

**TUGAS AKHIR**  
**PERBEDAAN *STRING WELDING* DAN *BACK-STEP WELDING***  
**TERHADAP DISTORSI, STRUKTUR MIKRO, DAN**  
**KEKERASAN BAJA ASTM A36 DENGAN PROSES SMAW**

**Disusun untuk memenuhi persyaratan mencapai gelar Sarjana Terapan**

**Dosen Pembimbing :**  
**Dr. Muhammad Hasan Albana, S.Pd., M.T.**  
**Ifti Luthviana Dewi, S.Pd., Gr., M.Pd.**



Disusun oleh:  
**BINAUVAL ZAHABI**  
**4422201008**

**PROGRAM STUDI TEKNOLOGI REKAYASA PENGELASAN DAN**  
**FABRIKASI**  
**JURUSAN TEKNIK MESIN**  
**POLITEKNIK NEGERI BATAM**

**2026**

## **LEMBAR PENGESAHAN**

### **PERBEDAAN *STRING WELDING* DAN *BACK-STEP WELDING* TERHADAP DISTORSI, STRUKTUR MIKRO, DAN KEKERASAN BAJA ASTM A36 DENGAN PROSES SMAW**

#### **TUGAS AKHIR**

Disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Terapan  
pada Program Studi D4 Teknologi Rekayasa Pengelasan dan Fabrikasi  
Jurusan Teknik Mesin  
Politeknik Negeri Batam

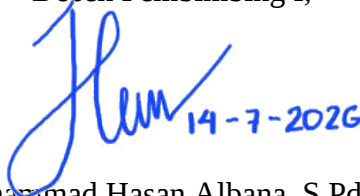
Disusun oleh :

**BINAUVAL ZAHABI**  
**4422201008**

Telah disetujui oleh Dosen Pembimbing.

Batam, 14 Juli 2026.

Dosen Pembimbing I,



Dr. Muhammad Hasan Albana, S.Pd., M.T.

Dosen Pembimbing II,



Ifti Luthviana Dewi, S.Pd., Gr., M.Pd.

## LEMBAR PENGESAHAN

### PERBEDAAN *STRING WELDING* DAN *BACK-STEP WELDING* TERHADAP DISTORSI, STRUKTUR MIKRO, DAN KEKERASAN BAJA ASTM A36 DENGAN PROSES SMAW

#### TUGAS AKHIR

Disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Terapan  
pada Program Studi D4 Teknologi Rekayasa Pengelasan dan Fabrikasi  
Jurusan Teknik Mesin  
Politeknik Negeri Batam

Disusun oleh :

**BINAUVAL ZAHABI**  
**4422201008**

Telah diterima dan disetujui pada 28 Juli 2026

Penguji I



Ir. Adhe Arysawan, S.Pd., M.Si.

Penguji II

Insan Kamil, S.Pd., M.Pd.

Dosen Pembimbing I

Dr. Muhammad Hasan Albana, S.Pd., M.T.

Dosen Pembimbing II

Ifti Luthviana Dewi, S.Pd.,  
Gr., M.Pd.

Mengetahui,  
Koordinator Program Studi  
Teknologi Rekayasa Pengelasan dan Fabrikasi



Nurul Laili Arifin, S.S.T., M.T.

## PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

|                 |                                               |
|-----------------|-----------------------------------------------|
| Nama            | : Binauval Zahabi                             |
| NIM             | : 4422201008                                  |
| Tahun terdaftar | : 2022                                        |
| Program Studi   | : Teknologi Rekayasa Pengelasan dan Fabrikasi |
| Jurusan         | : Teknik Mesin                                |

Menyatakan bahwa dalam dokumen ilmiah Laporan Tugas Akhir ini tidak terdapat bagian dari karya ilmiah lain yang telah diajukan untuk memperoleh gelar akademik di suatu lembaga Pendidikan Tinggi dan juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang/lembaga lain, kecuali yang secara tertulis disitasi dalam dokumen ini dan disebutkan sumbernya secara lengkap dalam daftar pustaka.

Dengan demikian saya menyatakan bahwa dokumen ilmiah ini bebas dari unsur- unsur plagiasi dan apabila dokumen ilmiah Tugas Akhir ini dikemudian hari terbukti merupakan plagiasi dari hasil karya penulis lain dan/atau dengan sengaja mengajukan karya atau pendapat yang merupakan hasil karya penulis lain, maka penulis bersedia menerima sanksi akademik dan/atau sanksi hukum yang berlaku.

Batam, 14 Juli 2026

|                   |
|-------------------|
| Materai<br>10.000 |
|-------------------|

Binauval Zahabi  
4422201008

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan karunia-Nya sehingga Laporan Tugas Akhir yang berjudul “Perbedaan *String Welding* dan *Back-Step Welding* terhadap Distorsi, Struktur Mikro, dan Kekerasan Baja ASTM A36 dengan Proses SMAW” dapat diselesaikan. Laporan ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Terapan pada Program Studi Teknologi Rekayasa Pengelasan dan Fabrikasi, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Batam.

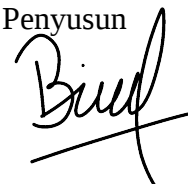
Dalam pelaksanaan penelitian dan penyusunan laporan ini, penulis memperoleh bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Ir. Ari Wibowo, S.T., M.Eng., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin, serta Nurul Laili Arifin, S.S.T., M.T., selaku Koordinator Program Studi Teknologi Rekayasa Pengelasan dan Fabrikasi.
2. Dr. Muhammad Hasan Albana, S.Pd., M.T., selaku Dosen Pembimbing I, dan Ifti Luthviana Dewi, S.Pd., Gr., M.Pd., selaku Dosen Pembimbing II, atas bimbingan, arahan, dan masukan yang diberikan.
3. Seluruh dosen, tenaga kependidikan, teknisi dan laboran Workshop 2 Politeknik Negeri Batam, serta pihak PT. Hi-Test Laboratory yang telah membantu pelaksanaan penelitian.
4. Rekan-rekan mahasiswa dan seluruh pihak yang turut membantu penyelesaian Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari bahwa laporan ini masih memiliki keterbatasan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan. Semoga laporan ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca, khususnya dalam bidang teknologi pengelasan dan metalurgi.

Batam, 14 Juli 2026

Penyusun



Binauval Zahabi  
4422201008

## ABSTRAK

Penelitian ini membandingkan secara deskriptif *string welding* dan *back-step welding* terhadap distorsi, struktur mikro, dan kekerasan sambungan baja ASTM A36 hasil pengelasan SMAW melalui eksperimen laboratorium. Enam kupon plat setebal 10 mm dibagi menjadi dua sampel, masing-masing tiga spesimen. Kedua sampel berasal dari plat dengan *heat number* berbeda; oleh karena itu, perbandingan kekerasan antar sampel ditafsirkan terhadap *base metal* masing-masing dan tidak digunakan untuk menyatakan pengaruh tunggal *welding sequence*. Distorsi dinilai melalui distorsi sudut dan penyusutan melintang, struktur mikro diamati pada *base metal*, HAZ, dan *weld metal*, sedangkan kekerasan diuji menggunakan Vickers HV10. Data dianalisis dengan pendekatan deskriptif-komparatif tanpa uji statistik. *Back-step welding* menghasilkan rata-rata distorsi sudut 6,67 derajat dan penyusutan melintang 1,49 mm, sedikit lebih rendah daripada *string welding* sebesar 7,00 derajat dan 1,59 mm. Seluruh spesimen menunjukkan *complete fusion*. *Base metal* dan HAZ didominasi ferit-perlit, sedangkan *weld metal* menunjukkan matriks feritik dengan indikasi *acicular ferrite*; sampel *string welding* tampak lebih homogen, sementara *back-step welding* lebih heterogen, terutama pada B-II dan B-III. Rata-rata kekerasan *base metal*, HAZ, dan *weld metal* masing-masing sebesar 136,08; 147,81; dan 177,94 HV10 pada *string welding* serta 151,89; 151,75; dan 180,22 HV10 pada *back-step welding*. *Weld metal* menjadi zona terkeras pada kedua sampel. Hasil menunjukkan kecenderungan *back-step welding* menurunkan distorsi, tetapi kesimpulan mengenai kekerasan dibatasi oleh perbedaan *heat number* dan variasi proses manual.

**Kata kunci:** *welding sequence*, SMAW, ASTM A36, distorsi, struktur mikro, kekerasan Vickers.

## ABSTRACT

This laboratory experiment descriptively compared string welding and back-step welding in terms of distortion, microstructure, and hardness of SMAW joints made from ASTM A36 steel. Six 10 mm-thick plate coupons were divided into two groups of three specimens. The two groups were produced from plates with different heat numbers; therefore, intergroup hardness was interpreted relative to the base metal of each group and was not used to claim a single causal effect of welding sequence. Distortion was evaluated using angular distortion and transverse shrinkage, microstructures were examined in the base metal, heat-affected zone (HAZ), and weld metal, and hardness was measured using Vickers HV10. The data were analyzed descriptively and comparatively without inferential statistical testing. Back-step welding produced mean angular distortion and transverse shrinkage of 6.67 degrees and 1.49 mm, respectively, slightly lower than the 7.00 degrees and 1.59 mm obtained with string welding. All specimens showed complete fusion. The base metal and HAZ were dominated by ferrite-pearlite, while the weld metal showed a ferritic matrix with morphological indications of acicular ferrite. The string welded group appeared more homogeneous, whereas the back-step group was more heterogeneous, particularly in specimens B-II and B-III. Mean hardness values for the base metal, HAZ, and weld metal were 136.08, 147.81, and 177.94 HV10 for string welding and 151.89, 151.75, and 180.22 HV10 for back-step welding. The weld metal was the hardest region in both groups. The results indicate a descriptive tendency for back-step welding to reduce distortion, while hardness interpretation remains limited by the different heat numbers and manual-process variability.

**Keywords:** welding sequence, SMAW, ASTM A36, distortion, microstructure, Vickers hardness.

## DAFTAR ISI

|                                                   |      |
|---------------------------------------------------|------|
| LEMBAR PENGESAHAN .....                           | iii  |
| PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI .....                   | iv   |
| KATA PENGANTAR.....                               | v    |
| ABSTRAK .....                                     | vi   |
| ABSTRACT .....                                    | vii  |
| DAFTAR ISI.....                                   | viii |
| DAFTAR TABEL .....                                | x    |
| DAFTAR GAMBAR.....                                | xi   |
| DAFTAR LAMPIRAN .....                             | xii  |
| BAB I PENDAHULUAN.....                            | 1    |
| 1.1. Latar Belakang .....                         | 1    |
| 1.2. Rumusan Masalah .....                        | 3    |
| 1.3. Batasan Masalah/Ruang Lingkup .....          | 3    |
| 1.4. Tujuan Penelitian .....                      | 4    |
| 1.5. Manfaat Penelitian .....                     | 4    |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....                      | 6    |
| 2.1. Hasil penelitian/perancangan terdahulu ..... | 6    |
| 2.2. Teori/Konsep dasar .....                     | 8    |
| 2.2.1. Pengertian Pengelasan .....                | 8    |
| 2.2.2. Pengertian <i>Welding Sequence</i> .....   | 8    |
| 2.2.3. Pengertian <i>Heat Number</i> .....        | 10   |
| 2.2.4. Pengertian SMAW .....                      | 10   |
| 2.2.5. Pengertian Distorsi Pengelasan.....        | 10   |
| 2.2.6. Pengertian Struktur Mikro .....            | 11   |
| 2.2.7. Pengertian Kekerasan.....                  | 13   |

|                                                               |           |
|---------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....</b>                    | <b>14</b> |
| 3.1. <b>Metode Penelitian .....</b>                           | <b>14</b> |
| 3.2. <b>Bahan dan Peralatan yang Digunakan.....</b>           | <b>14</b> |
| 3.2.1. <b>Bahan yang Digunakan .....</b>                      | <b>14</b> |
| 3.2.2. <b>Peralatan yang Digunakan.....</b>                   | <b>15</b> |
| 3.3. <b>Urutan Pelaksanaan Penelitian .....</b>               | <b>15</b> |
| <b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>                      | <b>22</b> |
| 4.1. <b>Data Pengujian .....</b>                              | <b>22</b> |
| 4.2. <b>Hasil Pengukuran Distorsi.....</b>                    | <b>23</b> |
| 4.3. <b>Hasil Pemeriksaan Makro .....</b>                     | <b>26</b> |
| 4.4. <b>Hasil dan Pembahasan Struktur Mikro .....</b>         | <b>29</b> |
| 4.4.1. <b>Spesimen A-I (<i>String Welding</i>).....</b>       | <b>30</b> |
| 4.4.2. <b>Spesimen A-II (<i>String Welding</i>) .....</b>     | <b>32</b> |
| 4.4.3. <b>Spesimen A-III (<i>String Welding</i>).....</b>     | <b>34</b> |
| 4.4.4. <b>Spesimen B-I (<i>Back-step Welding</i>) .....</b>   | <b>36</b> |
| 4.4.5. <b>Spesimen B-II (<i>Back-step Welding</i>) .....</b>  | <b>38</b> |
| 4.4.6. <b>Spesimen B-III (<i>Back-step Welding</i>) .....</b> | <b>40</b> |
| 4.5. <b>Hasil dan Pengolahan Data Kekerasan .....</b>         | <b>42</b> |
| <b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>                       | <b>47</b> |
| 5.1. <b>Kesimpulan .....</b>                                  | <b>47</b> |
| 5.2. <b>Saran.....</b>                                        | <b>48</b> |
| <b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>                                   | <b>49</b> |
| <b>LAMPIRAN.....</b>                                          | <b>52</b> |

## **DAFTAR TABEL**

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabel 2. 1 Ringkasan Penelitian Terdahulu .....                                          | 6  |
| Tabel 2. 2 Pengertian dan Karakteristik Fasa Struktur Mikro pada Baja Karbon Rendah..... | 12 |
| Tabel 3. 1 Parameter Pengelasan .....                                                    | 18 |
| Tabel 4. 1 Jenis Data dan Analisisnya .....                                              | 22 |
| Tabel 4. 2 Data Distorsi Sudut .....                                                     | 23 |
| Tabel 4. 3 Data Penyusutan Melintang (Tranverse Shrinkage) .....                         | 24 |
| Tabel 4. 4 Data Pemeriksaan Makro .....                                                  | 26 |
| Tabel 4. 5 Ringkasan Pengamatan Struktur Mikro .....                                     | 41 |
| Tabel 4. 6 Nilai Rata-Rata Kekerasan Vickers Pada Masing-Masing Spesimen                 | 43 |
| Tabel 4. 7 Nilai Rata-Rata Kekerasan Vickers Pada Masing-Masing Variabel .               | 43 |

## DAFTAR GAMBAR

|                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 2. 1 Skema String Welding .....                                                      | 8  |
| Gambar 2. 2 Skema Back-step Welding .....                                                   | 9  |
| Gambar 2. 3 Jenis-Jenis Distorsi Pada Sambungan Las (Purnama dkk., 2023)..                  | 11 |
| Gambar 3. 1 Diagram Alur Penelitian.....                                                    | 16 |
| Gambar 3. 2 Gambar Spesimen Uji .....                                                       | 17 |
| Gambar 3. 3 Mesin Las SMAW Lincoln Electric – Aspect 300.....                               | 17 |
| Gambar 3. 4 Pengukuran Distorsi Sudut.....                                                  | 18 |
| Gambar 3. 5 Pengukuran Penyusutan Melintang.....                                            | 19 |
| Gambar 3. 6 Area Pemotongan Spesimen Uji untuk Sampel Struktur Mikro ....                   | 19 |
| Gambar 3. 7 Ukuran Sampel Struktur Mikro.....                                               | 20 |
| Gambar 3. 8 Area Pengamatan Struktur Mikro .....                                            | 20 |
| Gambar 3. 9 Titik Indentasi Pada Pengujian Kekerasan Vickers .....                          | 21 |
| Gambar 4. 1 Grafik Distorsi Sudut pada Setiap Spesimen .....                                | 24 |
| Gambar 4. 2 Grafik Penyusutan Melintang pada Setiap Spesimen .....                          | 25 |
| Gambar 4. 3 Foto Makro Spesimen A (String Welding) .....                                    | 27 |
| Gambar 4. 4 Foto Makro Spesimen B (Back-step Welding) .....                                 | 28 |
| Gambar 4. 5 Identifikasi Fasa Struktur Mikro Spesimen A-I Pada Pembesaran<br>500x.....      | 30 |
| Gambar 4. 6 Identifikasi Fasa Struktur Mikro Spesimen A-II Pada Pembesaran<br>500x.....     | 32 |
| Gambar 4. 7 Identifikasi Fasa Struktur Mikro Spesimen A-III Pada Pembesaran<br>500x.....    | 34 |
| Gambar 4. 8 Identifikasi Fasa Struktur Mikro Spesimen B-I Pada Pembesaran<br>500x.....      | 36 |
| Gambar 4. 9 Identifikasi Fasa Struktur Mikro Spesimen B-II Pada Pembesaran<br>500x.....     | 38 |
| Gambar 4. 10 Identifikasi Fasa Struktur Mikro Spesimen B-III Pada Pembesaran<br>500x.....   | 40 |
| Gambar 4. 11 Distribusi Nilai Kekerasan Vickers pada Base Metal, HAZ dan<br>Weld Metal..... | 45 |

## **DAFTAR LAMPIRAN**

|                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Lampiran 1. Dokumentasi Proses Fabrikasi.....                                       | 52 |
| Lampiran 2. Dokumentasi Pengukuran Distorsi Sudut dan Penyusutan Melintang<br>..... | 53 |
| Lampiran 3. Data Kekerasan Vickers Sampel A dan Sampel B .....                      | 55 |
| Lampiran 4. Dokumentasi Pengujian di PT. Hi-Test Lab Batam .....                    | 57 |
| Lampiran 5. Laporan Hasil Pengujian di PT. Hi-Test Lab Batam.....                   | 58 |

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1.Latar Belakang**

Selama kegiatan magang industri, dijumpai indikasi linear pada beberapa sambungan pipe-to-connector yang menggunakan material pipa berkekuatan luluh tinggi, seperti X56, X65, dan X80. Pada baja berkekuatan tinggi, interaksi antara siklus termal pengelasan, tegangan sisa, hidrogen, serta kondisi metalurgi dapat meningkatkan kerentanan terhadap inisiasi dan perambatan retak. Wu dkk. (2024) menunjukkan bahwa sensitivitas retak terinduksi hidrogen pada baja pipa X80 dipengaruhi oleh kondisi perlakuan panas dan perubahan struktur material

Salah satu tindakan proses yang dapat digunakan untuk mengendalikan respons termal adalah pengaturan *welding sequence*. Urutan dan arah deposisi menentukan lokasi pemanasan, waktu pendinginan antarbagian, serta urutan terjadinya kontraksi. Afonso dkk. (2022) dan Liang & Deng (2018) menunjukkan bahwa perubahan urutan pengelasan dapat menghasilkan distribusi temperatur, tegangan sisa, dan distorsi yang berbeda meskipun geometri sambungan dan masukan energi dibuat serupa

Pengumpulan data langsung pada sambungan pipa X56-X80 di lokasi industri tidak dapat dilakukan karena keterbatasan akses, dokumentasi proses, dan pengambilan spesimen. Oleh sebab itu, penelitian ini dirancang sebagai eksperimen laboratorium dengan material *surrogate*, yaitu baja karbon rendah ASTM A36. Penggunaan ASTM A36 tidak dimaksudkan sebagai pengganti langsung baja pipa berkekuatan tinggi, tetapi sebagai media terkendali untuk mempelajari kecenderungan umum pengaruh urutan deposisi terhadap distorsi, perubahan morfologi struktur mikro, dan distribusi kekerasan.

Baja ASTM A36 dipilih karena tersedia di laboratorium, mudah dipreparasi, dan banyak digunakan sebagai material struktur. Proses SMAW digunakan karena sesuai dengan fasilitas *Workshop 2* Politeknik Negeri Batam dan relevan dengan praktik fabrikasi serta perbaikan. Pada baja karbon

rendah, siklus pemanasan dan pendinginan pengelasan memengaruhi pembentukan *HAZ*, morfologi *weld metal*, dan distribusi kekerasan. Dengan demikian, perbandingan *welding sequence* tetap memberikan dasar pemahaman mengenai pengelolaan panas, walaupun hasilnya tidak dapat langsung digeneralisasi ke X56-X80 (Senthilkumar dkk., 2023).

Berdasarkan kajian pustaka terkini, penelitian yang membahas distorsi dan karakteristik struktur mikro pada pengelasan umumnya lebih menitikberatkan pada variasi masukan panas, kecepatan pengelasan, atau jumlah lintasan las. Sementara itu, kajian eksperimental yang secara khusus membandingkan pengaruh *welding sequence*, seperti *string welding* dan *back-step welding* dengan kondisi masukan panas yang dijaga tetap masih relatif terbatas. Padahal, perbedaan urutan pengelasan dapat menyebabkan variasi distribusi panas selama proses berlangsung, terutama terkait pola pendinginan antar lintasan, yang pada akhirnya berpotensi memengaruhi pembentukan struktur mikro dan distribusi kekerasan. Oleh karena itu, diperlukan suatu penelitian yang memfokuskan pada pengaruh *welding sequence* dengan masukan panas konstan, guna memperoleh pemahaman yang lebih jelas mengenai dampaknya terhadap distorsi, struktur mikro, dan kekerasan sambungan las (Purnama dkk., 2023).

Penelitian menggunakan enam spesimen yang dibagi menjadi sampel *string welding* dan *back-step welding*. Parameter nominal, geometri sambungan, posisi, jenis elektroda per lintasan, dan batas *interpass temperature* dibuat sama. Namun, sampel A dan B berasal dari plat dengan *heat number* berbeda, yaitu identifikasi dari pabrik untuk proses peleburan pada suatu *batch*. Keterbatasan ini dicatat sejak tahap metodologi dan menjadi dasar bahwa perbandingan kekerasan absolut tidak dapat ditafsirkan sebagai pengaruh tunggal *welding sequence*.

Hasil penelitian diharapkan menjadi referensi awal untuk penyusunan prosedur eksperimen yang lebih ketat, pengembangan *Welding Procedure Specification* (WPS), dan penelitian lanjutan pada material pipa berkekuatan tinggi. Karena jumlah spesimen terbatas dan terdapat faktor pengganggu *heat number*, hasil dibahas sebagai kecenderungan deskriptif, bukan perbedaan

yang signifikan secara statistik.

### 1.2. Rumusan Masalah

- 1) Bagaimana gambaran perbedaan distorsi antara metode *string welding* dan *back-step welding* pada sambungan las baja ASTM A36 menggunakan proses SMAW?
- 2) Bagaimana gambaran perbedaan struktur mikro antara metode *string welding* dan *back-step welding* pada sambungan las baja ASTM A36 menggunakan proses SMAW?
- 3) Bagaimana gambaran perbedaan kekerasan antara metode *string welding* dan *back-step welding* pada sambungan las baja ASTM A36 menggunakan proses SMAW?

### 1.3. Batasan Masalah/Ruang Lingkup

- 1) Material yang digunakan adalah baja karbon rendah ASTM A36 dengan ketebalan nominal 10 mm. Enam kupon dibagi menjadi sampel A (*string welding*) dan sampel B (*back-step welding*), masing-masing tiga spesimen. Plat kedua sampel memiliki *heat number* berbeda.
- 2) Sambungan menggunakan *single V-groove butt joint* dengan sudut kampuh 60 derajat, root gap 2 mm, root face 2 mm, dan posisi pengelasan 1G.
- 3) Proses pengelasan adalah SMAW. Elektroda E7016 LB-52U diameter 2,6 mm digunakan untuk *root pass*, E7016 LB-52 diameter 2,6 mm untuk *hot pass*, dan E7018 LB-52-18 diameter 3,2 mm untuk filler serta capping.
- 4) Variasi *welding sequence* terdiri atas *string welding* dan *back-step welding*. *Step length* pada *back-step welding* ditetapkan 50 mm.
- 5) Arus, tegangan, *travel speed*, polaritas, dan *interpass temperature* mengikuti parameter pada Tabel 3.1.
- 6) Distorsi dievaluasi melalui *angular distortion* dan *transverse shrinkage*. Pemeriksaan makro, struktur mikro, dan kekerasan mengacu pada laporan laboratorium ASTM E340-23, ASTM E407-2023, dan ASTM E92-23.

- 7) Analisis bersifat deskriptif-komparatif tanpa uji statistik.

#### **1.4. Tujuan Penelitian**

- 1) Menyelidiki gambaran perbedaan distorsi antara metode *string welding* dan *back-step welding* pada sambungan las baja ASTM A36 menggunakan proses SMAW.
- 2) Menyelidiki gambaran perbedaan struktur mikro antara metode *string welding* dan *back-step welding* pada sambungan las baja ASTM A36 menggunakan proses SMAW.
- 3) Menyelidiki gambaran perbedaan kekerasan antara metode *string welding* dan *back-step welding* pada sambungan las baja ASTM A36 menggunakan proses SMAW.

Hipotesis penelitian ini didasarkan pada teori bahwa perbedaan welding sequence memengaruhi distribusi panas selama proses pengelasan sehingga berpotensi menghasilkan karakteristik sambungan las yang berbeda. Hipotesis penelitian adalah sebagai berikut:

- 1) Perbedaan *welding sequence* menghasilkan kecenderungan perbedaan distorsi pada sambungan las baja ASTM A36.
- 2) Perbedaan *welding sequence* menghasilkan kecenderungan perbedaan morfologi struktur mikro pada *base metal*, HAZ, dan *weld metal*.
- 3) Perbedaan *welding sequence* menghasilkan kecenderungan perbedaan distribusi kekerasan pada sambungan las baja ASTM A36.

Perbedaan tersebut diperkirakan terjadi akibat perubahan distribusi panas, urutan kontraksi, laju pendinginan serta pemanasan ulang antar segmen ataupun antar lintasan selama proses pengelasan.

#### **1.5. Manfaat Penelitian**

Data yang diperoleh dari penelitian dari variasi welding sequence dapat menjadi acuan dalam menentukan parameter pengelasan yang baik dan bahkan bisa dikembangkan untuk pembuatan Welding Procedure Specification (WPS) yang optimal. Selain itu, hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat bagi dunia industri sebagai referensi dalam memilih strategi proses pengelasan yang efektif dan efisien guna

meningkatkan kualitas hasil pengelasan. Di sisi lain, penelitian ini juga dapat menambah referensi ilmiah di bidang metalurgi dan proses pengelasan.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1. Hasil penelitian/perancangan terdahulu

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa distorsi dan sifat metalurgi hasil las tidak hanya dipengaruhi oleh besarnya energi yang masuk, tetapi juga oleh urutan, arah, dan interval deposisi. Tabel 2.1 merangkum variabel utama, proses, keluaran, dan relevansi penelitian yang menjadi dasar kajian ini.

Tabel 2. 1 Ringkasan Penelitian Terdahulu

| Sumber                | Material dan proses               | Variabel utama                              | Output                    | Temuan relevan dan celah                                                                                                                                                |
|-----------------------|-----------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Purnama dkk. (2023)   | ASTM A36; GMAW                    | <i>Welding sequence dan travel speed</i>    | Distorsi                  | <i>Heat input</i> yang lebih tinggi meningkatkan distorsi; <i>stepping stone</i> tidak selalu menurunkan distorsi. Belum membahas struktur mikro dan HV secara terpadu. |
| Cuana dkk. (2025)     | Sambungan fillet; GMAW-pulsed     | <i>String welding dan back-step welding</i> | Distorsi                  | <i>Back-step welding</i> menghasilkan distorsi lebih kecil pada konfigurasi fillet. Proses dan geometri berbeda dari penelitian ini.                                    |
| Afonso dkk. (2022)    | Butt joint; GMAW                  | <i>Welding sequence</i>                     | Distorsi sudut            | Urutan pengelasan memengaruhi distorsi sudut. Tidak mengevaluasi struktur mikro dan kekerasan.                                                                          |
| Liang dan Deng (2018) | Panel bertulang; simulasi numerik | <i>Heat input, sequence, restraint</i>      | Distorsi                  | <i>Sequence</i> mengubah kekakuan bertahap dan deformasi meskipun energi serupa. Konfigurasi berupa struktur kompleks dan analisis numerik.                             |
| Ling dkk. (2015)      | JIS SS400; FCAW-G                 | Jumlah dan urutan lintasan multi-pass       | Struktur mikro, HV, impak | Siklus termal dan efek tempering antarlintasan mengubah kekerasan dan struktur mikro. Material dan proses berbeda.                                                      |

| Sumber                   | Material dan proses      | Variabel utama    | Output                            | Temuan relevan dan celah                                                                                        |
|--------------------------|--------------------------|-------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Wibowo dkk. (2016)       | ASTM A36; GMAW           | <i>Heat input</i> | Distorsi, struktur mikro, mekanik | <i>Heat input</i> mengubah distorsi, zona struktur mikro, dan kekerasan. Welding sequence bukan variabel utama. |
| Senthilkumar dkk. (2023) | ASTM A36; GTAW           | <i>Heat input</i> | Struktur mikro, HV, korosi        | Masukan panas memengaruhi ukuran butir dan kekerasan. Tidak membandingkan urutan deposisi.                      |
| Nitha (2019)             | Baja karbon rendah; SMAW | Arus pengelasan   | Struktur mikro, HV, tarik         | Arus mengubah respons termal dan sifat mekanik. Tidak memisahkan pengaruh <i>sequence</i> .                     |

Purnama dkk. (2023) memperlihatkan bahwa efektivitas *sequence* bergantung pada konfigurasi dan distribusi panas aktual. Cuana dkk. (2025) memperoleh kecenderungan sebaliknya pada sambungan fillet, yaitu *back-step welding* menurunkan distorsi dibanding *string welding*. Perbedaan kedua studi menunjukkan bahwa *sequence* tidak dapat dievaluasi terpisah dari geometri sambungan, panjang segmen, restraint, dan kestabilan proses.

Liang & Deng (2018), serta Afonso dkk. (2022) memperkuat bahwa urutan pengelasan mengubah kondisi kekakuan dan kontraksi selama proses berlangsung. Di sisi metalurgi, Ling dkk. (2015), Wibowo dkk. (2016), Senthilkumar dkk. (2023), dan (Nitha, 2019) menunjukkan bahwa siklus termal, laju pendinginan, serta pemanasan ulang memengaruhi struktur mikro dan kekerasan. Namun, *output* distorsi, struktur mikro, dan HV jarang dievaluasi bersamaan dalam perbandingan langsung *string welding* dan *back-step welding* pada butt joint SMAW ASTM A36.

