

PROJEK AKHIR - VM191837

PENGARUH SUDUT SINGLE V JOINT TERHADAP LAJU KOROSI, KEKUATAN TARIK DAN STRUKTUR MIKRO PELAT BAJA A36 DENGAN PENGELASAN SMAW MENGGUNAKAN ELEKTRODA E7018 PADA LINGKUNGAN LAUT

FAJAR PUTRA CAHYADI

NRP 10211910000022

Dosen Pembimbing

Ir. Hari Subiyanto, MSc

NIP 19600623 198803 1 002

Program Studi Teknologi Rekayasa Manufaktur

Departemen Teknik Mesin Industri

Fakultas Vokasi

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2023



PROJEK AKHIR - VM191837

PENGARUH SUDUT SINGLE V JOINT TERHADAP LAJU KOROSI, KEKUATAN TARIK DAN STRUKTUR MIKRO PELAT BAJA A36 DENGAN PENGELASAN SMAW MENGGUNAKAN ELEKTRODA E7018 PADA LINGKUNGAN LAUT

FAJAR PUTRA CAHYADI

NRP 10211910000022

Dosen Pembimbing

Ir. Hari Subiyanto, MSc

NIP 19600623 198803 1 002

Program Studi Teknologi Rekayasa Manufaktur

Departemen Teknik Mesin Industri

Fakultas Vokasi

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2023



FINAL PROJECT - VM191837

**THE EFFECT OF SINGLE V JOINT ANGLE ON
CORROSION RATE, TENSILE STRENGTH, AND
MICROSTRUCTURE OF A36 STEEL PLATE WITH SMAW
WELDING USING E7018 ELECTRODE IN MARINE
ENVIRONMENT**

FAJAR PUTRA CAHYADI

NRP 10211910000022

Advisor

Ir. Hari Subiyanto, MSc

NIP 19600623 198803 1 002

Study Program Manufacturing Engineering Technology

Department of Industrial Mechanical Engineering

Faculty of Vocational

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2023

LEMBAR PENGESAHAN

PENGARUH SUDUT SINGLE V JOINT TERHADAP LAJU KOROSI, KEKUATAN TARIK DAN STRUKTUR MIKRO PELAT BAJA A36 DENGAN PENGELASAN SMAW MENGGUNAKAN ELEKTRODA E7018 PADA LINGKUNGAN LAUT

PROJEK AKHIR

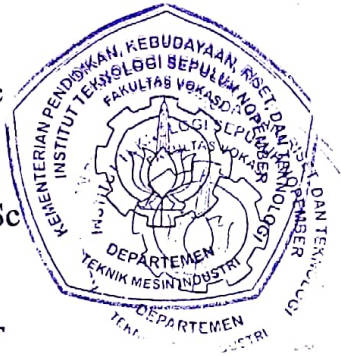
Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarjana Terapan pada
Program Studi D-4 Teknologi Rekayasa Manufaktur
Departemen Teknik Mesin Industri
Fakultas Vokasi
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh: **Fajar Putra Cahyadi**

NRP. 10211910000022

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Ir. Hari Subiyanto, MSc
2. Ir. Eddy Widiyono, M.Sc
3. Ahmat Safa'at, ST., MT
4. Rizaldy Hakim A, S.T., M.T.



Pembimbing

Penguji

Penguji

Penguji

SURABAYA

Juli, 2023

APPROVAL SHEET

THE EFFECT OF SINGLE V JOINT ANGLE ON CORROSION RATE, TENSILE STRENGTH, AND MICROSTRUCTURE OF A36 STEEL PLATE WITH SMAW WELDING USING E7018 ELECTRODE IN MARINE ENVIRONMENT

FINAL PROJECT

Submitted to fulfill one of the requirements

for obtaining a Bachelor Degree at

Undergraduate Study Program of Manufacturing Engineering Technology

Department of Industrial Mechanical Engineering

Faculty of Vocational

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

By: **Fajar Putra Cahyadi**

NRP. 10211910000022

Approved by Final Project Examiner Team:

1. Ir. Hari Subiyanto, MSc

2. Ir. Eddy Widiyono, M.Sc

3. Ahmat Safa'at, ST., MT

4. Rizaldy Hakim A, S.T., M.T.



Advisor

Examiner

Examiner

Examiner

SURABAYA

July 2023

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Fajar Putra Cahyadi / 10211910000022
Departemen : Teknik Mesin Industri
Dosen Pembimbing / NIP : Ir. Hari Subiyanto, MSc / 19600623 198803 1 002

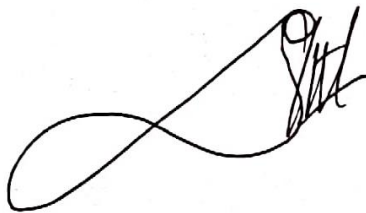
dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Pengaruh Sudut *Single V Joint* terhadap Laju Korosi, Kekuatan Tarik dan Struktur Mikro Pelat Baja A36 dengan Pengelasan SMAW Menggunakan Elektroda E7018 pada Lingkungan Laut” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

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

Surabaya, 24 Juli 2023

Mengetahui
Dosen Pembimbing

Mahasiswa



Ir. Hari Subiyanto, MSc
NIP. 19600623 198803 1 002



Fajar Putra Cahyadi
NRP. 10211910000022

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student / NRP : Fajar Putra Cahyadi / 10211910000022
Department : Industrial Mechanical Engineering
Advisor / NIP : Ir. Hari Subiyanto, MSc / 19600623 198803 1 002

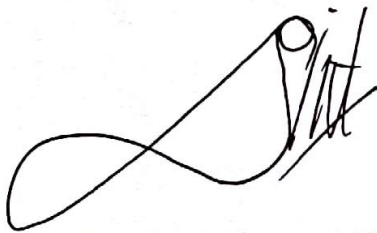
hereby declare that the Final Project with the title of “The Effect of Single V Joint Angle on Corrosion Rate, Tensile Strength, and Microstructure of A36 Steel Plate with SMAW Welding Using E7018 Electrode in Marine Environment” is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

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

Surabaya, 24 July 2023

Acknowledged

Advisor



Ir. Hari Subiyanto, MSc

NIP. 19600623 198803 1 002

Student



Fajar Putra Cahyadi

NRP. 10211910000022

ABSTRAK

PENGARUH SUDUT SINGLE V JOINT TERHADAP LAJU KOROSI, KEKUATAN TARIK DAN STRUKTUR MIKRO PELAT BAJA A36 DENGAN PENGELASAN SMAW MENGGUNAKAN ELEKTRODA E7018 PADA LINGKUNGAN LAUT

Nama Mahasiswa / NRP : Fajar Putra Cahyadi / 1021191000022
Departemen : Teknik Mesin Industri - ITS
Dosen Pembimbing : Ir. Hari Subiyanto, MSc

Abstrak

Variasi sudut *single V joint* mempengaruhi deposit bahan tambah terhadap material sehingga mempengaruhi efisiensi sambungan pada pengelasan. Deposit bahan tambah terhadap material menciptakan terjadinya perubahan struktur mikro dan siklus termal yang berbeda pada setiap daerah pengelasan. Hal tersebut akan mempengaruhi tingkat korosi pada material. Variasi sudut yang digunakan sebesar 55°, 65° dan 75° dengan ketebalan pelat baja A36 sebesar 12 mm, menggunakan elektroda E7018 dengan diameter 3,2 kemudian dilakukan pengujian korosi, tarik, dan metalografi.

Pada pengujian korosi, menggunakan metode tiga sel elektroda dengan NaCl 3,5% sebagai media pengkorosi. Elektroda acuan adalah SCE, sedangkan elektroda pembantu menggunakan grafit. Pengujian metalografi untuk mengetahui ukuran butir, distribusi fasa, dan keberadaan kotoran dalam logam. Pengujian tarik digunakan untuk menguji kekuatan material dengan beban lambat atau cepat.

Peningkatan sudut pengelasan menyebabkan peningkatan laju korosi. Pada sudut 55°, laju korosi adalah 0.29 mm/year untuk HAZ dan 0.36 mm/year untuk weld metal (WM). Pada sudut 65°, laju korosi meningkat menjadi 0.94 mm/year untuk HAZ dan 1.66 mm/year untuk WM. Pada sudut 75°, laju korosi mencapai 2.73 mm/year untuk HAZ dan 6.55 mm/year untuk WM. Uji tarik pada setiap sudut pengelasan menunjukkan patahan pada *base metal* yang menunjukkan kecocokan pemilihan elektroda dan metode *multipass* pengelasan. Patahan juga terjadi pada *weld metal* akibat porositas. Sudut *single V joint* juga mempengaruhi ukuran butir pada HAZ dan *weld metal*. Semakin besar sudut, semakin besar volume pengisian logam las dan peningkatan ukuran butir. Tidak ada transformasi fasa dalam semua variasi sudut *single V joint*.

Kata kunci: *Single V Joint, Korosi, Pengelasan, Tiga Sel Elektroda, Variasi Sudut*

ABSTRACT

THE EFFECT OF SINGLE V JOINT ANGLE ON CORROSION RATE, TENSILE STRENGTH, AND MICROSTRUCTURE OF A36 STEEL PLATE WITH SMAW WELDING USING E7018 ELECTRODE IN MARINE ENVIRONMENT

Student Name / NRP : Fajar Putra Cahyadi / 1021191000022
Department : Industrial Mechanical Engineering - ITS
Advisor : Ir. Hari Subiyanto, MSc

Abstract

Variations in the angle of the single V joint affect the deposit of added material on the material so it affects the efficiency of the joint in welding. The deposit of added material on the material creates changes in the microstructure and different thermal cycles in each welding area. This will affect the corrosion rate of the material. In this research, we will study the effect of a single V joint angle on the corrosion rate of an A36 steel plate in a marine environment. Variations in the angles used are 55°, 65°, and 75° with a thickness of 12 mm A36 steel plate, using an E7018 electrode with a diameter of 3.2, and then corrosion, tensile, and metallographic tests are carried out.

In the corrosion testing, a three-electrode cell method was used with a 3.5% NaCl solution as the corrosive media. The reference electrode used was the saturated calomel electrode (SCE), while the auxiliary electrode utilized graphite. Metallographic examination aimed to determine the grain size, phase distribution, and presence of impurities in the metal. Tensile testing was conducted to assess the strength of the material under both slow and fast loading conditions.

Increasing the welding angle resulted in an escalation of the corrosion rate. At an angle of 55 degrees, the corrosion rate was 0.29 mm/year for the heat-affected zone (HAZ) and 0.36 mm/year for the weld metal (WM). The corrosion rate increased to 0.94 mm/year for the HAZ and 1.66 mm/year for the WM at an angle of 65 degrees. At 75 degrees, the corrosion rate reached 2.73 mm/year for the HAZ and 6.55 mm/year for the WM. Tensile testing at each welding angle revealed fractures in the base metal, indicating compatibility between electrode selection and the multipass welding method. Fractures also occurred in the weld metal due to porosity. The single V joint angle also influenced the grain size in both the HAZ and weld metal, with larger angles resulting in increased metal filling volume and grain size. No phase transformation was observed in all variations of the single V joint angle.

