 490
Job no.	:	260 A	Pre-treatment	:	ANNEALING
Test standard	:	ASTM E 8/E8M			

Test speeds	:	Method A		Speed, yield point	:	100	kpsi/min
Pre-load	:	0,3	kpsi	Speed in the yield range	:	0,05	1/min
Speed, Young's modulus	:	100	kpsi/min	Test speed	:	0,5	1/min

Test results:

Legend	No.	Specimen no.	Clock time	L_c	m_E	$Y_{0.2}$	$EUL_{0.5}$	$Y_{0.2}/R_m$	UYS	UYS/R_m	LYS
				mm	MPa	MPa	MPa	%	MPa	%	MPa
	21	1	16:56:12	150	31300	328,1	26,2	65,83	337,8	67,77	327,3
	22	2	17:05:58	150	30100	321,8	21,1	65,98	327,3	67,11	324,8
	24	3	17:23:56	150	3700	427,5	14,0	85,06	333,6	66,38	322,9

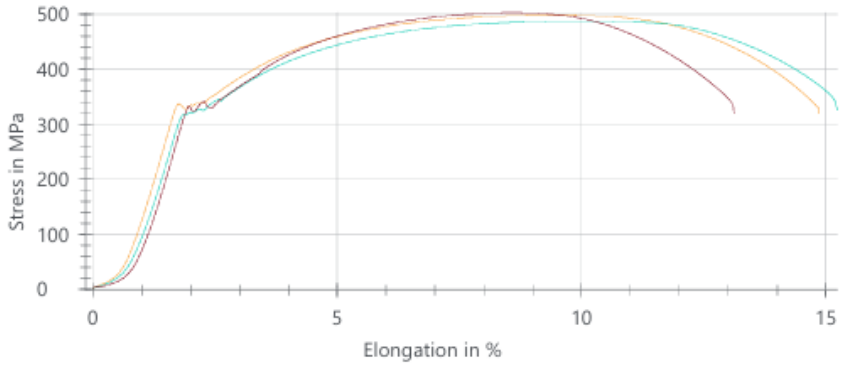
Legend	No.	YPE	TS	F_{max}	El_u	$El_{u\ plateau}$	Elong. at break	L_0	L_c	T	W
		%	MPa	MPa	%	%	%	mm	mm	mm	mm
	21	0,53	498,4	498,41	8,7	8,7	14,2	150,00	150,00	12,13	12,27
	22	0,08	487,6	487,64	9,2	9,2	14,5	150,00	150,00	12,45	12,65
	24	0,46	502,6	502,64	8,7	8,6	13,2	150,00	150,00	12,26	12,32

Legend	No.	Cross-section in^2	Elongation %
	21	0,23	-
	22	0,24	-
	24	0,23	-

b

Zwick / Roell

Series graph:



Statistics:

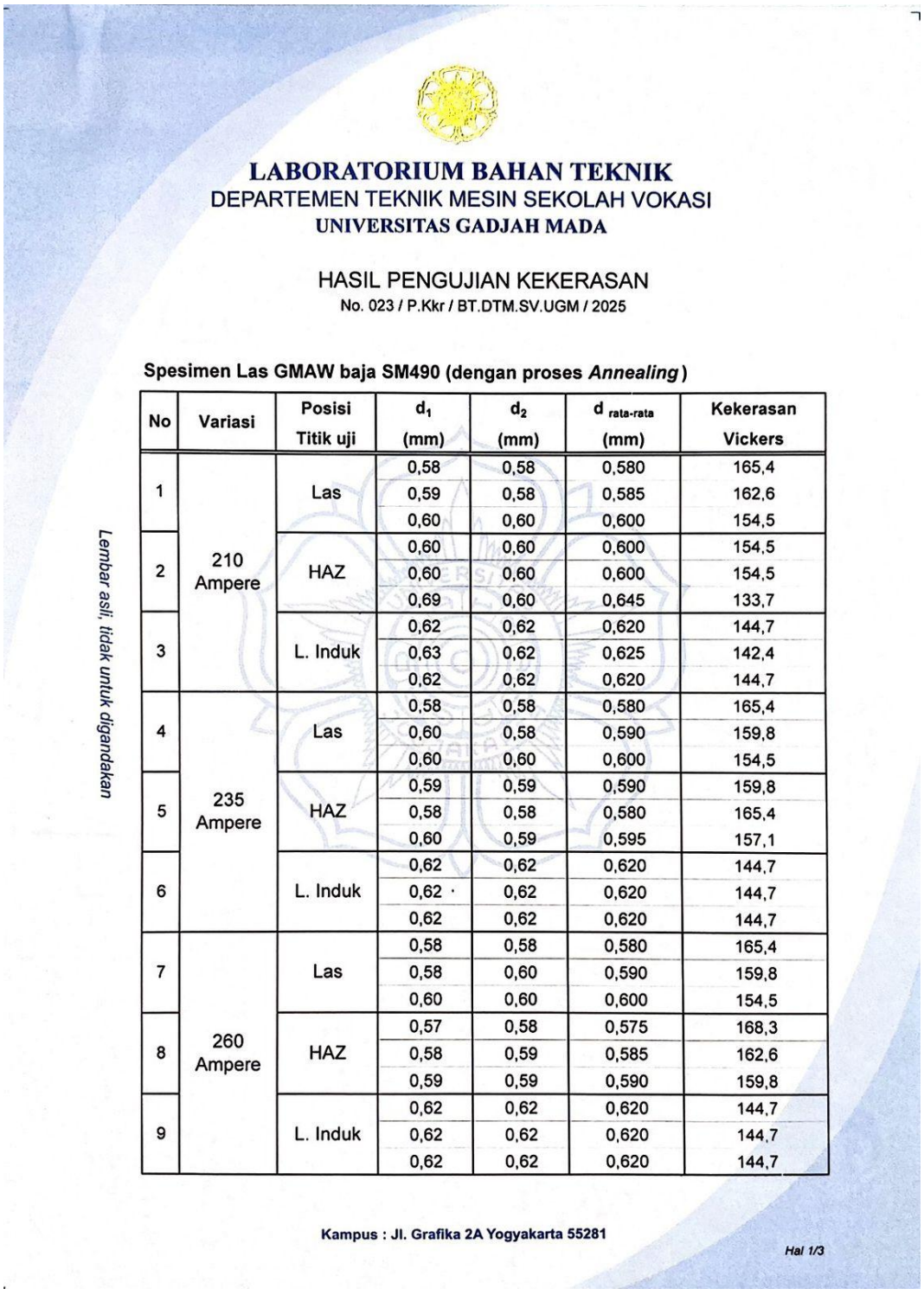
Series	Specimen no.	L_c	m_E	$Y_{0.2}$	$EUL_{0.5}$	$Y_{0.2}/R_m$	UYS	UYS/R_m	LYS	YPE
n = 3		mm	MPa	MPa	MPa	%	MPa	%	MPa	%
x	2	150	21700	359,1	20,4	72,29	332,9	67,09	325,0	0,36
s	1	0,000	15600	59,3	6,1	11,06	5,3	0,69	2,2	0,24
ν [%]	50,00	0,00	72,03	16,52	29,82	15,29	1,59	1,04	0,68	67,24

Series	TS	F_{max}	El_u	$El_{u\ plateau}$	Elong. at break	L_0	L_c	T	W
n = 3	MPa	MPa	%	%	%	mm	mm	mm	mm
x	496,2	496,23	8,9	8,8	14,0	150,00	150,00	12,28	12,41
s	7,7	7,73	0,3	0,3	0,7	0,00	0,00	0,1609	0,2065
ν [%]	1,56	1,56	3,44	3,54	4,95	0,00	0,00	1,31	1,66

Series	Cross-section	Elongation
n = 3	in^2	%
x	0,24	-
s	0,01	-
ν [%]	2,95	-

Lampiran C. Data Hasil Uji Kekerasan

a. Hasil Kekerasan *Annealing*



LABORATORIUM BAHAN TEKNIK
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN SEKOLAH VOKASI
UNIVERSITAS GADJAH MADA

HASIL PENGUJIAN KEKERASAN
No. 023 / P.Kkr / BT.DTM.SV.UGM / 2025

Spesimen Las GMAW baja SM490 (dengan proses *Annealing*)