Posisi penelitian ini adalah membandingkan kedua *welding sequence* pada geometri dan parameter nominal yang sama, kemudian menghubungkan hasil distorsi, penerimaan makro, morfologi mikro, dan distribusi kekerasan. Kontribusi penelitian bersifat deskriptif karena jumlah spesimen terbatas, proses dilakukan manual, dan *heat number* sampel berbeda.

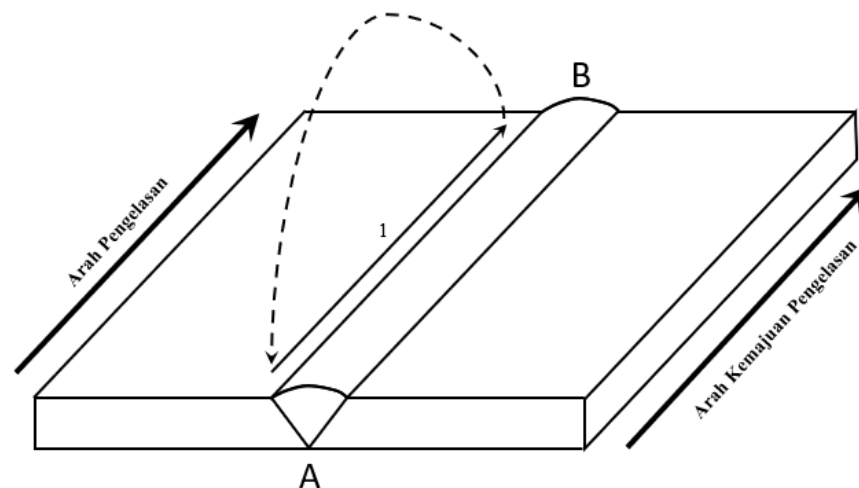
## 2.2. Teori/Konsep dasar

### 2.2.1. Pengertian Pengelasan

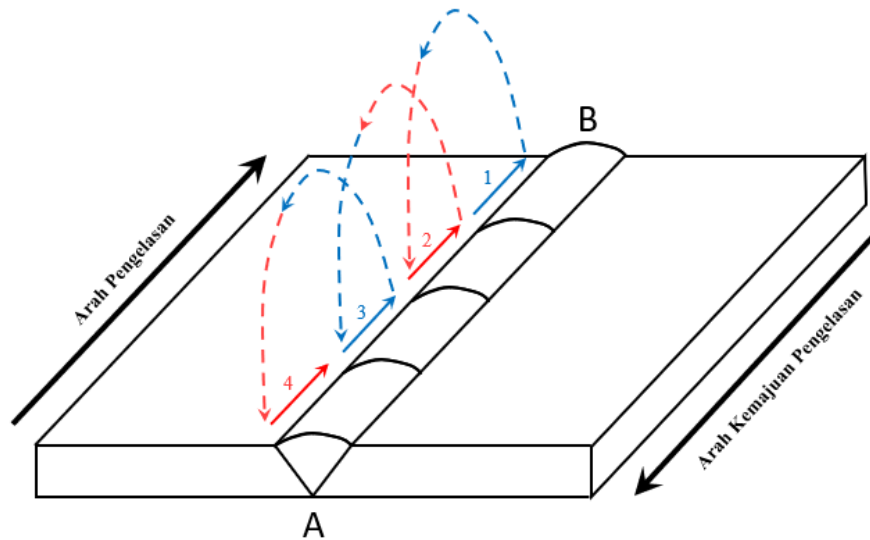
Pengelasan merupakan proses penyambungan dua buah logam sampai titik leleh logam, baik menggunakan bahan tambah maupun tidak, serta menggunakan energi panas sebagai pencair bahan yang dilas (Bhirawa, 2015). Pada proses pengelasan, permukaan material yang disambung akan dilelehkan pada area sambungan dan setelah solidifikasi akan membentuk ikatan permanen (Dr. Rahman & Boruah, 2025). Definisi ini sejalan dengan pengertian pengelasan yang dijelaskan dalam standar AWS D1.1 dan DIN, yang menekankan bahwa pengelasan menghasilkan ikatan material yang permanen melalui proses fusi atau tekanan (AWS, 2020; Hamid, 2016).

### 2.2.2. Pengertian *Welding Sequence*

Menurut AWS (2020), *welding sequence* merupakan urutan pengerjaan las dalam suatu pengelasan. Definisi ini didukung juga oleh Sadhegi Tabar dkk. (Sadeghi Tabar dkk., 2024), yang menyatakan bahwa *welding sequence* adalah urutan pelaksanaan pengelasan pada suatu komponen atau geometri sambungan.



Gambar 2. 1 Skema *String Welding*



Gambar 2. 2 Skema *Back-step Welding*

Perbedaan antara kedua metode ini terletak pada karakteristik perpindahan panasnya yang secara signifikan memengaruhi tegangan sisa dan distorsi. *String welding* yang dilakukan dengan arah lurus dan kontinu, memberikan panas secara terus-menerus di sepanjang jalur las, menghasilkan panas dan pemuatan lokal yang diikuti dengan penyusutan yang tidak merata yang cenderung meningkatkan terjadinya distorsi (Cuana dkk., 2025).

Sebagai gantinya, metode *back-step welding* dilakukan dengan membuat las-lasan pendek secara bertahap, setiap lasan pendek baru dimulai dari ujung lasan sebelumnya. Las-lasan yang sebelumnya sudah mengeras dan menahan bagian yang akan dilas, pemuatan dan penyusutan pada lasan berikutnya menjadi lebih kecil sehingga distorsi bisa dikendalikan (Jilabi, 2024).

Perbedaan siklus termal akibat variasi *welding sequence* tidak hanya memengaruhi distorsi, tetapi juga berpengaruh terhadap transformasi struktur mikro dan distribusi hasil pengelasan. Variasi laju pendinginan serta efek pemanasan ulang antar lintasan dapat menghasilkan morfologi struktur mikro yang berbeda pada daerah *weld metal* maupun HAZ, yang kemudian memengaruhi sifat mekanik sambungan las (Ling dkk., 2015; Wibowo dkk., 2016).

### 2.2.3. Pengertian *Heat Number*

*Heat number* merupakan kode identifikasi unik yang menunjukkan asal suatu material dari satu *batch* atau satu kali proses peleburan baja. Kode ini digunakan sebagai bagian dari sistem *material traceability* untuk menelusuri informasi komposisi kimia dan sifat mekanik material selama proses fabrikasi hingga tahap sertifikasi (Darmawan & Suharyono, 2026).

Oleh karena itu, penggunaan material dengan *heat number* yang berbeda dalam suatu penelitian dapat menjadi faktor pengganggu ketika tujuan penelitian adalah mengevaluasi pengaruh suatu variabel proses, karena sebagian perbedaan hasil yang diamati berpotensi dipengaruhi oleh karakteristik awal material.

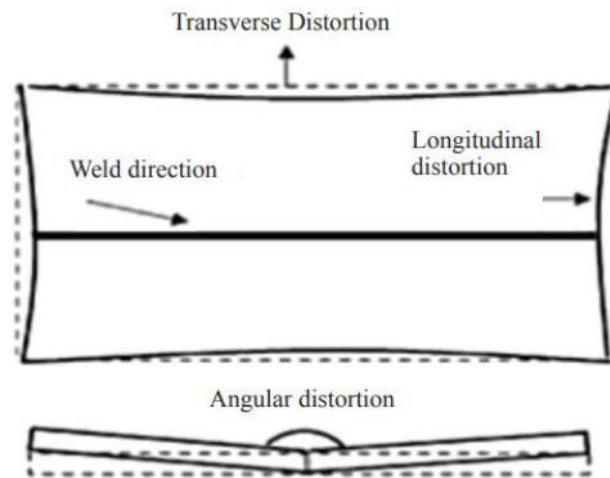
### 2.2.4. Pengertian SMAW

*Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) adalah metode penyambungan logam dengan menggunakan tenaga listrik sebagai sumber panas dan menggunakan elektroda sebagai bahan tambahannya (Azwinur dkk., 2017). Pada proses ini, busur listrik yang terjadi antara elektroda dan logam dasar menghasilkan panas yang melelehkan benda kerja. Elektroda tersebut memiliki lapisan fluks yang berfungsi sebagai pelindung kolam las, karena saat mencair, fluks menghasilkan gas pelindung dan membentuk lapisan *slag* yang mencegah kontaminasi dari atmosfer, sementara elektroda perlahan habis seiring proses pengelasan berlangsung (Kazi dkk., 2015).

### 2.2.5. Pengertian Distorsi Pengelasan

Distorsi pada pengelasan didefinisikan sebagai perubahan bentuk yang terjadi akibat ekspansi dan kontraksi termal yang tidak seragam pada benda kerja selama siklus pemanasan dan pendinginan dalam proses pengelasan. Perubahan bentuk ini bersifat tidak diinginkan dan sebagian besar tidak dapat dihindari, namun biasanya dapat dikendalikan dengan memberi *external restraint* pada komponen atau mengubah proses pengelasannya. Distorsi ini dapat memengaruhi keselamatan, fungsi, dan durabilitas suatu struktur. Oleh karena itu, distorsi perlu diperhitungkan dalam proses perancangan agar risikonya dapat dikurangi. Dengan memprediksi perubahan bentuk pada suatu komponen, perancang dapat

menyesuaikan desain produk atau proses manufakturnya untuk mencapai hasil yang diinginkan (Granell dkk., 2021).



Gambar 2. 3 Jenis-Jenis Distorsi Pada Sambungan Las (Purnama dkk., 2023)

Besarnya distorsi tidak hanya dipengaruhi oleh besarnya *heat input*, tetapi juga oleh distribusi panas dan urutan kontraksi yang ditentukan oleh *welding sequence*. Oleh karena itu, variasi *welding sequence* berpotensi menghasilkan tingkat distorsi yang berbeda meskipun parameter pengelasan lainnya dibuat sama (Afonso dkk., 2022; Liang & Deng, 2018).

#### 2.2.6. Pengertian Struktur Mikro

Panas berpotensi untuk memengaruhi sifat fisik dan mekanik las, serta transformasi fasa pada struktur mikro (Suheri dkk., 2024). Masukan panas yang tinggi menyebabkan perubahan yang cukup besar pada struktur mikro *weld metal* dan *heat-affected zone* (HAZ) (Ling dkk., 2015). Besarnya panas selama proses pengelasan akan memengaruhi laju pendinginan yang menentukan struktur mikro yang terbentuk pada hasil pengelasan (Ninien & Ponimin, 2011).

Sifat baja karbon sangat dipengaruhi oleh struktur mikronya, pengamatan struktur mikro hanya dapat dilakukan ketika material diamati di bawah mikroskop metalurgi. Struktur mikro terdiri atas ferit, perlit, sementit, dan austenit dengan variasi tertentu tergantung dengan masukan panas yang dialami. Struktur mikro pada baja karbon tersusun dari beberapa fasa utama yang terbentuk akibat kombinasi antara komposisi kimia dan siklus termal. Setiap fasa memiliki ciri dan sifat yang berbeda-

beda, sehingga memengaruhi kekuatan, keuletan, dan kekerasan material (Nitha, 2019).

Tabel 2. 2 Pengertian dan Karakteristik Fasa Struktur Mikro pada Baja Karbon Rendah

| Fasa                    | Pengertian dan Karakteristik                                                                                                                            | Sumber                        |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| Ferit                   | Larutan padat karbon berkadar sangat rendah dalam besi alfa berstruktur BCC. Bersifat lunak, ulet, dan dominan pada baja karbon rendah.                 | (Nitha, 2019)                 |
| Austenit                | Larutan karbon dalam besi gamma berstruktur FCC. Stabil pada temperatur tinggi, bersifat liat, dan berubah menjadi fasa lain saat pendinginan.          |                               |
| Perlit                  | Campuran lamelar ferit dan sementit. Lebih keras daripada ferit, tetapi masih memiliki keuletan yang cukup baik.                                        |                               |
| Sementit                | Senyawa besi-karbon yang sangat keras dan getas. Umumnya terdapat sebagai bagian dari perlit atau sebagai partikel karbida.                             |                               |
| Martensit               | Terbentuk akibat pendinginan sangat cepat dari austenit dan memiliki struktur BCT. Bersifat sangat keras, tetapi cenderung rapuh.                       |                               |
| <i>Acicular ferrite</i> | Ferit halus berbentuk jarum yang tumbuh secara acak di dalam butir austenit. Susunannya dapat menghambat perambatan retak dan meningkatkan ketangguhan. | (Yan dkk., 2024)              |
| Bainit                  | Produk transformasi austenit yang terbentuk pada rentang temperatur menengah. Lebih keras daripada perlit, tetapi lebih ulet daripada martensit.        | (Adamczyk-Cieślak dkk., 2021) |

Untuk baja karbon rendah seperti ASTM A36 ( $\leq 0,30 \% C$ ), struktur mikro pada suhu ruang umumnya berupa ferit dan perlit, austenit hanya terbentuk pada temperatur tinggi selama pemanasan dan tidak stabil pada suhu ruang sehingga akan bertransformasi saat pendinginan. Saat pendinginan terjadi, austenit akan berubah menjadi ferit, perlit, bainit, atau bahkan martensit jika terjadi pendinginan secara cepat. Jadi, austenit tidak termasuk fasa akhir pada kondisi normal untuk material ini (Awali dkk.,

2021; Sumiyanto & Abdunnaser, 2015).

#### **2.2.7. Pengertian Kekerasan**

Kekerasan adalah kemampuan suatu material untuk menahan goresan, erosi, keausan, penekanan, penetrasi, dan mampu menahan beban hingga terjadinya deformasi plastis. Pengujian kekerasan bertujuan untuk menilai hasil perlakuan panas, mengidentifikasi pengerasan atau pelunakan yang terjadi akibat *overheating*, dekarburisasi, atau pengerasan permukaan.

Metode pengukuran kekerasan dilakukan dengan menekan area permukaan spesimen menggunakan sebuah indenter dengan beban tertentu, kemudian mengukur jejak tekanannya. Indenter biasanya terbuat dari baja yang dikeraskan, *tungsten carbide*, atau piramida berlian berbentuk *diamond* dengan sudut puncak antara dua sisi berlawanan sebesar  $136^\circ$  (Bontong dkk., 2018).

Distribusi kekerasan pada sambungan las sangat dipengaruhi oleh struktur mikro yang terbentuk setelah proses pendinginan. Dengan demikian, perubahan siklus termal akibat variasi *welding sequence* secara tidak langsung juga dapat memengaruhi distribusi kekerasan hasil pengelasan (Senthilkumar dkk., 2023; Wibowo dkk., 2016).

## **BAB III**

### **METODOLOGI PENELITIAN**

#### **3.1. Metode Penelitian**

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen laboratorium dengan pendekatan deskriptif-komparatif. Proses pengelasan dilakukan secara langsung pada enam spesimen, kemudian diikuti pengukuran distorsi, pemeriksaan makro, pengamatan struktur mikro, dan pengujian kekerasan. Pendekatan ini dipilih untuk menggambarkan kecenderungan perbedaan antar welding sequence, bukan untuk menguji statistika.

Uji statistik tidak digunakan karena setiap sampel hanya terdiri atas tiga spesimen, proses SMAW dilakukan manual, dan plat sampel A serta B memiliki *heat number* berbeda. Kondisi tersebut melanggar asumsi bahwa *welding sequence* merupakan satu-satunya faktor pembeda. Rata-rata, simpangan baku, rentang, dan perubahan relatif digunakan sebagai statistik deskriptif.

#### **3.2. Bahan dan Peralatan yang Digunakan**

##### **3.2.1. Bahan yang Digunakan**

Adapun bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Plat ASTM A36 dengan jumlah 6 spesimen (*test coupon*).
2. Elektroda E7016 LB-52U 2,6 mm
3. Elektroda E7016 LB-52 2,6 mm
4. Elektroda E7018 LB-52-18 3,2 mm

Pemilihan tiga jenis elektroda ini berdasarkan ketersediaan di fasilitas *Workshop 2* Politeknik Negeri Batam. Pemilihan elektroda disesuaikan dengan fungsi pada setiap lintasan pengelasan. Elektroda E7016 LB-52U digunakan untuk *root pass* karena sesuai untuk pengelasan *open root*, memiliki busur yang stabil, dan mendukung pembentukan penetrasi *root* yang baik. Elektroda E7016 LB-52 digunakan pada *hot pass*, sedangkan E7018 LB-52-18 digunakan pada *filler pass* dan *capping pass* karena memiliki kemampuan deposisi yang lebih tinggi. LB-52U dan LB-52 sama-sama termasuk dalam klasifikasi E7016, sehingga sifat logam las

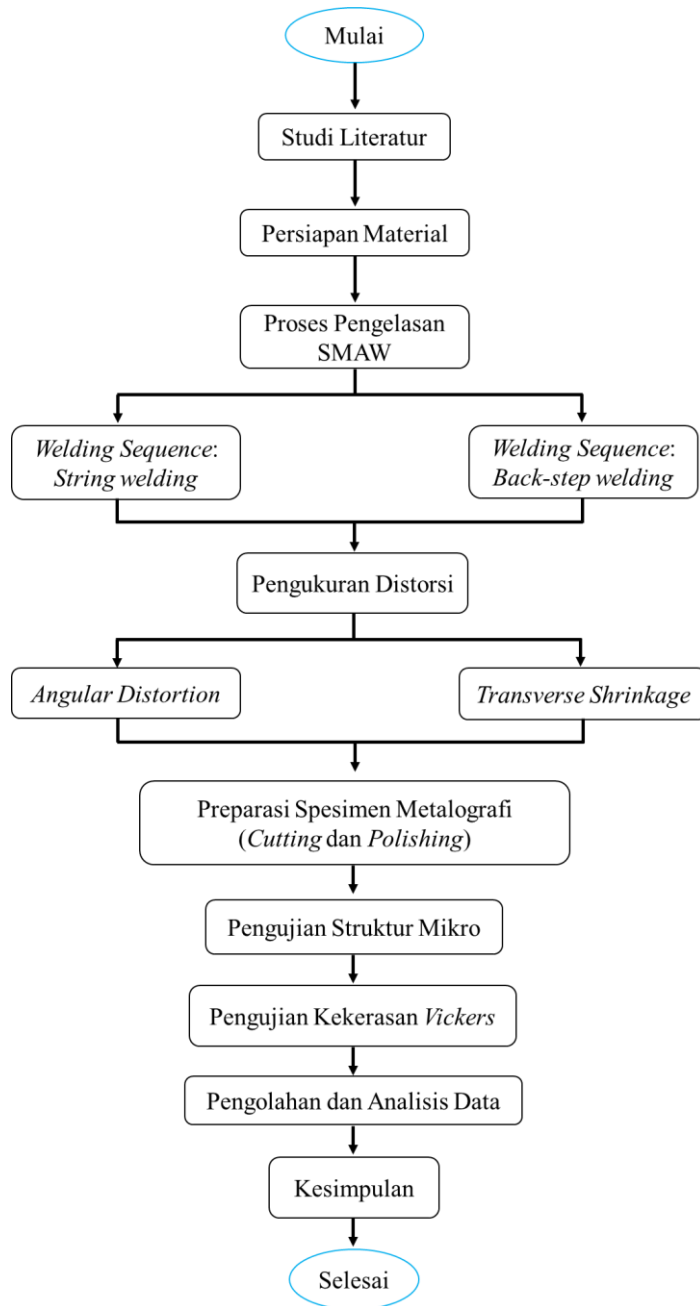
yang dihasilkan relatif sebanding. Namun, keduanya memiliki perbedaan pada formulasi fluks dan karakteristik penggunaannya. Karena susunan elektroda yang sama diterapkan pada kedua variasi *welding sequence*, jenis elektroda tidak dijadikan sebagai variabel pembanding dalam penelitian ini.

### **3.2.2. Peralatan yang Digunakan**

1. Mesin las SMAW
2. Alat uji struktur mikro: Mikroskop optik metalografi
3. Alat uji kekerasan: *hardness vickers*
4. *Vernier caliper*
5. Penggaris besi
6. *Welding gauge*
7. Busur
8. Gerinda
9. Senter
10. Alat perlindungan diri, seperti *wearpack*, sarung tangan, kacamata, helm las, dan sepatu *safety*

### **3.3. Urutan Pelaksanaan Penelitian**

Proses pengelasan dilaksanakan di kampus Politeknik Negeri Batam, tepatnya di *Workshop 2* (laboratorium pengelasan), Lalu pengujian akan dilakukan pada PT. Hi-Test Laboratory. Urutan pelaksanaan penelitian bisa dilihat pada gambar 3. 1.

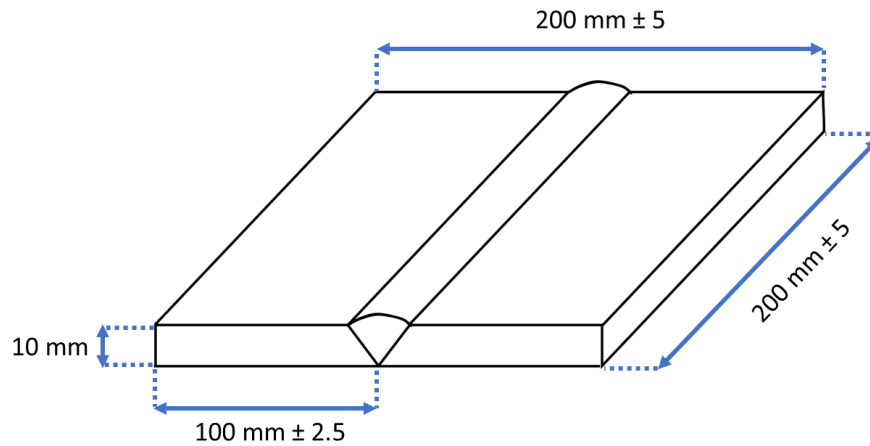


Gambar 3. 1 Diagram Alur Penelitian

Penelitian ini diawali dengan tahap studi literatur yang bertujuan untuk mengumpulkan dan mempelajari referensi yang relevan terkait pengelasan, *welding sequence*, distorsi, struktur mikro, dan kekerasan material baja ASTM A36. Studi literatur ini digunakan sebagai dasar dalam penentuan metode penelitian, variabel penelitian, serta prosedur pengujian yang akan dilakukan.

Setelah itu, dilakukan tahap persiapan material, meliputi penyiapan plat

ASTM A36 yang menjadi spesimen uji (*test coupon*) sesuai dengan ukuran dan ketentuan yang telah ditetapkan, serta persiapan peralatan dan bahan pengelasan yang digunakan dalam penelitian.



Gambar 3. 2 Gambar Spesimen Uji

Tahap selanjutnya adalah proses pengelasan dengan metode *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW). Penelitian ini menggunakan total enam spesimen, yang dibagi ke dalam dua variasi *welding sequence*, yaitu *string welding* dan *back-step welding*, di mana masing-masing variasi *welding sequence* terdiri dari tiga spesimen. Mesin las SMAW yang digunakan yaitu Lincoln Electric – Aspect 300.



Gambar 3. 3 Mesin Las SMAW Lincoln Electric – Aspect 300

Proses pengelasan dilakukan sesuai parameter yang tertera dalam tabel 1, semua parameter dijaga konstan. *Interpass temperature* dijaga tidak melebihi 200°C sebelum melakukan pengelasan berikutnya untuk mencegah akumulasi panas berlebih yang dapat menyebabkan pertumbuhan butir kasar

pada daerah *weld metal* dan HAZ. Pada metode *back-step welding*, panjang langkah mundur (*step length*) ditetapkan sebesar 50 mm untuk setiap lintasan pengelasan.

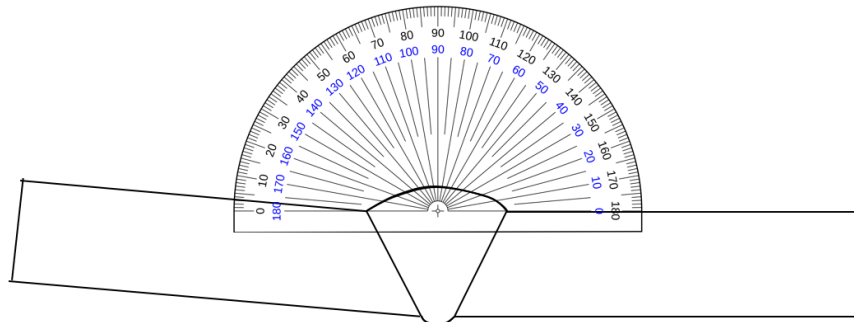
Tabel 3. 1 Parameter Pengelasan

| Pass No. | Layer    | Elektroda      | Diameter elektrod a (mm) | Proses | Polaritas | Kuat Arus (A) | Voltage (V) | Travel Speed (mm/s) | Heat Input (kJ/mm) |
|----------|----------|----------------|--------------------------|--------|-----------|---------------|-------------|---------------------|--------------------|
| 1        | Root     | E7016 LB-52U   | 2,6                      | SMAW   | DCE N     | 60 – 80       | 20 – 25     | 1,75 – 2,21         | 1,54 – 1,14        |
| 2        | Hot Pass | E7016 LB-52    | 2,6                      | SMAW   | DCE P     | 70 – 90       | 20 – 25     | 2,71 – 3,09         | 0,45 – 0,83        |
| 3        | Filler   | E7018 LB-52-18 | 3,2                      | SMAW   | DCE P     | 110 – 130     | 20 – 25     | 2,16 – 2,54         | 0,86 – 1,50        |
| 4        | Cap      | E7018 LB-52-18 | 3,2                      | SMAW   | DCE P     | 110 – 130     | 20 – 25     | 1,04 – 1,95         | 1,12 – 3,12        |

- Posisi : 1G
- Interpass temperature: max 200°C
- Step length (back-step welding): 50 mm

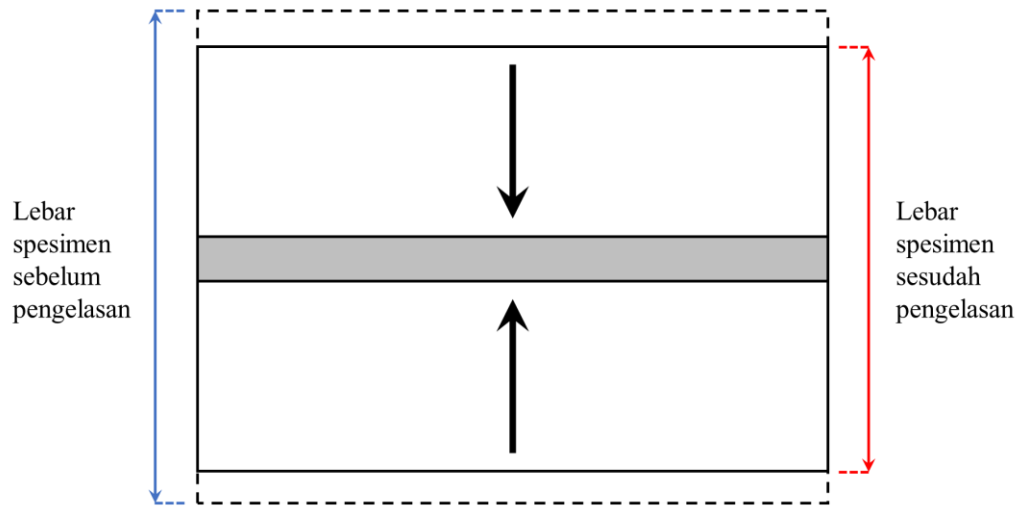
Pengelasan dilakukan di *Workshop 2* dalam kondisi lingkungan yang relatif serupa dan spesimen didinginkan secara alami. Suhu serta kelembapan ruangan tidak dicatat secara kuantitatif; karena itu, pengendalian lingkungan diperlakukan sebagai prosedur operasional, bukan variabel terukur.

Setelah proses pengelasan selesai, seluruh spesimen selanjutnya menjalani tahap pengujian. Pengujian pertama yang dilakukan adalah pengukuran distorsi sudut (*angular distortion*) untuk mengetahui seberapa jauh perubahan bentuk atau deformasi yang terjadi akibat perbedaan *welding sequence*. Pengujian dilakukan dengan meletakkan spesimen uji di atas permukaan rata sebagai bidang acuan datar, lalu diukur menggunakan busur seperti pada gambar 3. 4.



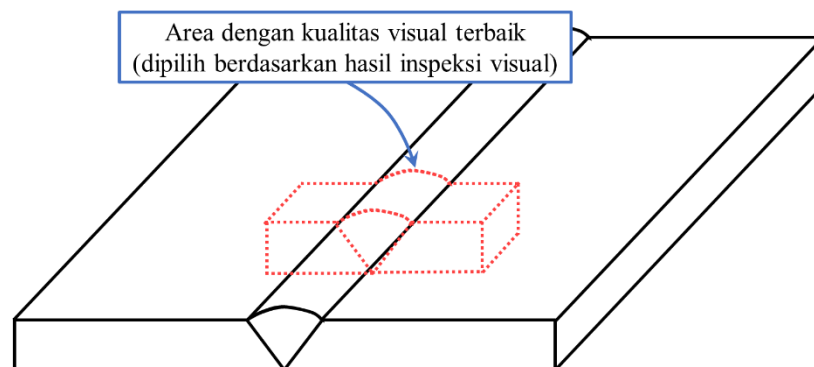
Gambar 3. 4 Pengukuran Distorsi Sudut

Selain distorsi sudut (*angular distortion*), pengukuran distorsi juga dilakukan dalam bentuk penyusutan melintang (*transverse shrinkage*) menggunakan *vernier caliper*. Lebar spesimen diukur saat sebelum dilas, lalu diukur kembali sesudah dilas. Selisih antara pengukuran tersebut merupakan hasil dari penyusutan melintang (*transverse shrinkage*). Ilustrasi mengenai penyusutan melintang (*transverse shrinkage*) dapat dilihat pada gambar 3. 5.

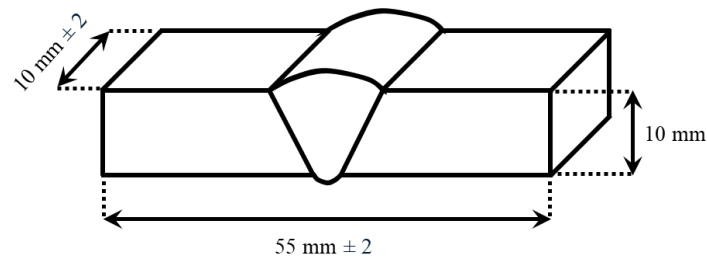


Gambar 3. 5 Pengukuran Penyusutan Melintang

Selanjutnya dilakukan pengujian struktur mikro untuk mengamati perubahan struktur mikro *base metal*, *weld metal*, dan HAZ yang disebabkan oleh variasi *welding sequence*. Tahap awal pengujian struktur mikro diawali dengan pembuatan spesimen uji mikro melalui proses metalografi. Spesimen terlebih dahulu dipotong (*cutting*) menggunakan *band saw* sesuai lokasi yang telah ditentukan seperti pada gambar 3. 6 dan 3. 7.