Keywords: *Single V Joint, Corrosion, Welding, Three-Electrode Cells, Angle Variation.*

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, karena dengan rahmat dan karunia-Nya, penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul " Pengaruh Sudut *Single V Joint* terhadap Laju Korosi, Kekuatan Tarik dan Struktur Mikro Pelat Baja A36 dengan Pengelasan SMAW Menggunakan Elektroda E7018 pada Lingkungan Laut". Tugas akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan studi Sarjana Terapan Teknik (S.Tr.T) di Departemen Teknik Mesin Industri, Fakultas Vokasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Dalam penyelesaian tugas akhir ini penulis telah melibatkan banyak pihak, maka dari itu dalam kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Ir. Hari Subiyanto, M.Sc sebagai dosen pembimbing akademik dan pembimbing utama yang telah memberikan pengarahan dan bimbingan kepada penulis.
2. Bapak Dr. Ir. Heru Mirmanto, MT. selaku kepala Departemen Teknik Mesin Industri, Fakultas Vokasi, Institut Teknologi Sepuluh Nolember.
3. Bapak Ir. Eddy Widiyono, M. Sc. sebagai dosen penguji tugas akhir.
4. Bapak Ahmat Safa'at, ST., MT sebagai dosen penguji tugas akhir.
5. Bapak Rizaldy Hakim A, S.T., M.T. sebagai dosen penguji tugas akhir.
6. Ibu Dr. Atria Pradityana S.T., M.T., sebagai koordinator Program Studi.
7. Teman-teman seangkatan yang telah memberikan dukungan moral dan kolaborasi dalam proses penelitian ini.
8. Keluarga dan orang terkasih peneliti yang selalu memberikan semangat dan doa yang tak terhingga.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini tidak akan sempurna tanpa adanya saran, masukan, dan kritik dari berbagai pihak. Penulis berharap bahwa hasil penelitian ini dapat memberikan kontribusi yang berarti dalam pemahaman tentang pengaruh sudut *single V joint* terhadap laju korosi pelat baja A36 pada lingkungan laut. Semoga penelitian ini dapat menjadi dasar bagi penelitian selanjutnya dalam upaya meningkatkan keberlanjutan dan kehandalan penggunaan material baja dalam aplikasi kelautan.

Surabaya, 21 Juli 2023

Fajar Putra Cahyadi

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
APPROVAL SHEET	ii
PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
STATEMENT OF ORIGINALITY	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan	2
1.5 Manfaat	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 Hasil Penelitian Terdahulu	3
2.2 Dasar Teori	3
2.2.1 Pengelasan	3
2.2.2 Shielded Metal Arc Welding (SMAW)	4
2.2.3 Elektroda	5
2.2.4 Baja	7
2.2.5 Heat Input	8
2.2.6 Sambungan Las	9
2.2.7 Tegangan Sisa	12
2.2.8 Multipass	15
2.2.9 Korosi	16
BAB III METODOLOGI	25
3.1 Metode yang Digunakan	25
3.1.1 Diagram Alir Penelitian	25
3.1.2 Studi Literatur	26
3.1.3 Observasi Lapangan	26
3.1.4 Material ASTM A36	26

3.1.5	Pembuatan Kampuh.....	27
3.1.6	Tahap Pengelasan	29
3.1.7	Pembuatan Benda Uji	29
3.1.8	Tahap Pengujian	30
3.1.9	Analisa Data	34
3.2	Bahan dan Peralatan yang Digunakan	34
3.3	Urutan Pelaksanaan Penelitian.....	35
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....		36
4.1	Pelaksanaan Penelitian.....	36
4.2	Pengujian.....	37
4.2.1	Pengujian Makro.....	37
4.2.2	Pengujian Korosi	38
4.2.3	Pengujian Tarik.....	46
4.2.4	Pengujian Metalografi	53
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		65
5.1	Kesimpulan	65
5.2	Saran	65
DAFTAR PUSTAKA.....		66
LAMPIRAN		68
Lampiran 1. Sertifikat Material		68
Lampiran 2. Datasheet Elektroda		69
Lampiran 3. Hasil Uji Korosi		70
Lampiran 4. Perhitungan Standar Deviasi dan Eror		77
Lampiran 5. Hasil Uji Tensile		78
Lampiran 6. Pendekatan Nilai Stress Ultimate Tanpa Porosity		81
Lampiran 7. Hasil Uji Metalografi		84
Lampiran 8. Perhitungan Average Grain Size Area		86

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Skema Proses SMAW	4
Gambar 2. 2 Rangkaian Mesin Las SMAW	5
Gambar 2. 3 Diagram Fasa Kesetimbangan Fe-Fe ₃ C	7
Gambar 2. 4 Kurva Karakteristik Mesin Las dan Busur Listrik	9
Gambar 2. 5 Alur Butt Joint.....	10
Gambar 2. 6 Standar Kampuh Single V Joint.....	11
Gambar 2. 7 Distorsi Pada Pengelasan	11
Gambar 2. 8 Arah Pembekuan Logam Las	12
Gambar 2. 9 Siklus Termal Daerah Lasan	13
Gambar 2. 10 Distribusi Angular pada Las.....	13
Gambar 2. 11 Tegangan Sisa Karena Penahan Luar pada Butt Joint	14
Gambar 2. 12 Skema Distribusi Tegangan Sisa dalam Sambungan Butt Joint	14
Gambar 2. 13 Metode Multipass.....	15
Gambar 2. 14 Korosi Pada Besi Akibat Kontak Dengan Air.....	18
Gambar 2. 15 Paduan atau Sistem Lingkungan yang menyebabkan SCC.....	19
Gambar 2. 16 Persyaratan penting SCC.....	19
Gambar 2. 17 Mekanisme SCC Baja Karbon N80 dalam Larutan Asam NaCl	22
Gambar 2. 18 Rangkaian Uji Potensiostat	23
Gambar 3. 1 Dimensi Base Metal	26
Gambar 3. 2 Pemotongan Pelat ASTM A36.....	27
Gambar 3. 3 Kampuh Single V joint.....	27
Gambar 3. 4 Pembuatan Kampuh	28
Gambar 3. 5 Kalibrasi Sudut Kampuh	28
Gambar 3. 6 Dimensi Benda Uji.....	30
Gambar 3. 7 CorrTest Electrochemical Workstation.....	31
Gambar 3. 8 Universal Testing Machine Cap 15 Ton	32
Gambar 4. 1 Hasil Pengelasan Material Baja ASTM A36	37
Gambar 4. 2 Spesimen Hasil Etsa Makro	38

Gambar 4. 3 Preparasi Sampel Korosi	39
Gambar 4. 4 Rata – Rata Corrosion Rate	44
Gambar 4. 5 Hasil Visual Benda Uji Tarik	47
Gambar 4. 6 Average Yield & Ultimate Stress pada Patahan Base Metal	48
Gambar 4. 7 Porositas Pada Weld Metal	50
Gambar 4. 8 Metalografi Single V Joint 55°	54
Gambar 4. 9 Hasil ImageJ Pada Single V Joint 55°	55
Gambar 4. 10 Pola untuk Penghitungan Intersep Single V Joint 55°	56
Gambar 4. 11 Metalografi Single V Joint 65°	57
Gambar 4. 12 Hasil ImageJ Pada Single V Joint 65°	58
Gambar 4. 13 Pola untuk Penghitungan Intersep Single V Joint 65°	59
Gambar 4. 14 Metalografi Single V Joint 75°	60
Gambar 4. 15 Hasil ImageJ Pada Single V Joint 75°	61
Gambar 4. 16 Pola untuk Penghitungan Intersep Single V Joint 65°	62
Gambar 4. 17 Average Grain Area	63

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Spesifikasi Elektroda Terbungkus dari Baja Lunak	6
Tabel 2. 2 Standart Equivalent ASTM A36.....	8
Tabel 2. 3 Komposisi Kimia ASTM A36	8
Tabel 2. 4 Properti Mekanik ASTM A36	8
Tabel 2. 5 Kriteria Ketahanan Material Berdasarkan Laju Korosi	24
Tabel 3. 1 Tabel Spesifikasi ASTM A36.....	26
Tabel 3. 2 Parameter Pengelasan	29
Tabel 3. 3 Procedure Qualification Record (PQR)	29
Tabel 3. 4 Rencana Pengujian Laju Korosi	31
Tabel 3. 5 Rencana Pengujian Tarik	33
Tabel 3. 6 Rencana Pengujian Metalografi.....	33
Tabel 4. 1 Procedure Qualification Record (PQR)	36
Tabel 4. 2 Data Lebar dan Sudut HAZ	38
Tabel 4. 3 Diagram Tafel Base Metal Single V Joint 55°	40
Tabel 4. 4 Diagram Tafel Base Metal Single V Joint 65°	41
Tabel 4. 5 Diagram Tafel Base Metal Single V Joint 75°.....	42
Tabel 4. 6 Hasil Uji Korosi	43
Tabel 4. 7 Hasil Uji Tarik	47
Tabel 4. 8 Hasil Uji Tarik pada Patahan Base Metal	48
Tabel 4. 9 Hasil Uji Tarik Pada Patahan Weld Metal	49
Tabel 4. 10 Luas Sketsa Permukaan dan Luas Sketsa Cacat Las	52
Tabel 4. 11 Data perhitungan intercept weld metal single V joint 55°	56
Tabel 4. 12 Data perhitungan intercept weld metal single V joint 65°	59
Tabel 4. 13 Data perhitungan intercept weld metal single V joint 75°	62

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam perancangan manufaktur, penggabungan berbagai material dengan tingkat faktor efisiensi yang tinggi serta nilai ekonomis yang baik sangat diperlukan dalam prinsip aplikasi fabrikasi. Proses pengelasan berperan vital dalam semua bidang industri, terutama dalam industri konstruksi lepas pantai. Dalam perencanaan konstruksi lepas pantai, pengelasan diperlukan untuk penyambungan satu komponen ke komponen lainnya, terutama logam. Pengelasan adalah proses di mana bahan dari jenis atau kelas dasar yang sama disatukan sehingga menyebabkan material bergabung melalui pembentukan ikatan kimia primer dan/atau sekunder di bawah aksi gabungan panas dan tekanan (Messler, 2004).

Salah satu pengaplikasian dalam industri konstruksi lepas pantai adalah *subsea system*. *Subsea system* ini merupakan penggambaran istilah dimana suatu sistem sepenuhnya berada didasar laut dalam. Sistem ini akan membutuhkan jalur pipa untuk mencapai titik yang tidak dijangkau oleh jalur pipa yang telah ada sebelumnya. Pengumpulan beberapa jalur pipa ini kemudian diteruskan dalam satu jalur berbeda yang membutuhkan teknologi bernama *manifold*. Salah satu jenis *manifold* yaitu *Pipeline End Manifold (PLEM)*, dimana membutuhkan proses penyambungan pelat baja karbon melalui pengelasan untuk menciptakan struktur komponen dengan berbagai macam fungsi.

Komponen – komponen dalam konstruksi lepas pantai sangat rentan terhadap kerusakan akibat korosi yang disebabkan oleh air laut. Fenomena ini terjadi secara alami dan juga tidak dapat dihindarkan. Korosi sangat mempengaruhi umur rata – rata konstruksi bangunan lepas pantai industri minyak dan gas. Korosi ini sering merusak kekuatan bangunan sehingga perlu adanya reparasi atau penggantian *jacket/modul* ketika konstruksi bangunan sudah dinilai beresiko. Kegagalan ini harus dihindari untuk meminimalisir terjadinya dampak kerugian yang fatal dalam dunia konstruksi lepas pantai.