No	Variasi	Posisi Titik uji	d_1 (mm)	d_2 (mm)	$d_{rata-rata}$ (mm)	Kekerasan Vickers
1	210 Ampere	Las	0,58	0,58	0,580	165,4
			0,59	0,58	0,585	162,6
			0,60	0,60	0,600	154,5
2		HAZ	0,60	0,60	0,600	154,5
			0,60	0,60	0,600	154,5
			0,69	0,60	0,645	133,7
3		L. Induk	0,62	0,62	0,620	144,7
			0,63	0,62	0,625	142,4
			0,62	0,62	0,620	144,7
4	235 Ampere	Las	0,58	0,58	0,580	165,4
			0,60	0,58	0,590	159,8
			0,60	0,60	0,600	154,5
5		HAZ	0,59	0,59	0,590	159,8
			0,58	0,58	0,580	165,4
			0,60	0,59	0,595	157,1
6		L. Induk	0,62	0,62	0,620	144,7
			0,62	0,62	0,620	144,7
			0,62	0,62	0,620	144,7
7	260 Ampere	Las	0,58	0,58	0,580	165,4
			0,58	0,60	0,590	159,8
			0,60	0,60	0,600	154,5
8		HAZ	0,57	0,58	0,575	168,3
			0,58	0,59	0,585	162,6
			0,59	0,59	0,590	159,8
9		L. Induk	0,62	0,62	0,620	144,7
			0,62	0,62	0,620	144,7
			0,62	0,62	0,620	144,7

Lembar asli, tidak untuk digandakan

Kampus : Jl. Grafika 2A Yogyakarta 55281

Hal 1/3

b. Hasil Kekerasan *Non-Annealing*

LABORATORIUM BAHAN TEKNIK
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN SEKOLAH VOKASI
UNIVERSITAS GADJAH MADA

HASIL PENGUJIAN KEKERASAN

No. 023 / P.Kkr / BT.DTM.SV.UGM / 2025

Spesimen Las GMAW baja SM490 (tanpa proses *Annealing*)

No	Variasi	Posisi Titik uji	d_1 (mm)	d_2 (mm)	$d_{rata-rata}$ (mm)	Kekerasan Vickers
1	210 Ampere	Las	0,56	0,56	0,560	177,4
			0,56	0,57	0,565	174,3
			0,56	0,59	0,575	168,3
2		HAZ	0,54	0,55	0,545	187,3
			0,55	0,55	0,550	183,9
			0,56	0,54	0,550	183,9
3		L. Induk	0,59	0,59	0,590	159,8
			0,59	0,59	0,590	159,8
			0,59	0,59	0,590	159,8
4	235 Ampere	Las	0,58	0,58	0,580	165,4
			0,60	0,60	0,600	154,5
			0,58	0,58	0,580	165,4
5		HAZ	0,56	0,56	0,560	177,4
			0,56	0,56	0,560	177,4
			0,56	0,56	0,560	177,4
6		L. Induk	0,59	0,60	0,595	157,1
			0,59	0,59	0,590	159,8
			0,59	0,59	0,590	159,8
7	260 Ampere	Las	0,56	0,56	0,560	177,4
			0,56	0,56	0,560	177,4
			0,56	0,56	0,560	177,4
8		HAZ	0,56	0,57	0,565	174,3
			0,57	0,57	0,570	171,2
			0,55	0,56	0,555	180,6
9		L. Induk	0,62	0,60	0,590	159,8
			0,62	0,60	0,600	154,5
			0,62	0,59	0,600	154,5

Lembar asli, tidak untuk digandakan

Kampus : Jl. Grafika 2A Yogyakarta 55281

Hal 2/3

Lampiran D. Perhitungan

Perhitungan *Travel Speed*

$$Heat\ Input = \frac{I\ x\ V\ x\ 60}{S}$$

V : Tegangan (Volt)

I : Arus pengelasan (Ampere)

S : *Travel speed* (mm/min)

60 : konversi detik ke menit

1 kJ = 1000 J

- Arus 210 A

  $$Heat\ Input = \frac{210A\ x\ 26\ x\ 60}{231} = 1000 \text{ x } 1{,}418 \text{ kJ/mm}$$