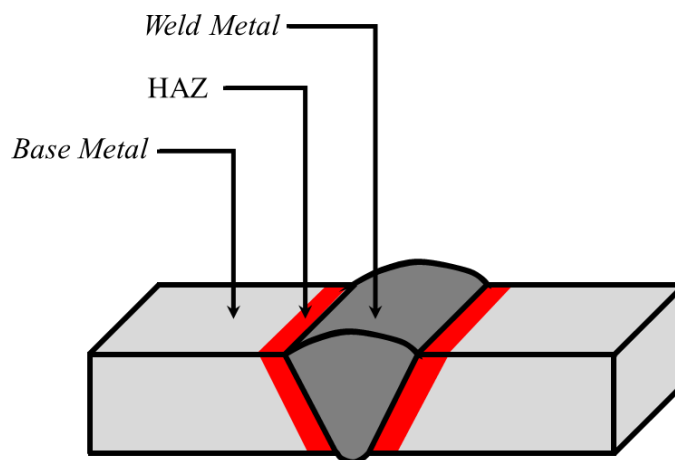
Gambar 3. 6 Area Pemotongan Spesimen Uji untuk Sampel Struktur Mikro



Gambar 3. 7 Ukuran Sampel Struktur Mikro

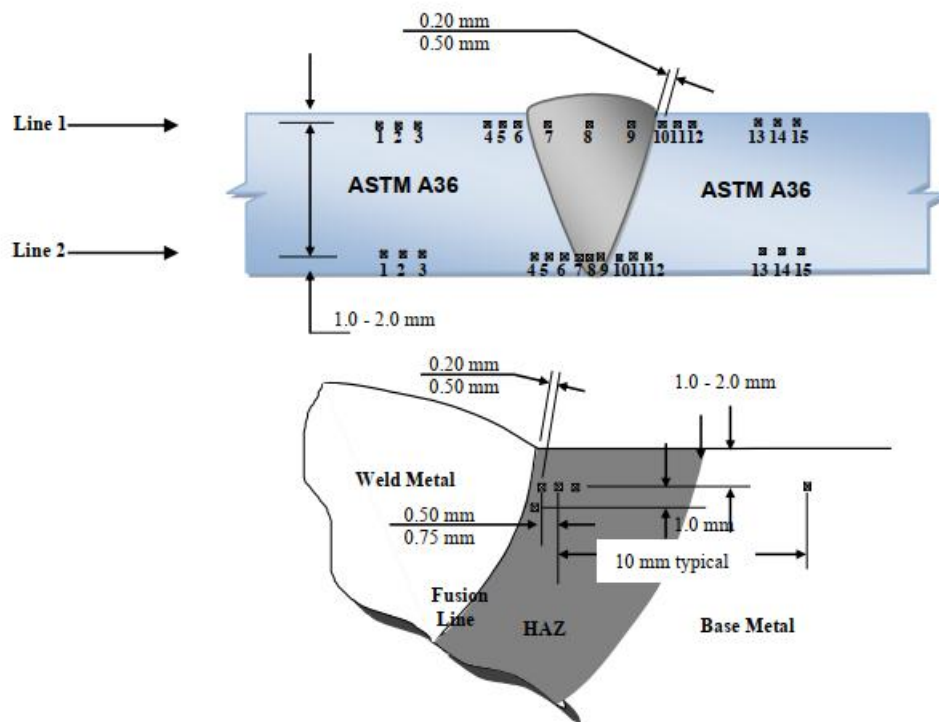
Setelah pemotongan, spesimen diampelas secara bertahap menggunakan kertas amplas dengan ukuran grit 60, 120, 240, 400, 1200, 1500, dan 2000. Kemudian, spesimen dipoles (*polishing*) menggunakan autosol hingga diperoleh permukaan yang rata, halus, dan bebas dari goresan.

Setelah proses pemolesan, spesimen dilakukan proses etsa (*etching*) menggunakan larutan nital dengan tujuan agar perbatasan antara setiap area *base metal*, *weld metal* dan HAZ dapat terlihat secara visual, sehingga dapat diobservasi menggunakan mikroskop metalurgi. Pengujian mikro mengacu pada ASTM E407-2023.



Gambar 3. 8 Area Pengamatan Struktur Mikro

Pengujian kekerasan mengacu pada ASTM E92-23 dengan beban 10 kgf. Setiap spesimen diuji pada dua garis, masing-masing 15 titik. Titik 1-3 dan 13-15 mewakili *base metal*, titik 4-6 dan 10-12 mewakili *HAZ*, sedangkan titik 7-9 mewakili *weld metal*. Dengan demikian, setiap spesimen menghasilkan 30 nilai dan seluruh penelitian menghasilkan 180 nilai HV10.



Gambar 3. 9 Titik Indentasi Pada Pengujian Kekerasan *Vickers*

## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1. Data Pengujian

Bab ini menyajikan hasil pengukuran distorsi, pemeriksaan makro, struktur mikro, dan kekerasan pada sambungan las baja ASTM A36. Data pengujian berasal dari dua sampel, yaitu Sampel A (*string welding*) dan Sampel B (*back-step welding*). Masing-masing sampel terdiri dari tiga spesimen, yaitu A-I, A-II, A-III serta B-I, B-II, dan B-III. Laporan laboratorium menuliskan pengujian makro mengacu ASTM E340-23, pengujian struktur mikro mengacu ASTM E407-2023, dan pengujian kekerasan mengacu ASTM E92-23 dengan beban 10 kgf atau HV10.

Data distorsi terdiri atas nilai distorsi sudut dan penyusutan melintang yang diperoleh dari enam spesimen. Nilai pengukuran setiap sampel dirata-ratakan, kemudian dibandingkan secara deskriptif untuk mengetahui pengaruh variasi *welding sequence* terhadap distorsi yang terjadi. Struktur mikro dianalisis secara kualitatif-deskriptif melalui perbandingan daerah base metal, HAZ, dan weld metal. Kekerasan dianalisis dengan memasukkan seluruh nilai uji, kemudian nilai pada daerah yang sama dirata-ratakan untuk setiap spesimen dan setiap sampel.

Tabel 4. 1 Jenis Data dan Analisisnya

| Jenis Data     | Standar Uji    | Data yang Dimasukkan                                    | Jumlah Data          | Keterangan Analisis                                               |
|----------------|----------------|---------------------------------------------------------|----------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Distorsi       | Tidak ada      | Distorsi sudut dan penyusutan melintang                 | 6 Spesimen           | Dirata-ratakan per spesimen, lalu dianalisis secara deskriptif    |
| Makro          | ASTM E340-23   | Foto makro 10x, tebal, lebar, hasil acceptance          | 6 spesimen           | Digunakan untuk memastikan kondisi sambungan dan complete fusion. |
| Struktur mikro | ASTM E407-2023 | Foto 100x dan 500x pada base metal, HAZ, dan weld metal | 18 lokasi pengamatan | Analisis deskriptif-komparatif                                    |

| Jenis Data | Standar Uji | Data yang Dimasukkan                            | Jumlah Data    | Keterangan Analisis                                          |
|------------|-------------|-------------------------------------------------|----------------|--------------------------------------------------------------|
| Kekerasan  | ASTM E92-23 | Nilai HV10 Line 1 dan Line 2, titik 1 sampai 15 | 180 nilai HV10 | Dirata-ratakan per daerah, lalu dianalisis secara deskriptif |

Berdasarkan skema pada Gambar 4.1, setiap spesimen memiliki dua garis pengujian, yaitu Line 1 dan Line 2. Titik 1-3 dan 13-15 berada pada base metal, titik 4-6 dan 10-12 berada pada HAZ, sedangkan titik 7-9 berada pada weld metal. Karena setiap titik diuji pada dua garis, maka setiap spesimen memiliki 30 nilai kekerasan. Pengelompokan ini digunakan sebagai dasar perhitungan rata-rata kekerasan.

#### 4.2. Hasil Pengukuran Distorsi

Pengukuran distorsi dilakukan untuk mengetahui perubahan bentuk dan perubahan dimensi yang terjadi pada sambungan las baja ASTM A36 setelah proses pengelasan SMAW. Pada penelitian ini, distorsi dianalisis melalui dua parameter, yaitu distorsi sudut (angular distortion) dan penyusutan melintang (transverse shrinkage). Distorsi sudut diukur menggunakan busur derajat, sedangkan penyusutan melintang diperoleh dari hasil pengukuran lebar spesimen sebelum dan sesudah pengelasan menggunakan *vernier caliper*. Selisih antara lebar sebelum dan sesudah pengelasan digunakan sebagai nilai penyusutan melintang.

Tabel 4. 2 Data Distorsi Sudut

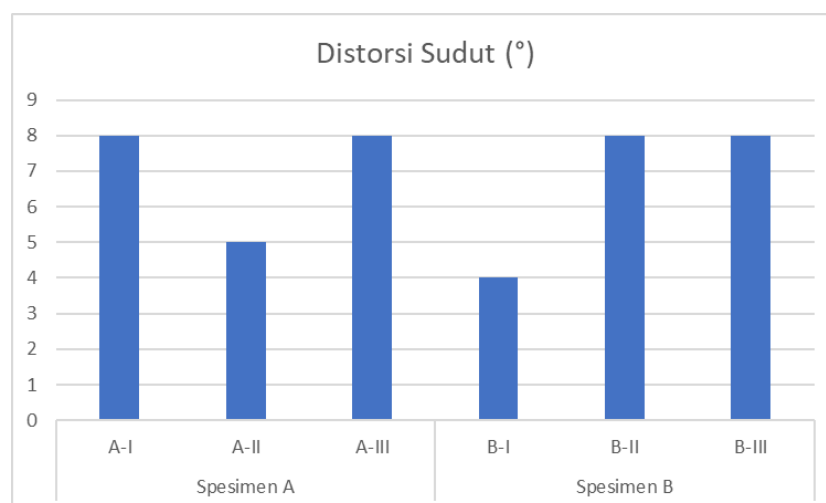
| Spesimen |       | Distorsi Sudut (°) | Rata-Rata (°) |
|----------|-------|--------------------|---------------|
| A        | A-I   | 8                  | 7             |
|          | A-II  | 5                  |               |
|          | A-III | 8                  |               |
| B        | B-I   | 4                  | 6,67          |
|          | B-II  | 8                  |               |
|          | B-III | 8                  |               |

Tabel 4. 3 Data Penyusutan Melintang (*Tranverse Shrinkage*)

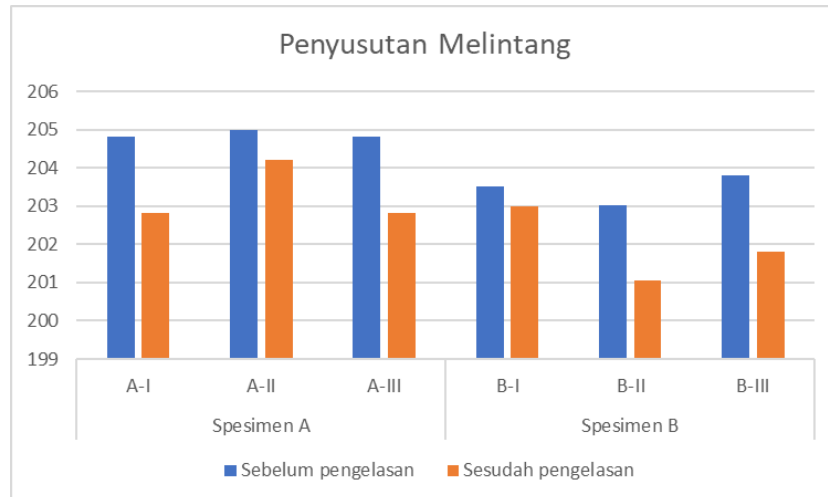
| Spesimen |       | Lebar Spesimen (mm) |           |                    |           |
|----------|-------|---------------------|-----------|--------------------|-----------|
|          |       | Sebelum pengelasan  | Rata-Rata | Sesudah pengelasan | Rata-Rata |
| A        | A-I   | 204,80              | 204,86    | 202,81             | 203,28    |
|          | A-II  | 204,99              |           | 204,21             |           |
|          | A-III | 204,80              |           | 202,81             |           |
| B        | B-I   | 203,50              | 203,44    | 203,00             | 201,95    |
|          | B-II  | 203,03              |           | 201,05             |           |
|          | B-III | 203,79              |           | 201,81             |           |

Rata-rata distorsi sudut *back-step welding* sebesar  $6,67^\circ$ , lebih rendah  $0,33^\circ$  atau sekitar 4,8% dibanding *string welding*. Rata-rata penyusutan melintang juga lebih rendah 0.10 mm atau sekitar 6,3%. Selisih tersebut kecil, sehingga hasil hanya menunjukkan kecenderungan deskriptif dan tidak cukup untuk klaim perbedaan signifikan.

Peringkat kedua ukuran distorsi konsisten pada enam spesimen. A-I, A-III, B-II, dan B-III yang memiliki distorsi sudut  $8^\circ$  juga menunjukkan penyusutan sekitar 1,98-1,99 mm. Sebaliknya, A-II dengan  $5^\circ$  memiliki penyusutan 0,78 mm dan B-I dengan  $4^\circ$  memiliki penyusutan 0,50 mm. Kesesuaian ini menunjukkan bahwa kontraksi melintang dan perubahan sudut muncul bersamaan pada spesimen yang diuji, tetapi jumlah data tidak memadai untuk menyatakan korelasi umum.



Gambar 4. 1 Grafik Distorsi Sudut pada Setiap Spesimen



Gambar 4. 2 Grafik Penyusutan Melintang pada Setiap Spesimen

Kecenderungan distorsi lebih rendah pada *back-step welding* dapat dijelaskan oleh pembagian jalur menjadi segmen pendek dan perubahan arah deposisi lokal. Pola tersebut berpotensi membagi kontraksi dan memberi waktu pendinginan parsial. Namun, variasi besar antara B-I dan B-II/B-III menunjukkan bahwa *welding sequence* sangat sensitif terhadap pelaksanaan manual, kestabilan busur, *travel speed* aktual, dan waktu antar segmen. Oleh sebab itu, data ini belum cukup untuk merekomendasikan perubahan WPS tanpa verifikasi tambahan.

Penurunan distorsi pada *back-step welding* sejalan dengan penelitian Cuana dkk. (2025) yang menunjukkan bahwa deposisi segmen pendek menghasilkan distribusi panas yang lebih merata. Akan tetapi, selisih distorsi pada penelitian ini relatif kecil dibanding penelitian tersebut. Perbedaan ini kemungkinan dipengaruhi oleh geometri sambungan, proses SMAW manual, serta jumlah spesimen yang terbatas sehingga efek *welding sequence* tidak tampak sekuat pada penelitian sebelumnya.

Meskipun penurunan distorsi yang diperoleh relatif kecil, hasil ini menunjukkan bahwa pemilihan *welding sequence* dapat dipertimbangkan sebagai salah satu parameter proses untuk mengendalikan deformasi tanpa mengubah parameter utama seperti kuat arus dan tegangan listrik. Dalam fabrikasi, pendekatan ini berpotensi membantu mengurangi kebutuhan pekerjaan pelurusan (*straightening*) setelah pengelasan, khususnya pada komponen yang sensitif terhadap distorsi.

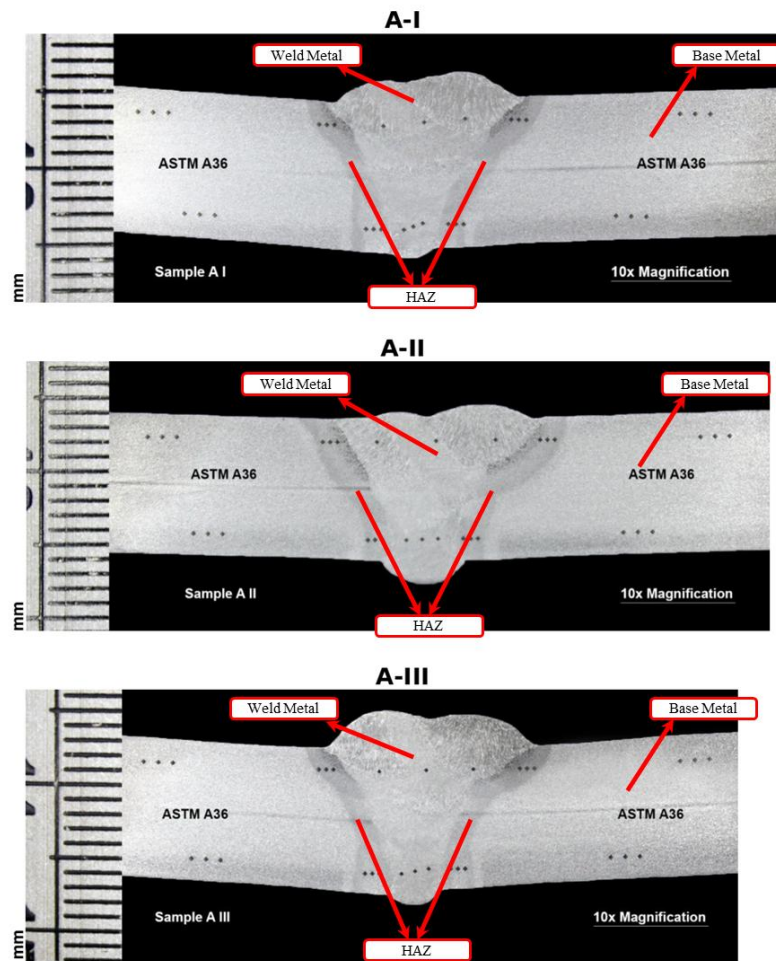
#### 4.3. Hasil Pemeriksaan Makro

Pemeriksaan makro dilakukan untuk melihat kondisi penampang sambungan las. Data yang dimasukkan meliputi seluruh spesimen Sampel A dan Sampel B. Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh spesimen memiliki ketebalan 10 mm, lebar 10 mm, dan seluruhnya dinyatakan *accepted* dengan kriteria *complete fusion*.

Tabel 4. 4 Data Pemeriksaan Makro

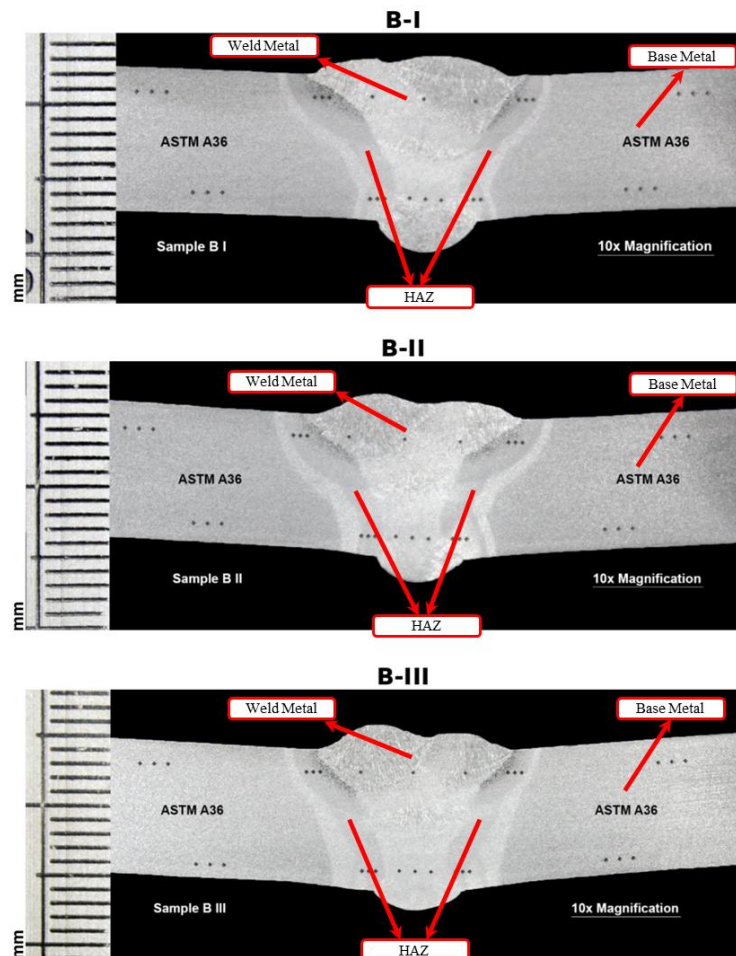
| Sampel                | Spesimen | Tebal (mm) | Lebar (mm) | Hasil           | Kriteria Penerimaan    |
|-----------------------|----------|------------|------------|-----------------|------------------------|
| A<br>(String Welding) | A-I      | 10         | 10         | <i>Accepted</i> | <i>Complete Fusion</i> |
|                       | A-II     | 10         | 10         | <i>Accepted</i> | <i>Complete Fusion</i> |
|                       | A-III    | 10         | 10         | <i>Accepted</i> | <i>Complete Fusion</i> |
| B (Back-step welding) | B-I      | 10         | 10         | <i>Accepted</i> | <i>Complete Fusion</i> |
|                       | B-II     | 10         | 10         | <i>Accepted</i> | <i>Complete Fusion</i> |
|                       | B-III    | 10         | 10         | <i>Accepted</i> | <i>Complete Fusion</i> |

Berdasarkan hasil tersebut, dapat dinyatakan bahwa variasi *welding sequence* yang digunakan pada penelitian ini tidak menyebabkan perbedaan penerimaan secara makro. Baik metode *string welding* maupun *back-step welding* mampu menghasilkan sambungan yang memenuhi kriteria fusi lengkap. Dengan demikian, perbedaan yang muncul pada distorsi, struktur mikro, dan kekerasan tidak dapat dikaitkan dengan kegagalan fusi besar seperti *lack of fusion*, tetapi lebih tepat dibahas sebagai akibat dari perbedaan siklus termal, distribusi panas, dan proses penyusutan selama pengelasan.



Gambar 4. 3 Foto Makro Spesimen A (*String Welding*)

Hasil makro ini penting sebagai dasar pembahasan berikutnya. Jika terdapat cacat makro yang besar, maka nilai kekerasan atau perubahan struktur mikro dapat dipengaruhi oleh ketidaksempurnaan sambungan. Namun, karena seluruh spesimen dinyatakan accepted, maka analisis struktur mikro dan kekerasan dapat difokuskan pada pengaruh daerah pengelasan, yaitu base metal, HAZ, dan weld metal, serta kemungkinan pengaruh welding sequence terhadap siklus panas.



Gambar 4. 4 Foto Makro Spesimen B (*Back-step Welding*)

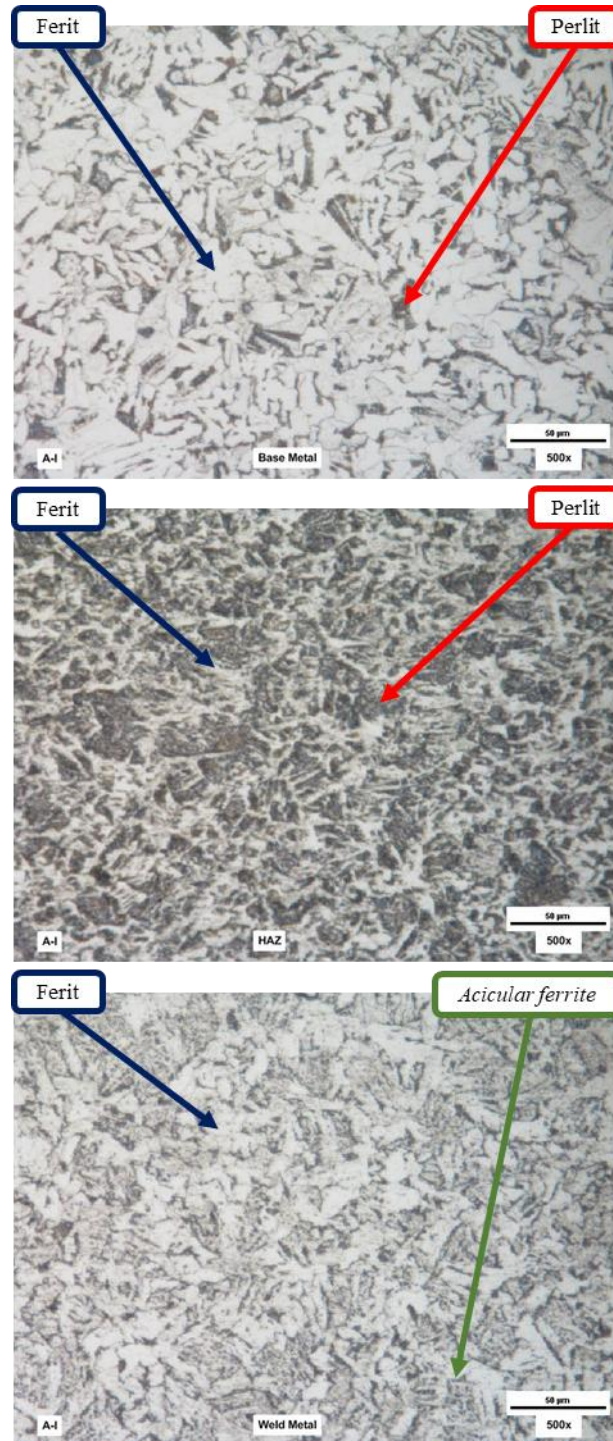
Penelitian Wibowo dkk. (2016) menunjukkan bahwa struktur makro las berkaitan dengan volume deposit logam las, penetrasi, dan besarnya penyusutan termal. Dalam penelitian tersebut, semakin besar masukan panas, semakin besar pula kecenderungan perubahan volume deposit dan distorsi. Pada penelitian ini, pemeriksaan makro tidak menunjukkan perbedaan penerimaan antara Sampel A dan B, tetapi foto makro tetap dapat digunakan untuk menunjukkan adanya daerah yang mengalami pencairan (*weld metal*), daerah yang terpengaruh panas atau HAZ, dan logam dasar. Oleh karena itu, pemeriksaan makro berfungsi sebagai penghubung antara hasil distorsi dan hasil pengujian kekerasan.

#### 4.4. Hasil dan Pembahasan Struktur Mikro

Pengamatan struktur mikro pada pembesaran 500x dilakukan terhadap 18 lokasi, yaitu daerah *base metal*, *heat-affected zone* (HAZ), dan *weld metal* pada spesimen A-I, A-II, A-III, B-I, B-II, dan B-III. Sampel A merupakan sampel *string welding*, sedangkan Sampel B merupakan sampel *back-step welding*. Analisis dilakukan secara kualitatif-deskriptif dengan membandingkan morfologi fasa yang tampak dominan, tingkat kehalusan, dan keseragaman distribusinya pada setiap daerah. Perbandingan antar sampel difokuskan pada kecenderungan visual karena pengamatan tidak disertai pengukuran ukuran butir atau fraksi fasa secara kuantitatif.

Kerangka identifikasi mengacu pada Sub-bab 2.2.5. Pada baja karbon rendah ASTM A36 yang telah kembali ke suhu ruang, ferit dan perlit digunakan sebagai identifikasi utama pada *base metal* dan HAZ. Austenit tidak diharapkan stabil pada kondisi tersebut, sedangkan sementit terutama berada sebagai bagian dari perlit. Pada *weld metal*, morfologi berjarum yang tumbuh relatif acak dan saling berpotongan ditafsirkan sebagai indikasi *acicular ferrite* sesuai karakteristik morfologi yang dibahas oleh Yan dkk. (2024). Akan tetapi, identifikasi ini hanya didasarkan pada citra mikroskop optik 500x dan bentuk morfologi. Tanpa karakterisasi lanjutan seperti SEM/EBSD atau analisis fasa kuantitatif, *acicular ferrite*, bainit, dan martensit tidak dapat dibedakan secara konklusif. Oleh karena itu, penamaan fasa pada bagian ini bersifat indikatif, dan keterbatasan tersebut berlaku untuk seluruh spesimen.

#### 4.4.1. Spesimen A-I (String Welding)

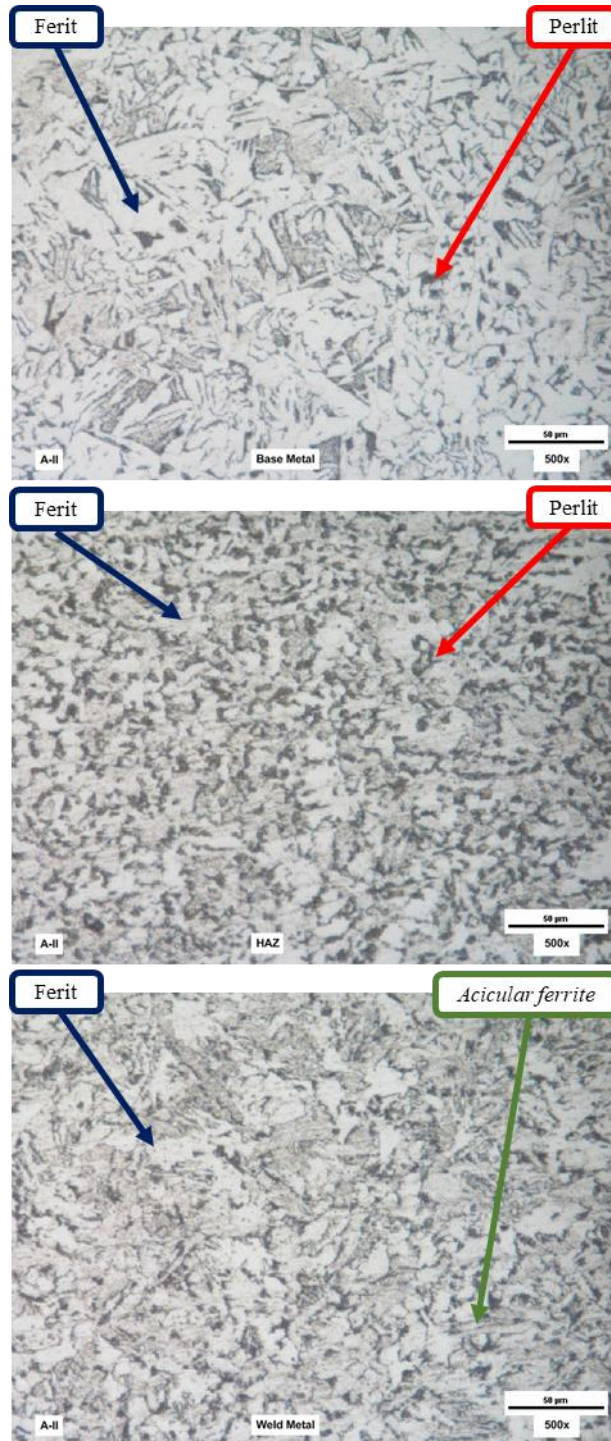


Gambar 4. 5 Identifikasi Fasa Struktur Mikro Spesimen A-I Pada Pembesaran 500x

Pada *base metal* A-I, daerah terang yang mendominasi bidang pandang diidentifikasi sebagai ferit, sedangkan daerah gelap dengan pola lamelar diidentifikasi sebagai perlit. Pada HAZ A-I, ferit masih menjadi matriks

utama, tetapi daerah perlit tampak lebih rapat dan lebih halus dibandingkan *base metal*, yang menggambarkan perubahan morfologi setelah mengalami siklus termal pengelasan. Pada *weld metal* A-I, matriks feritik disertai morfologi berjarum pada beberapa bagian yang ditafsirkan sebagai indikasi *acicular ferrite*. Distribusi morfologi berjarum tersebut tampak belum sepenuhnya merata dibandingkan A-II dan A-III.