Kemampuan ketahanan korosi dalam penyambungan pelat baja karbon melalui pengelasan menjadi salah satu faktor dalam menghasilkan sambungan yang optimal. Kampuh akan menampung bahan pengisi yang mencair akibat energi panas sehingga merekat ke *base metal*. Variasi bentuk kampuh akan mempengaruhi kekuatan dan laju korosi pada hasil pengelasan. Pertimbangan pemilihan kampuh ini berdasarkan pada kemampuan sambungan dalam menerima beban statis maupun dinamis. Penggunaan jenis kampuh V dengan pemilihan sudut yang tepat akan mempengaruhi hasil pengelasan serta dapat menjaga kemungkinan terjadinya distorsi yang dihasilkan akibat tegangan sisa. Kemungkinan terjadinya distorsi sudut dapat dicegah dengan penggunaan jig pada saat pengelasan berlangsung, namun pemakaian jig dapat meningkatkan *internal stress* pada hasil lasan. Pembentukan *internal stress* tersebut akan mempengaruhi tingkat korosi pada suatu pengelasan.

Sebelumnya telah dilakukan penelitian oleh Fridayan (2017) tentang analisis pengaruh variasi *heat input* dan bentuk kampuh pada pengelasan SMAW terhadap sifat mekanik dan laju

korosi pada weld joint pelat baja A36 di lingkungan laut. Maka dari itu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh sudut *single V joint* terhadap laju korosi, kekuatan tarik dan struktur mikro pelat baja A36 dengan pengelasan SMAW menggunakan elektroda E7018 pada lingkungan laut.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana pengaruh variasi sudut *single V joint* terhadap laju korosi pelat baja A36 pada lingkungan laut?
2. Bagaimana pengaruh variasi sudut *single V joint* terhadap kekuatan tarik pelat baja A36?
3. Bagaimana pengaruh variasi sudut *single V joint* terhadap struktur mikro pelat baja A36?

1.3 Batasan Masalah

Agar dapat memfokuskan pokok permasalahan tugas akhir ini, maka perlu adanya batasan masalah pengujian sebagai berikut:

1. Jenis material yang digunakan adalah pelat baja ASTM A36 dengan ukuran pelat 200 mm x 120 mm x 12 mm.
2. Proses pengelasan menggunakan metode SMAW dengan elektroda E7018 Ø3,2 mm.
3. Bentuk kampuh yang digunakan adalah *single V joint* dengan variasi sudut sebesar 55°, 65° dan 75°.
4. Penetapan arus sebesar 120A.
5. Posisi pengelasan adalah 1G.
6. Pengelasan dilakukan tanpa *pre-heating* dan *post-heating*.
7. Dilakukan pengujian korosi dengan metode sel tiga elektroda pada *weld metal*, *heat affected zone (HAZ)* dan *base metal*.
8. Uji korosi dengan salinitas NaCl 3,5%.

1.4 Tujuan

1. Mengetahui pengaruh variasi sudut *single V joint* terhadap laju korosi pelat baja A36 pada lingkungan laut.
2. Mengetahui pengaruh variasi sudut *single V joint* terhadap kekuatan tarik pelat baja A36.
3. Mengetahui pengaruh variasi sudut *single V joint* terhadap struktur mikro pelat baja A36.

1.5 Manfaat

Dari penelitian ini diharapkan dapat mengetahui pengaruh variasi sudut *single V joint* terhadap laju korosi pelat baja A36 pada lingkungan laut. Sehingga dari penelitian ini dapat diketahui sudut *single V joint* yang optimal pada pengelasan SMAW material pelat baja ASTM A36 untuk konstruksi bangunan lepas pantai.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Hasil Penelitian Terdahulu

Berdasarkan studi literatur, diperoleh penelitian sebelumnya oleh Fridayan (2017) berjudul “Analisis Pengaruh Variasi *Heat Input* dan Bentuk Kampuh pada Pengelasan SMAW *Weld Joint* Pelat Baja A36 Terhadap Sifat Mekanik dan Ketahanan Korosi di Lingkungan Laut”. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui sifat mekanik dan ketahanan korosi dengan variasi *heat input* dan bentuk kampuh. Variasi *heat input* yang digunakan sebesar 25 kJ/mm, 34 kJ/mm dan 57 kJ/mm dengan variasi bentuk kampuh yaitu *single V*, U dan *double V*. Material baja A36 dengan ketebalan 10 mm dilakukan pengelasan dengan elektroda E7018 Ø3,2 mm. Pengujian yang dilakukan adalah uji tarik, uji mikro, uji kekerasan dan uji korosi.

Spesimen kampuh V dengan *heat input* 25 kJ/mm memiliki nilai *ultimate strength*, kekerasan dan laju korosi masing – masing sebesar 509,15 MPa, 178 HVN, 0,8 mm/year. *Heat input* 34 kJ/mm menghasilkan nilai *ultimate strength*, kekerasan dan laju korosi sebesar 479,12 MPa, 186,6 HVN dan 0,4 mm/year. *Heat input* 57 kJ/mm menghasilkan nilai *ultimate strength*, kekerasan dan laju korosi sebesar 494,74 MPa, 152,67 HVN dan 0,87 mm/year.

Spesimen kampuh U dengan *heat input* 25 kJ/mm memiliki nilai *ultimate strength*, kekerasan dan laju korosi masing – masing sebesar 474,2 MPa, 180,33 HVN, dan 1,32 mm/year. *Heat input* 34 kJ/mm menghasilkan nilai *ultimate strength*, kekerasan dan laju korosi sebesar 510,18 MPa, 181,67 HVN dan 0,78 mm/year. *Heat input* 57 kJ/mm menghasilkan nilai *ultimate strength*, kekerasan dan laju korosi sebesar 513,33 MPa, 187,33 HVN dan 0,87 mm/year.

Spesimen kampuh *double V* dengan *heat input* 25 kJ/mm memiliki nilai *ultimate strength*, kekerasan dan laju korosi masing – masing sebesar 501,89 MPa, 164,33 HVN, dan 0,59 mm/year. *Heat input* 34 kJ/mm menghasilkan nilai *ultimate strength*, kekerasan dan laju korosi sebesar 527,48 MPa, 192,33 HVN dan 0,33 mm/year. *Heat input* 57 kJ/mm menghasilkan nilai *ultimate strength*, kekerasan dan laju korosi sebesar 489,02 MPa, 149,67 HVN dan 0,61 mm/year.

Berdasarkan penelitian tersebut, terdapat kekurangan karena tidak adanya data laju korosi yang optimal pada sudut *single V joint*. Oleh karena itu, dibutuhkan penelitian lebih lanjut tentang pengaruh sudut *single v joint* terhadap laju korosi, kekuatan tarik dan struktur mikro pelat baja A36 dengan pengelasan SMAW menggunakan elektroda E7018 pada lingkungan laut.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Pengelasan

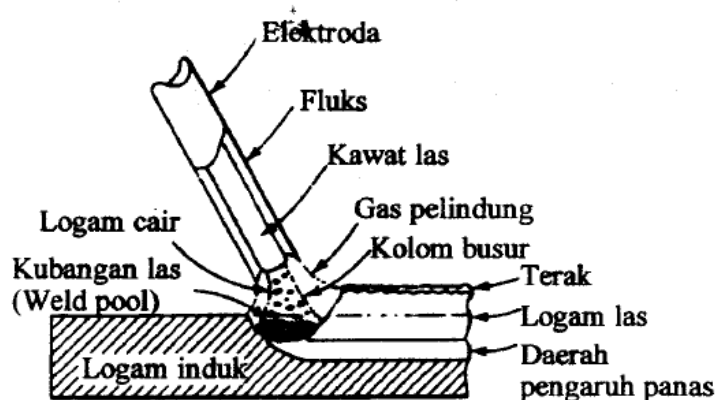
Pengelasan adalah proses di mana bahan dari jenis atau kelas dasar yang sama disatukan sehingga menyebabkan material bergabung melalui pembentukan ikatan kimia primer dan/atau sekunder di bawah aksi gabungan panas dan tekanan (Messler, 2004). Karena

proses tersebut, maka terjadi siklus termal cepat pada daerah sekitar pengelasan yang menyebabkan perubahan metalurgi. Proses pengelasan berperan vital dalam semua bidang industri, terutama dalam industri konstruksi lepas pantai, kapal, perpipaan dan yang lainnya.

2.2.2 Shielded Metal Arc Welding (SMAW)

Shielded Metal Arc Welding (SMAW) adalah proses pengelasan dalam peleburan cepat logam yang dihasilkan oleh kekencangan busur listrik yang dipertahankan antara ujung elektroda habis pakai dan permukaan logam dasar pada sambungan yang dilas. Ini adalah proses las busur yang paling umum digunakan, peralatannya cepat, tukang las memiliki lebih banyak kebebasan bergerak, dan dimungkinkan untuk mengelas berbagai macam logam hanya dengan menjepit jenis elektroda. (Khan, 2007).

Jenis pengelasan ini dilakukan dengan menggunakan suatu logam pengisi yang terbungkus oleh fluks. Ketika ujung elektroda yang beraliran listrik menyentuh logam induk, proses pemanasan terjadi dikarenakan timbulnya lompatan ion listrik antara katoda dengan anoda. Panas tersebut akan mencairkan elektroda dan *base metal* sehingga menyatu membentuk logam lasan. Lapisan pembungkus elektroda ini membantu busur las dalam menyediakan gas pelindung beserta slag untuk melindungi cairan las dari kontaminasi. Sedangkan pada inti elektroda merupakan logam sebagai bahan tambahan. Setelah fluks cair membeku, terjadi proses pembentukan terak yang akan menutupi lubang las. Gambar 2.1 adalah skema proses SMAW.



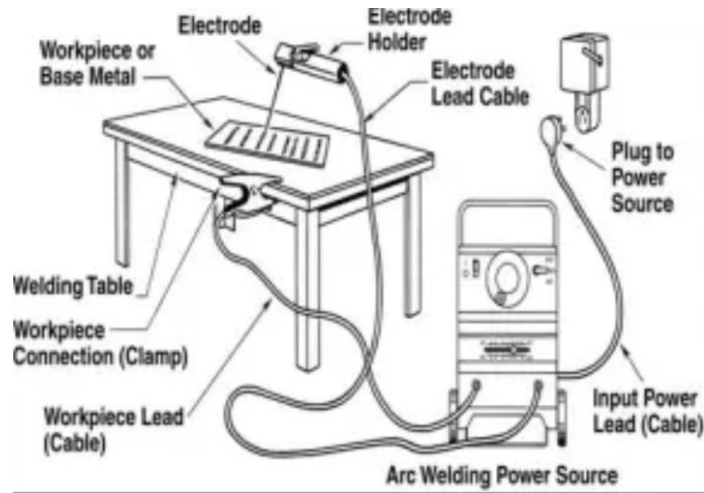
Gambar 2. 1 Skema Proses SMAW

(Sonawan & Suratman, 2006)

Polaritas menjadi parameter penting pada saat proses pengelasan berjalan dalam menentukan kekuatan dan kualitas lasan. Jika pemilihan polaritas salah, masalah pada pengelasan dapat muncul seperti penetrasi yang tidak efektif, hilangnya kendali busur las, dan yang lainnya. *Direct Current Reverse Polarity* (DCEP), *Direct Current Straight Polarity* (DCEN), dan *Alternating Current* (AC) merupakan tiga jenis polaritas pada pengelasan.