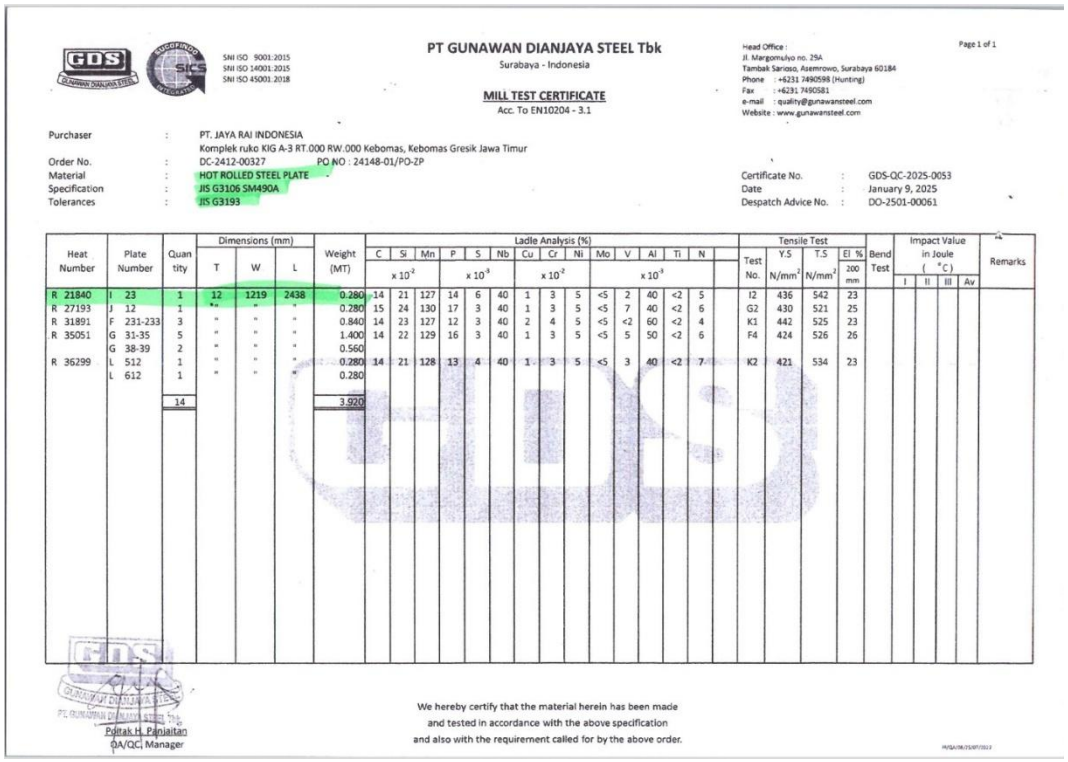
- Arus 235 A

  $$Heat\ Input = \frac{235A\ x\ 26\ x\ 60}{227{,}3} = 1000 \text{ x } 1{,}61 \text{kJ/mm}$$

- Arus 260 A

  $$Heat\ Input = \frac{260A\ x\ 26\ x\ 60}{217{,}4} = 1000 \text{ x } 1{,}865 \text{ kJ/mm}$$

Lampiran E. *Mill Test Certificate* Baja SM490



SNI ISO 9001:2015
SNI ISO 14001:2015
SNI ISO 45001:2018

PT GUNAWAN DIANJAYA STEEL Tbk
Surabaya - Indonesia

Head Office :
Jl. Margomulyo no. 29A
Tambak Sarioso, Asemrowo, Surabaya 60184
Phone : +6231 7490598 (Hunting)
Fax : +6231 7490581
e-mail : quality@gunawansteel.com
Website : www.gunawansteel.com

MILL TEST CERTIFICATE
Acc. To EN10204 - 3.1

Purchaser : PT. JAYA RAI INDONESIA
Komplek ruko KIG A-3 RT.000 RW.000 Kebomas, Kebomas Gresik Jawa Timur
Order No. : DC-2412-00327 PO NO : 24148-01/PO-ZP
Material : HOT ROLLED STEEL PLATE
Specification : JIS G3106 SM490A
Tolerances : JIS G3193

Certificate No. : GDS-QC-2025-0053
Date : January 9, 2025
Despatch Advice No. : DO-2501-00061