#### 4.4.2. Spesimen A-II (*String Welding*)

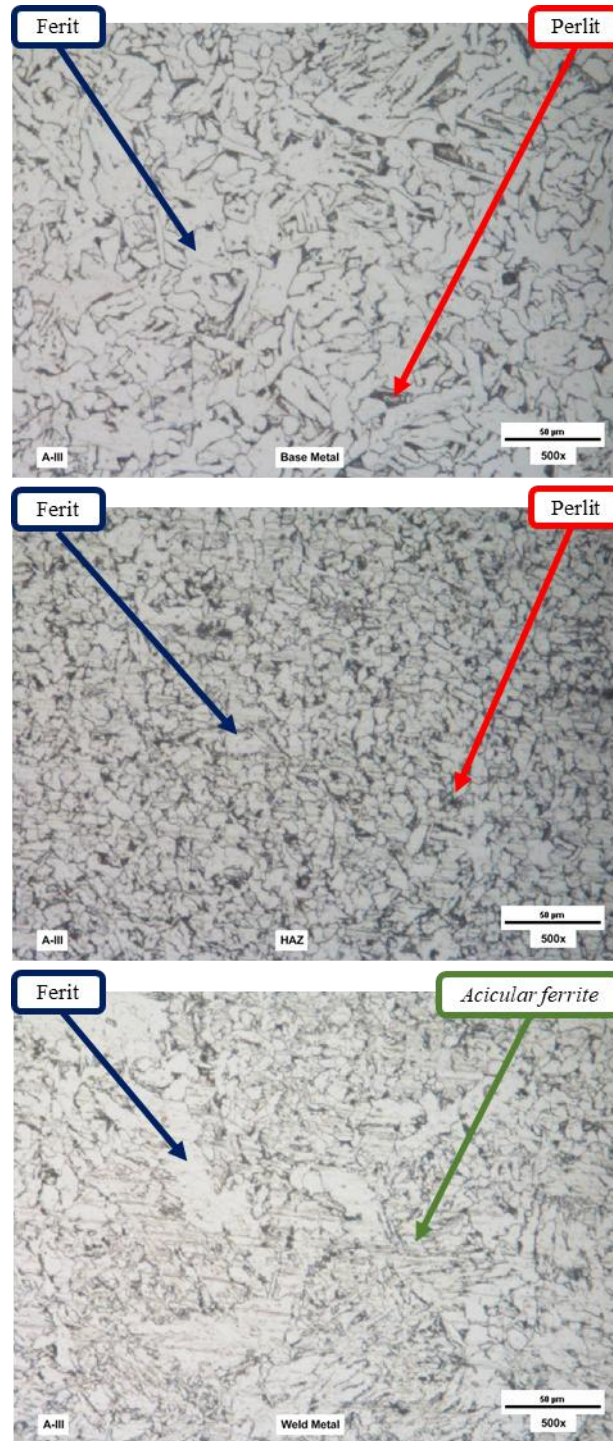


Gambar 4. 6 Identifikasi Fasa Struktur Mikro Spesimen A-II Pada Pembesaran 500x

Pada *base metal* A-II, ferit tampak sebagai daerah terang yang dominan, sedangkan perlit terlihat sebagai koloni gelap berlamela. Pada HAZ A-II, ferit dan perlit masih menjadi fasa utama, tetapi keduanya tampak lebih

halus dan tersebar lebih merata daripada pada *base metal*. Pada *weld metal* A-II, matriks feritik berdampingan dengan morfologi berjarum yang relatif merata dan saling berpotongan. Morfologi tersebut ditafsirkan sebagai indikasi *acicular ferrite*. Dibandingkan A-I, distribusi struktur berjarum pada A-II terlihat lebih homogen secara visual.

#### 4.4.3. Spesimen A-III (String Welding)

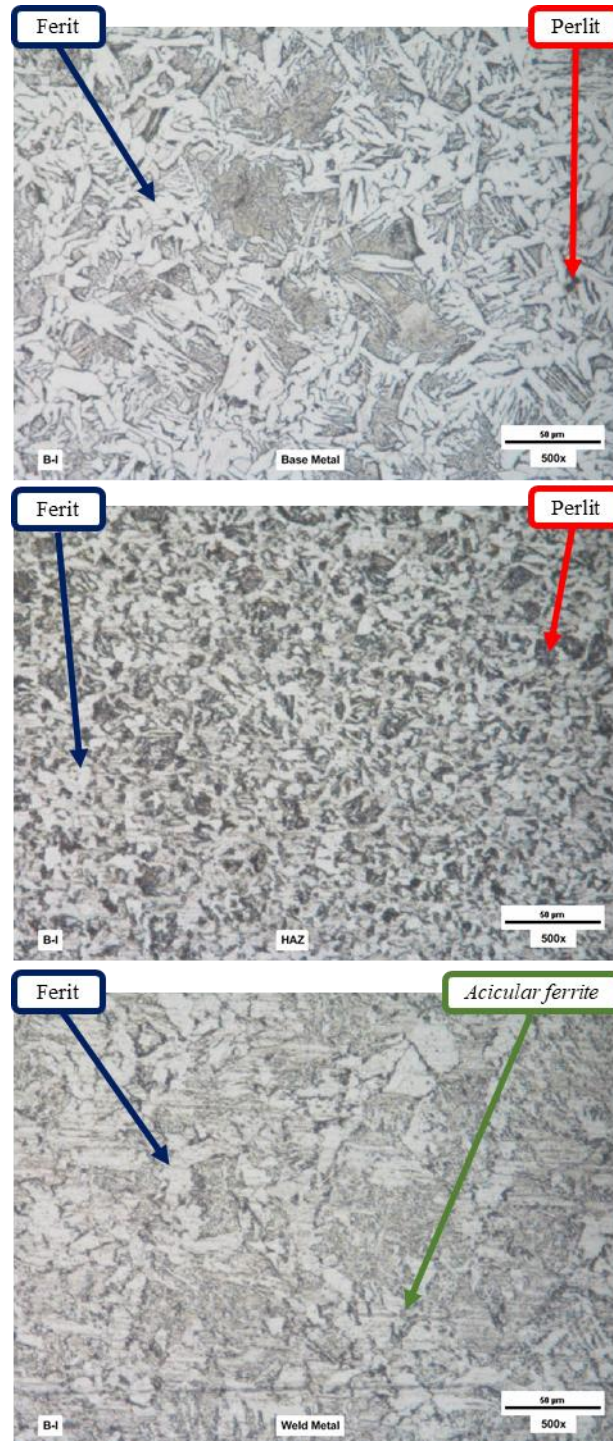


Gambar 4. 7 Identifikasi Fasa Struktur Mikro Spesimen A-III Pada Pembesaran 500x

Pada *base metal* A-III, ferit tetap menjadi fasa dominan, sedangkan perlit terlihat sebagai daerah gelap pada batas dan di antara butir ferit. HAZ A-III menunjukkan ferit dan perlit yang secara visual lebih halus; di antara

HAZ sampel A, bidang A-III tampak paling seragam. Pada *weld metal* A-III, matriks feritik disertai morfologi berjarum yang tersebar pada beberapa bagian dan ditafsirkan sebagai indikasi *acicular ferrite*. Perubahan morfologi dari pola ferit-perlit pada *base metal* dan HAZ menuju struktur feritik berjarum pada *weld metal* menunjukkan pengaruh proses pencairan dan pembekuan kembali.

#### 4.4.4. Spesimen B-I (*Back-step Welding*)

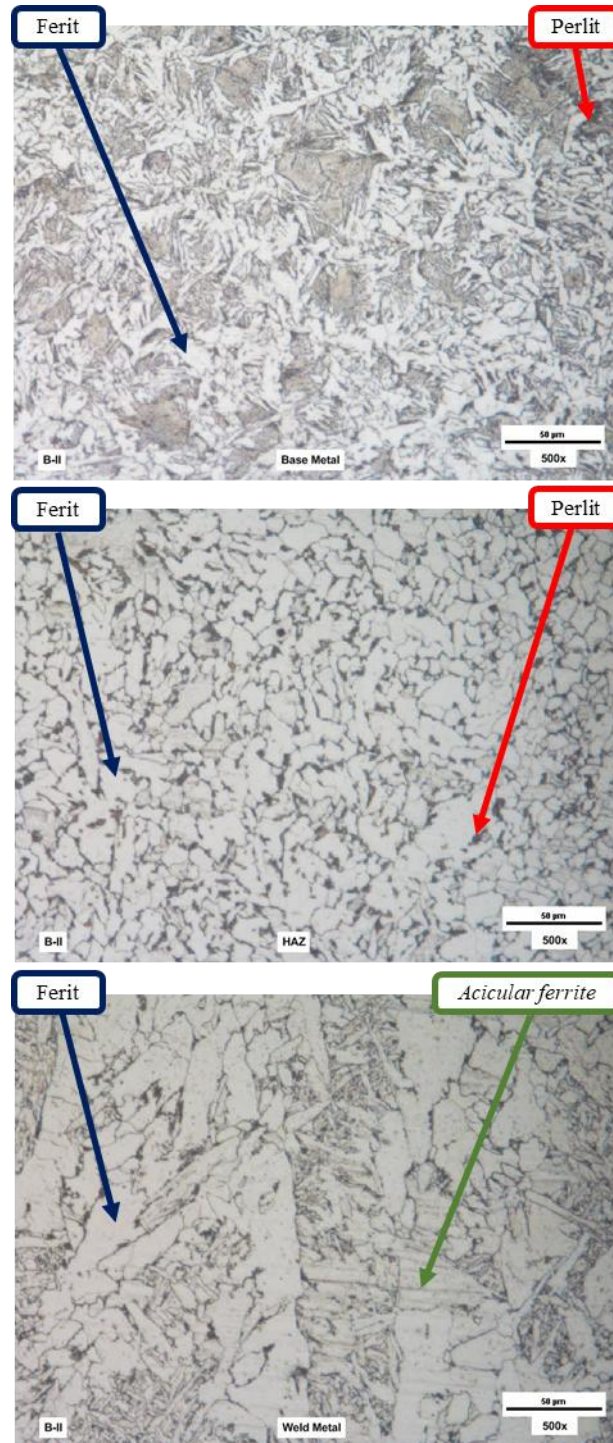


Gambar 4. 8 Identifikasi Fasa Struktur Mikro Spesimen B-I Pada Pembesaran 500x

Pada *base metal* B-I, ferit dan perlit menjadi fasa dominan, dengan koloni perlit yang tampak lebih menonjol dibandingkan *base metal* sampel A. Perbedaan visual tersebut tidak langsung diartikan sebagai pengaruh

*welding sequence* karena dapat dipengaruhi oleh posisi pengambilan foto, kondisi preparasi dan etsa, pencahayaan, serta perbedaan *heat number* material. Pada HAZ B-I, ferit dan perlit tampak lebih halus serta lebih rapat daripada *base metal*. Pada *weld metal* B-I, morfologi berjarum tampak terkonsentrasi pada bagian tertentu dan ditafsirkan sebagai indikasi *acicular ferrite*. Distribusinya kurang homogen dibandingkan *weld metal* A-II dan A-III, tetapi heterogenitasnya belum sekuat B-II dan B-III.

#### 4.4.5. Spesimen B-II (*Back-step Welding*)

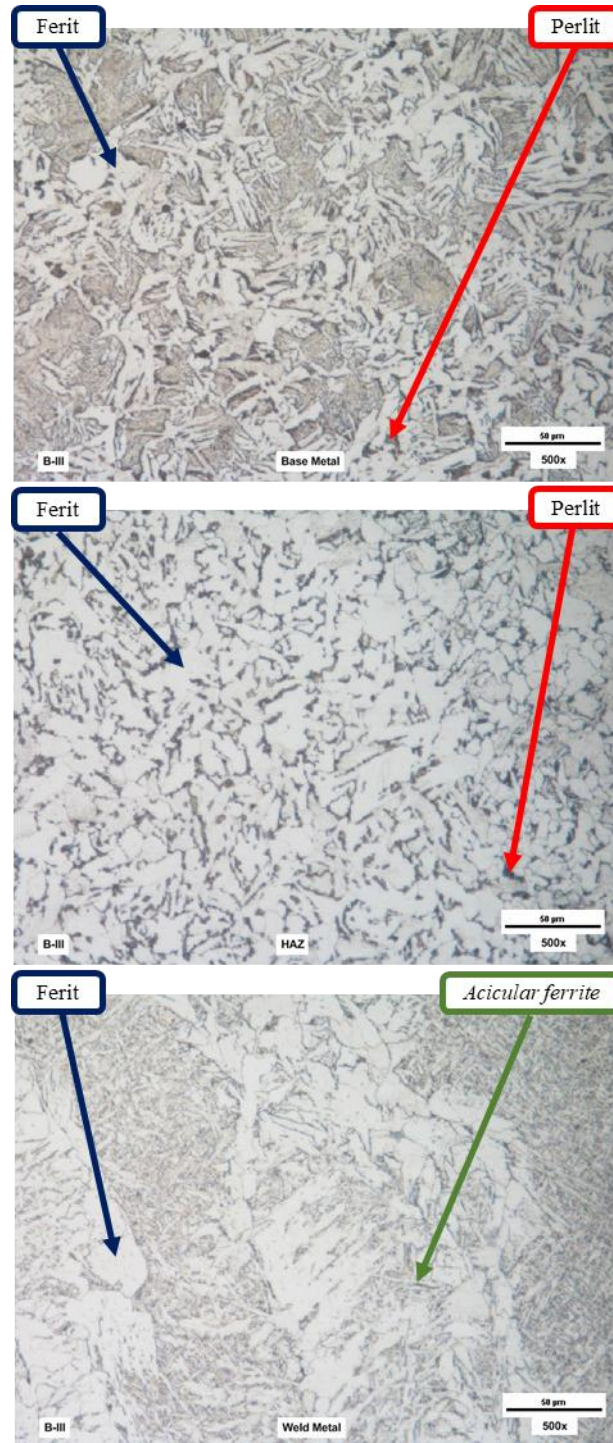


Gambar 4. 9 Identifikasi Fasa Struktur Mikro Spesimen B-II Pada Pembesaran 500x

Pada *base metal* B-II, ferit dan perlit kembali menjadi fasa dominan, dengan koloni perlit yang tampak relatif rapat di antara daerah ferit. HAZ B-II tetap didominasi ferit dan perlit, tetapi ukuran ferit tampak berubah

dari bagian yang relatif kasar menuju bagian yang lebih halus. Kondisi ini dapat berkaitan dengan perbedaan respons termal lokal, tetapi temperatur puncak dan laju pendinginan tidak diukur sehingga mekanismenya tidak dapat dikonfirmasi. Pada *weld metal* B-II, daerah ferit berukuran relatif besar berdampingan dengan paket morfologi berjarum yang ditafsirkan sebagai indikasi *acicular ferrite*. Perbedaan ukuran dan kerapatan antardaerah membuat *weld metal* B-II tampak lebih heterogen daripada sampel A. Heterogenitas tersebut dapat berkaitan dengan pemanasan dan pemanasan ulang lokal pada deposisi *back-step*, tetapi variasi proses SMAW manual juga perlu dipertimbangkan.

#### 4.4.6. Spesimen B-III (*Back-step Welding*)



Gambar 4. 10 Identifikasi Fasa Struktur Mikro Spesimen B-III Pada Pembesaran 500x

Pada *base metal* B-III, ferit menjadi fasa dominan dengan koloni perlit yang tersebar. Pada HAZ B-III, ferit dan perlit masih menjadi fasa utama, tetapi ukuran ferit dan distribusi perlit tampak tidak seragam pada seluruh

bidang pandang. Pada *weld metal* B-III, daerah feritik bersebelahan dengan morfologi berjarum yang sangat rapat, terutama pada sisi kanan bidang pandang, dan ditafsirkan sebagai indikasi *acicular ferrite*. Dibandingkan seluruh *weld metal* lainnya, B-III menunjukkan heterogenitas visual paling kuat. Pola tersebut mengindikasikan riwayat termal lokal yang tidak seragam, tetapi interpretasinya tetap bersifat deskriptif karena siklus termal aktual tidak tercatat.

Tabel 4. 5 Ringkasan Pengamatan Struktur Mikro

| Spesimen | Base metal                                | HAZ                                   | Weld metal                                              | Ringkasan                  |
|----------|-------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------|
| A-I      | Ferit-perlit; distribusi sedang           | Ferit-perlit lebih rapat dan halus    | Matriks feritik dengan struktur berjarum lokal          | Cukup homogen              |
| A-II     | Ferit-perlit                              | Ferit-perlit lebih halus dan merata   | Struktur berjarum relatif merata dan saling berpotongan | Paling homogen di sampel A |
| A-III    | Ferit dominan dengan perlit tersebar      | Susunan paling halus di sampel A      | Ferit dengan area berjarum tersebar                     | Homogen                    |
| B-I      | Ferit-perlit; koloni gelap lebih menonjol | Lebih halus dan rapat dari base metal | Struktur berjarum terkonsentrasi pada area tertentu     | Heterogenitas sedang       |
| B-II     | Ferit-perlit relatif rapat                | Perubahan ukuran butir antardaerah    | Ferit relatif kasar berdampingan dengan paket berjarum  | Heterogen                  |
| B-III    | Ferit dominan dengan perlit luas          | Distribusi berbeda antarbagian        | Daerah berjarum rapat terutama pada satu sisi           | Paling heterogen           |

Secara keseluruhan, *base metal* dan HAZ seluruh spesimen didominasi ferit-perlit, sedangkan *weld metal* menunjukkan matriks feritik dengan

indikasi *acicular ferrite*. Perbedaan kedua sampel terutama terlihat pada keseragaman morfologi, bukan pada jenis fasa dominan. Sampel *string welding* cenderung lebih homogen, sedangkan *back-step welding* lebih heterogen, terutama pada *weld metal* B-II dan B-III. Kecenderungan tersebut dapat dikaitkan secara teoritis dengan deposisi segmen pendek yang menimbulkan variasi lokal pemanasan, pendinginan, dan pemanasan ulang. Namun, pengaruh tunggal *welding sequence* belum dapat ditegaskan karena SMAW dilakukan secara manual, *heat input* aktual dan riwayat temperatur pada area lokal tidak dicatat, serta sampel menggunakan *heat number* berbeda. Oleh karena itu, hasil ini bersifat visual-deskriptif dan dibahas bersama data kekerasan pada Sub-bab 4.5.

Dari sisi metalurgi, hasil penelitian menunjukkan bahwa perubahan *welding sequence* pada kondisi penelitian ini tidak menghasilkan perbedaan jenis fasa dominan, tetapi memengaruhi tingkat homogenitas morfologi *weld metal*. Hal ini mengindikasikan bahwa pemilihan *welding sequence* dapat dipertimbangkan untuk membantu menjaga kualitas sambungan tanpa menimbulkan perubahan struktur mikro yang berarti pada material ASTM A36.

#### **4.5. Hasil dan Pengolahan Data Kekerasan**

Pengujian kekerasan dilakukan menggunakan metode *Vickers* dengan beban 10 kgf atau HV10 mengacu pada ASTM E92-23. Setiap spesimen diuji pada dua garis, yaitu Line 1 dan Line 2, dengan masing-masing garis terdiri atas 15 titik. Titik 1–3 dan 13–15 mewakili *base metal*, titik 4–6 dan 10–12 mewakili HAZ, sedangkan titik 7–9 mewakili *weld metal*. Dengan demikian, setiap spesimen menghasilkan 30 nilai dan keseluruhan penelitian menghasilkan 180 nilai HV10. Data lengkap setiap titik disajikan pada Lampiran 3, sedangkan Tabel 4.6 dan Tabel 4.7 menyajikan ringkasan per spesimen dan per sampel untuk analisis deskriptif.

Tabel 4. 6 Nilai Rata-Rata Kekerasan *Vickers* Pada Masing-Masing Spesimen

| Sampel | Spesimen | Daerah     | n  | Rata-rata (HV10) | Simpangan Baku | Min | Max |
|--------|----------|------------|----|------------------|----------------|-----|-----|
| A      | A-I      | Base Metal | 12 | 136,08           | 3,15           | 130 | 141 |
|        |          | HAZ        | 12 | 151,42           | 9,73           | 142 | 168 |
|        |          | Weld Metal | 6  | 179,33           | 11,91          | 165 | 195 |
|        | A-II     | Base Metal | 12 | 134,75           | 2,42           | 131 | 138 |
|        |          | HAZ        | 12 | 145,00           | 4,61           | 140 | 157 |
|        |          | Weld Metal | 6  | 176,50           | 3,78           | 172 | 182 |
|        | A-III    | Base Metal | 12 | 137,42           | 3,90           | 132 | 145 |
|        |          | HAZ        | 12 | 147,00           | 4,49           | 141 | 152 |
|        |          | Weld Metal | 6  | 178,00           | 8,39           | 168 | 191 |
| B      | B-I      | Base Metal | 12 | 151,92           | 4,68           | 144 | 159 |
|        |          | HAZ        | 12 | 150,67           | 8,36           | 141 | 167 |
|        |          | Weld Metal | 6  | 172,17           | 8,54           | 162 | 186 |
|        | B-II     | Base Metal | 12 | 152,17           | 2,76           | 147 | 156 |
|        |          | HAZ        | 12 | 150,42           | 9,05           | 138 | 163 |
|        |          | Weld Metal | 6  | 182,17           | 14,19          | 169 | 203 |
|        | B-III    | Base Metal | 12 | 151,58           | 3,82           | 146 | 158 |
|        |          | HAZ        | 12 | 154,17           | 6,82           | 143 | 166 |
|        |          | Weld Metal | 6  | 186,33           | 14,46          | 174 | 208 |

Tabel 4. 7 Nilai Rata-Rata Kekerasan *Vickers* Pada Masing-Masing Variabel

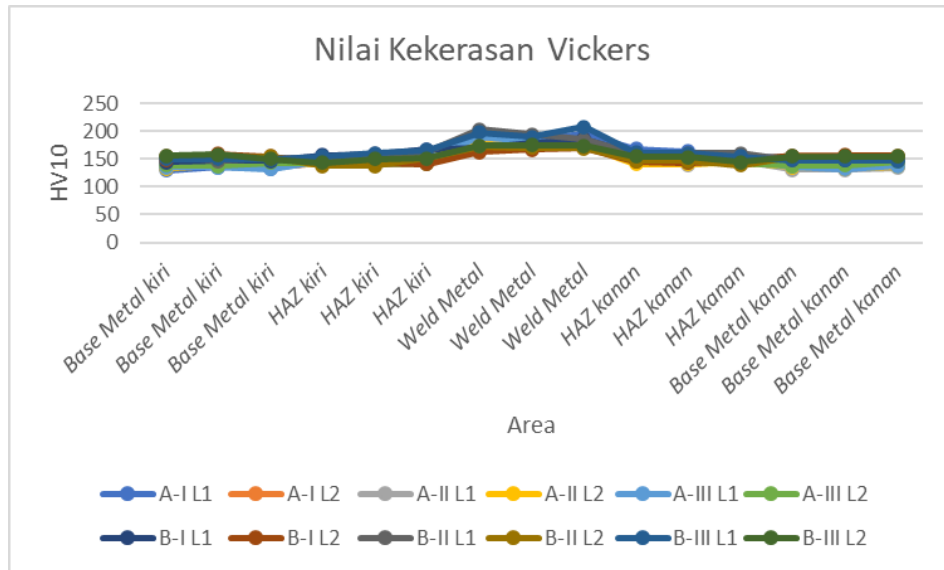
| Sampel | Daerah     | n  | Rata-rata (HV10) | Simpangan Baku | Min | Max |
|--------|------------|----|------------------|----------------|-----|-----|
| A      | Base Metal | 36 | 136,08           | 3,31           | 130 | 145 |
|        | HAZ        | 36 | 147,81           | 7,08           | 140 | 168 |
|        | Weld Metal | 18 | 177,94           | 8,25           | 165 | 195 |

| Sampel | Daerah     | n  | Rata-rata (HV10) | Simpangan Baku | Min | Max |
|--------|------------|----|------------------|----------------|-----|-----|
| B      | Base Metal | 36 | 151,89           | 3,73           | 144 | 159 |
|        | HAZ        | 36 | 151,75           | 8,08           | 138 | 167 |
|        | Weld Metal | 18 | 180,22           | 13,40          | 162 | 208 |

Ringkasan pada Tabel 4.6 dan Tabel 4.7 menunjukkan bahwa sampel A (*string welding*) memiliki rata-rata kekerasan 136,08 HV10 pada *base metal*, 147,81 HV10 pada HAZ, dan 177,94 HV10 pada *weld metal*. Sampel B (*back-step welding*) memiliki rata-rata 151,89 HV10 pada *base metal*, 151,75 HV10 pada HAZ, dan 180,22 HV10 pada *weld metal*. Pada kedua sampel, *weld metal* merupakan daerah dengan rata-rata kekerasan tertinggi.

Perbedaan kondisi awal material perlu dipertimbangkan sebelum membandingkan kedua sampel. Kekerasan *base metal* sampel B sebesar 151,89 HV10, atau 15,81 HV10 lebih tinggi daripada sampel A sebesar 136,08 HV10. Kedua sampel berasal dari plat dengan *heat number* berbeda, sehingga nilai absolut antar sampel tidak dapat digunakan untuk menyatakan pengaruh tunggal *welding sequence*. Oleh karena itu, perubahan pada HAZ dan *weld metal* ditafsirkan terhadap *base metal* masing-masing sampel.

Pada sampel A, kekerasan HAZ meningkat 11,73 HV10 atau 8,6% terhadap *base metal*, sedangkan *weld metal* meningkat 41,86 HV10 atau 30,8%. Pada sampel B, kekerasan HAZ hanya berbeda -0,14 HV10 atau sekitar -0,1% dari *base metal*, sedangkan *weld metal* meningkat 28,33 HV10 atau 18,7%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan relatif terbesar terjadi pada *weld metal* kedua sampel, tetapi besarnya peningkatan tidak dapat digunakan untuk menentukan metode yang lebih unggul karena kondisi awal material berbeda.



Gambar 4. 11 Distribusi Nilai Kekerasan Vickers pada *Base Metal*, *HAZ* dan *Weld Metal*

Kekerasan yang lebih tinggi pada *weld metal* berkaitan dengan proses pencairan, dilusi antara logam pengisi dan logam dasar, pembekuan kembali, serta pemanasan ulang oleh lintasan berikutnya. Kecenderungan ini selaras dengan pengamatan struktur mikro pada Sub-bab 4.4: *base metal* dan HAZ didominasi ferit-perlit, sedangkan *weld metal* menunjukkan matriks feritik dengan indikasi *acicular ferrite* dan morfologi hasil solidifikasi yang berbeda. Karena identifikasi fasa hanya dilakukan secara optik, kenaikan kekerasan tidak dikaitkan secara pasti dengan satu fasa tertentu.

Nilai kekerasan *weld metal* penelitian ini masih berada dalam rentang yang dilaporkan Wibowo dkk. (2016). Kesesuaian tersebut kemungkinan disebabkan oleh kesamaan material dasar, yaitu ASTM A36. Sehingga transformasi struktur mikro pada daerah las masih menghasilkan kisaran kekerasan yang sebanding. Namun, penelitian beliau memvariasikan *heat input*, sedangkan penelitian ini memvariasikan *welding sequence*. Oleh karena itu, meskipun nilai kekerasannya berada pada rentang yang sama, mekanisme yang memengaruhi perubahan kekerasan pada kedua penelitian tidak sepenuhnya identik.

Ling dkk. (2015) menunjukkan bahwa urutan dan jumlah lintasan pada pengelasan *multi-pass* dapat mengubah siklus termal serta efek *tempering* antarlintasan. Sementara itu, Wibowo dkk. (2016), Senthilkumar dkk. (2023),

dan Nitha (2019) memperlihatkan bahwa hubungan antara masukan panas dan kekerasan bergantung pada material, proses, geometri, serta kondisi pendinginan. Dengan demikian, pola kekerasan dalam penelitian ini lebih tepat dipahami sebagai respons gabungan kondisi awal material, masukan panas lokal, pembekuan, pendinginan, dan pemanasan ulang.

Sebaran kekerasan *weld metal* sampel B juga lebih besar, dengan simpangan baku 13,40 HV10 dan rentang 162–208 HV10, dibandingkan sampel A sebesar 8,25 HV10 dan rentang 165–195 HV10. Kecenderungan ini searah dengan pengamatan morfologi yang lebih heterogen pada *weld metal* B-II dan B-III. Namun, variasi tersebut belum dapat dinyatakan sebagai karakteristik umum *back-step welding* karena jumlah spesimen terbatas, proses SMAW dilakukan secara manual, *heat number* berbeda, serta *heat input* aktual dan riwayat temperatur lokal tidak tercatat.

Secara keseluruhan, sampel A menunjukkan pola peningkatan kekerasan dari *base metal* menuju HAZ dan mencapai nilai tertinggi pada *weld metal*. Pada sampel B, kekerasan HAZ hampir sama dengan *base metal*, sedangkan peningkatan utama terjadi pada *weld metal*. Pola umum tersebut konsisten dengan perubahan morfologi struktur mikro dari ferit-perlit pada *base metal* dan HAZ menuju struktur feritik hasil solidifikasi pada *weld metal*. Hasil hanya menunjukkan kecenderungan deskriptif dan belum dapat mengisolasi pengaruh *welding sequence* terhadap kekerasan.

## BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai perbedaan *string welding* dan *back-step welding* terhadap distorsi, struktur mikro, dan kekerasan baja ASTM A36 dengan proses SMAW, dapat disimpulkan bahwa *back-step welding* menunjukkan kecenderungan menghasilkan distorsi yang lebih rendah dibandingkan *string welding*. Rata-rata distorsi sudut pada *back-step welding* sebesar  $6,67^\circ$  dengan penyusutan melintang 1,49 mm, sedangkan *string welding* menghasilkan rata-rata distorsi sudut  $7,00^\circ$  dan penyusutan melintang 1,59 mm. Meskipun demikian, selisih sebesar  $0,33^\circ$  dan 0,10 mm belum dapat digunakan untuk menyatakan adanya perbedaan yang signifikan karena penelitian menggunakan pendekatan deskriptif-komparatif dengan jumlah spesimen yang terbatas.

Pengamatan struktur mikro menunjukkan bahwa seluruh spesimen memiliki *base metal* dan HAZ yang didominasi oleh fasa ferit-perlit, sedangkan *weld metal* menunjukkan matriks feritik dengan indikasi *acicular ferrite*. Perbedaan utama kedua metode pengelasan terlihat pada tingkat homogenitas morfologi *weld metal*, di mana *string welding* cenderung menghasilkan struktur yang lebih homogen, sedangkan *back-step welding* menunjukkan morfologi yang lebih heterogen, terutama pada spesimen B-II dan B-III. Identifikasi fasa dalam penelitian ini masih bersifat indikatif karena dilakukan menggunakan mikroskop optik dengan pembesaran  $500\times$ .

Hasil pengujian kekerasan menunjukkan bahwa *weld metal* merupakan daerah dengan nilai kekerasan tertinggi pada kedua metode pengelasan. Namun, karena kedua kelompok spesimen berasal dari plat dengan *heat number* yang berbeda, perbandingan nilai kekerasan absolut antar sampel tidak dapat diatribusikan sepenuhnya terhadap pengaruh *welding sequence*. Oleh karena itu, interpretasi hasil dilakukan terhadap perubahan relatif masing-masing sampel.

Penelitian ini memberikan kontribusi berupa data deskriptif mengenai pengaruh *string welding* dan *back-step welding* terhadap distorsi, struktur

mikro, dan kekerasan sambungan baja ASTM A36 menggunakan proses SMAW. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemilihan *welding sequence* dapat dipertimbangkan sebagai salah satu parameter proses untuk membantu mengendalikan distorsi tanpa menunjukkan perubahan karakteristik struktur mikro yang mencolok pada kondisi penelitian ini. Namun demikian, hasil penelitian masih dibatasi oleh jumlah spesimen yang terbatas, proses pengelasan manual, tidak dicatatnya parameter termal aktual, serta penggunaan material dengan *heat number* yang berbeda sehingga hasil yang diperoleh lebih menunjukkan kecenderungan deskriptif daripada hubungan sebab-akibat yang dapat digeneralisasi.

## 5.2. Saran

Berdasarkan keterbatasan penelitian, saran disampaikan sebagai berikut:

1. **Perbaikan metodologi.** Penelitian lanjutan sebaiknya menggunakan plat dari *heat number* yang sama, menambah jumlah spesimen, serta memverifikasi komposisi kimia, kekerasan awal, dan ukuran butir. Arus, tegangan, *travel speed*, *heat input* aktual, *interpass temperature*, dan waktu antar lintasan perlu dicatat, sistem pengelasan termekanisasi juga disarankan untuk mengurangi variasi proses manual.
2. **Karakterisasi lanjut.** Distorsi sebaiknya diukur pada lebih banyak titik atau menggunakan pemindaian tiga dimensi. Analisis struktur mikro dapat dilengkapi dengan pengukuran ukuran butir dan fraksi fasa, serta karakterisasi beresolusi lebih tinggi menggunakan SEM/EBSD. Pemetaan kekerasan yang lebih rapat juga diperlukan untuk menghubungkan variasi lokal kekerasan dengan HAZ dan morfologi *weld metal*.
3. **Pengembangan penelitian.** Penelitian dapat diterapkan pada baja pipa X56, X65, atau X80 dengan prosedur pengelasan yang terverifikasi. Pengujian lanjutan dapat mencakup tegangan sisa, ketangguhan, dan kerentanan terhadap *hydrogen cracking* agar relevansinya terhadap sambungan *pipe-to-connector* di industri dapat dievaluasi.

## DAFTAR PUSTAKA

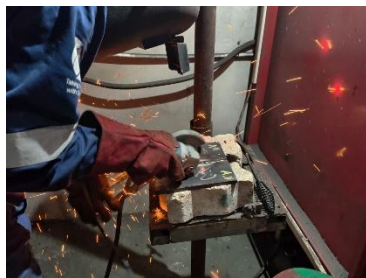
- Adamczyk-Cieślak, B., Koralnik, M., Kuziak, R., Majchrowicz, K., & Mizera, J. (2021). Studies of Bainitic Steel for Rail Applications Based on Carbide-Free, Low-Alloy Steel. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 52(12), 5429–5442. <https://doi.org/10.1007/s11661-021-06480-6>
- Afonso, I. S., Martín, M. R., & Ribeiro, J. E. (2022). Effect of Welding Sequence in Angular Distortion on Butt Joint GMAW Process. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(20). <https://doi.org/10.3390/app122010402>
- Awali, J., Rudiyanto, F., Thesalonicha, S., Lubis, M. P. D., Tanjung, R. A., & Triana, Y. (2021). Analisis Variasi Arus Pengelasan Kombinasi SMAW-FCAW dengan Kampuh Double V-Groove terhadap Kekerasan dan Struktur Mikro Dissimilar Material JIS G3101-SS400 dan ASTM A36. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 12(2), 421–432. <https://doi.org/10.21776/ub.jrm.2021.012.02.19>
- AWS. (2020). *Structural Welding Code - Steel* (24th ed.). American Welding Society.
- Azwinur, Jalil, S. A., & Husna, A. (2017). Pengaruh Variasi Arus Pengelasan Terhadap Sifat Mekanik Pada Proses Pengelasan SMAW. *Jurnal Polimesin*, 15(2), 36–41.
- Bhirawa, W. T. (2015). Proses Pengelasan Menggunakan Electric Welding Machine. *Jurnal Teknik Industri*, 4, 72–83.
- Bontong, Y., Nitha, Abbas, H., Syam, R., Arsyad, H., & Asmal, H. S. (2018). Behaviour of Pack Carburizing with Bone Buffalo Charcoal AND BaCO<sub>3</sub> Againts Mechanical Properties of Low Carbon Steel. *ARPJN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 13(14), 4309–4316. [www.arpnjournals.com](http://www.arpnjournals.com)
- Cuana, R., Syahputra Purba, A., Putra, G. A., Muvariz, F., Amalia, M., & Purba, A. S. (2025). Effect of Welding on Distortion Changes in Fillet Joints with Different Sequences. *MECOMARE*, 14(2), 42–48. [www.trigin.pelnus.ac.id](http://www.trigin.pelnus.ac.id)
- Darmawan, D., & Suharyono, D. (2026). Supply Chain Management for Pressure Vessel Fabrication Based on Design Pressure and Capacity Specifications.

- Dalam *Flywheel: Jurnal Teknik Mesin Untirta* (Vol. 12).  
<http://jurnal.untirta.ac.id/index.php/jwl>
- Dr. Rahman, M., & Boruah, T. (2025). Optimizing Shielded Metal Arc Welding (SMAW) Parameters with a Comparative Simulation Approach. *International Journal of Novel Research and Development*, 10, 2456–4184. [www.ijnrd.org](http://www.ijnrd.org)
- Granell, I., Ramos, A., & Carnicero, A. (2021). A Geometry-Based Welding Distortion Prediction Tool. *Materials*, 14(17).  
<https://doi.org/10.3390/ma14174789>
- Hamid, A. (2016). Analisa Pengaruh Arus Pengelasan SMAW Pada Material Baja Karbon Rendah Terhadap Kekuatan Material Hasil Sambungan. *Jurnal Teknologi Elektro*, 7, 23–36.
- Jilabi, A. S. J. (2024). Control of Angular Distortion in Gas Tungsten Arc Aluminum Welds Using the Back-Step Welding Procedure. *Annales de Chimie: Science des Materiaux*, 48(6), 823–829.  
<https://doi.org/10.18280/acsm.480608>
- Kazi, J., Zaid, S., Talha, S. Mohd., Yasir, M., & Akib, D. (2015). A Review on Various Welding Techniques. *Journal of Modern Engineering Research*, 5(2), 22–28. [www.ijmer.com](http://www.ijmer.com)
- Liang, W., & Deng, D. (2018). Influences of Heat Input, Welding Sequence and External Restraint on Twisting Distortion in an Asymmetrical Curved Stiffened Panel. *Advances in Engineering Software*, 115, 439–451.  
<https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2017.11.002>
- Ling, K. H., Fuh, Y. K., Kuo, T. C., & Xun-Tu, S. (2015). Effect of Welding Sequence of a Multi-Pass Temper Bead in Gas-Shielded Flux-Cored Arc Welding Process: Hardness, Microstructure, and Impact Toughness Analysis. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81(5–8), 1033–1046. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7277-x>
- Ninien, S., & Ponimin. (2011). Analisa Pengaruh Penggunaan Variasi Besaran Arus Pada Las TIG Terhadap Perubahan Struktur Mikro. *MeTriK Polban*, 5, 18–23.
- Nitha. (2019). Pengaruh Arus Pengelasan Terhadap Kekerasan, Kekuatan Tarik,

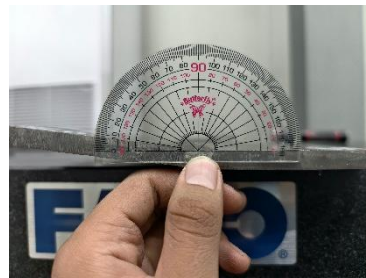
- dan Struktur Mikro Hasil Las SMAW. *Mechanical Engineering Science (MES) Journal*, 1, 19–29.
- Purnama, D., Rizkia, V., & Nanda Garjati, V. (2023). Analysis of The Effect of Welding Sequence and Speed on The Distortion of ASTM A36 Joints by MIG Method. *Jurnal Polimesin*, 21(5), 2023–2031. <http://ejurnal.pnl.ac.id/polimesin>
- Sadeghi Tabar, R., Lindkvist, L., Wärmefjord, K., Franciosa, P., Ceglarek, D., & Söderberg, R. (2024). Enhancing Welding Geometric Precision: Analyzing the Impact of Weld Path Directions, Sequences and Locating Schemes on Displacement. *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(23). <https://doi.org/10.3390/app142311144>
- Senthilkumar, S., Manivannan, S., Venkatesh, R., & Karthikeyan, M. (2023). Influence of Heat Input on The Mechanical Characteristics, Corrosion and Microstructure of ASTM A36 Steel Welded by GTAW Technique. *Heliyon*, 9(9). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19708>
- Suheri, S., Widodo, S. B., Arif, Z., Surawan, S., Ali, S., Pamungkas, N., & Syafii, M. (2024). Effect of Welding Sequence on Distortion Results in Bracket Connections. *ROTOR*, 17(1).
- Sumiyanto, & Abdunnaser. (2015). Pengaruh Media Pendingin Terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Plat Baja Karbon ASTM A-36. *BINA TEKNIKA*, 11, 155–170.
- 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.
- Wu, C., Yan, C., Zhang, S., Zhou, L., Shen, M., & Tian, Z. (2024). Research on Hydrogen-Induced Induced Cracking Sensitivity of X80 Pipeline Steel under Different Heat Treatments. *Materials*, 17(9). <https://doi.org/10.3390/ma17091953>
- Yan, Z., Wang, C., Duan, H., Hao, J., & Yuan, G. (2024). Microstructure Refinement via Nucleation of Intragranular Acicular Ferrite Stimulated by Ti-Containing Core–Shell Structured Particles in Low-Carbon Steel. *Materials*, 17(18). <https://doi.org/10.3390/ma17184644>

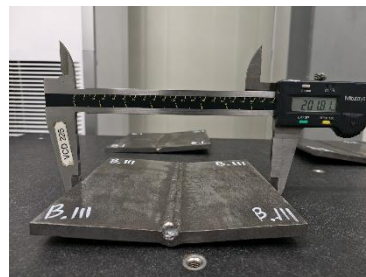
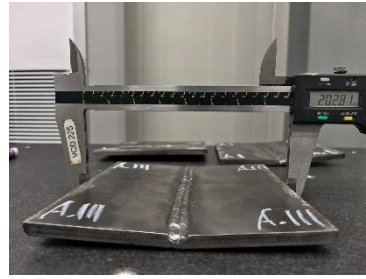
## LAMPIRAN

### Lampiran 1. Dokumentasi Proses Fabrikasi



## Lampiran 2. Dokumentasi Pengukuran Distorsi Sudut dan Penyusutan Melintang





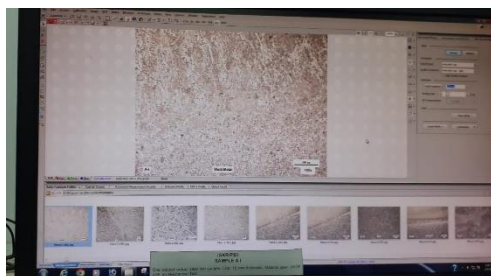
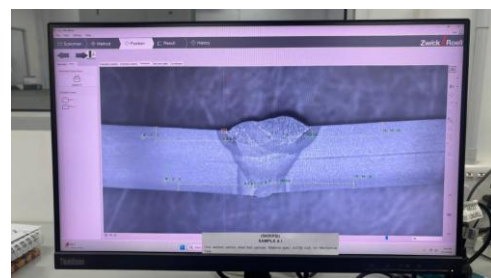
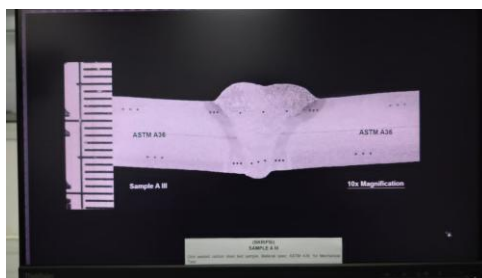
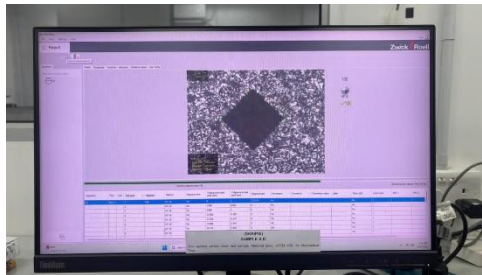
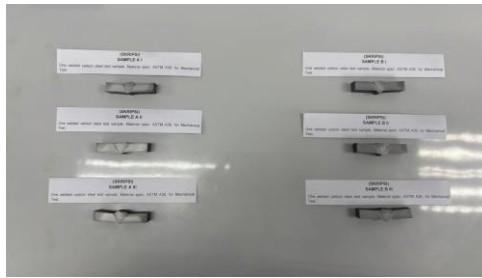
Lampiran 3. Data Kekerasan *Vickers* Sampel A dan Sampel B

| No. | Daerah                 | A-I<br>L1 | A-I<br>L2 | A-II<br>L1 | A-II<br>L2 | A-III<br>L1 | A-III<br>L2 |
|-----|------------------------|-----------|-----------|------------|------------|-------------|-------------|
| 1   | Base<br>Metal<br>kiri  | 130       | 137       | 135        | 133        | 135         | 139         |
| 2   |                        | 135       | 137       | 136        | 138        | 135         | 138         |
| 3   |                        | 133       | 135       | 137        | 138        | 132         | 143         |
| 4   | HAZ<br>kiri            | 145       | 142       | 142        | 142        | 147         | 142         |
| 5   |                        | 156       | 142       | 146        | 148        | 151         | 141         |
| 6   |                        | 166       | 142       | 157        | 145        | 151         | 142         |
| 7   | Weld<br>Metal          | 188       | 165       | 180        | 176        | 191         | 168         |
| 8   |                        | 186       | 171       | 172        | 175        | 181         | 171         |
| 9   |                        | 195       | 171       | 182        | 174        | 182         | 175         |
| 10  | HAZ<br>kanan           | 168       | 151       | 147        | 141        | 152         | 152         |
| 11  |                        | 163       | 147       | 140        | 141        | 151         | 144         |
| 12  |                        | 152       | 143       | 146        | 145        | 149         | 142         |
| 13  | Base<br>Metal<br>kanan | 134       | 138       | 131        | 135        | 136         | 138         |
| 14  |                        | 135       | 141       | 131        | 133        | 132         | 139         |
| 15  |                        | 137       | 141       | 134        | 136        | 137         | 145         |

| No. | Daerah                | B-I<br>L1 | B-I<br>L2 | B-II<br>L1 | B-II<br>L2 | B-III<br>L1 | B-III<br>L2 |
|-----|-----------------------|-----------|-----------|------------|------------|-------------|-------------|
| 1   | Base<br>Metal<br>kiri | 144       | 149       | 154        | 156        | 150         | 156         |
| 2   |                       | 148       | 159       | 147        | 151        | 150         | 158         |
| 3   |                       | 147       | 154       | 152        | 154        | 149         | 150         |
| 4   | HAZ<br>kiri           | 157       | 144       | 150        | 138        | 154         | 143         |
| 5   |                       | 159       | 142       | 155        | 138        | 160         | 150         |
| 6   |                       | 167       | 141       | 163        | 152        | 166         | 151         |
| 7   | Weld<br>Metal         | 170       | 162       | 203        | 172        | 198         | 174         |
| 8   |                       | 178       | 167       | 194        | 170        | 189         | 175         |
| 9   |                       | 186       | 170       | 185        | 169        | 208         | 174         |
| 10  | HAZ<br>kanan          | 158       | 145       | 158        | 146        | 161         | 154         |
| 11  |                       | 154       | 143       | 160        | 146        | 160         | 153         |
| 12  |                       | 152       | 146       | 160        | 139        | 154         | 144         |

| No. | Daerah                 | B-I<br>L1 | B-I<br>L2 | B-II<br>L1 | B-II<br>L2 | B-III<br>L1 | B-III<br>L2 |
|-----|------------------------|-----------|-----------|------------|------------|-------------|-------------|
| 13  | Base<br>Metal<br>kanan | 154       | 156       | 148        | 155        | 148         | 155         |
| 14  |                        | 149       | 157       | 153        | 152        | 148         | 154         |
| 15  |                        | 150       | 156       | 150        | 154        | 146         | 155         |

#### Lampiran 4. Dokumentasi Pengujian di PT. Hi-Test Lab Batam



## Lampiran 5. Laporan Hasil Pengujian di PT. Hi-Test Lab Batam

**Job No** : -  
**No.** : HT/BTM/0626/  
**Page (s)** : 1 of 16  
**Date Received** : 02 June 2026  
**Date Tested** : 02 June 2026  
**Sample Marking** : Sample A

**Type of Test** : Vickers Hardness Number (HV) Load Test, 10 kgf



Customer : Skripsi  
Reference Code : -  
Test Method : ASTM E92-23  
Object to be tested : (as received)

Job No : -  
No. : HT/BTM/0626/  
Page (s) : 2 of 16  
Date Received : 02 June 2026  
Date Tested : 02 June 2026  
Sample Marking : Sample A

One welded carbon steel test sample, Size: 10 mm thickness, Material spec: ASTM A36, for Hardness Test.

Type of Test : Vickers Hardness Number (HV) Load Test, 10 kgf (HV-10)  
Location : A-I

| Sample Identification | Material Specification | Test Location | Vickers Hardness Number (HV)<br>Test Load Applied, 10 Kgf |        |        |        |
|-----------------------|------------------------|---------------|-----------------------------------------------------------|--------|--------|--------|
|                       |                        |               | Line 1                                                    |        | Line 2 |        |
|                       |                        |               | No                                                        | Result | No     | Result |
| Sample A-I            | ASTM A36               | Base Metal    | 1                                                         | 130    | 1      | 137    |
|                       |                        |               | 2                                                         | 135    | 2      | 137    |
|                       |                        |               | 3                                                         | 133    | 3      | 135    |
|                       |                        | HAZ           | 4                                                         | 145    | 4      | 142    |
|                       |                        |               | 5                                                         | 156    | 5      | 142    |
|                       |                        |               | 6                                                         | 166    | 6      | 142    |
|                       | Weld Metal             |               | 7                                                         | 188    | 7      | 165    |
|                       |                        |               | 8                                                         | 186    | 8      | 171    |
|                       |                        |               | 9                                                         | 195    | 9      | 171    |
|                       | ASTM A36               | HAZ           | 10                                                        | 168    | 10     | 151    |
|                       |                        |               | 11                                                        | 163    | 11     | 147    |
|                       |                        |               | 12                                                        | 152    | 12     | 143    |
|                       |                        | Base Metal    | 13                                                        | 134    | 13     | 138    |
|                       |                        |               | 14                                                        | 135    | 14     | 141    |
|                       |                        |               | 15                                                        | 137    | 15     | 141    |

Testing Machine Used : The Zwick Roell Hardness Testing Machine, Model DuraScan 70 G5, S/N: DS251917  
Remark : Has been verified using Euro Products Limited Standardized Blocks  
(Identity No: EP18202924, EP18203976 and EP18204217)  
Test Conducted by : M. Faiz Dwisusilo, S.T  
Witness By :

Customer : Skripsi  
Reference Code : -  
Test Method : ASTM E92-23  
Object to be tested : (as received)

Job No : -  
No. : HT/BTM/0626/  
Page (s) : 3 of 16  
Date Received : 02 June 2026  
Date Tested : 02 June 2026  
Sample Marking : Sample A

One welded carbon steel test sample, Size: 10 mm thickness, Material spec: ASTM A36, for Hardness Test.

Type of Test : Vickers Hardness Number (HV) Load Test, 10 kgf (HV-10)  
Location : A-II

| Sample Identification | Material Specification | Test Location | Vickers Hardness Number (HV)<br>Test Load Applied, 10 Kgf |        |        |        |
|-----------------------|------------------------|---------------|-----------------------------------------------------------|--------|--------|--------|
|                       |                        |               | Line 1                                                    |        | Line 2 |        |
|                       |                        |               | No                                                        | Result | No     | Result |
| Sample A-II           | ASTM A36               | Base Metal    | 1                                                         | 135    | 1      | 133    |
|                       |                        |               | 2                                                         | 136    | 2      | 138    |
|                       |                        |               | 3                                                         | 137    | 3      | 138    |
|                       |                        | HAZ           | 4                                                         | 142    | 4      | 142    |
|                       |                        |               | 5                                                         | 146    | 5      | 148    |
|                       |                        |               | 6                                                         | 157    | 6      | 145    |
|                       | Weld Metal             |               | 7                                                         | 180    | 7      | 176    |
|                       |                        |               | 8                                                         | 172    | 8      | 175    |
|                       |                        |               | 9                                                         | 182    | 9      | 174    |
|                       | ASTM A36               | HAZ           | 10                                                        | 147    | 10     | 141    |
|                       |                        |               | 11                                                        | 140    | 11     | 141    |
|                       |                        |               | 12                                                        | 146    | 12     | 145    |
|                       |                        | Base Metal    | 13                                                        | 131    | 13     | 135    |
|                       |                        |               | 14                                                        | 131    | 14     | 133    |
|                       |                        |               | 15                                                        | 134    | 15     | 136    |

Testing Machine Used : The Zwick Roell Hardness Testing Machine, Model DuraScan 70 G5, S/N: DS251917  
Remark : Has been verified using Euro Products Limited Standardized Blocks  
(Identity No: EP18202924, EP18203976 and EP18204217)  
Test Conducted by : M. Faiz Dwisusilo, S.T  
Witness By :

Customer : Skripsi  
 Reference Code : -  
 Test Method : ASTM E92-23  
 Object to be tested : (as received)

Job No : -  
 No. : HT/BTM/0626/  
 Page (s) : 4 of 16  
 Date Received : 02 June 2026  
 Date Tested : 02 June 2026  
 Sample Marking : Sample A

One welded carbon steel test sample, Size: 10 mm thickness, Material spec: ASTM A36, for Hardness Test.

Type of Test : Vickers Hardness Number (HV) Load Test, 10 kgf (HV-10)  
 Location : A-III

| Sample Identification | Material Specification | Test Location | Vickers Hardness Number (HV)<br>Test Load Applied, 10 Kgf |        |        |        |
|-----------------------|------------------------|---------------|-----------------------------------------------------------|--------|--------|--------|
|                       |                        |               | Line 1                                                    |        | Line 2 |        |
|                       |                        |               | No                                                        | Result | No     | Result |
| Sample A-III          | ASTM A36               | Base Metal    | 1                                                         | 135    | 1      | 139    |
|                       |                        |               | 2                                                         | 135    | 2      | 138    |
|                       |                        |               | 3                                                         | 132    | 3      | 143    |
|                       |                        | HAZ           | 4                                                         | 147    | 4      | 142    |
|                       |                        |               | 5                                                         | 151    | 5      | 141    |
|                       |                        |               | 6                                                         | 151    | 6      | 142    |
|                       | Weld Metal             |               | 7                                                         | 191    | 7      | 168    |
|                       |                        |               | 8                                                         | 181    | 8      | 171    |
|                       |                        |               | 9                                                         | 182    | 9      | 175    |
|                       | ASTM A36               | HAZ           | 10                                                        | 152    | 10     | 152    |
|                       |                        |               | 11                                                        | 151    | 11     | 144    |
|                       |                        |               | 12                                                        | 149    | 12     | 142    |
|                       |                        | Base Metal    | 13                                                        | 136    | 13     | 138    |
|                       |                        |               | 14                                                        | 132    | 14     | 139    |
|                       |                        |               | 15                                                        | 137    | 15     | 145    |

Testing Machine Used : The Zwick Roell Hardness Testing Machine, Model DuraScan 70 G5, S/N: DS251917  
 Remark : Has been verified using Euro Products Limited Standardized Blocks  
 (Identity No: EP18202924, EP18203976 and EP18204217)  
 Test Conducted by : M. Faiz Dwisusilo, S.T  
 Witness By :

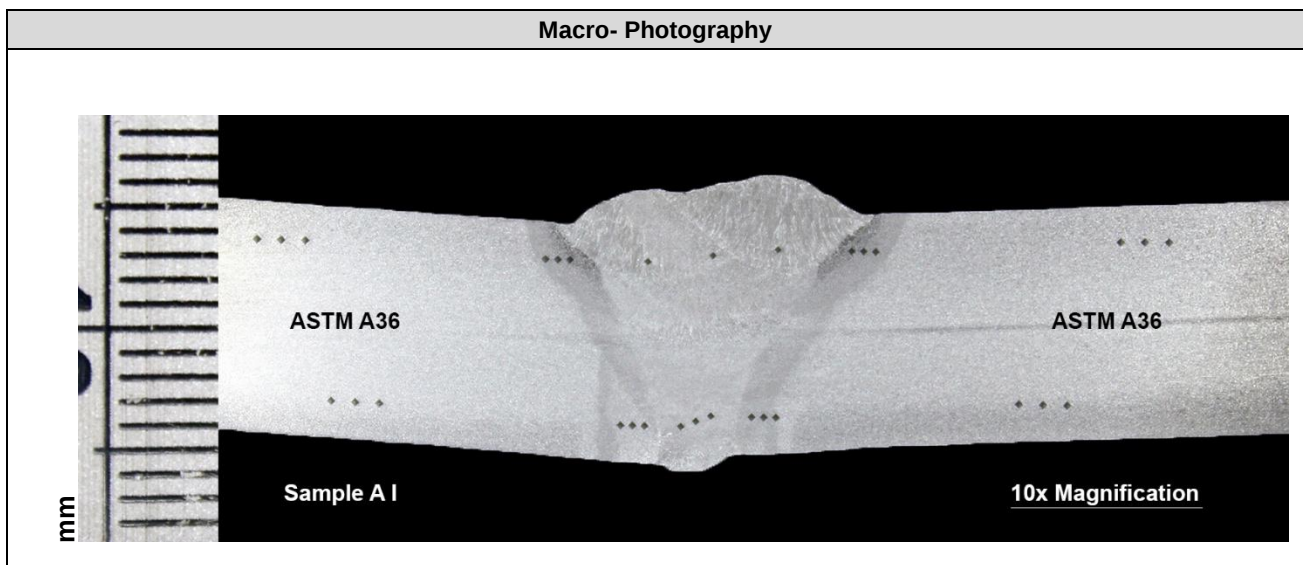
Customer : Skripsi  
Reference Code : -  
Test Method : ASTM E340-23  
Object to be tested : (as received)

Job No : -  
No. : HT/BTM/0626/  
Page (s) : 5 of 16  
Date Received : 02 June 2026  
Date Tested : 02 June 2026  
Sample Marking : Sample A

One welded carbon steel test sample, Size: 10 mm thickness, Material spec: ASTM A36, for Macro Examination Test.

Type of Test : Macro 10X Examination and Photo  
Location : A-I

| Specimen No | Thickness (mm) | Width (mm) | Result   |
|-------------|----------------|------------|----------|
| Sample A-I  | 10             | 10         | Accepted |



Acceptance criteria : Complete Fusion  
Test Conducted by : Rahmad Musliadi, Amd  
Witness By :

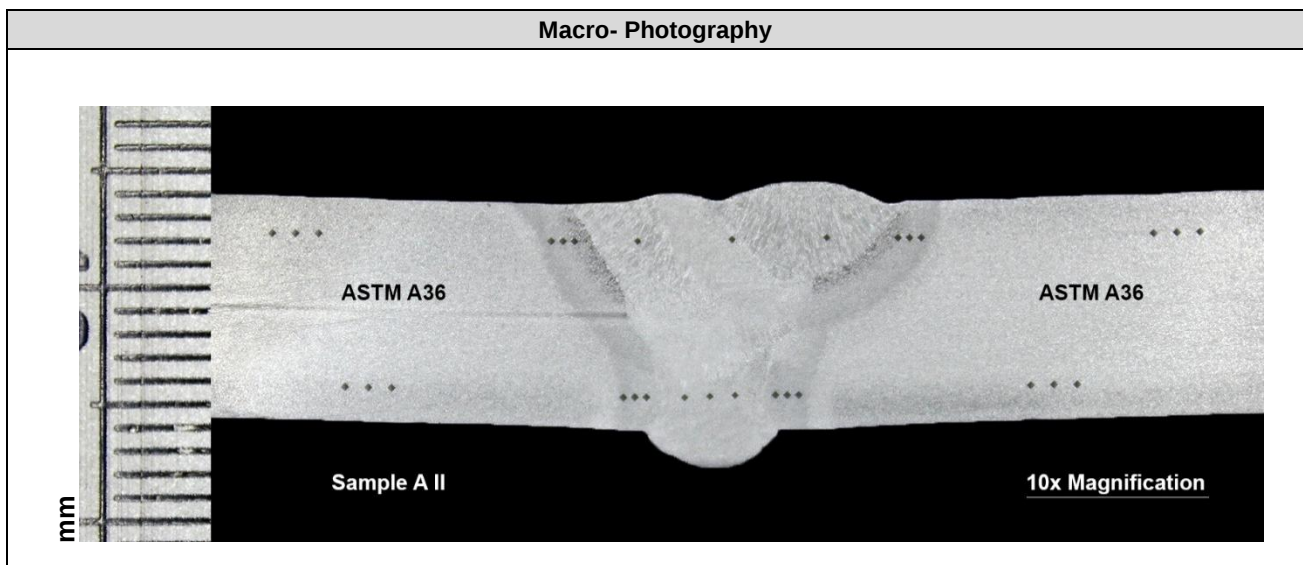
Customer : Skripsi  
Reference Code : -  
Test Method : ASTM E340-23  
Object to be tested : (as received)

Job No : -  
No. : HT/BTM/0626/  
Page (s) : 6 of 16  
Date Received : 02 June 2026  
Date Tested : 02 June 2026  
Sample Marking : Sample A

One welded carbon steel test sample, Size: 10 mm thickness, Material spec: ASTM A36, for Macro Examination Test.