Polaritas lurus (DCEN) dapat digunakan jika titik cair bahan induk tinggi dengan kapasitas besar, sehingga *electrode holder* dihubungkan dengan kutub negatif sedangkan

logam induk dihubungkan dengan kutub positif. Polaritas terbalik (DCEP) digunakan jika titik cair pada bahan induk rendah dengan kapasitas kecil, sehingga *electrode holder* dihubungkan dengan kutub positif sedangkan logam induk dihubungkan dengan kutub negatif. Gambar 2.2 menunjukkan rangkaian mesin las SMAW.



Gambar 2. 2 Rangkaian Mesin Las SMAW

(EduEngineering, 2015)

2.2.3 Elektroda

Elektroda adalah substansi utama pada pengelasan busur yang berfungsi dalam mengalirkan listrik dari sumber listrik agar logam induk dapat mencair. Elektroda terdiri dari dua jenis yaitu elektroda karbon dan logam. Elektroda logam berfungsi sebagai pengisi pada saat proses pengelasan berlangsung. Elektroda karbon dan logam ini juga dibagi menjadi dua jenis yaitu elektroda yang terbungkus fluks dan yang tidak terbungkus fluks. Lapisan fluks berfungsi sebagai sumber terak / gas yang bisa melindungi logam cair dari kontaminasi. Terak pelindung ini dapat meminimalisir tingkat kerapuhan logam las akibat adanya pendinginan cepat.

Berdasarkan jenis fluks, arus yang dibutuhkan dan posisi las menjadi acuan standarisasi elektroda. Standar yang sering digunakan dalam dunia industri adalah *American Welding Society (AWS)* dan juga *Japan Industrial Standard (JIS)*. Pada pengklasifikasian standarisasi ini disimbolkan pada suatu kode pada setiap elektroda. Sebagai contoh, elektroda E7018 dapat dijelaskan sebagai berikut:

E : elektroda busur listrik

XX: dua angka setelah E dinyatakan sebagai kekuatan tarik elektroda (ksi)

X : angka ketiga menyatakan posisi pengelasan. Dengan penjabaran sebagai berikut:

- Angka 1 dinyatakan sebagai pengelasan segala posisi
- Angka 2 dinyatakan sebagai pengelasan posisi datar dan di bawah tangan
- Angka 3 dinyatakan sebagai pengelasan posisi dibawah tangan

X : angka keempat dinyatakan sebagai jenis arus yang sesuai pada saat proses pengelasan.

Penelitian ini menggunakan elektroda E7018 terbungkus fluks serbuk besi dengan tipe hidrogen rendah yang biasanya digunakan pada pengelasan baja dengan kelas uji tarik yang tinggi sesuai dengan spesifikasi AWS E7018. Performa elektroda ini dapat diaplikasikan pada semua posisi dengan jenis arus AC maupun DC. Sebagai acuan, tabel 2.1 dibawah ini merupakan tabel spesifikasi elektroda terbungkus baja karbon rendah berdasarkan klasifikasinya.

Tabel 2. 1 Spesifikasi Elektroda Terbungkus dari Baja Lunak
(Wiryosumarto & Okumura, 2000)

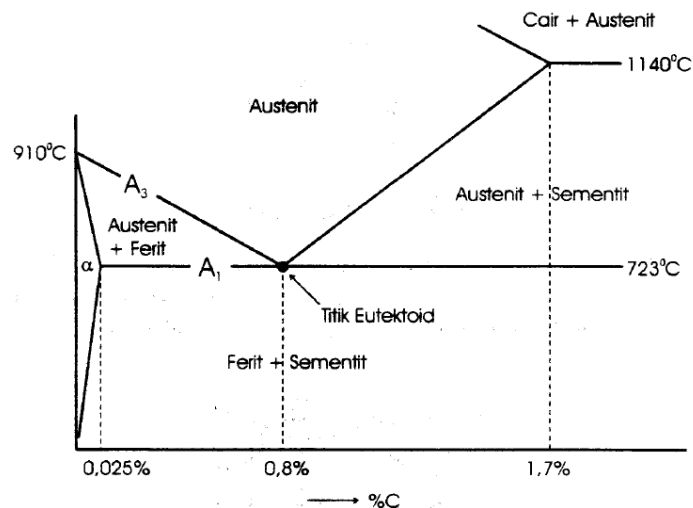
Klasifikasi AWS - ASTM	Jenis Fluks	Posisi Pengelasan *)	Jenis Listrik	Kekuatan Tarik (kgm/mm ²)	Kekuatan Luluh (kgm/mm ²)	Perpanjangan (%)
Kekuatan tarik terendah kelompok E70 setelah dilaskan adalah 70.00 psi atau 49.2 kg/mm ²						
E7014	Serbuk besi, titania	F, V, OH, H	AC / polaritas ganda	50,6	42,2	17
E7015	Natium hidrogen rendah	F, V, OH, H	DC polaritas balik			22
E7016	Kalium hidrogen rendah	F, V, OH, H	AC / DC polaritas balik			22
E7018	Serbuk besi, hidrogen rendah	F, V, OH, H	AC / DC polaritas balik			22
E7024	Serbuk besi, titania	H-S, F	AC / DC polaritas ganda			17
E7028	Serbuk besi, hidrogen rendah	H-S, F	AC / DC polaritas balik			22
*) Arti Simbol: F = datar, V = vertical, OH = Overhead, H = Horizontal, H-S = Horizontal las sudut						

2.2.4 Baja

Baja merupakan jenis paduan logam besi yang menjadi unsur dasar dan karbon sebagai paduan utamanya. Baja mengandung karbon antara 0,05 – 1,7% berat. Penambahan unsur karbon (C) mampu meningkatkan sifat material.

Berdasarkan komposisi kimia penyusunnya, baja dibagi menjadi baja karbon dan baja paduan. Unsur pembentuk baja karbon adalah besi dan karbon. Tetapi baja karbon juga mengandung unsur lain seperti mangan, fosfor, belerang dan silikon pada saat proses pembuatannya. Unsur – unsur tersebut dikomposisikan hingga persentase unsur tersebut tidak mempengaruhi sifat baja. Sedangkan pada baja paduan, unsur paduan ditambahkan dengan persentase kadar secukupnya untuk memperoleh sifat baja yang diinginkan.

Baja karbon diklasifikasikan menjadi baja karbon rendah (*low carbon steel* atau *mild steel*), baja karbon sedang (*medium carbon steel*) dan baja karbon tinggi (*high carbon steel*). Pengklasifikasian ini berdasarkan pada banyaknya persentase kadar karbon yang ditambahkan pada pembuatan baja. Kadar karbon tersebut sangat mempengaruhi struktur mikro pada saat baja ditempa perlakuan panas yang mengacu pada diagram keseimbangan Fe-Fe₃C. Gambar 2.3 akan tercantum sebagai penjelasan diagram fasa Fe-Fe₃C.



Gambar 2.3 Diagram Fasa Kesetimbangan Fe-Fe₃C

(Sonawan & Suratman, 2006)

Baja karbon rendah memiliki kandungan karbon 0,05-0,3% berat (wt%). Jenis baja ini memiliki kekuatan tarik antara 60.000 – 80.000 psi dengan kekuatan luluh 40.000 psi. Baja ini terdiri dari struktur *ferrite* dengan sedikit *pearlite* yang menghasilkan karakteristik sifat mekanik yang lunak, mudah dibending, serta memiliki keuletan yang tinggi. Untuk kekuatan jenis material ini relatif rendah sehingga pengaplikasiannya digunakan sebagai rangka bangunan, beton, kendaraan dan lain sebagainya.

Baja karbon sedang merupakan baja karbon yang memiliki persentase kadar 0,3-0,7% berat (wt%). Struktur baja karbon ini terdiri dari *ferrite* dan *pearlite* yang cukup banyak sehingga memiliki kekuatan yang lebih baik daripada baja karbon rendah. Kekurangan dari

jenis baja ini adalah memiliki sifat keuletan menurun sehingga membuat material menjadi lebih getas. Pengaplikasian baja karbon sedang biasanya digunakan sebagai poros, engkol, dan lain sebagainya.

Baja karbon tinggi merupakan baja karbon yang memiliki kadar presentasi berat lebih dari 0,7%. Unsur karbon yang sangat tinggi ini membuat kekuatan meningkat, namun material menjadi getas daripada jenis karbon lainnya. Pengaplikasian baja ini biasanya digunakan untuk perkakas yang membutuhkan kekuatan yang tinggi seperti alat pemotong, mata bor, dan lain sebagainya.

Baja ASTM A36 termasuk ke dalam kategori baja karbon rendah yang memiliki kandungan 0,1% - 0,3% wt. Pelat karbon A36 adalah standar Amerika yang ditentukan dalam ASTM A36. Standar yang digunakan ini sangat sering digunakan untuk struktur konstruksi dalam dunia industri dikarenakan material ini memiliki sifat karbon canai panas, kekuatan luluh minimum 36k psi, dan sangat bagus untuk ditempa berbagai perlakuan panas.

Tabel 2. 2 Standart Equivalent ASTM A36

(ASTM International, 2005)

ASTM/ASME	JIS	DIN/BS	GB
A36	JIS G3101 SS330	EN10025 S185	GB700 Q235

Tabel 2. 3 Komposisi Kimia ASTM A36

(ASTM International, 2005)

C	Si	Mn	P	S
≤0,25	≤0,40	≤0,80 – 1,20	≤0,04	≤0,05

Tabel 2. 4 Properti Mekanik ASTM A36

(ASTM International, 2005)

Tensile Strength, Ultimate ksi [MPa]	Tensile Strength, Yield Min, ksi [MPa]	Elongation 2in. [50mm], mnt, %
50-80 [400-550]	36 [250]	23

2.2.5 Heat Input

Heat input adalah masukan panas sebagai sumber energi saat pengelasan yang merupakan hasil dari tegangan, arus dan kecepatan pengelasan. Hubungan ketiganya menghasilkan energi las yang akan mempengaruhi hasil pengelasan. *Heat input* akan mempengaruhi laju pendinginan las yang nantinya akan berakibat pada struktur mikro pada

hasil las. *Heat input* yang tinggi menyebabkan terjadinya distorsi yang besar akibat meningkatnya tegangan sisa pada pengelasan.