Heat Number	Plate Number	Quantity	Dimensions (mm) T	W	L	Weight (MT)	Ladle Analysis (%) C (x10⁻²)	Si	Mn (x10⁻²)	P (x10⁻³)	S	Nb (x10⁻³)	Cu (x10⁻²)	Cr	Ni	Mo (x10⁻³)	V	Al	Ti	N	Tensile Test Test No.	Y.S N/mm²	T.S N/mm²	El % 200 mm	Bend Test	Impact Value in Joule (°C) I	II	III	Av	Remarks
R 21840	I 23	1	12	1219	2438	0.280	14	21	127	14	6	40	1	3	5	<5	2	40	<2	5	I2	436	542	23						
R 27193	J 12	1	"	"	"	0.280	15	24	130	17	3	40	1	3	5	<5	7	40	<2	6	G2	430	521	25						
R 31891	F 231-233	3	"	"	"	0.840	14	23	127	12	3	40	2	4	5	<5	<2	60	<2	4	K1	442	525	23						
R 35051	G 31-35	5	"	"	"	1.400	14	22	129	16	3	40	1	3	5	<5	5	50	<2	6	F4	424	526	26						
	G 38-39	2	"	"	"	0.560																								
R 36299	L 512	1	"	"	"	0.280	14	21	128	13	4	40	1	3	5	<5	3	40	<2	7	K2	421	534	23						
	L 612	1	"	"	"	0.280																								
		14				3.920																								

We hereby certify that the material herein has been made
and tested in accordance with the above specification
and also with the requirement called for by the above order.

Poltak H. Panjaitan
QA/QC Manager

Lampiran F. ***Mill Test Certificate Filler*** **ER 70S-6**

000-3

HIT WELDING INDUSTRY CO.,LTD.
(CHANGZHOU HUATONG
WELDING INDUSTRY CO.,LTD.)

MILL TEST CERTIFICATE

EN 10204:2004/3.1

QAM. Ricardo Lee

Our Inv. (Ref) No. HT17828009-3	DATE APR.28,2017	CERT NO. 042812
consignee ref.	BUYER REF CHWI17031/IV/2017	PACK 95040 KGS
PT. YONTOMO SUKSES ABADI KOMPLEK DAAN MOGOT ARCADIA BLOK G4 NO.8 RT. 01 RW. 03 BATU CEPER - BATU CEPER TANGERANG - BANTEN 15122 INDONESIA	REQUIREMENTS AWS A5.18 :ER 70S-6 DIN 8559 : SG2 EN 13479 . EN ISO 14341 -A- : G 42 2 C1/M21 3Si1 Approved by: DB(42.177.01),TUV(10801), under gas C1, M2, M3 ISO 14175 Approved by: ABS, LR, CCS, GL, NK under gas CO2 Certified by CWB to CSA standard W48 Welding Position: PA, PB, PC, PD, PE, PF DIN EN ISO6947	
PRODUCT Copper Coated Mild Steel Solid Wire For Gas Shielded Welding	INSPECTOR STAMP 李 振 华 Ricardo Lee	
BRAND MARK HUATONG HTW-50		
DESIGNATION HTW-50(SG2 G 42 2 C1/ G 42 4 M21 3Si1)		
DATE OF LOADING APR.28, 2017 AT FACTORY	TERMS OF DELIVERY CNF JAKARTA, INDONESIA	

LOT NO.	Spec.	N.WEIGHT	PCS.	MFG. DATE
S070770410	1.2mm 15kg/D270	47520 KGS	3168 CTNS	APR.10,2017
S070770410	1.0mm 15kg/D270	47520 KGS	3168 CTNS	APR.10,2017

CHEMICAL COMPOSITION

LOT NO	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Al	Ti+Zr
S070770410	0.08	0.83	1.48	0.012	0.014	0.030	0.010	0.11	0.006	0.001	0.01	0.008

LOT NO	Spec.	TEST RESULT YIELD STRENGTH Mpa	TENSILE STRENGTH Mpa	A %	Typical Values IMPACT TEST TEMP °C	KV2 J	X-Ray Indicates Test Result
S070770410	1.2mm	439	545	30	-30	92	Grade: I
S070770410	1.0mm	433	546	29	-30	95	Grade: I

reviewed by
Irma 18/5/17

THE REQUIREMENTS STIPULATED ARE SATISFIED.
HIT WELDING INDUSTRY CO.,LTD.
(CHANGZHOU HUATONG
WELDING INDUSTRY CO.,LTD.
CHINA)
www.htw.cn