Type of Test : Macro 10X Examination and Photo  
Location : A-II

| Specimen No | Thickness (mm) | Width (mm) | Result   |
|-------------|----------------|------------|----------|
| Sample A-II | 10             | 10         | Accepted |



Acceptance criteria : Complete Fusion  
Test Conducted by : Rahmad Musliadi, Amd  
Witness By :

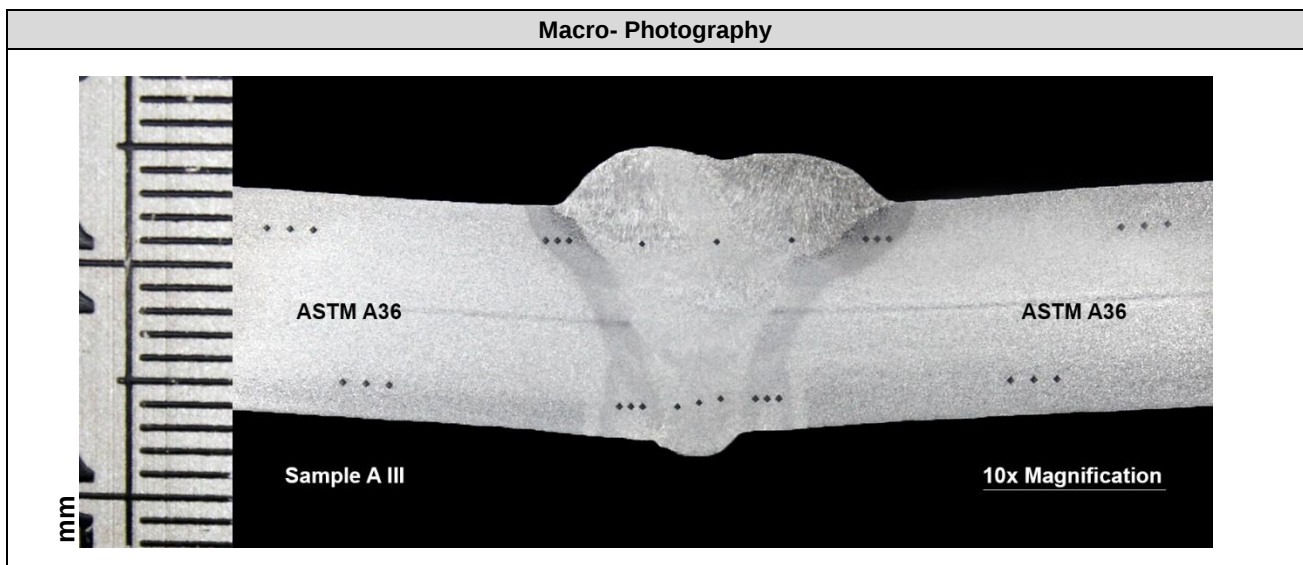
Customer : Skripsi  
Reference Code : -  
Test Method : ASTM E340-23  
Object to be tested : (as received)

Job No : -  
No. : HT/BTM/0626/  
Page (s) : 7 of 16  
Date Received : 02 June 2026  
Date Tested : 02 June 2026  
Sample Marking : Sample A

One welded carbon steel test sample, Size: 10 mm thickness, Material spec: ASTM A36, for Macro Examination Test.

Type of Test : Macro 10X Examination and Photo  
Location : A-III

| Specimen No  | Thickness (mm) | Width (mm) | Result   |
|--------------|----------------|------------|----------|
| Sample A-III | 10             | 10         | Accepted |



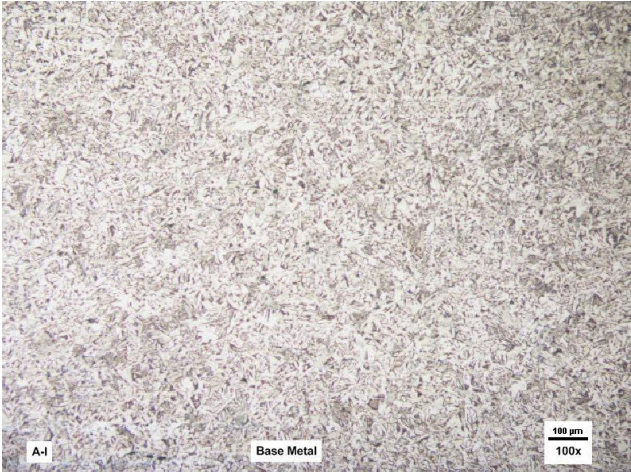
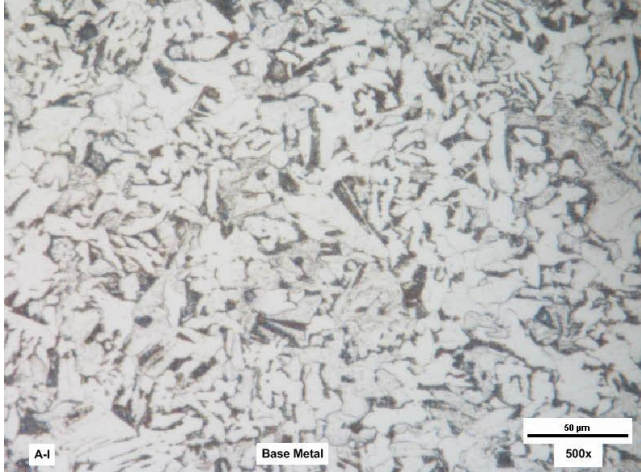
Acceptance criteria : Complete Fusion  
Test Conducted by : Rahmad Musliadi, Amd  
Witness By :

Customer : Skripsi  
Reference Code : -  
Test Method : ASTM E407-2023  
Object to be tested : (as received)

Job No : -  
No. : HT/BTM/0626/  
Page (s) : 8 of 16  
Date Received : 02 June 2026  
Date Tested : 02 June 2026  
Sample Marking : Sample A

One welded carbon steel test sample, Size: 10 mm thickness, Material spec: ASTM A36, for Micro Examination Test.

Type of Test : Micro Examination and Photo  
Location : A-I Base Metal

| Sample Identification                                                              | Result                                                                                                                                                                                                                                        |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sample A-I Base Metal                                                              | <ul style="list-style-type: none"><li>- The micro examination it shown two phases, there are ferrite and austenite phases, which the dark areas is ferrite phase.</li><li>- No intermetallic phases, and precipitates was observed.</li></ul> |
| 100x                                                                               | 500x                                                                                                                                                                                                                                          |
|  |                                                                                                                                                            |

Testing Machine Used : NIKON ECLIPSEMA200 optical microscope  
Remark : **Type etchant solutions is  $\text{HNO}_3$**   
Test Conducted by : Rissa Deshanty, ST  
Witnessed By :

#### Term & Conditions

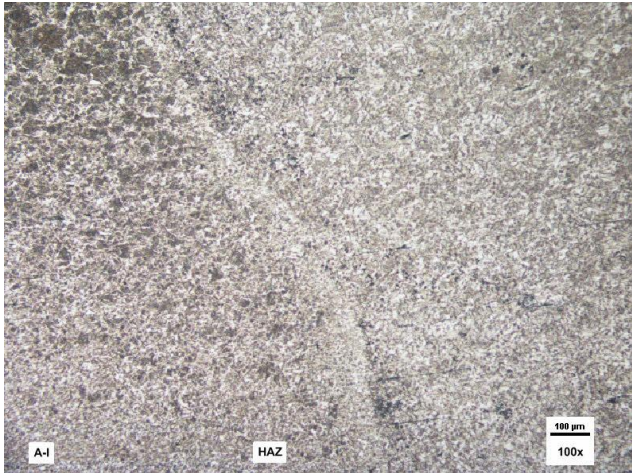
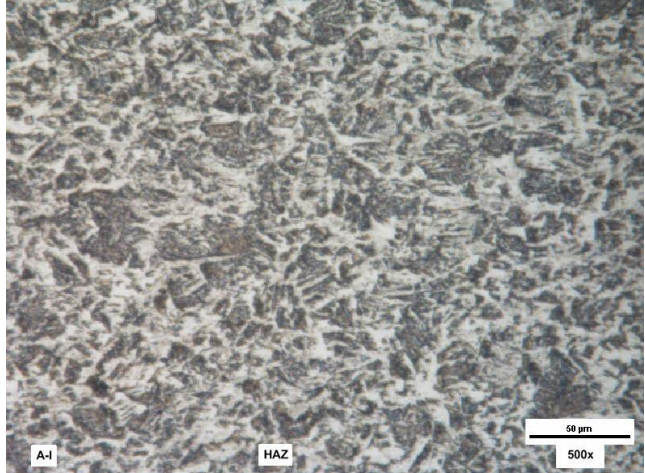
1. The Report is prepared for the sole use of the Client and is prepared based upon the item submitted, the Services required by the Client and the conditions under which the Services are performed by PT. Hi-Test.  
The Report is not intended to be representative of similar or equivalent Services on similar or equivalent Items. The Report does not constitute an endorsement by PT. Hi-Test of the Item.
2. PT. Hi-Test agrees to use reasonable diligence in the performance of the Services but no warranties are given and none may be implied directly or indirectly relating to the Services, the Report or the facilities of PT. Hi-Test.
3. This report shall not be reproduced except in full unless permission for the reproduction of an approved abstract has been obtained in writing from PT. Hi-Test.
4. PT. Hi-Test shall under no circumstances be liable to the Client or its agents, servants or representatives, in contract, tort (including negligence or breach of statutory duty) or otherwise for any direct or indirect loss or damage suffered by the Client, its agents, servants or representatives shows ever arising or whether connected with the Services provided by PT. Hi-Test herein.

Customer : Skripsi  
 Reference Code : -  
 Test Method : ASTM E407-2023  
 Object to be tested : (as received)

Job No : -  
 No. : HT/BTM/0626/  
 Page (s) : 9 of 16  
 Date Received : 02 June 2026  
 Date Tested : 02 June 2026  
 Sample Marking : Sample A

One welded carbon steel test sample, Size: 10 mm thickness, Material spec: ASTM A36, for Micro Examination Test.

Type of Test : Micro Examination and Photo  
 Location : A-I HAZ

| Sample Identification                                                              | Result                                                                                                                                                                                                                                           |
|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sample A-I HAZ                                                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>- The micro examination it shown two phases, there are ferrite and austenite phases, which the dark areas is ferrite phase.</li> <li>- No intermetallic phases, and precipitates was observed.</li> </ul> |
| 100x                                                                               | 500x                                                                                                                                                                                                                                             |
|  |                                                                                                                                                               |

Testing Machine Used : NIKON ECLIPSEMA200 optical microscope  
 Remark : *Type etchant solutions is HNO<sub>3</sub>*  
 Test Conducted by : Rissa Deshanty, ST  
 Witnessed By :

#### Term & Conditions

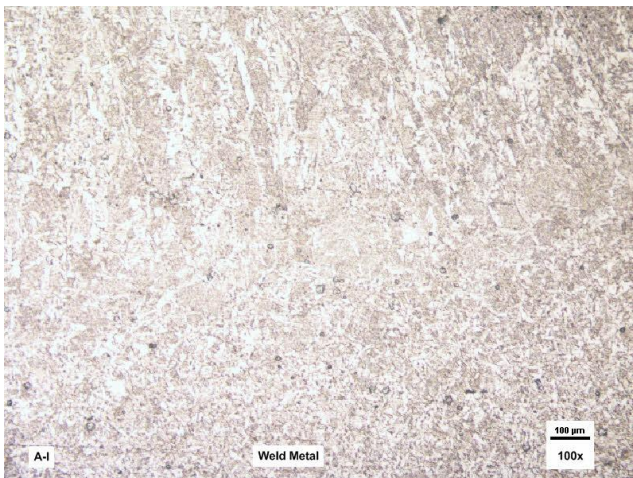
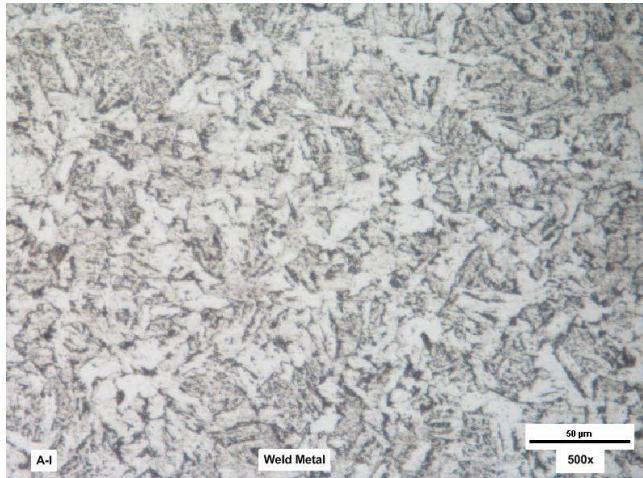
- The Report is prepared for the sole use of the Client and is prepared based upon the item submitted, the Services required by the Client and the conditions under which the Services are performed by PT. Hi-Test.  
The Report is not intended to be representative of similar or equivalent Services on similar or equivalent Items. The Report does not constitute an endorsement by PT. Hi-Test of the Item.
- PT. Hi-Test agrees to use reasonable diligence in the performance of the Services but no warranties are given and none may be implied directly or indirectly relating to the Services, the Report or the facilities of PT. Hi-Test.
- This report shall not be reproduced except in full unless permission for the reproduction of an approved abstract has been obtained in writing from PT. Hi-Test.
- PT. Hi-Test shall under no circumstances be liable to the Client or its agents, servants or representatives, in contract, tort (including negligence or breach of statutory duty) or otherwise for any direct or indirect loss or damage suffered by the Client, its agents, servants or representatives shows ever arising or whether connected with the Services provided by PT. Hi-Test herein.

Customer : Skripsi  
Reference Code : -  
Test Method : ASTM E407-2023  
Object to be tested : (as received)

Job No : -  
No. : HT/BTM/0626/  
Page (s) : 10 of 16  
Date Received : 02 June 2026  
Date Tested : 02 June 2026  
Sample Marking : Sample A

One welded carbon steel test sample, Size: 10 mm thickness, Material spec: ASTM A36, for Micro Examination Test.

Type of Test : Micro Examination and Photo  
Location : A-I Weld Metal

| Sample Identification                                                               | Result                                                                                                                                                                                                                                        |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sample A-I Weld Metal                                                               | <ul style="list-style-type: none"><li>- The micro examination it shown two phases, there are ferrite and austenite phases, which the dark areas is ferrite phase.</li><li>- No intermetallic phases, and precipitates was observed.</li></ul> |
| 100x                                                                                | 500x                                                                                                                                                                                                                                          |
|  |                                                                                                                                                           |

Testing Machine Used : NIKON ECLIPSEMA200 optical microscope  
Remark : *Type etchant solutions is HNO<sub>3</sub>*  
Test Conducted by : Rissa Deshanty, ST  
Witnessed By :

#### Term & Conditions

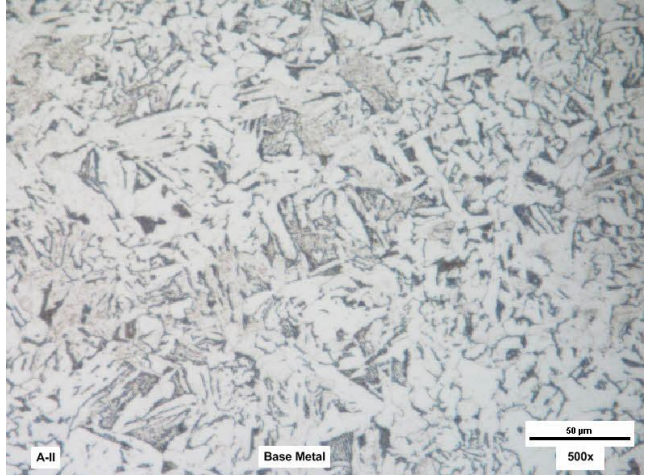
- The Report is prepared for the sole use of the Client and is prepared based upon the item submitted, the Services required by the Client and the conditions under which the Services are performed by PT. Hi-Test.  
The Report is not intended to be representative of similar or equivalent Services on similar or equivalent Items. The Report does not constitute an endorsement by PT. Hi-Test of the Item.
- PT. Hi-Test agrees to use reasonable diligence in the performance of the Services but no warranties are given and none may be implied directly or indirectly relating to the Services, the Report or the facilities of PT. Hi-Test.
- This report shall not be reproduced except in full unless permission for the reproduction of an approved abstract has been obtained in writing from PT. Hi-Test.
- PT. Hi-Test shall under no circumstances be liable to the Client or its agents, servants or representatives, in contract, tort (including negligence or breach of statutory duty) or otherwise for any direct or indirect loss or damage suffered by the Client, its agents, servants or representatives shows ever arising or whether connected with the Services provided by PT. Hi-Test herein.

Customer : Skripsi  
Reference Code : -  
Test Method : ASTM E407-2023  
Object to be tested : (as received)

Job No : -  
No. : HT/BTM/0626/  
Page (s) : 11 of 16  
Date Received : 02 June 2026  
Date Tested : 02 June 2026  
Sample Marking : Sample A

One welded carbon steel test sample, Size: 10 mm thickness, Material spec: ASTM A36, for Micro Examination Test.

Type of Test : Micro Examination and Photo  
Location : A-II Base Metal

| Sample Identification                                                              | Result                                                                                                                                                                                                                                        |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sample A-II Base Metal                                                             | <ul style="list-style-type: none"><li>- The micro examination it shown two phases, there are ferrite and austenite phases, which the dark areas is ferrite phase.</li><li>- No intermetallic phases, and precipitates was observed.</li></ul> |
| 100x                                                                               | 500x                                                                                                                                                                                                                                          |
|  |                                                                                                                                                            |

Testing Machine Used : NIKON ECLIPSEMA200 optical microscope  
Remark : **Type etchant solutions is  $\text{HNO}_3$**   
Test Conducted by : Rissa Deshanty, ST  
Witnessed By :

#### Term & Conditions

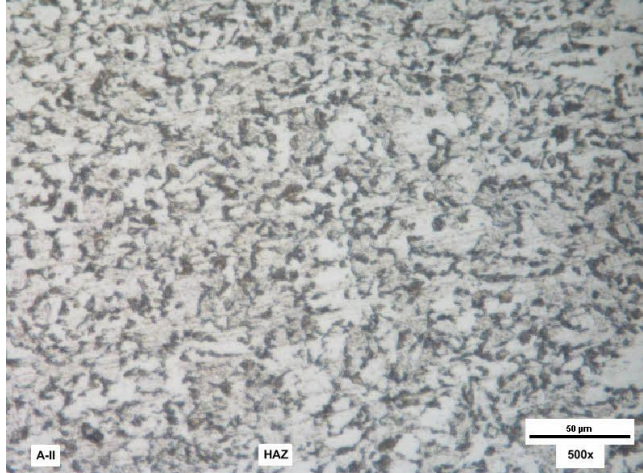
1. The Report is prepared for the sole use of the Client and is prepared based upon the item submitted, the Services required by the Client and the conditions under which the Services are performed by PT. Hi-Test.  
The Report is not intended to be representative of similar or equivalent Services on similar or equivalent Items. The Report does not constitute an endorsement by PT. Hi-Test of the Item.
2. PT. Hi-Test agrees to use reasonable diligence in the performance of the Services but no warranties are given and none may be implied directly or indirectly relating to the Services, the Report or the facilities of PT. Hi-Test.
3. This report shall not be reproduced except in full unless permission for the reproduction of an approved abstract has been obtained in writing from PT. Hi-Test.
4. PT. Hi-Test shall under no circumstances be liable to the Client or its agents, servants or representatives, in contract, tort (including negligence or breach of statutory duty) or otherwise for any direct or indirect loss or damage suffered by the Client, its agents, servants or representatives shows ever arising or whether connected with the Services provided by PT. Hi-Test herein.

Customer : Skripsi  
Reference Code : -  
Test Method : ASTM E407-2023  
Object to be tested : (as received)

Job No : -  
No. : HT/BTM/0626/  
Page (s) : 12 of 16  
Date Received : 02 June 2026  
Date Tested : 02 June 2026  
Sample Marking : Sample A

One welded carbon steel test sample, Size: 10 mm thickness, Material spec: ASTM A36, for Micro Examination Test.

Type of Test : Micro Examination and Photo  
Location : A-II HAZ

| Sample Identification                                                              | Result                                                                                                                                                                                                                                        |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sample A-II HAZ                                                                    | <ul style="list-style-type: none"><li>- The micro examination it shown two phases, there are ferrite and austenite phases, which the dark areas is ferrite phase.</li><li>- No intermetallic phases, and precipitates was observed.</li></ul> |
| 100x                                                                               | 500x                                                                                                                                                                                                                                          |
|  |                                                                                                                                                            |

Testing Machine Used : NIKON ECLIPSEMA200 optical microscope  
Remark : *Type etchant solutions is HNO<sub>3</sub>*  
Test Conducted by : Rissa Deshanty, ST  
Witnessed By :

#### Term & Conditions

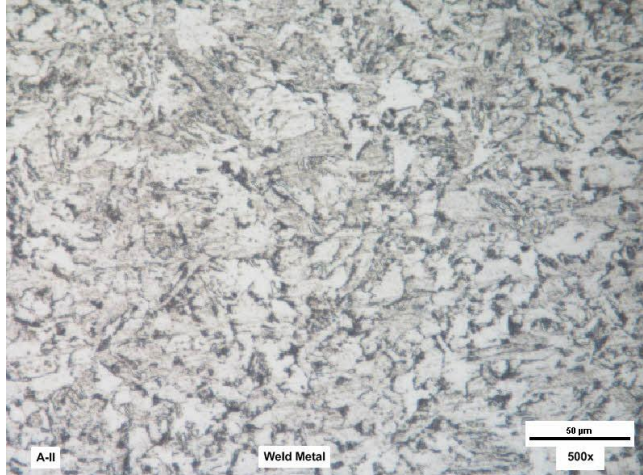
1. The Report is prepared for the sole use of the Client and is prepared based upon the item submitted, the Services required by the Client and the conditions under which the Services are performed by PT. Hi-Test.  
The Report is not intended to be representative of similar or equivalent Services on similar or equivalent Items. The Report does not constitute an endorsement by PT. Hi-Test of the Item.
2. PT. Hi-Test agrees to use reasonable diligence in the performance of the Services but no warranties are given and none may be implied directly or indirectly relating to the Services, the Report or the facilities of PT. Hi-Test.
3. This report shall not be reproduced except in full unless permission for the reproduction of an approved abstract has been obtained in writing from PT. Hi-Test.
4. PT. Hi-Test shall under no circumstances be liable to the Client or its agents, servants or representatives, in contract, tort (including negligence or breach of statutory duty) or otherwise for any direct or indirect loss or damage suffered by the Client, its agents, servants or representatives shows ever arising or whether connected with the Services provided by PT. Hi-Test herein.

Customer : Skripsi  
Reference Code : -  
Test Method : ASTM E407-2023  
Object to be tested : (as received)

Job No : -  
No. : HT/BTM/0626/  
Page (s) : 13 of 16  
Date Received : 02 June 2026  
Date Tested : 02 June 2026  
Sample Marking : Sample A

One welded carbon steel test sample, Size: 10 mm thickness, Material spec: ASTM A36, for Micro Examination Test.

Type of Test : Micro Examination and Photo  
Location : A-II Weld Metal

| Sample Identification                                                              | Result                                                                                                                                                                                                                                        |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sample A-II Weld Metal                                                             | <ul style="list-style-type: none"><li>- The micro examination it shown two phases, there are ferrite and austenite phases, which the dark areas is ferrite phase.</li><li>- No intermetallic phases, and precipitates was observed.</li></ul> |
| 100x                                                                               | 500x                                                                                                                                                                                                                                          |
|  |                                                                                                                                                            |

Testing Machine Used : NIKON ECLIPSEMA200 optical microscope  
Remark : **Type etchant solutions is  $\text{HNO}_3$**   
Test Conducted by : Rissa Deshanty, ST  
Witnessed By :

#### Term & Conditions

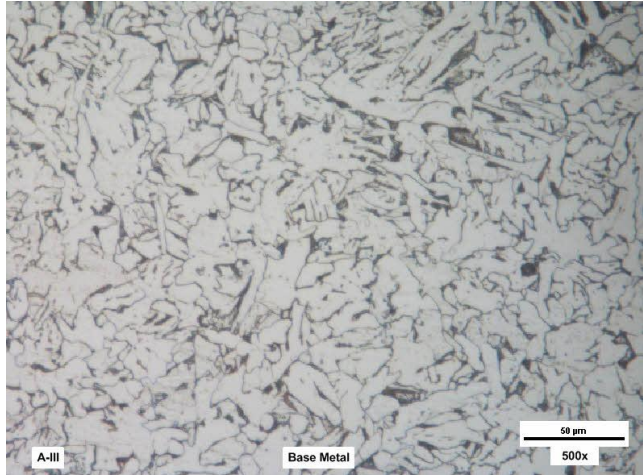
1. The Report is prepared for the sole use of the Client and is prepared based upon the item submitted, the Services required by the Client and the conditions under which the Services are performed by PT. Hi-Test.  
The Report is not intended to be representative of similar or equivalent Services on similar or equivalent Items. The Report does not constitute an endorsement by PT. Hi-Test of the Item.
2. PT. Hi-Test agrees to use reasonable diligence in the performance of the Services but no warranties are given and none may be implied directly or indirectly relating to the Services, the Report or the facilities of PT. Hi-Test.
3. This report shall not be reproduced except in full unless permission for the reproduction of an approved abstract has been obtained in writing from PT. Hi-Test.
4. PT. Hi-Test shall under no circumstances be liable to the Client or its agents, servants or representatives, in contract, tort (including negligence or breach of statutory duty) or otherwise for any direct or indirect loss or damage suffered by the Client, its agents, servants or representatives shows ever arising or whether connected with the Services provided by PT. Hi-Test herein.

Customer : Skripsi  
Reference Code : -  
Test Method : ASTM E407-2023  
Object to be tested : (as received)

Job No : -  
No. : HT/BTM/0626/  
Page (s) : 14 of 16  
Date Received : 02 June 2026  
Date Tested : 02 June 2026  
Sample Marking : Sample A

One welded carbon steel test sample, Size: 10 mm thickness, Material spec: ASTM A36, for Micro Examination Test.

Type of Test : Micro Examination and Photo  
Location : A-III Base Metal

| Sample Identification                                                              | Result                                                                                                                                                                                                                                        |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sample A-III Base Metal                                                            | <ul style="list-style-type: none"><li>- The micro examination it shown two phases, there are ferrite and austenite phases, which the dark areas is ferrite phase.</li><li>- No intermetallic phases, and precipitates was observed.</li></ul> |
| 100x                                                                               | 500x                                                                                                                                                                                                                                          |
|  |                                                                                                                                                            |

Testing Machine Used : NIKON ECLIPSEMA200 optical microscope  
Remark : *Type etchant solutions is HNO<sub>3</sub>*  
Test Conducted by : Rissa Deshanty, ST  
Witnessed By :

#### Term & Conditions

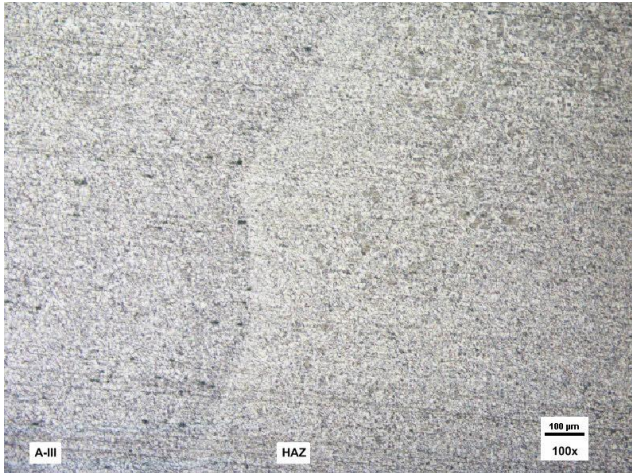
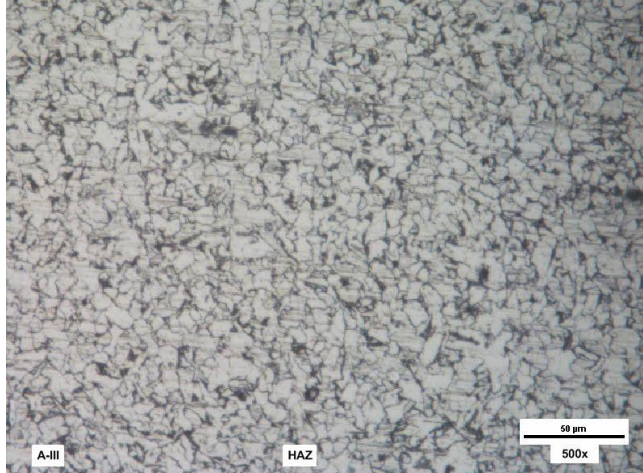
- The Report is prepared for the sole use of the Client and is prepared based upon the item submitted, the Services required by the Client and the conditions under which the Services are performed by PT. Hi-Test.  
The Report is not intended to be representative of similar or equivalent Services on similar or equivalent Items. The Report does not constitute an endorsement by PT. Hi-Test of the Item.
- PT. Hi-Test agrees to use reasonable diligence in the performance of the Services but no warranties are given and none may be implied directly or indirectly relating to the Services, the Report or the facilities of PT. Hi-Test.
- This report shall not be reproduced except in full unless permission for the reproduction of an approved abstract has been obtained in writing from PT. Hi-Test.
- PT. Hi-Test shall under no circumstances be liable to the Client or its agents, servants or representatives, in contract, tort (including negligence or breach of statutory duty) or otherwise for any direct or indirect loss or damage suffered by the Client, its agents, servants or representatives shows ever arising or whether connected with the Services provided by PT. Hi-Test herein.