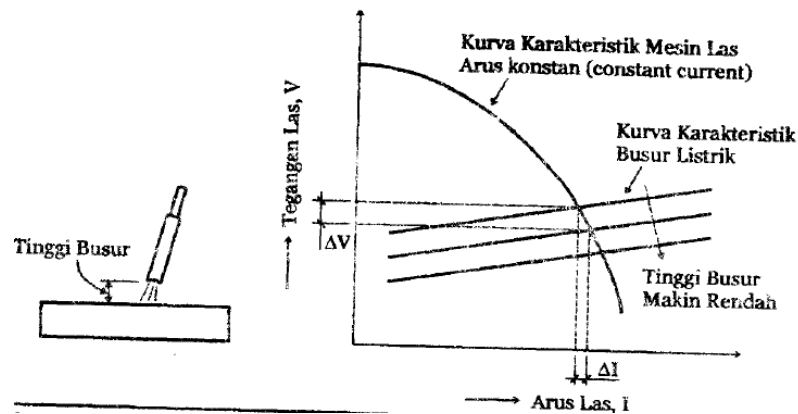
Hubungan parameter *heat input* antara arus, tegangan dan kecepatan pengelasan dirumuskan sebagai berikut:

$$HI \text{ (Heat Input)} = \frac{\text{Tegangan} \times \text{Arus}}{\text{Kecepatan Pengelasan}} \eta$$

Jika menginginkan masukan panas yang tinggi, maka parameter yang dapat diatur adalah memperbesar arus atau memperlambat kecepatan pengelasan. Tegangan las secara umum tidak dapat diatur, tetapi memiliki pengaruh terhadap masukan panas.

Arus mempengaruhi dilusi atau pencampuran material. Semakin besar arus las maka semakin besar dilusi yang notabenehnya makin banyak bagian *base metal* yang mencair. Diameter elektroda juga mempengaruhi besarnya arus. Semakin besar elektroda maka semakin tinggi arus yang digunakan dalam mencairkan elektroda. (Sonawan & Suratman, 2006).

Penempatan ketinggian busur juga mempengaruhi arus dan tegangan. Jika pada saat pengelasan terjadi kenaikan tinggi busur maka tegangan akan merangkak naik dan arus las menurun. Kenaikan tegangan akan berlanjut jika tinggi busur semakin besar dan pada akhirnya busur listrik mati (Sonawan & Suratman, 2006). Gambar 2.4 menunjukkan kurva karakteristik mesin las dan busur listrik.



Gambar 2. 4 Kurva Karakteristik Mesin Las dan Busur Listrik

(Sonawan & Suratman, 2006)

2.2.6 Sambungan Las

Sambungan las merupakan sambungan antara dua logam dengan cara pemanasan. Sambungan dapat terjadi akibat logam dalam keadaan plastis atau meleleh. Terdapat beberapa tipe sambungan pada pengelasan, yaitu *butt joint*, *corner joint*, *lap joint*, *tee joint*, dan *edge joint*.

Sambungan *butt joint* merupakan sambungan yang posisi kedua benda kerjanya terletak di bidang yang sama sehingga penyambungan dilakukan di ujung kedua benda yang saling berdekatan ini. Sambungan sebidang biasanya digunakan untuk menyambung kedua ujung pelat datar yang mempunyai tingkat ketebalan yang sama atau hampir sama.

Bentuk alur sambungan *butt joint* sangat mempengaruhi efisiensi sambungan. Pada dasarnya pemilihan alur harus mengacu pada masukan panas dan penurunan logam las sampai kepada harga terendah yang tidak menurunkan mutu sambungan. Bentuk yang telah menjadi standar pada umumnya hanya meliputi pelaksanaan pengelasan yang sering dilakukan, sehingga dalam pengelasan bentuk alur harus ditentukan berdasarkan pengalaman. (Wiryosumarto & Okumura, 2000)

Jenis lasan Jenis alur	Lasan dengan alur		
	Lasan Penetrasi penuh tanpa pelat penahan	Lasan penetrasi penuh dengan pelat penahan	Lasan penetrasi sebagian
Persegi (I)			
V tunggal (V)			
Tirus tunggal (V)			
U tunggal (U)		—	
V ganda (X)		—	
Tirus ganda (K)		—	
U ganda (H) (DU)		—	
J tunggal (J)		—	
J ganda (DJ)		—	

Gambar 2. 5 Alur Butt Joint

(Wiryosumarto & Okumura, 2000)

Menurut edisi terbaru standar AWS D1.1 yang dirilis pada tahun 2020, telah ditetapkan bahwa ada batasan yang mengatur sudut *single V joint* yang diperbolehkan dalam proses pengelasan. Sesuai dengan spesifikasi tersebut, sudut *groove* yang diterima dapat memiliki nilai 60° dengan toleransi tambahan sebesar $+10^\circ$. Dalam konteks ini, toleransi tersebut diberikan untuk mempertimbangkan kemungkinan variasi sudut *groove* yang dapat terjadi selama proses pengelasan. Dengan adanya toleransi ini, memungkinkan keberagaman

dalam sudut *groove* yang diterima, asalkan tetap berada dalam kisaran antara 60° hingga 70° sesuai dengan batas yang telah ditetapkan.

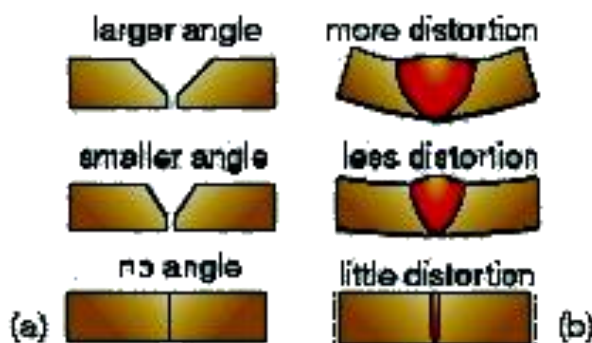
Single-V-groove weld (2)
Butt joint (B)

Welding Process	Joint Designation	Base Metal Thickness (U – unlimited)		Groove Preparation		Allowed Welding Positions	Gas Shielding for FCAW	Notes	
		T ₁	T ₂	Root Opening Root Face Groove Angle	Tolerances				
					As Detailed (see 5.4.1.1)				As Fit-Up (see 5.4.1.8)
SMAW	B-U2	U	—	R = 0 to 1/8 f = 0 to 1/8 $\alpha = 60^\circ$	+1/16, -0 +1/16, -0 +10°, -0°	+1/16, -1/8 Not limited +10°, -5°	All	—	d, e, j
GMAW FCAW	B-U2-GF	U	—	R = 0 to 1/8 f = 0 to 1/8 $\alpha = 60^\circ$	+1/16, -0 +1/16, -0 +10°, -0°	+1/16, -1/8 Not limited +10°, -5°	All	Not required	a, d, j
SAW	B-L2c-S	Over 1/2 to 1	—	R = 0 f = 1/4 max. $\alpha = 60^\circ$	R = ± 0 f = +0, -f $\alpha = +10^\circ,$ -0°	+1/16, -0 $\pm 1/16$ +10°, -5°	F	—	d, j
		Over 1 to 1-1/2	—	R = 0 f = 1/2 max. $\alpha = 60^\circ$					
		Over 1-1/2 to 2	—	R = 0 f = 5/8 max. $\alpha = 60^\circ$					

Gambar 2. 6 Standar Kampuh *Single V Joint*

(American Welding Society, 2020)

Variasi sudut pada *single V joint* memiliki korelasi dengan distorsi pada pengelasan. Semakin besar derajat sudut kampuh, maka semakin besar kemungkinan nilai distorsi yang dihasilkan. Hal tersebut dipengaruhi dari deposit bahan tambah terhadap material. Semakin besar deposit bahan tambah maka semakin besar nilai distorsi yang dihasilkan. (Aditia Siregar et al., n.d.)



Gambar 2. 7 Distorsi Pada Pengelasan

(Kou, 2002)

Karena penyusutan pematatan dan kontraksi termal logam las selama pengelasan, benda kerja memiliki kecenderungan untuk terdistorsi. Lasan cenderung lebih lebar di bagian atas daripada di bagian bawah, menyebabkan lebih banyak penyusutan pematatan dan kontraksi termal di bagian atas benda kerja las daripada di bagian bawah. Akibatnya,

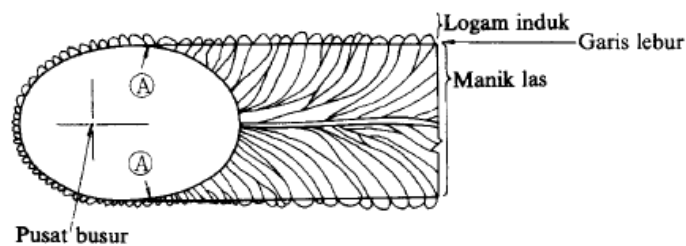
distorsi sudut yang dihasilkan adalah ke atas. Mengurangi volume logam las dapat mengurangi jumlah distorsi sudut dan penyusutan lateral. (Kou, 2002)

Dalam kasus ini, beberapa logam dilengkungan tertentu dapat terkorosi dengan cepat jika berhubungan dengan tegangan tarik, yaitu *stress corrosion cracking* (SCC). Sambungan dalam kondisi las yang mengandung tegangan sisa akan mengalami serangan korosi yang berlebihan. (Khan, 2007)

2.2.7 Tegangan Sisa

Setiap titik pada daerah pengelasan mengalami tingkat pemanasan yang berbeda sehingga menyebabkan tingkat pendinginan juga berbeda. Struktur mikro pada setiap daerah memiliki karakteristik yang berbeda tergantung pada laju pendinginan yang dialami oleh material hasil pengelasan. (Sonawan & Suratman, 2006)

Daerah pengelasan terdiri dari 3 bagian, yaitu *base metal*, *heat affected zone* (HAZ) dan *weld metal*. Secara skematik, proses pertumbuhan kristal logam las berbentuk pilar yang tumbuh searah dengan sumber panas dan menjadi garis lebur. Pada garis lebur, sebagian *base metal* mencair dan selama proses pembekuan logam tumbuh pada butir – butir logam induk dengan sumbu kristal yang sama. (Wiryosumarto & Okumura, 2000)



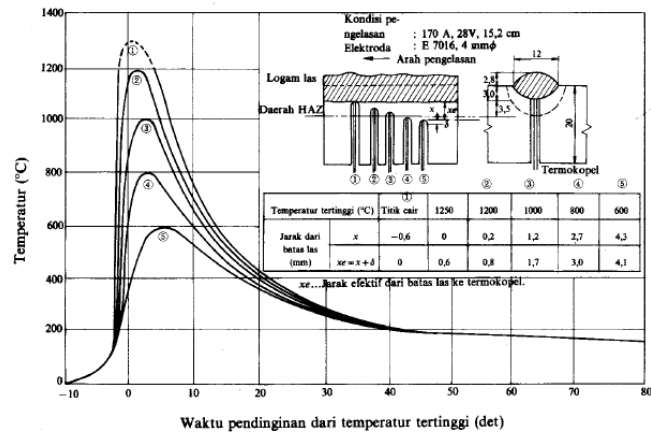
Gambar 2. 8 Arah Pembekuan Logam Las

(Wiryosumarto & Okumura, 2000)