ISO 9001 BUREAU VERITAS Certification

Certificate No.CNBJ311421-

Lampiran G. Standar ASTM E3

Designation: E 3 – 95

An American National Standard

Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens[1]

This standard is issued under the fixed designation E 3; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope

1.1 The primary objective of metallographic examinations is to reveal the constituents and structure of metals and their alloys by means of the light microscope. In special cases, the objective of the examination may require the development of less detail than in other cases but, under nearly all conditions, the proper selection and preparation of the specimen is of major importance. Because of the diversity in available equipment and the wide variety of problems encountered, the following text presents for the guidance of the metallographer only those practices which experience has shown are generally satisfactory; it cannot and does not describe the variations in technique required to solve individual problems.

NOTE 1—For a more extensive description of various metallographic techniques, refer to Samuels, L. E., *Metallographic Polishing by Mechanical Methods*, American Society for Metals (ASM) Metals Park, OH, 3rd Ed., 1982; Petzow, G., *Metallographic Etching, ASM, 1978; and VanderVoort, G., Metallography: Principles and Practice*, McGraw Hill, NY, 1984.

1.2 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*

E 7 Terminology Relating to Metallography[2]

E 45 Practice for Determining the Inclusion Content of Steel[2]

E 340 Test Method for Macroetching Metals and Alloys[2]

E 407 Test Methods for Microetching Metals and Alloys[2]

E 1077 Test Method for Estimating the Depth of Decarburization of Steel Specimens[2]

E 1268 Practice for Assessing the Degree of Banding or Orientation of Microstructures[2]

E 1558 Guide to Electrolytic Polishing of Metallographic Specimens[2]

3. Significance and Use

3.1 Microstructures have a strong influence on the properties and successful application of metals and alloys. Determination and control of microstructure requires the use of metallographic examination.

3.2 Many specifications contain a requirement regarding microstructure; hence, a major use for metallographic examination is inspection to ensure that the requirement is met. Other major uses for metallographic examination are in failure analysis, and in research and development.

3.3 Proper choice of specimen location and orientation will minimize the number of specimens required and simplify their interpretation. It is easy to take too few specimens for study, but it is seldom that too many are studied.

4. Selection of Metallographic Specimens

4.1 The selection of test specimens for metallographic examination is extremely important because, if their interpretation is to be of value, the specimens must be representative of the material that is being studied. The intent or purpose of the metallographic examination will usually dictate the location of the specimens to be studied. With respect to purpose of study, metallographic examination may be divided into three classifications:

4.1.1 *General Studies or Routine Work*—Specimens from locations that are most likely to reveal the maximum variations within the material under study should be chosen. For example, specimens should be taken from a casting in the zones wherein maximum segregation might be expected to occur as well as specimens from sections where segregation should be at a minimum. In the examination of strip or wire, test specimens should be taken from each end of the coils.

4.1.2 *Study of Failures*—Test specimens should be taken as closely as possible to the fracture or to the initiation of the failure. Before taking the metallographic specimens, study of the fracture surface should be complete, or, at the very least, the fracture surface should be documented. Specimens should be taken in many cases from a sound area for a comparison of structures and properties.

4.1.3 *Research Studies*—The nature of the study will dictate specimen location, orientation, etc. Sampling will usually be more extensive than in routine examinations.

4.2 Having established the location of the metallographic samples to be studied, the type of section to be examined must

[1] This practice is under the jurisdiction of ASTM Committee E-4 on Metallography and is the direct responsibility of Subcommittee E04.01 on Sampling, Specimen Preparation, and Photography.

Current edition approved Jan. 15, 1995. Published March 1995. Originally published as E 3 – 21 T. Last previous edition E 3 – 80 (1986).

[2] *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 03.01.

Copyright © ASTM, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States

Lampiran H. Standar ASTM E92

This international standard was developed in accordance with internationally recognized principles on standardization established in the Decision on Principles for the Development of International Standards, Guides and Recommendations issued by the World Trade Organization Technical Barriers to Trade (TBT) Committee.

Designation: E92 – 17

Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials[1]

This standard is issued under the fixed designation E92; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the U.S. Department of Defense.