Customer : Skripsi  
Reference Code : -  
Test Method : ASTM E407-2023  
Object to be tested : (as received)

Job No : -  
No. : HT/BTM/0626/  
Page (s) : 15 of 16  
Date Received : 02 June 2026  
Date Tested : 02 June 2026  
Sample Marking : Sample A

One welded carbon steel test sample, Size: 10 mm thickness, Material spec: ASTM A36, for Micro Examination Test.

Type of Test : Micro Examination and Photo  
Location : A-III HAZ

| Sample Identification                                                              | Result                                                                                                                                                                                                                                        |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sample A-III HAZ                                                                   | <ul style="list-style-type: none"><li>- The micro examination it shown two phases, there are ferrite and austenite phases, which the dark areas is ferrite phase.</li><li>- No intermetallic phases, and precipitates was observed.</li></ul> |
| 100x                                                                               | 500x                                                                                                                                                                                                                                          |
|  |                                                                                                                                                            |

Testing Machine Used : NIKON ECLIPSEMA200 optical microscope  
Remark : *Type etchant solutions is HNO<sub>3</sub>*  
Test Conducted by : Rissa Deshanty, ST  
Witnessed By :

#### Term & Conditions

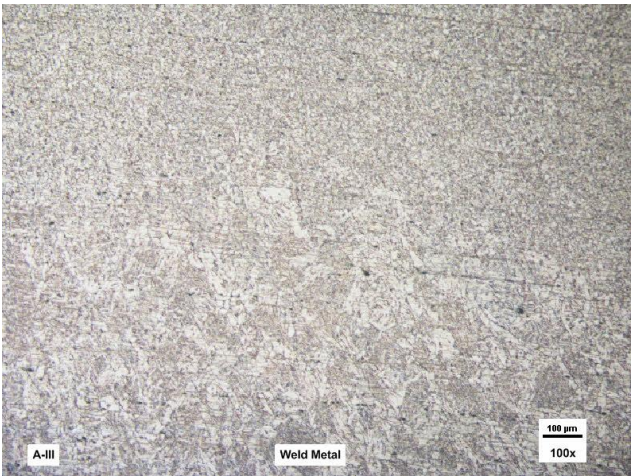
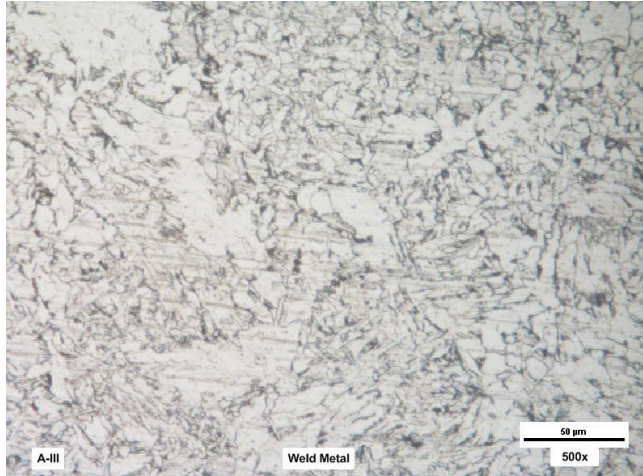
- The Report is prepared for the sole use of the Client and is prepared based upon the item submitted, the Services required by the Client and the conditions under which the Services are performed by PT. Hi-Test.  
The Report is not intended to be representative of similar or equivalent Services on similar or equivalent Items. The Report does not constitute an endorsement by PT. Hi-Test of the Item.
- PT. Hi-Test agrees to use reasonable diligence in the performance of the Services but no warranties are given and none may be implied directly or indirectly relating to the Services, the Report or the facilities of PT. Hi-Test.
- This report shall not be reproduced except in full unless permission for the reproduction of an approved abstract has been obtained in writing from PT. Hi-Test.
- PT. Hi-Test shall under no circumstances be liable to the Client or its agents, servants or representatives, in contract, tort (including negligence or breach of statutory duty) or otherwise for any direct or indirect loss or damage suffered by the Client, its agents, servants or representatives shows ever arising or whether connected with the Services provided by PT. Hi-Test herein.

Customer : Skripsi  
Reference Code : -  
Test Method : ASTM E407-2023  
Object to be tested : (as received)

Job No : -  
No. : HT/BTM/0626/  
Page (s) : 16 of 16  
Date Received : 02 June 2026  
Date Tested : 02 June 2026  
Sample Marking : Sample A

One welded carbon steel test sample, Size: 10 mm thickness, Material spec: ASTM A36, for Micro Examination Test.

Type of Test : Micro Examination and Photo  
Location : A-III Weld Metal

| Sample Identification                                                               | Result                                                                                                                                                                                                                                        |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sample A-III Weld Metal                                                             | <ul style="list-style-type: none"><li>- The micro examination it shown two phases, there are ferrite and austenite phases, which the dark areas is ferrite phase.</li><li>- No intermetallic phases, and precipitates was observed.</li></ul> |
| 100x                                                                                | 500x                                                                                                                                                                                                                                          |
|  |                                                                                                                                                           |

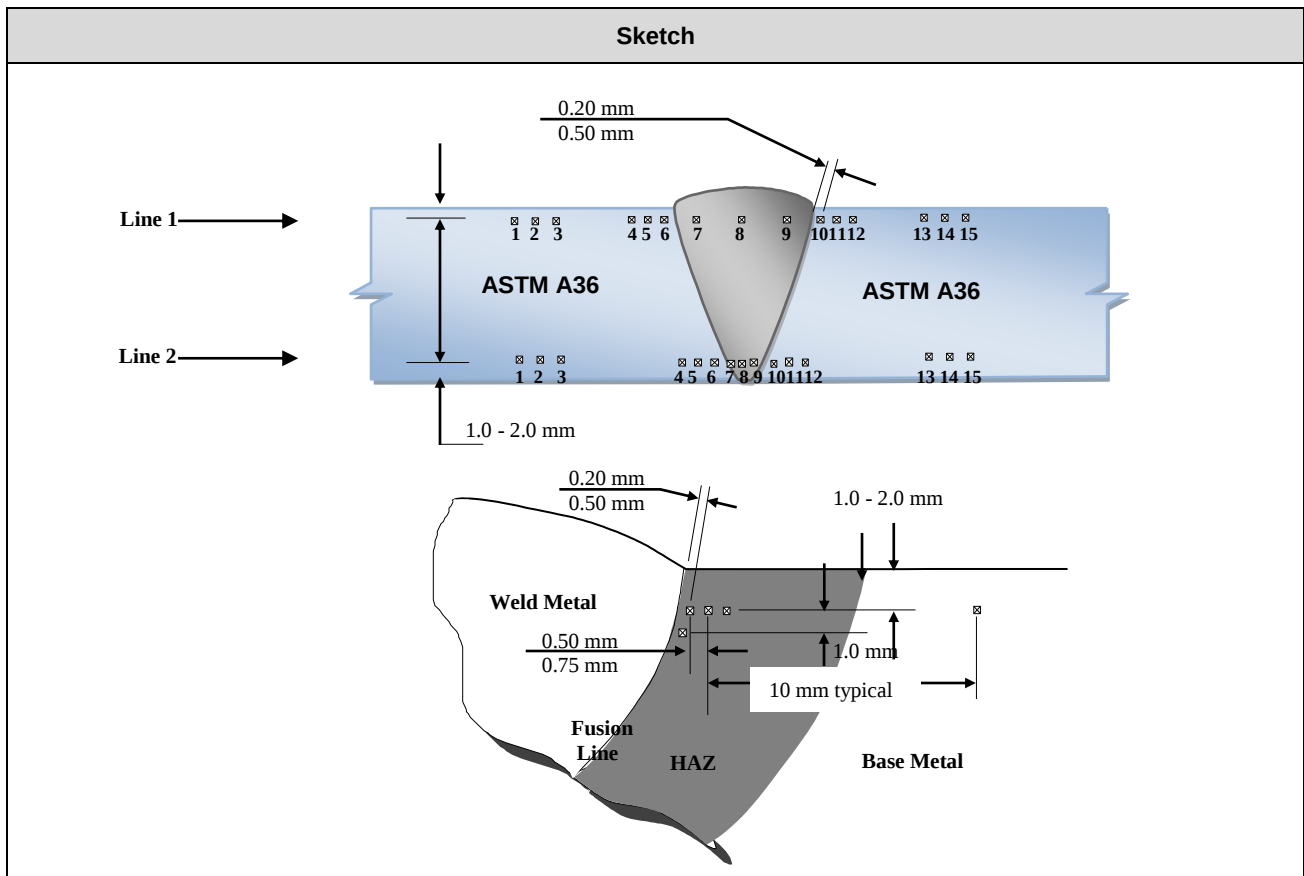
Testing Machine Used : NIKON ECLIPSEMA200 optical microscope  
Remark : **Type etchant solutions is  $HNO_3$**   
Test Conducted by : Rissa Deshanty, ST  
Witnessed By :

#### Term & Conditions

1. The Report is prepared for the sole use of the Client and is prepared based upon the item submitted, the Services required by the Client and the conditions under which the Services are performed by PT. Hi-Test.  
The Report is not intended to be representative of similar or equivalent Services on similar or equivalent Items. The Report does not constitute an endorsement by PT. Hi-Test of the Item.
2. PT. Hi-Test agrees to use reasonable diligence in the performance of the Services but no warranties are given and none may be implied directly or indirectly relating to the Services, the Report or the facilities of PT. Hi-Test.
3. This report shall not be reproduced except in full unless permission for the reproduction of an approved abstract has been obtained in writing from PT. Hi-Test.
4. PT. Hi-Test shall under no circumstances be liable to the Client or its agents, servants or representatives, in contract, tort (including negligence or breach of statutory duty) or otherwise for any direct or indirect loss or damage suffered by the Client, its agents, servants or representatives shows ever arising or whether connected with the Services provided by PT. Hi-Test herein.

**Job No** : -  
**No.** : HT/BTM/0626/  
**Page (s)** : 1 of 16  
**Date Received** : 02 June 2026  
**Date Tested** : 02 June 2026  
**Sample Marking** : Sample B

**Type of Test** : **Vickers Hardness Number (HV) Load Test, 10 kgf**



Customer : Skripsi  
 Reference Code : -  
 Test Method : ASTM E92-23  
 Object to be tested : (as received)

Job No : -  
 No. : HT/BTM/0626/  
 Page (s) : 2 of 16  
 Date Received : 02 June 2026  
 Date Tested : 02 June 2026  
 Sample Marking : Sample B

One welded carbon steel test sample, Size: 10 mm thickness, Material spec: ASTM A36, for Hardness Test.

Type of Test : Vickers Hardness Number (HV) Load Test, 10 kgf (HV-10)  
 Location : B-I

| Sample Identification | Material Specification | Test Location | Vickers Hardness Number (HV)<br>Test Load Applied, 10 Kgf |        |        |        |
|-----------------------|------------------------|---------------|-----------------------------------------------------------|--------|--------|--------|
|                       |                        |               | Line 1                                                    |        | Line 2 |        |
|                       |                        |               | No                                                        | Result | No     | Result |
| Sample B-I            | ASTM A36               | Base Metal    | 1                                                         | 144    | 1      | 149    |
|                       |                        |               | 2                                                         | 148    | 2      | 159    |
|                       |                        |               | 3                                                         | 147    | 3      | 154    |
|                       |                        | HAZ           | 4                                                         | 157    | 4      | 144    |
|                       |                        |               | 5                                                         | 159    | 5      | 142    |
|                       |                        |               | 6                                                         | 167    | 6      | 141    |
|                       | Weld Metal             |               | 7                                                         | 170    | 7      | 162    |
|                       |                        |               | 8                                                         | 178    | 8      | 167    |
|                       |                        |               | 9                                                         | 186    | 9      | 170    |
|                       | ASTM A36               | HAZ           | 10                                                        | 158    | 10     | 145    |
|                       |                        |               | 11                                                        | 154    | 11     | 143    |
|                       |                        |               | 12                                                        | 152    | 12     | 146    |
|                       |                        | Base Metal    | 13                                                        | 154    | 13     | 156    |
|                       |                        |               | 14                                                        | 149    | 14     | 157    |
|                       |                        |               | 15                                                        | 150    | 15     | 156    |

Testing Machine Used : The Zwick Roell Hardness Testing Machine, Model DuraScan 70 G5, S/N: DS251917  
 Remark : Has been verified using Euro Products Limited Standardized Blocks  
 (Identity No: EP18202924, EP18203976 and EP18204217)  
 Test Conducted by : M. Faiz Dwisusilo, S.T  
 Witness By :

Customer : Skripsi  
Reference Code : -  
Test Method : ASTM E92-23  
Object to be tested : (as received)

Job No : -  
No. : HT/BTM/0626/  
Page (s) : 3 of 16  
Date Received : 02 June 2026  
Date Tested : 02 June 2026  
Sample Marking : Sample B

One welded carbon steel test sample, Size: 10 mm thickness, Material spec: ASTM A36, for Hardness Test.

Type of Test : Vickers Hardness Number (HV) Load Test, 10 kgf (HV-10)  
Location : B-II

| Sample Identification | Material Specification | Test Location | Vickers Hardness Number (HV)<br>Test Load Applied, 10 Kgf |        |        |        |
|-----------------------|------------------------|---------------|-----------------------------------------------------------|--------|--------|--------|
|                       |                        |               | Line 1                                                    |        | Line 2 |        |
|                       |                        |               | No                                                        | Result | No     | Result |
| Sample B-II           | ASTM A36               | Base Metal    | 1                                                         | 154    | 1      | 156    |
|                       |                        |               | 2                                                         | 147    | 2      | 151    |
|                       |                        |               | 3                                                         | 152    | 3      | 154    |
|                       |                        | HAZ           | 4                                                         | 150    | 4      | 138    |
|                       |                        |               | 5                                                         | 155    | 5      | 138    |
|                       |                        |               | 6                                                         | 163    | 6      | 152    |
|                       | Weld Metal             |               | 7                                                         | 203    | 7      | 172    |
|                       |                        |               | 8                                                         | 194    | 8      | 170    |
|                       |                        |               | 9                                                         | 185    | 9      | 169    |
|                       | ASTM A36               | HAZ           | 10                                                        | 158    | 10     | 146    |
|                       |                        |               | 11                                                        | 160    | 11     | 146    |
|                       |                        |               | 12                                                        | 160    | 12     | 139    |
|                       |                        | Base Metal    | 13                                                        | 148    | 13     | 155    |
|                       |                        |               | 14                                                        | 153    | 14     | 152    |
|                       |                        |               | 15                                                        | 150    | 15     | 154    |

Testing Machine Used : The Zwick Roell Hardness Testing Machine, Model DuraScan 70 G5, S/N: DS251917  
Remark : Has been verified using Euro Products Limited Standardized Blocks  
(Identity No: EP18202924, EP18203976 and EP18204217)  
Test Conducted by : M. Faiz Dwisusilo, S.T  
Witness By :

Customer : Skripsi  
Reference Code : -  
Test Method : ASTM E92-23  
Object to be tested : (as received)

Job No : -  
No. : HT/BTM/0626/  
Page (s) : 4 of 16  
Date Received : 02 June 2026  
Date Tested : 02 June 2026  
Sample Marking : Sample B

One welded carbon steel test sample, Size: 10 mm thickness, Material spec: ASTM A36, for Hardness Test.

Type of Test : Vickers Hardness Number (HV) Load Test, 10 kgf (HV-10)  
Location : B-III

| Sample Identification | Material Specification | Test Location | Vickers Hardness Number (HV)<br>Test Load Applied, 10 Kgf |        |        |        |
|-----------------------|------------------------|---------------|-----------------------------------------------------------|--------|--------|--------|
|                       |                        |               | Line 1                                                    |        | Line 2 |        |
|                       |                        |               | No                                                        | Result | No     | Result |
| Sample B-III          | ASTM A36               | Base Metal    | 1                                                         | 150    | 1      | 156    |
|                       |                        |               | 2                                                         | 150    | 2      | 158    |
|                       |                        |               | 3                                                         | 149    | 3      | 150    |
|                       |                        | HAZ           | 4                                                         | 154    | 4      | 143    |
|                       |                        |               | 5                                                         | 160    | 5      | 150    |
|                       |                        |               | 6                                                         | 166    | 6      | 151    |
|                       | Weld Metal             |               | 7                                                         | 198    | 7      | 174    |
|                       |                        |               | 8                                                         | 189    | 8      | 175    |
|                       |                        |               | 9                                                         | 208    | 9      | 174    |
|                       | ASTM A36               | HAZ           | 10                                                        | 161    | 10     | 154    |
|                       |                        |               | 11                                                        | 160    | 11     | 153    |
|                       |                        |               | 12                                                        | 154    | 12     | 144    |
|                       |                        | Base Metal    | 13                                                        | 148    | 13     | 155    |
|                       |                        |               | 14                                                        | 148    | 14     | 154    |
|                       |                        |               | 15                                                        | 146    | 15     | 155    |

Testing Machine Used : The Zwick Roell Hardness Testing Machine, Model DuraScan 70 G5, S/N: DS251917  
Remark : Has been verified using Euro Products Limited Standardized Blocks  
(Identity No: EP18202924, EP18203976 and EP18204217)  
Test Conducted by : M. Faiz Dwisusilo, S.T  
Witness By :

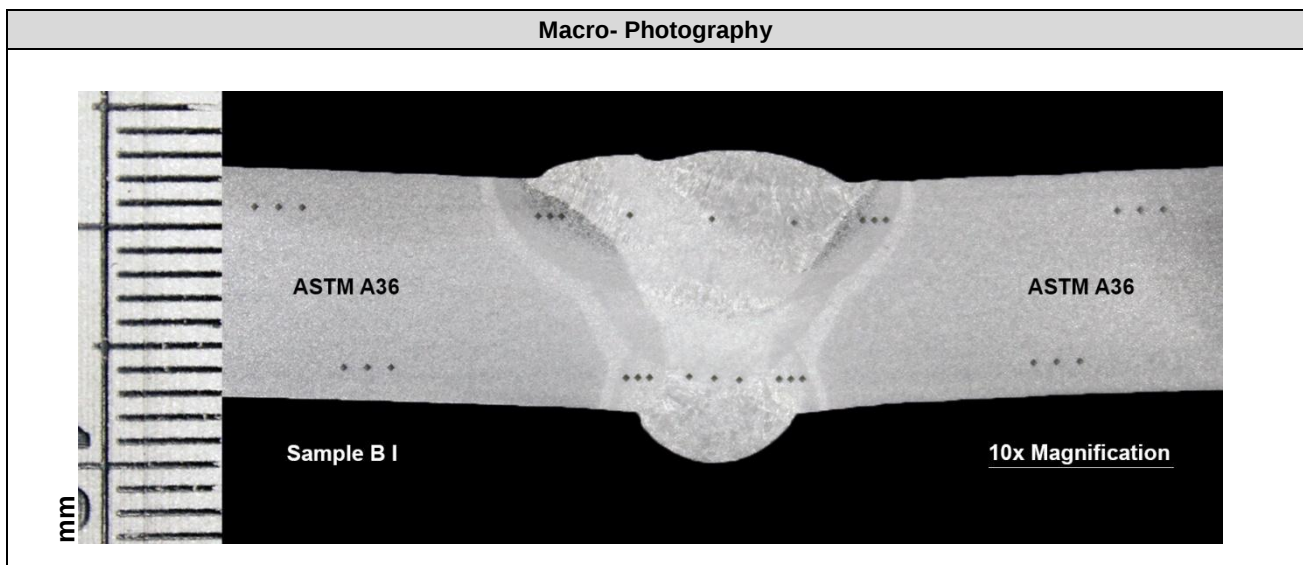
Customer : Skripsi  
Reference Code : -  
Test Method : ASTM E340-23  
Object to be tested : (as received)

Job No : -  
No. : HT/BTM/0626/  
Page (s) : 5 of 16  
Date Received : 02 June 2026  
Date Tested : 02 June 2026  
Sample Marking : Sample B

One welded carbon steel test sample, Size: 10 mm thickness, Material spec: ASTM A36, for Macro Examination Test.

Type of Test : Macro 10X Examination and Photo  
Location : B-I

| Specimen No | Thickness (mm) | Width (mm) | Result   |
|-------------|----------------|------------|----------|
| Sample B-I  | 10             | 10         | Accepted |



Acceptance criteria : Complete Fusion  
Test Conducted by : Rahmad Musliadi, Amd  
Witness By :

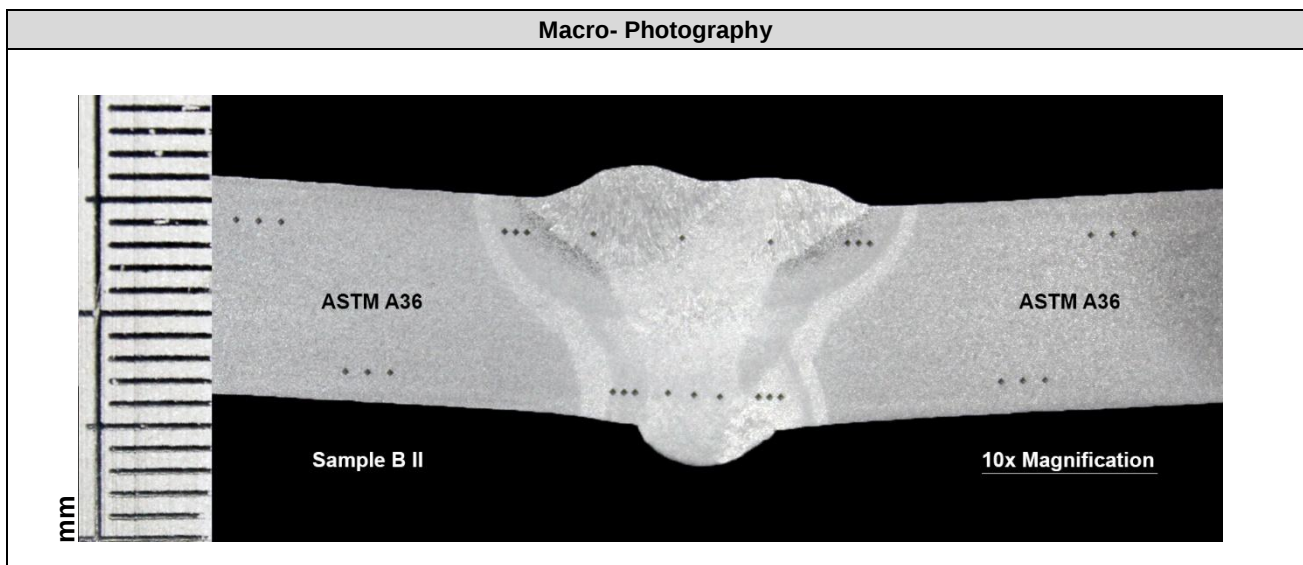
Customer : Skripsi  
Reference Code : -  
Test Method : ASTM E340-23  
Object to be tested : (as received)

Job No : -  
No. : HT/BTM/0626/  
Page (s) : 6 of 16  
Date Received : 02 June 2026  
Date Tested : 02 June 2026  
Sample Marking : Sample B

One welded carbon steel test sample, Size: 10 mm thickness, Material spec: ASTM A36, for Macro Examination Test.

Type of Test : Macro 10X Examination and Photo  
Location : B-II

| Specimen No | Thickness (mm) | Width (mm) | Result   |
|-------------|----------------|------------|----------|
| Sample B-II | 10             | 10         | Accepted |



Acceptance criteria : Complete Fusion  
Test Conducted by : Rahmad Musliadi, Amd  
Witness By :

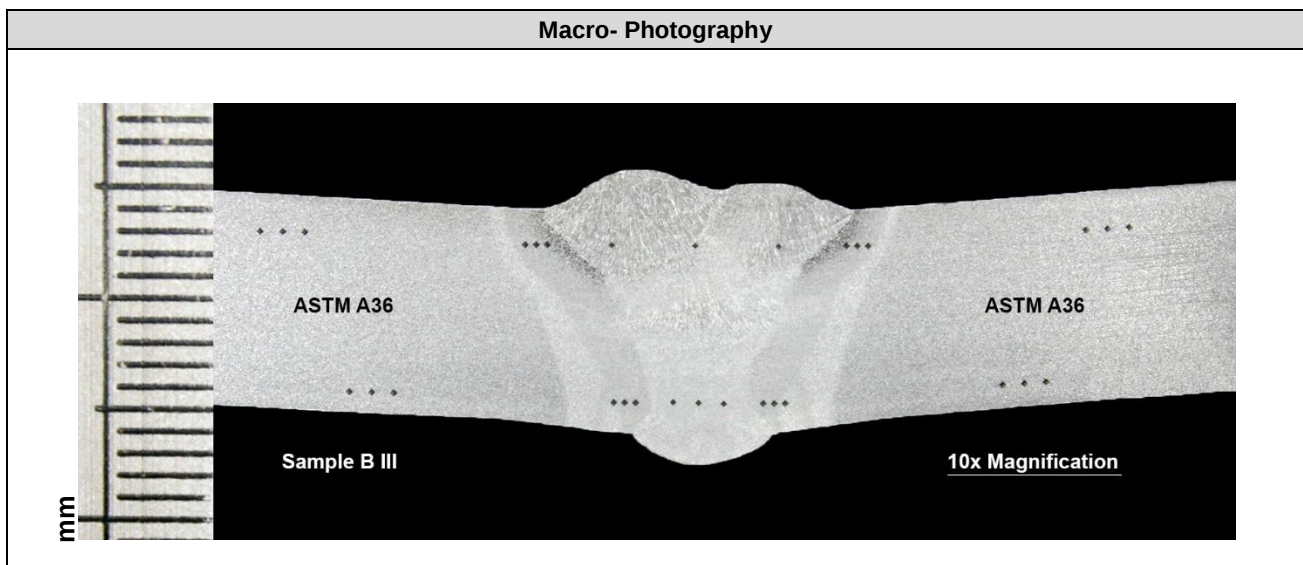
Customer : Skripsi  
Reference Code : -  
Test Method : ASTM E340-23  
Object to be tested : (as received)

Job No : -  
No. : HT/BTM/0626/  
Page (s) : 7 of 16  
Date Received : 02 June 2026  
Date Tested : 02 June 2026  
Sample Marking : Sample B

One welded carbon steel test sample, Size: 10 mm thickness, Material spec: ASTM A36, for Macro Examination Test.

Type of Test : Macro 10X Examination and Photo  
Location : B-III

| Specimen No  | Thickness (mm) | Width (mm) | Result   |
|--------------|----------------|------------|----------|
| Sample B-III | 10             | 10         | Accepted |



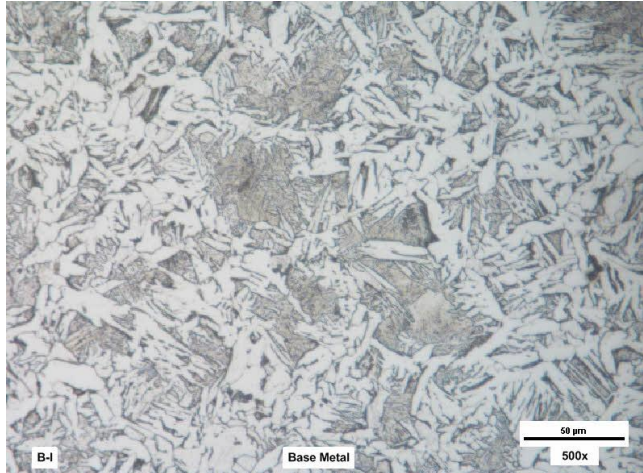
Acceptance criteria : Complete Fusion  
Test Conducted by : Rahmad Musliadi, Amd  
Witness By :

Customer : Skripsi  
Reference Code : -  
Test Method : ASTM E407-2023  
Object to be tested : (as received)

Job No : -  
No. : HT/BTM/0626/  
Page (s) : 8 of 16  
Date Received : 02 June 2026  
Date Tested : 02 June 2026  
Sample Marking : Sample B

One welded carbon steel test sample, Size: 10 mm thickness, Material spec: ASTM A36, for Micro Examination Test.

Type of Test : Micro Examination and Photo  
Location : B-I Base Metal

| Sample Identification                                                              | Result                                                                                                                                                                                                                                        |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sample B-I Base Metal                                                              | <ul style="list-style-type: none"><li>- The micro examination it shown two phases, there are ferrite and austenite phases, which the dark areas is ferrite phase.</li><li>- No intermetallic phases, and precipitates was observed.</li></ul> |
| 100x                                                                               | 500x                                                                                                                                                                                                                                          |
|  |                                                                                                                                                            |

Testing Machine Used : NIKON ECLIPSEMA200 optical microscope  
Remark : **Type etchant solutions is  $HNO_3$**   
Test Conducted by : Rissa Deshanty, ST  
Witnessed By :

#### Term & Conditions

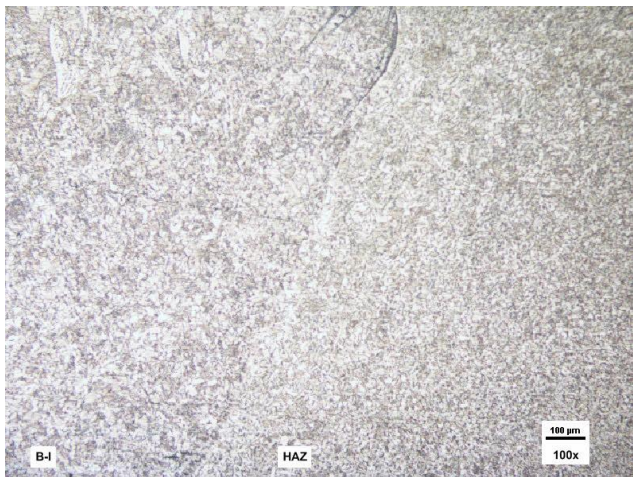
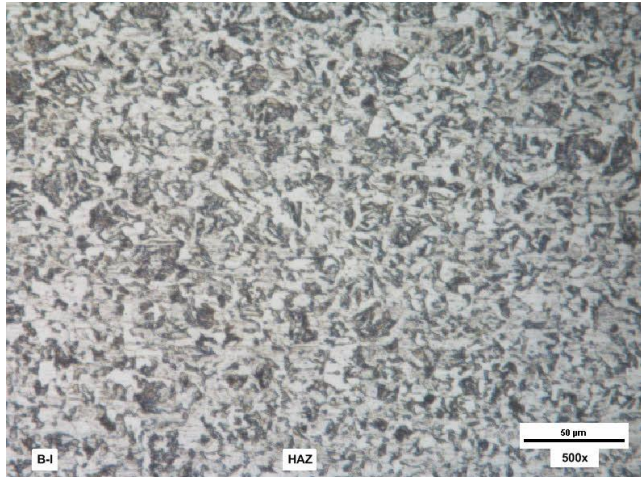
1. The Report is prepared for the sole use of the Client and is prepared based upon the item submitted, the Services required by the Client and the conditions under which the Services are performed by PT. Hi-Test.  
The Report is not intended to be representative of similar or equivalent Services on similar or equivalent Items. The Report does not constitute an endorsement by PT. Hi-Test of the Item.
2. PT. Hi-Test agrees to use reasonable diligence in the performance of the Services but no warranties are given and none may be implied directly or indirectly relating to the Services, the Report or the facilities of PT. Hi-Test.
3. This report shall not be reproduced except in full unless permission for the reproduction of an approved abstract has been obtained in writing from PT. Hi-Test.
4. PT. Hi-Test shall under no circumstances be liable to the Client or its agents, servants or representatives, in contract, tort (including negligence or breach of statutory duty) or otherwise for any direct or indirect loss or damage suffered by the Client, its agents, servants or representatives shows ever arising or whether connected with the Services provided by PT. Hi-Test herein.