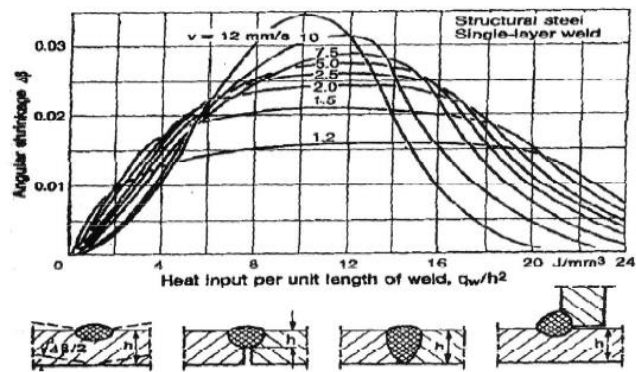
Didalam logam las terdapat tiga pemisahan, yaitu makro, gelombang dan mikro. Pemisahan makro merupakan perubahan perlahan komponen yang terjadi mulai dari garis lebur menuju ke sumbu las. Pemisahan gelombang merupakan perubahan komponen dikarenakan adanya pembekuan yang terputus pada saat proses pembentukan gelombang manik las. Sementara pemisahan mikro merupakan perubahan komponen yang terjadi dalam satu pilar atau dalam bagian dari satu pilar. (Wiryosumarto & Okumura, 2000)

Lubang halus pada pengelasan disebabkan karena adanya gas yang tidak larut dalam logam padat. Lubang tersebut bisa disebabkan karena tiga acara, yang pertama adalah pelepasan gas dikarenakan adanya perbedaan batas kelarutan antara logam cair dan logam padat pada suhu pembekuan, yang kedua adalah terbentuknya gas karena adanya reaksi kimia, dan yang ketiga disebabkan karena penyusutan gas ke dalam atmosfer busur. (Wiryosumarto & Okumura, 2000)

Lamanya proses pendinginan pada suatu daerah temperatur pada siklus termal las sangat mempengaruhi kualitas sambungan. Gambar 2.9 menunjukkan siklus termal daerah lasan dari las busur listrik dengan elektroda terbungkus

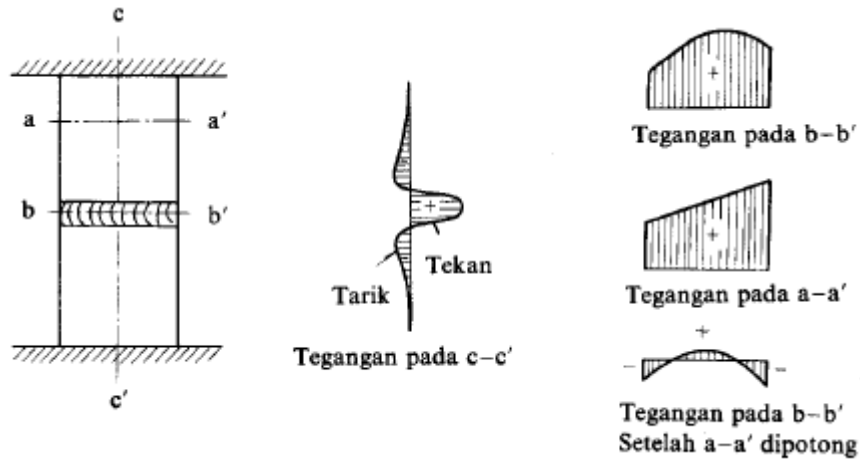


Gambar 2. 9 Siklus Termal Daerah Lasan
 (Wiryosumarto & Okumura, 2000)



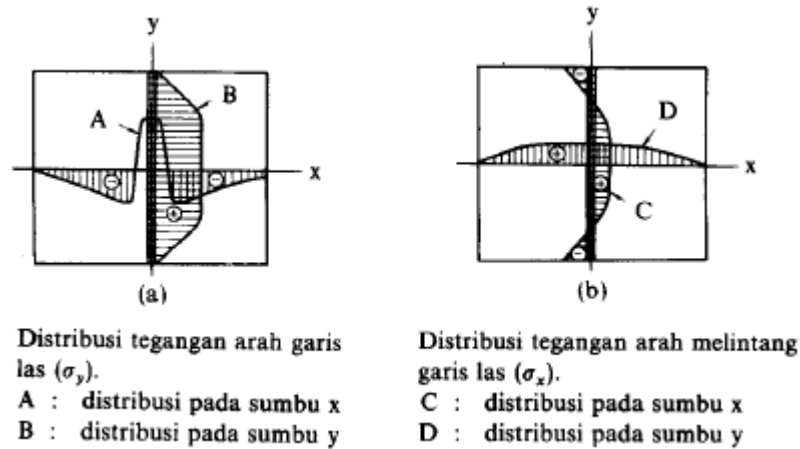
Gambar 2. 10 Distribusi Angular pada Las.
 (Wiryosumarto & Okumura, 2000)

Pada lasan konstruksi bebas akan terjadi tegangan tarik dengan arah memanjang pada sekitar garis las dan tegangan tekan pada jarak yang sedikit lebih jauh lagi yang seimbang antara satu sama lain. Hal – hal yang berpengaruh terhadap pembentukan tegangan sisa adalah batas transformasi dan batas luluh bahan, suhu pemanasan yang tinggi, kecepatan pendinginan, tahanan luar dan pemanasan mula. Faktor ini sangat berkaitan antara satu dengan lainnya, karena itu dalam mengatur dan mengawasi terjadinya tegangan sisa semuanya harus diperhatikan. (Wiryosumarto & Okumura, 2000)



Gambar 2. 11 Tegangan Sisa Karena Penahan Luar pada Butt Joint
(Wiryosumarto & Okumura, 2000)

Distribusi tegangan sisa tergantung dari jenis dan bentuk lasan. Dalam las *butt joint*, tegangan sisa dengan arah memanjang akan mencapai batas kekuatan luluh pada garis las dan kemudian akan menurun dan mencapai nol pada ujung pelat. Sedangkan pada arah melintang garis las terjadi keseimbangan antara tegangan tarik dan tekan seperti pada gambar 2.11.

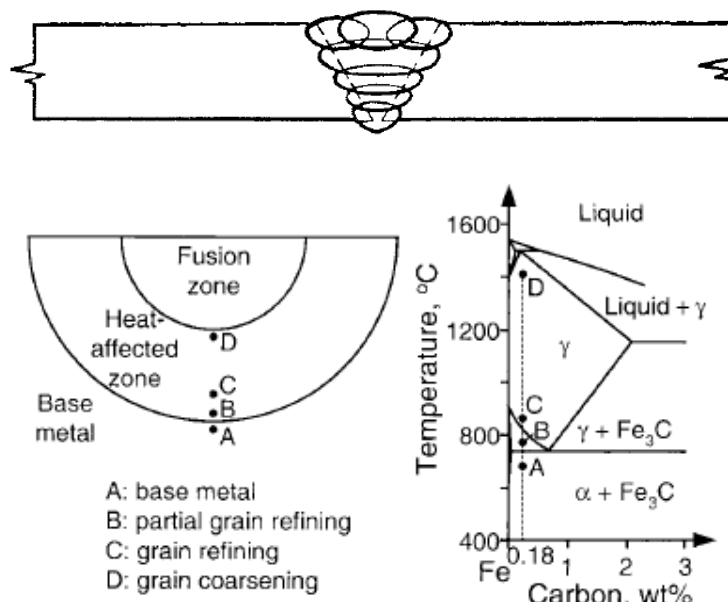


Gambar 2. 12 Skema Distribusi Tegangan Sisa dalam Sambungan Butt Joint
(Wiryosumarto & Okumura, 2000)

Di daerah yang agak jauh dari sumber panas, tegangan bersifat tekanan (σ_x negatif) karena perluasan daerah ini dibatasi oleh logam sekitarnya yang memiliki suhu lebih rendah. Karena kekuatan luluh rendah dari logam pada suhu tinggi di daerah-daerah ini, σ_x mencapai kekuatan luluh dari logam dasar pada suhu yang sesuai. Di daerah yang lebih jauh dari pengelasan, σ_x bersifat tarik, dan σ_x seimbang dengan tegangan tekanan di daerah dekat pengelasan. Logam las dan logam dasar yang berdekatan telah mendingin dan menyusut lebih jauh, sehingga menghasilkan tegangan tarik yang lebih tinggi di daerah dekat pengelasan dan tegangan tekanan di daerah yang jauh dari pengelasan.

2.2.8 Multipass

Pengelasan *multipass* adalah suatu metode pengelasan yang melibatkan penerapan beberapa lintasan las pada satu sambungan. Dalam metode ini, setiap lintasan las diterapkan secara bertahap dan dibiarkan mendingin sebelum lintasan berikutnya ditambahkan. Pendekatan ini melibatkan penggunaan lebih banyak logam las, yang menghasilkan sambungan yang memiliki kekuatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan pengelasan tunggal. Namun, karena suhu yang tinggi terlibat dalam proses ini, zona pengaruh panas yang terbentuk juga menjadi lebih besar, yang pada gilirannya dapat menyebabkan penurunan kekuatan sambungan. Setiap lintasan las yang ditambahkan dalam pengelasan *multipass* memiliki peran dan tujuan spesifik, seperti *root pass*, *cap pass*, *hot pass*, *fill pass*, dan sebagainya, yang masing-masing berkontribusi dalam mencapai hasil akhir yang diinginkan dari proses pengelasan tersebut.



Gambar 2. 13 Metode Multipass

(Kou, 2002)

Mikrostruktur HAZ dapat dibagi menjadi tiga wilayah utama: *partial grain-refining*, *grain-refining*, dan *grain-coarsening regions* (posisi B-D). Suhu puncak pada posisi-posisi tersebut ditunjukkan dalam diagram fasa. Penyusutan butir dekat batas fusi menghasilkan butir kolom kasar di zona fusi yang jauh lebih besar dari butir HAZ secara rata-rata. Dalam pengelasan berulang-ulang / *multipass* baja, HAZ (Heat-Affected Zone) dari pengelasan berikutnya dapat menggantikan zona fusi dari pengelasan sebelumnya. Dilaporkan bahwa pemadatan butir zona fusi yang kasar melalui pengelasan berulang-ulang / *multipass* dapat meningkatkan ketangguhan logam las. (Kou, 2002)

Pengelasan berulang-ulang dapat menyebabkan pemadatan butir zona fusi dan HAZ. Pemanasan ulang daerah yang telah terpengaruh panas sebelumnya menyebabkan pembentukan butir logam yang lebih kecil dan lebih halus saat proses pendinginan. Hal ini

disebabkan oleh perubahan struktur mikro yang terjadi selama siklus pemanasan dan pendinginan berulang, menghasilkan butir logam yang lebih halus. Pemadatan butir zona fusi dan HAZ menjadi penting karena struktur butir yang lebih halus memiliki sifat mekanik yang lebih baik dalam hal ketangguhan. Struktur butir yang lebih halus memiliki batas butir yang lebih banyak, yang dapat menghambat perambatan retakan dan memberikan resistensi yang lebih baik terhadap kegagalan pada daerah las maupun HAZ. Sebagai hasilnya, ketika proses pengelasan berulang-ulang atau multipass dilakukan dengan benar dan menghasilkan pemadatan butir zona fusi yang kasar, logam las dapat mengalami peningkatan ketangguhan dan performa yang lebih baik.

2.2.9 Korosi

Korosi didefinisikan sebagai penghancuran atau kerusakan material karena reaksi dengan lingkungan. Beberapa bersikeras bahwa definisi harus dibatasi untuk logam, tetapi seringkali insinyur korosi harus mempertimbangkan logam dan bukan logam untuk solusi dari masalah yang diberikan. (Fontana, 1987). Korosi ini dapat diterjemahkan menjadi bentuk penghancuran ataupun kerusakan material sebagai bentuk penurunan kualitas suatu material akibat reaksi logam yang mengalami kontak dengan oksigen.