1. Scope*

1.1 These test methods cover the determination of the Vickers hardness and Knoop hardness of metallic materials by the Vickers and Knoop indentation hardness principles. This standard provides the requirements for Vickers and Knoop hardness machines and the procedures for performing Vickers and Knoop hardness tests.

1.2 This standard includes additional requirements in annexes:

Verification of Vickers and Knoop Hardness Testing Machines	Annex A1
Vickers and Knoop Hardness Standardizing Machines	Annex A2
Standardization of Vickers and Knoop Indenters	Annex A3
Standardization of Vickers and Knoop Hardness Test Blocks	Annex A4
Correction Factors for Vickers Hardness Tests Made on Spherical and Cylindrical Surfaces	Annex A5

1.3 This standard includes nonmandatory information in an appendix which relates to the Vickers and Knoop hardness tests:

Examples of Procedures for Determining Vickers and Knoop Hardness Uncertainty	Appendix X1

1.4 This test method covers Vickers hardness tests made utilizing test forces ranging from 9.807×10^{-3} N to 1176.80 N (1 gf to 120 kgf), and Knoop hardness tests made utilizing test forces from 9.807×10^{-3} N to 19.613 N (1 gf to 2 kgf).

1.5 Additional information on the procedures and guidance when testing in the microindentation force range (forces ≤ 1 kgf) may be found in Test Method E384, Test Method for Microindentation Hardness of Materials.

1.6 *Units*—When the Vickers and Knoop hardness tests were developed, the force levels were specified in units of grams-force (gf) and kilograms-force (kgf). This standard specifies the units of force and length in the International System of Units (SI); that is, force in Newtons (N) and length in mm or μm. However, because of the historical precedent and continued common usage, force values in gf and kgf units are provided for information and much of the discussion in this standard as well as the method of reporting the test results refers to these units.

NOTE 1—The Vickers and Knoop hardness numbers were originally defined in terms of the test force in kilogram-force (kgf) and the surface area or projected area in millimetres squared (mm^2). Today, the hardness numbers are internationally defined in terms of SI units, that is, the test force in Newtons (N). However, in practice, the most commonly used force units are kilogram-force (kgf) and gram-force (gf). When Newton units of force are used, the force must be divided by the conversion factor 9.80665 N/kgf.

1.7 The test principles, testing procedures, and verification procedures are essentially identical for both the Vickers and Knoop hardness tests. The significant differences between the two tests are the geometries of the respective indenters, the method of calculation of the hardness numbers, and that Vickers hardness may be used at higher force levels than Knoop hardness.

NOTE 2—While Committee E28 is primarily concerned with metallic materials, the test procedures described are applicable to other materials. Other materials may require special considerations, for example see C1326 and C1327 for ceramic testing.

1.8 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

1.9 *This international standard was developed in accordance with internationally recognized principles on standardization established in the Decision on Principles for the Development of International Standards, Guides and Recommendations issued by the World Trade Organization Technical Barriers to Trade (TBT) Committee.*

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*[2]

[1] These test methods are under the jurisdiction of ASTM Committee E28 on Mechanical Testing and is the direct responsibility of Subcommittee E28.06 on Indentation Hardness Testing.

Current edition approved April 1, 2017. Published May 2017. Originally approved in 1952. Last previous edition approved in 2016 as E92–16. DOI: 10.1520/E0092-17.

[2] For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

***A Summary of Changes section appears at the end of this standard**

Copyright © ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. United States

Lampiran I. Standar ASTM E8

This international standard was developed in accordance with internationally recognized principles on standardization established in the Decision on Principles for the Development of International Standards, Guides and Recommendations issued by the World Trade Organization Technical Barriers to Trade (TBT) Committee.

Designation: E8/E8M – 22

American Association State Highway and Transportation Officials Standard AASHTO No.: T68
An American National Standard

Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials[1]

This standard is issued under the fixed designation E8/E8M; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the U.S. Department of Defense.

1. Scope*

1.1 These test methods cover the tension testing of metallic materials in any form at room temperature, specifically, the methods of determination of yield strength, yield point elongation, tensile strength, elongation, and reduction of area.

1.2 The gauge lengths for most round specimens are required to be 4D for E8 and 5D for E8M. The gauge length is the most significant difference between E8 and E8M test specimens. Test specimens made from powder metallurgy (P/M) materials are exempt from this requirement by industry-wide agreement to keep the pressing of the material to a specific projected area and density.