Customer : Skripsi  
Reference Code : -  
Test Method : ASTM E407-2023  
Object to be tested : (as received)

Job No : -  
No. : HT/BTM/0626/  
Page (s) : 9 of 16  
Date Received : 02 June 2026  
Date Tested : 02 June 2026  
Sample Marking : Sample B

One welded carbon steel test sample, Size: 10 mm thickness, Material spec: ASTM A36, for Micro Examination Test.

Type of Test : Micro Examination and Photo  
Location : B-I HAZ

| Sample Identification                                                              | Result                                                                                                                                                                                                                                           |
|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sample B-I HAZ                                                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>- The micro examination it shown two phases, there are ferrite and austenite phases, which the dark areas is ferrite phase.</li> <li>- No intermetallic phases, and precipitates was observed.</li> </ul> |
| 100x                                                                               | 500x                                                                                                                                                                                                                                             |
|  |                                                                                                                                                               |

Testing Machine Used : NIKON ECLIPSEMA200 optical microscope  
Remark : *Type etchant solutions is HNO<sub>3</sub>*  
Test Conducted by : Rissa Deshanty, ST  
Witnessed By :

#### Term & Conditions

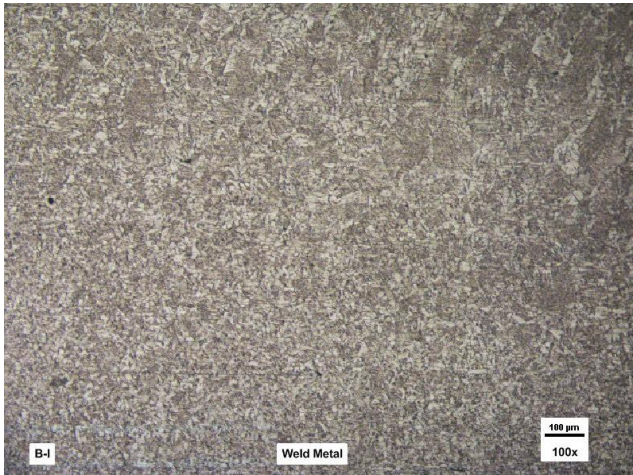
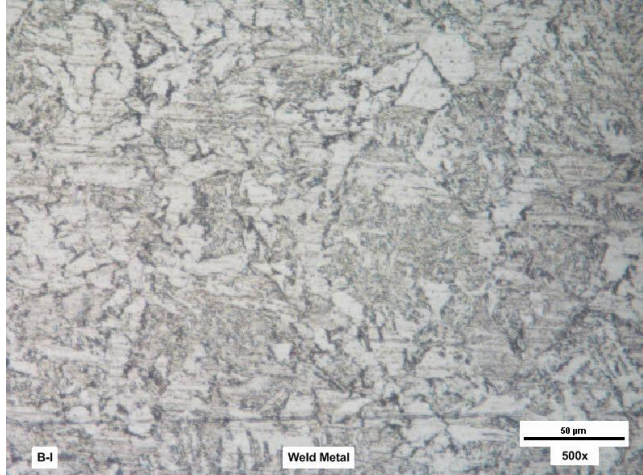
- The Report is prepared for the sole use of the Client and is prepared based upon the item submitted, the Services required by the Client and the conditions under which the Services are performed by PT. Hi-Test.  
The Report is not intended to be representative of similar or equivalent Services on similar or equivalent Items. The Report does not constitute an endorsement by PT. Hi-Test of the Item.
- PT. Hi-Test agrees to use reasonable diligence in the performance of the Services but no warranties are given and none may be implied directly or indirectly relating to the Services, the Report or the facilities of PT. Hi-Test.
- This report shall not be reproduced except in full unless permission for the reproduction of an approved abstract has been obtained in writing from PT. Hi-Test.
- PT. Hi-Test shall under no circumstances be liable to the Client or its agents, servants or representatives, in contract, tort (including negligence or breach of statutory duty) or otherwise for any direct or indirect loss or damage suffered by the Client, its agents, servants or representatives shows ever arising or whether connected with the Services provided by PT. Hi-Test herein.

Customer : Skripsi  
Reference Code : -  
Test Method : ASTM E407-2023  
Object to be tested : (as received)

Job No : -  
No. : HT/BTM/0626/  
Page (s) : 10 of 16  
Date Received : 02 June 2026  
Date Tested : 02 June 2026  
Sample Marking : Sample B

One welded carbon steel test sample, Size: 10 mm thickness, Material spec: ASTM A36, for Micro Examination Test.

Type of Test : Micro Examination and Photo  
Location : B-I Weld Metal

| Sample Identification                                                               | Result                                                                                                                                                                                                                                        |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sample B-I Weld Metal                                                               | <ul style="list-style-type: none"><li>- The micro examination it shown two phases, there are ferrite and austenite phases, which the dark areas is ferrite phase.</li><li>- No intermetallic phases, and precipitates was observed.</li></ul> |
| 100x                                                                                | 500x                                                                                                                                                                                                                                          |
|  |                                                                                                                                                           |

Testing Machine Used : NIKON ECLIPSEMA200 optical microscope  
Remark : *Type etchant solutions is HNO<sub>3</sub>*  
Test Conducted by : Rissa Deshanty, ST  
Witnessed By :

#### Term & Conditions

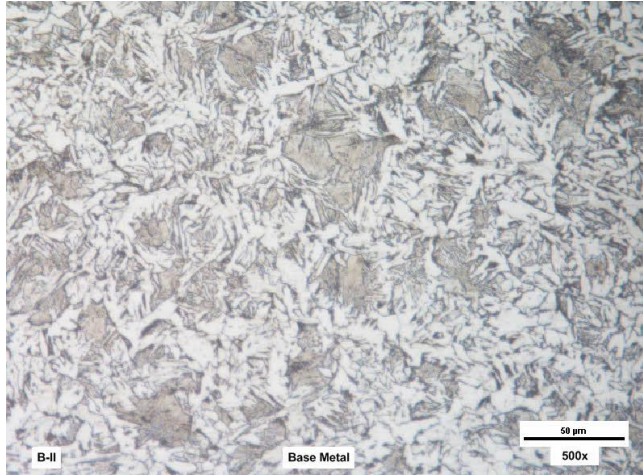
- The Report is prepared for the sole use of the Client and is prepared based upon the item submitted, the Services required by the Client and the conditions under which the Services are performed by PT. Hi-Test.  
The Report is not intended to be representative of similar or equivalent Services on similar or equivalent Items. The Report does not constitute an endorsement by PT. Hi-Test of the Item.
- PT. Hi-Test agrees to use reasonable diligence in the performance of the Services but no warranties are given and none may be implied directly or indirectly relating to the Services, the Report or the facilities of PT. Hi-Test.
- This report shall not be reproduced except in full unless permission for the reproduction of an approved abstract has been obtained in writing from PT. Hi-Test.
- PT. Hi-Test shall under no circumstances be liable to the Client or its agents, servants or representatives, in contract, tort (including negligence or breach of statutory duty) or otherwise for any direct or indirect loss or damage suffered by the Client, its agents, servants or representatives shows ever arising or whether connected with the Services provided by PT. Hi-Test herein.

Customer : Skripsi  
Reference Code : -  
Test Method : ASTM E407-2023  
Object to be tested : (as received)

Job No : -  
No. : HT/BTM/0626/  
Page (s) : 11 of 16  
Date Received : 02 June 2026  
Date Tested : 02 June 2026  
Sample Marking : Sample B

One welded carbon steel test sample, Size: 10 mm thickness, Material spec: ASTM A36, for Micro Examination Test.

Type of Test : Micro Examination and Photo  
Location : B-II Base Metal

| Sample Identification                                                              | Result                                                                                                                                                                                                                                        |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sample B-II Base Metal                                                             | <ul style="list-style-type: none"><li>- The micro examination it shown two phases, there are ferrite and austenite phases, which the dark areas is ferrite phase.</li><li>- No intermetallic phases, and precipitates was observed.</li></ul> |
| 100x                                                                               | 500x                                                                                                                                                                                                                                          |
|  |                                                                                                                                                            |

Testing Machine Used : NIKON ECLIPSEMA200 optical microscope  
Remark : **Type etchant solutions is  $\text{HNO}_3$**   
Test Conducted by : Rissa Deshanty, ST  
Witnessed By :

#### Term & Conditions

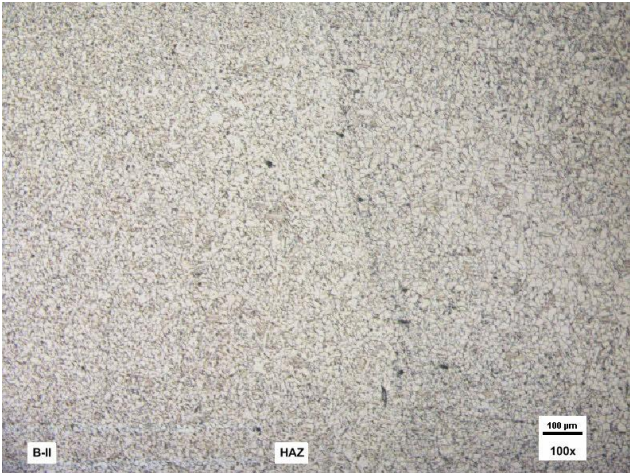
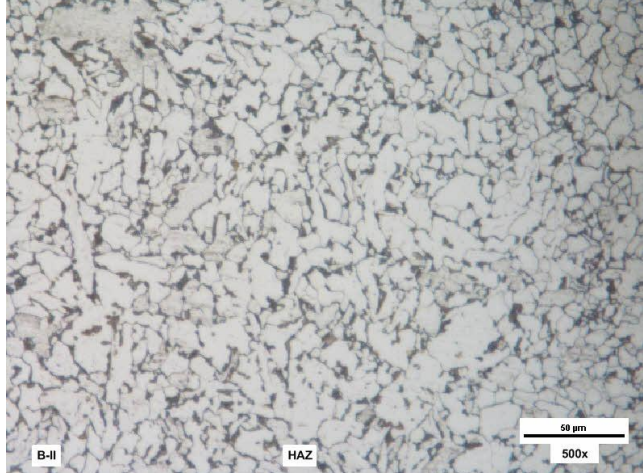
1. The Report is prepared for the sole use of the Client and is prepared based upon the item submitted, the Services required by the Client and the conditions under which the Services are performed by PT. Hi-Test.  
The Report is not intended to be representative of similar or equivalent Services on similar or equivalent Items. The Report does not constitute an endorsement by PT. Hi-Test of the Item.
2. PT. Hi-Test agrees to use reasonable diligence in the performance of the Services but no warranties are given and none may be implied directly or indirectly relating to the Services, the Report or the facilities of PT. Hi-Test.
3. This report shall not be reproduced except in full unless permission for the reproduction of an approved abstract has been obtained in writing from PT. Hi-Test.
4. PT. Hi-Test shall under no circumstances be liable to the Client or its agents, servants or representatives, in contract, tort (including negligence or breach of statutory duty) or otherwise for any direct or indirect loss or damage suffered by the Client, its agents, servants or representatives shows ever arising or whether connected with the Services provided by PT. Hi-Test herein.

Customer : Skripsi  
Reference Code : -  
Test Method : ASTM E407-2023  
Object to be tested : (as received)

Job No : -  
No. : HT/BTM/0626/  
Page (s) : 12 of 16  
Date Received : 02 June 2026  
Date Tested : 02 June 2026  
Sample Marking : Sample B

One welded carbon steel test sample, Size: 10 mm thickness, Material spec: ASTM A36, for Micro Examination Test.

Type of Test : Micro Examination and Photo  
Location : B-II HAZ

| Sample Identification                                                              | Result                                                                                                                                                                                                                                        |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sample B-II HAZ                                                                    | <ul style="list-style-type: none"><li>- The micro examination it shown two phases, there are ferrite and austenite phases, which the dark areas is ferrite phase.</li><li>- No intermetallic phases, and precipitates was observed.</li></ul> |
| 100x                                                                               | 500x                                                                                                                                                                                                                                          |
|  |                                                                                                                                                            |

Testing Machine Used : NIKON ECLIPSEMA200 optical microscope  
Remark : *Type etchant solutions is  $\text{HNO}_3$*   
Test Conducted by : Rissa Deshanty, ST  
Witnessed By :

#### Term & Conditions

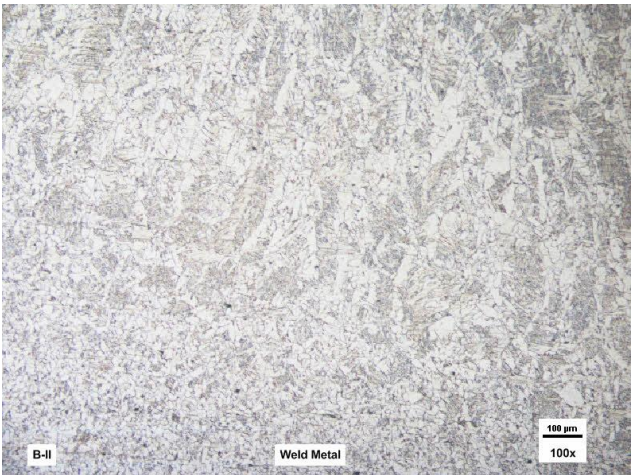
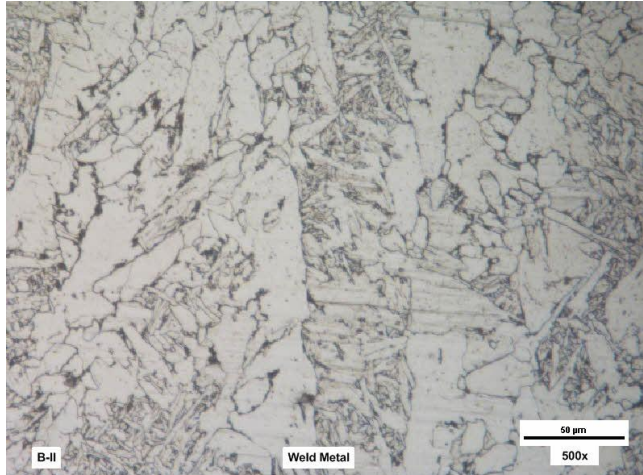
1. The Report is prepared for the sole use of the Client and is prepared based upon the item submitted, the Services required by the Client and the conditions under which the Services are performed by PT. Hi-Test.  
The Report is not intended to be representative of similar or equivalent Services on similar or equivalent Items. The Report does not constitute an endorsement by PT. Hi-Test of the Item.
2. PT. Hi-Test agrees to use reasonable diligence in the performance of the Services but no warranties are given and none may be implied directly or indirectly relating to the Services, the Report or the facilities of PT. Hi-Test.
3. This report shall not be reproduced except in full unless permission for the reproduction of an approved abstract has been obtained in writing from PT. Hi-Test.
4. PT. Hi-Test shall under no circumstances be liable to the Client or its agents, servants or representatives, in contract, tort (including negligence or breach of statutory duty) or otherwise for any direct or indirect loss or damage suffered by the Client, its agents, servants or representatives shows ever arising or whether connected with the Services provided by PT. Hi-Test herein.

Customer : Skripsi  
Reference Code : -  
Test Method : ASTM E407-2023  
Object to be tested : (as received)

Job No : -  
No. : HT/BTM/0626/  
Page (s) : 13 of 16  
Date Received : 02 June 2026  
Date Tested : 02 June 2026  
Sample Marking : Sample B

One welded carbon steel test sample, Size: 10 mm thickness, Material spec: ASTM A36, for Micro Examination Test.

Type of Test : Micro Examination and Photo  
Location : B-II Weld Metal

| Sample Identification                                                              | Result                                                                                                                                                                                                                                        |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sample B-II Weld Metal                                                             | <ul style="list-style-type: none"><li>- The micro examination it shown two phases, there are ferrite and austenite phases, which the dark areas is ferrite phase.</li><li>- No intermetallic phases, and precipitates was observed.</li></ul> |
| 100x                                                                               | 500x                                                                                                                                                                                                                                          |
|  |                                                                                                                                                            |

Testing Machine Used : NIKON ECLIPSEMA200 optical microscope  
Remark : **Type etchant solutions is  $\text{HNO}_3$**   
Test Conducted by : Rissa Deshanty, ST  
Witnessed By :

#### Term & Conditions

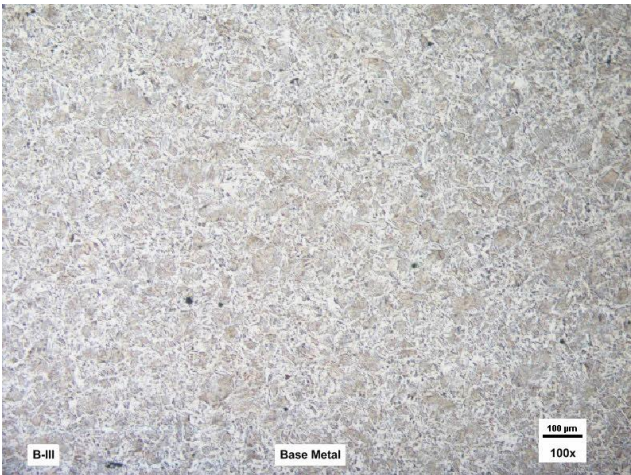
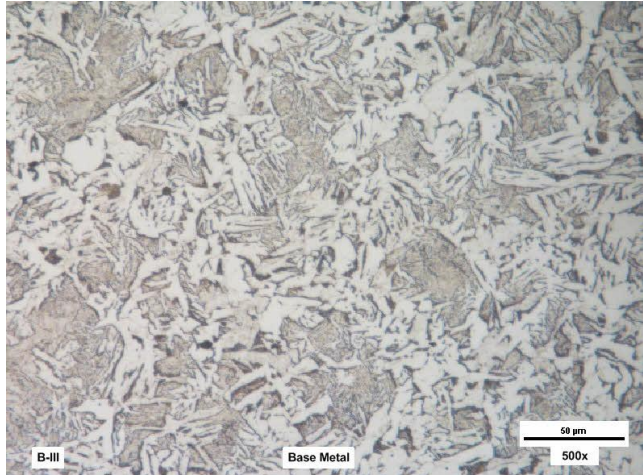
1. The Report is prepared for the sole use of the Client and is prepared based upon the item submitted, the Services required by the Client and the conditions under which the Services are performed by PT. Hi-Test.  
The Report is not intended to be representative of similar or equivalent Services on similar or equivalent Items. The Report does not constitute an endorsement by PT. Hi-Test of the Item.
2. PT. Hi-Test agrees to use reasonable diligence in the performance of the Services but no warranties are given and none may be implied directly or indirectly relating to the Services, the Report or the facilities of PT. Hi-Test.
3. This report shall not be reproduced except in full unless permission for the reproduction of an approved abstract has been obtained in writing from PT. Hi-Test.
4. PT. Hi-Test shall under no circumstances be liable to the Client or its agents, servants or representatives, in contract, tort (including negligence or breach of statutory duty) or otherwise for any direct or indirect loss or damage suffered by the Client, its agents, servants or representatives shows ever arising or whether connected with the Services provided by PT. Hi-Test herein.

Customer : Skripsi  
Reference Code : -  
Test Method : ASTM E407-2023  
Object to be tested : (as received)

Job No : -  
No. : HT/BTM/0626/  
Page (s) : 14 of 16  
Date Received : 02 June 2026  
Date Tested : 02 June 2026  
Sample Marking : Sample B

One welded carbon steel test sample, Size: 10 mm thickness, Material spec: ASTM A36, for Micro Examination Test.

Type of Test : Micro Examination and Photo  
Location : B-III Base Metal

| Sample Identification                                                              | Result                                                                                                                                                                                                                                        |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sample B-III Base Metal                                                            | <ul style="list-style-type: none"><li>- The micro examination it shown two phases, there are ferrite and austenite phases, which the dark areas is ferrite phase.</li><li>- No intermetallic phases, and precipitates was observed.</li></ul> |
| 100x                                                                               | 500x                                                                                                                                                                                                                                          |
|  |                                                                                                                                                            |

Testing Machine Used : NIKON ECLIPSEMA200 optical microscope  
Remark : *Type etchant solutions is HNO<sub>3</sub>*  
Test Conducted by : Rissa Deshanty, ST  
Witnessed By :

#### Term & Conditions

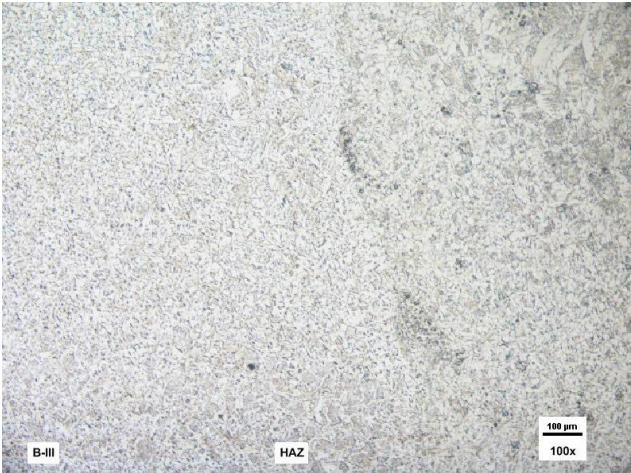
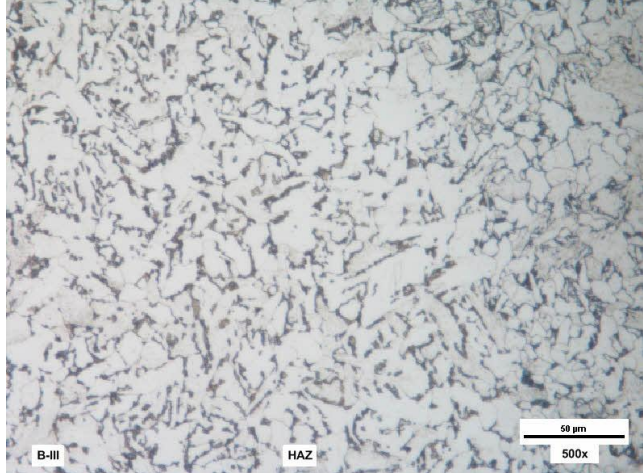
1. The Report is prepared for the sole use of the Client and is prepared based upon the item submitted, the Services required by the Client and the conditions under which the Services are performed by PT. Hi-Test.  
The Report is not intended to be representative of similar or equivalent Services on similar or equivalent Items. The Report does not constitute an endorsement by PT. Hi-Test of the Item.
2. PT. Hi-Test agrees to use reasonable diligence in the performance of the Services but no warranties are given and none may be implied directly or indirectly relating to the Services, the Report or the facilities of PT. Hi-Test.
3. This report shall not be reproduced except in full unless permission for the reproduction of an approved abstract has been obtained in writing from PT. Hi-Test.
4. PT. Hi-Test shall under no circumstances be liable to the Client or its agents, servants or representatives, in contract, tort (including negligence or breach of statutory duty) or otherwise for any direct or indirect loss or damage suffered by the Client, its agents, servants or representatives shows ever arising or whether connected with the Services provided by PT. Hi-Test herein.

Customer : Skripsi  
Reference Code : -  
Test Method : ASTM E407-2023  
Object to be tested : (as received)

Job No : -  
No. : HT/BTM/0626/  
Page (s) : 15 of 16  
Date Received : 02 June 2026  
Date Tested : 02 June 2026  
Sample Marking : Sample B

One welded carbon steel test sample, Size: 10 mm thickness, Material spec: ASTM A36, for Micro Examination Test.

Type of Test : Micro Examination and Photo  
Location : B-III HAZ

| Sample Identification                                                              | Result                                                                                                                                                                                                                                        |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sample B-III HAZ                                                                   | <ul style="list-style-type: none"><li>- The micro examination it shown two phases, there are ferrite and austenite phases, which the dark areas is ferrite phase.</li><li>- No intermetallic phases, and precipitates was observed.</li></ul> |
| 100x                                                                               | 500x                                                                                                                                                                                                                                          |
|  |                                                                                                                                                            |

Testing Machine Used : NIKON ECLIPSEMA200 optical microscope  
Remark : *Type etchant solutions is HNO<sub>3</sub>*  
Test Conducted by : Rissa Deshanty, ST  
Witnessed By :

#### Term & Conditions

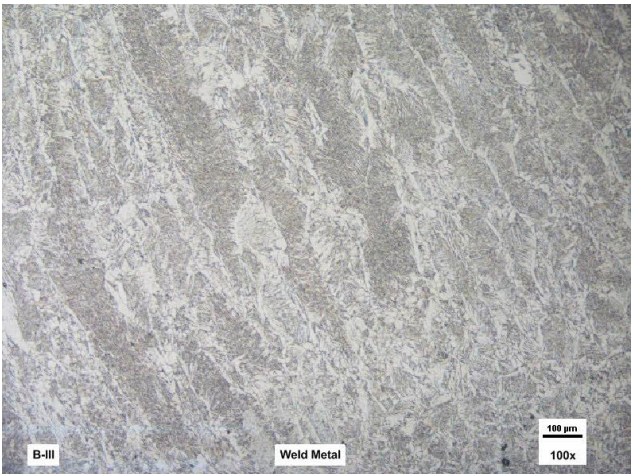
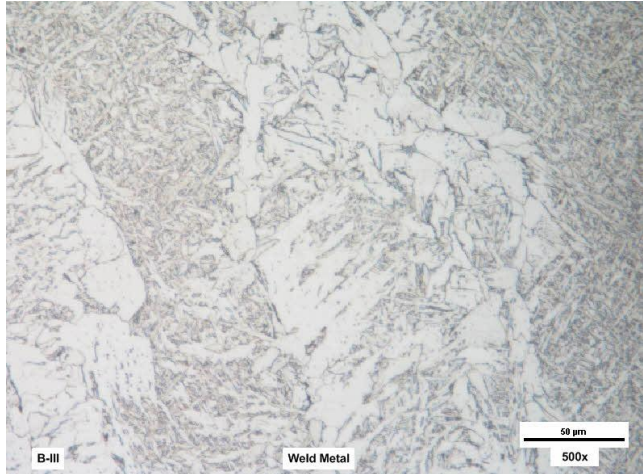
1. The Report is prepared for the sole use of the Client and is prepared based upon the item submitted, the Services required by the Client and the conditions under which the Services are performed by PT. Hi-Test.  
The Report is not intended to be representative of similar or equivalent Services on similar or equivalent Items. The Report does not constitute an endorsement by PT. Hi-Test of the Item.
2. PT. Hi-Test agrees to use reasonable diligence in the performance of the Services but no warranties are given and none may be implied directly or indirectly relating to the Services, the Report or the facilities of PT. Hi-Test.
3. This report shall not be reproduced except in full unless permission for the reproduction of an approved abstract has been obtained in writing from PT. Hi-Test.
4. PT. Hi-Test shall under no circumstances be liable to the Client or its agents, servants or representatives, in contract, tort (including negligence or breach of statutory duty) or otherwise for any direct or indirect loss or damage suffered by the Client, its agents, servants or representatives shows ever arising or whether connected with the Services provided by PT. Hi-Test herein.

Customer : Skripsi  
Reference Code : -  
Test Method : ASTM E407-2023  
Object to be tested : (as received)

Job No : -  
No. : HT/BTM/0626/  
Page (s) : 16 of 16  
Date Received : 02 June 2026  
Date Tested : 02 June 2026  
Sample Marking : Sample B

One welded carbon steel test sample, Size: 10 mm thickness, Material spec: ASTM A36, for Micro Examination Test.

Type of Test : Micro Examination and Photo  
Location : B-III Weld Metal

| Sample Identification                                                               | Result                                                                                                                                                                                                                                        |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sample B-III Weld Metal                                                             | <ul style="list-style-type: none"><li>- The micro examination it shown two phases, there are ferrite and austenite phases, which the dark areas is ferrite phase.</li><li>- No intermetallic phases, and precipitates was observed.</li></ul> |
| 100x                                                                                | 500x                                                                                                                                                                                                                                          |
|  |                                                                                                                                                           |

Testing Machine Used : NIKON ECLIPSEMA200 optical microscope  
Remark : *Type etchant solutions is HNO<sub>3</sub>*  
Test Conducted by : Rissa Deshanty, ST  
Witnessed By :

#### Term & Conditions

1. The Report is prepared for the sole use of the Client and is prepared based upon the item submitted, the Services required by the Client and the conditions under which the Services are performed by PT. Hi-Test.  
The Report is not intended to be representative of similar or equivalent Services on similar or equivalent Items. The Report does not constitute an endorsement by PT. Hi-Test of the Item.
2. PT. Hi-Test agrees to use reasonable diligence in the performance of the Services but no warranties are given and none may be implied directly or indirectly relating to the Services, the Report or the facilities of PT. Hi-Test.
3. This report shall not be reproduced except in full unless permission for the reproduction of an approved abstract has been obtained in writing from PT. Hi-Test.
4. PT. Hi-Test shall under no circumstances be liable to the Client or its agents, servants or representatives, in contract, tort (including negligence or breach of statutory duty) or otherwise for any direct or indirect loss or damage suffered by the Client, its agents, servants or representatives shows ever arising or whether connected with the Services provided by PT. Hi-Test herein.