Korosi membuat sifat dan kualitas material lebih rendah daripada material yang tidak terkorosi. Lingkungan korosif ini tercipta jika terdapat senyawa korosif pada kandungan air maupun uap air yang berlokasi di tempat material tersebut berada. Suhu dan tekanan yang tinggi juga dapat menciptakan terjadinya korosi pada logam. Dalam banyaknya permasalahan tentang korosi pada dunia industri, mekanisme terjadinya korosi diklasifikasikan menjadi dua golongan. Pengklasifikasian tersebut didasarkan atas tingkat temperatur yaitu korosi temperatur tinggi (*dry corrosion*) dan korosi temperatur rendah (*wet corrosion*).

Korosi temperatur tinggi (*dry corrosion*) identik terjadi pada suhu tinggi akibat adanya gas dan uap yang dominan. Proses degradasi atau perusakan material ini terjadi akibat pengaruh atmosfer pada suhu tinggi maupun proses yang terjadi pada sistem. Temperatur tinggi pada atmosfer ini menjadi oksidatif yang dapat merubah sifat dan struktur mikro material ikut terdampak. Salah satu pencegahan korosi ini adalah dengan melakukan *cleaning* sebelum dan sesudah proses yang berkorelasi dengan suhu yang tinggi.

Korosi temperatur rendah (*wet corrosion*) terjadi akibat adanya hubungan antara logam dan cairan. Cairan yang mengandung elektrolit akan menyumbang sebagian besar korosi yang terjadi pada material. Faktor keasaman juga berpengaruh pada penciptaan korosi yang berpotensi merusak material atau terjadi korosi eksternal.

Berdasarkan penyebabnya, korosi dibedakan menjadi:

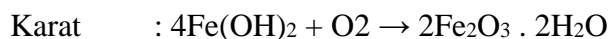
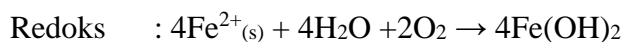
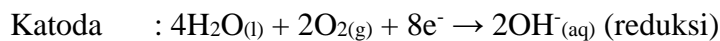
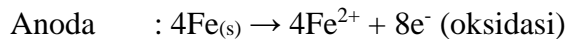
1. Korosi Homogen, yaitu korosi yang terjadi karat ke seluruh bagian material yang terbuka.
2. Korosi galvanik, yaitu korosi yang terjadi pada dua logam berbeda potensial dalam satu elektrolit.
3. Korosi celah, yaitu korosi yang terjadi pada celah dan permukaan tertutup pada logam yang terletak pada media korosif.

4. Korosi batas butir, yaitu korosi yang terjadi pada batas buti tempat mengumpulnya impurity.
5. Korosi sumuran, yaitu korosi karena adanya sistem anoda pada logam yang terdapat ion Cl⁻ yang tinggi.
6. Selective Leaching, yaitu pelarutan komponen paduan yang mengakibatkan paduan tersisa berpori sehingga ketahanan korosi berkurang.
7. Korosi erosi, yaitu korosi yang disebabkan oleh gerakan relatif.

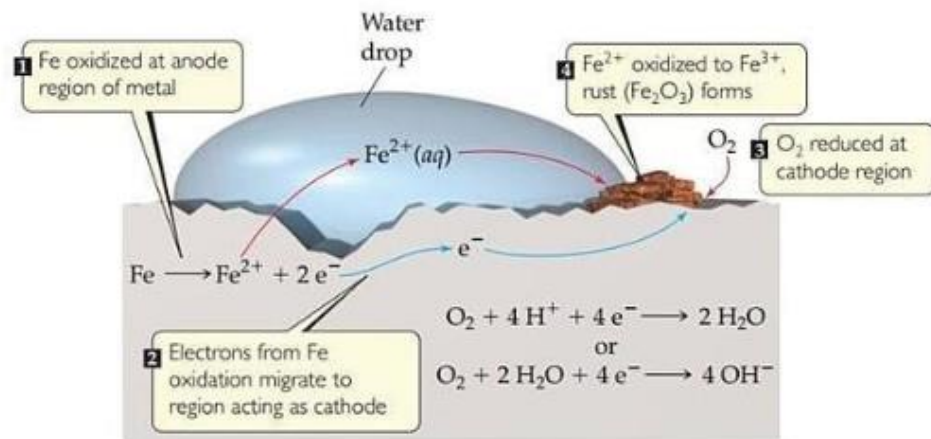
2.2.9.1 Prinsip Dasar dan Mekanisme

Mekanisme korosi secara elektrokimia dapat terjadi akibat beda potensial antara anoda dan katoda. Arus listrik mengalir dari katoda menuju anoda, sedangkan anoda mengalirkan elektron via *metallic pathway* menuju katoda. Aliran elektron menyebabkan anoda tidak stabil akibat dari adanya kelebihan ion⁺ akibat hilangnya ion⁻. Sebagai penyeimbang, anoda dipaksa untuk melepas proton ke media korosi yang notabeneanya adalah cairan elektrolit. Ion⁺ memiliki massa sehingga anoda mengalami kehilangan massa (tekorosi). Ion⁺ bereaksi dengan ion⁻ sehingga membentuk endapan di elektrolit. Terjadinya reaksi katodik ini menciptakan proteksi terhadap permukaan logam yang menyebabkan katoda terlindungi.

Baja memiliki kecenderungan untuk berinteraksi dengan lingkungan membentuk senyawa oksida. Terpaparnya baja akibat udara terbuka bisa mengalami korosi merata akibat pengaruh kelembaban dan oksigen. Berikut reaksi katodik dan anodik dalam proses korosi:



Reaksi ini terjadi saat baja bereaksi dengan media korosi air. Permukaan baja ini memiliki berbagai jenis unsur yang menyebabkan adanya area anoda yang melepas elektron menuju katoda sehingga menyebabkan area anoda harus melepaskan proton ke air untuk menstabilkan diri. Proton yang terlepas ini menyebabkan korosi membentuk karat (Fe₂O₃).



Gambar 2. 14 Korosi Pada Besi Akibat Kontak Dengan Air

(Edra, 2017)

Berdasarkan nilai potensial reaksinya, besi merupakan logam yang mudah mengalami korosi. Logam-logam lain yang mempunyai nilai potensial elektrode lebih besar dari 0,4 V akan sulit mengalami korosi, sebab dengan potensial tersebut akan menghasilkan Eoreaksi < 0 (negatif) ketika kontak dengan oksigen di udara. Logam-logam perak, platina, dan emas mempunyai potensial elektrode lebih besar dari 0,4 V sehingga sulit mengalami korosi.(Edra, 2017)

Elektrolit (asam atau garam) merupakan media yang baik untuk terjadinya transfer muatan. Hal ini mengakibatkan elektron lebih mudah untuk diikat oleh oksigen di udara. Air hujan banyak mengandung asam, sedangkan air laut banyak mengandung garam. Oleh karena itu air hujan dan air laut merupakan penyebab korosi yang utama.(Edra, 2017)

Jika dua logam yang berbeda potensial bersinggungan pada lingkungan berair atau lembab, dapat terbentuk sel elektrokimia secara langsung. Logam yang potensialnya lebih rendah akan segera melepaskan elektron ketika bersentuhan dengan logam yang potensialnya lebih tinggi, serta akan mengalami oksidasi oleh oksigen dari udara. Hal tersebut mengakibatkan korosi lebih cepat terjadi pada logam yang potensialnya rendah, sedangkan logam yang potensialnya tinggi justru lebih awet. Sebagai contoh, paku keling yang terbuat dari tembaga untuk menyambung besi akan menyebabkan besi di sekitar paku keling tersebut berkarat lebih cepat.(Edra, 2017)

2.2.9.2 Stress Corrosion Cracking (SCC)

Stress corrosion cracking (SCC) adalah penggambaran istilah kegagalan material yang terjadi secara perlahan dikarenakan oleh lingkungan propagasi retak. Perambatan retak ini merupakan hasil gabungan dan sinergis interaksi antara tegangan mekanik dan reaksi korosi. (Jones & Ricker, 1992)

Tegangan yang diperlukan agar menciptakan SCC biasanya berada dibawah tegangan luluh makroskopis dan bersifat tarik. Tegangan ini dapat diterapkan secara

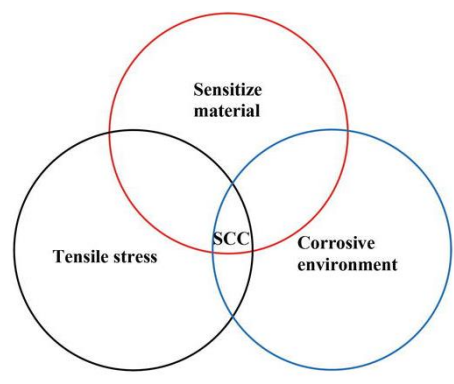
eksternal, tapi tegangan sisa sering menyebabkan kegagalan SCC. Pembebanan statis biasanya bertanggung jawab terhadap SCC, sementara pembebanan retak yang disebabkan oleh faktor lingkungan karena pembebanan siklik didefinisikan sebagai kelelahan korosi. Batas antara keduanya tidak jelas, namun karena lingkungan yang menyebabkan kelelahan korosi dan SCC tidak selalu sama, maka dari itu keduanya harus dianggap fenomena terpisah.

Stress corrosion cracking biasanya menggambarkan kegagalan dalam panduan logam. Namun, beberapa kasus menunjukkan tertundanya kegagalan material oleh perambatan retak yang disebabkan lingkungan. Lingkungan penyebab terjadinya SCC biasanya berair yang dapat berupa lapisan uap air yang terkondensasi atau larutan curah. Adanya perubahan faktor suhu, tingkat aerasi dan konsentrasi spesies ionic dapat mengubah lingkungan yang tidak berbahaya menjadi lingkungan yang dapat menyebabkan kegagalan SCC. Perlakuan panas juga dapat mengubah paduan menjadi kebal atau rentan terhadap SCC. Gambar 2.14 mendeskripsikan kombinasi paduan dan lingkungan yang menghasilkan SCC.