1.3 Exceptions to the provisions of these test methods may need to be made in individual specifications or test methods for a particular material. For examples, see Test Methods and Definitions A370 and Test Methods B557, and B557M.

1.4 Room temperature shall be considered to be 10 °C to 38 °C [50 °F to 100°F] unless otherwise specified.

1.5 The values stated in SI units are to be regarded as separate from inch/pound units. The values stated in each system are not exact equivalents; therefore each system must be used independently of the other. Combining values from the two systems may result in non-conformance with the standard.

1.6 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety, health, and environmental practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

1.7 *This international standard was developed in accordance with internationally recognized principles on standardization established in the Decision on Principles for the Development of International Standards, Guides and Recommendations issued by the World Trade Organization Technical Barriers to Trade (TBT) Committee.*

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*[2]

A356/A356M Specification for Steel Castings, Carbon, Low Alloy, and Stainless Steel, Heavy-Walled for Steam Turbines
A370 Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products
B557 Test Methods for Tension Testing Wrought and Cast Aluminum- and Magnesium-Alloy Products
B557M Test Methods for Tension Testing Wrought and Cast Aluminum- and Magnesium-Alloy Products (Metric)
E4 Practices for Force Calibration and Verification of Testing Machines
E6 Terminology Relating to Methods of Mechanical Testing
E29 Practice for Using Significant Digits in Test Data to Determine Conformance with Specifications
E83 Practice for Verification and Classification of Extensometer Systems
E345 Test Methods of Tension Testing of Metallic Foil
E691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method
E1012 Practice for Verification of Testing Frame and Specimen Alignment Under Tensile and Compressive Axial Force Application
D1566 Terminology Relating to Rubber
E1856 Guide for Evaluating Computerized Data Acquisition Systems Used to Acquire Data from Universal Testing Machines
E2658 Practices for Verification of Speed for Material Testing Machines

3. Terminology

3.1 *Definitions of Terms Common to Mechanical Testing—*

[1] These test methods are under the jurisdiction of ASTM Committee E28 on Mechanical Testing and are the direct responsibility of Subcommittee E28.04 on Uniaxial Testing.

Current edition approved May 1, 2022. Published July 2022. Originally approved in 1924. Last previous edition approved 2021 as E8/E8M – 21.
DOI: 10.1520/E0008_E0008M-22.

[2] For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

*A Summary of Changes section appears at the end of this standard

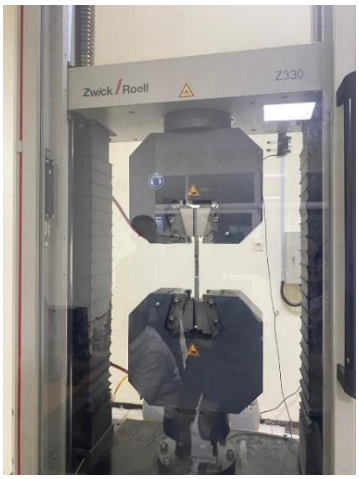
Copyright © ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. United States

Copyright by ASTM Int'l (all rights reserved); Tue Oct 18 20:36:07 GMT 2022
Downloaded/printed by
Asuncion Villanueva Carvallo (Instituto Mexicano Transporte) pursuant to License Agreement. No further reproductions authorized.

Lampiran J. Dokumentasi Kegiatan

No	Gambar Kegiatan	Keterangan
1.		Proses persiapan dan pemotongan material SM490
2.		Proses Pengelasan *Gas Metal Arc Welding* **(**GMAW)
3.		Proses pengukuran amper pengelasan menggunakan a*mperemeter*

4.		Proses pengujian NDT *ultrasonic testing*
5.		Proses pengujian NDT *magnetic testing*
6.		Proses pengujian NDT *penetrant testing*

7.		Proses *annealing* menggunakan *furnace*
8.		Proses pemotongan spesimen menggunakan *bendsaw*
9.		Proses pengujian tarik menggunakan mesin uji tarik dengan merk Zwick Roell type Z330

10.		Proses pengujian struktur mikro menggunakan mikroskop Olympus PME3
11.		Proses pengujian kekerasan *vickers*