Alloy	Environment
Carbon steel	Hot nitrate, hydroxide, and carbonate/bicarbonate solutions
High-strength steels	Aqueous electrolytes, particularly when containing H ₂ S
Austenitic stainless steels	Hot, concentrated chloride solutions; chloride-contaminated steam
High-nickel alloys	High-purity steam
α-brass	Ammoniacal solutions
Aluminum alloys	Aqueous Cl ⁻ , Br ⁻ , and I ⁻ solutions
Titanium alloys	Aqueous Cl ⁻ , Br ⁻ , and I ⁻ solutions; organic liquids; N ₂ O ₄
Magnesium alloys	Aqueous Cl ⁻ solutions
Zirconium alloys	Aqueous Cl ⁻ solutions; organic liquids; I ₂ at 350 °C (660 °F)

Gambar 2. 15 Paduan atau Sistem Lingkungan yang menyebabkan SCC
(Jones & Ricker, 1992)

Fenomena ini bersinggungan langsung dengan kombinasi tegangan tarik, lingkungan dan beberapa kondisi metalurgi. Selama retak korosi tegangan, logam maupun paduan dapat dikatakan tidak diserang pada sebagian permukaannya, sementara retakan halus dan bercabang akan berkembang melalui sebagian besar material. Fenomena ini dimulai dari faktor korosi permukaan material yang berkembang menjadi rapuh. Hal ini tidak sepenuhnya akibat proses mekanis, namun korosifitas lingkungan juga mempengaruhi mode perpatahan. (Khalifeh, 2019)



Gambar 2. 16 Persyaratan penting SCC
(Khalifeh, 2019)

Tegangan sisa pengelasan dan mekanis merupakan sumber utama tegangan yang biasanya dikaitkan dengan retak korosi tegangan. Tegangan sisa ini dihasilkan akibat perubahan suhu yang berbeda selama terjadinya pengelasan. Vektor regangan termal diformulasikan sebagai berikut:

$$\{\Delta\epsilon^{th}\} = [\alpha]\Delta T$$

Dimana $\Delta\epsilon^{th}$ adalah variasi regangan, α adalah ekspansi termal material, dan ΔT adalah perubahan suhu.

Proses *Stress Corrosion Cracking* memiliki empat tahap, yaitu:

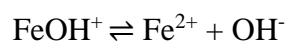
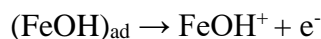
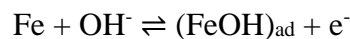
1. Inisiasi retakan.
2. Perluasan retakan.
3. Penggabungan/penyatuan retakan dalam beberapa kasus.
4. Perluasan retakan cepat dan kegagalan.

Proses ini dapat berlangsung dalam rentang waktu dari beberapa jam hingga beberapa tahun tergantung pada kondisi baja, lingkungan, dan tegangan yang diberikan. Terdapat berbagai mekanisme yang diajukan untuk menjelaskan interaksi antara tegangan dan korosi yang terjadi di ujung retakan, dan terdapat lebih dari satu proses yang menyebabkan SCC.

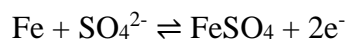
Semua mekanisme yang diajukan untuk pecahan yang dibantu oleh lingkungan dapat dikelompokkan ke dalam dua kategori dasar: mekanisme anoda dan mekanisme katoda. Mekanisme anoda yang paling jelas adalah pembentukan lapisan oksida pasif dari produk korosi. Tegangan merusak lapisan oksida yang rapuh, kemudian diikuti oleh pelarutan aktif dan penghilangan material dari ujung retakan sehingga retakan dapat berlanjut. Permukaan logam baru terkorosi dan proses ini berulang untuk menghasilkan retakan lebih lanjut, ini khas terjadi pada SCC. Sementara itu, mekanisme katoda melibatkan evolusi hidrogen, absorpsi dan difusi hidrogen dalam baja, serta pelapukan yang umum terjadi pada retakan yang disebabkan oleh hidrogen (hydrogen induced cracking/HIC). (Sikiru Olaide, 2015)

2.2.9.3 Pengaruh NaCl terhadap Korosi Celah Baja Karbon

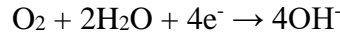
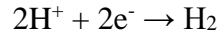
Pembubaran baja terkait erat dengan OH^- dalam media korosif dengan persamaan reaksi anodik sebagai berikut:



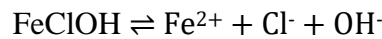
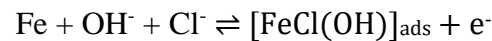
Sulfat bisa sebagai katalis untuk mempromosikan proses anodik dalam larutan dengan sulfat, sehingga mekanisme pembubaran anodik baja adalah sebagai berikut:



Namun, O₂ celah dalam harus habis akibat proses perpindahan massa yang terbatas oleh geometri celah sempit. Hal ini mengindikasikan bahwa reaksi sulfat sulit terjadi dan efek katalitik sulfat tidak dapat bekerja pada pembubaran baja di dalam celah. Sehingga terjadi reaksi katodik sebagai berikut:

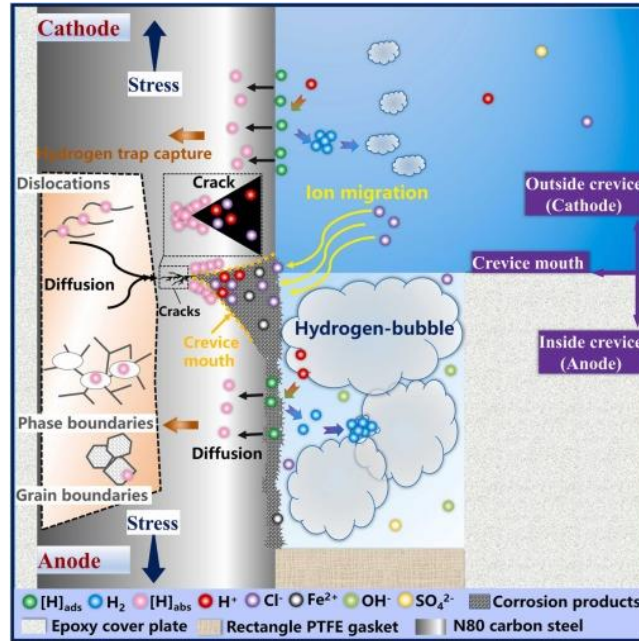


Ion hidrogen (H⁺) yang dikonsumsi di dalam retakan tidak dapat tergantikan dengan cukup melalui reaksi difusi dan hidrolisis, sementara ion hidroksida (OH⁻) dihasilkan melalui reduksi oksigen (O₂). Cl⁻ dapat berpartisipasi dalam pembubaran anodik baja dalam media korosif yang mengandung Cl⁻ sebagai berikut:



Konsentrasi ion hidroksida (OH⁻) dan ion klorida (Cl⁻) di dalam retakan dapat meningkat secara bertahap seiring dengan perkembangan korosi retakan pada baja karbon dalam larutan asam yang mengandung ion klorida (Cl⁻). Hal ini menyebabkan peningkatan pembubaran anodik pada bagian dalam baja, yang pada gilirannya berkontribusi pada pergeseran potensial korosi internal baja ke arah yang lebih negatif. Diperkirakan bahwa sejumlah besar ion klorida (Cl⁻) akan terakumulasi dalam larutan retakan dengan konsentrasi klorida (Cl⁻) yang lebih tinggi. Oleh karena itu, resistansi reaksi anodik pada bagian dalam baja akan menurun. Perbedaan potensial (ΔE) antara bagian dalam dan luar baja akan meningkat seiring dengan peningkatan konsentrasi ion klorida (Cl⁻) dalam larutan retakan. (Zhang et al., 2023)

Dalam lingkungan asam, reaksi katodik yang dominan adalah evolusi hidrogen. Produksi sejumlah besar atom hidrogen dapat terjadi dan masuk ke dalam struktur baja. Oleh karena itu, peran hidrogen dalam larutan asam secara signifikan berkontribusi pada inisiasi dan penyebaran retakan pada baja tanpa celah. Dengan adanya konsentrasi ion klorida (Cl⁻) dalam larutan, pembubaran baja dan evolusi hidrogen dapat dipercepat.



Gambar 2. 17 Mekanisme SCC Baja Karbon N80 dalam Larutan Asam NaCl

(Zhang et al., 2023)

Struktur retakan yang terbentuk pada permukaan baja memiliki pengaruh signifikan terhadap *stress corrosion cracking* (SCC) pada baja karbon N80 dalam larutan asam. Gambar 2.15 menggambarkan mekanisme SCC baja dengan retakan dalam larutan asam. Secara makroskopis, anoda dan katoda akan terpisah ketika retakan terbentuk pada permukaan baja. Retakan luar baja berperan sebagai katoda yang meningkatkan reaksi katodik. Sedangkan, baja di dalam retakan berperan sebagai anoda yang mendorong reaksi anodik. Hal ini berarti lebih banyak atom hidrogen dapat terbentuk dan meresap ke dalam struktur baja di luar retakan daripada baja tanpa retakan. (Zhang et al., 2023)

2.2.9.4 Uji Potensiostat

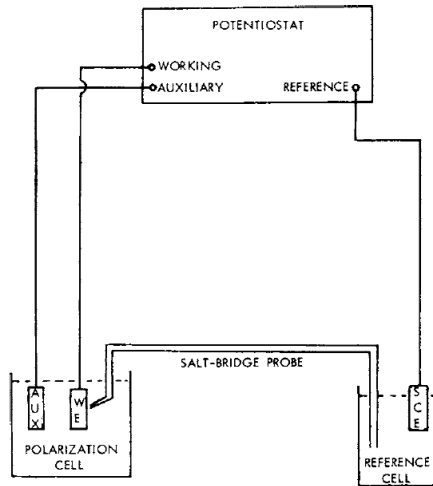
Metode pengukuran laju korosi pada logam dapat diuji menggunakan metode uji potensiostat (tiga sel elektroda). Pengujian ini menggunakan 3 logam yang memiliki potensial berbeda. Uji ini relatif mudah dan waktu yang diperlukan relatif lebih cepat. Cara kerjanya adalah dengan mengalirkan arus ke dalam elektroda kerja dimana elektroda acuan berfungsi sebagai katoda dan elektroda bantu sebagai penghantar arus dari elektroda kerja. Berikut merupakan penjelasan pada tiga sel elektroda:

1. Elektroda kerja
Elektroda kerja ini berfungsi sebagai logam yang akan diteliti. Logam ini akan dijadikan sebagai anoda yang nantinya akan terkorosi
2. Elektroda acuan
Elektroda acuan berfungsi sebagai logam acuan yang berperan sebagai katoda dalam penelitian. Arus sangat berpengaruh pada metode tiga sel elektroda. Arus yang dialirkan harus kecil agar tidak mempengaruhi electrode acuan yang bisa

mempengaruhi reaksi sel dan potensial elektroda tidak stabil. Elektroda yang biasanya digunakan adalah *saturated calomel electrode* (SCE)

3. Elektroda bantu

Elektroda bantu akan berfungsi sebagai penghantar arus yang berasal dari elektroda kerja. Elektroda ini tidak termasuk pengukuran untuk potensial. Logam yang biasa digunakan adalah emas, platina dan grafit. Penggunaan logam lain bisa dipilih dengan syarat tidak menciptakan kontaminasi ion ke dalam larutan elektrolit.



Gambar 2. 18 Rangkaian Uji Potensiostat

(ASTM International, 2014)

Ketiga elektroda tersebut akan dicelupkan ke dalam larutan elektrolit pada wadah pengujian yang terhubung dengan alat potensiostat. Proses ini dimulai dengan pemberian potensi pada elektroda kerja yang kemudian dilakukan *scanning* dengan kecepatan tertentu agar diplot pada diagram kurva potensial. Elektroda kerja ini nanti akan mengalami reaksi oksidasi dan reduksi akibat penerimaan potensi yang dialirkan lewat alat potensiostat. Pengujian ini menciptakan korosi yang akan terbentuk saat reaksi oksidasi pada saat potensi diatas 0 mV atau kurang dari itu pada elektroda kerja yang bersifat reaktif dengan kondisi lingkungan.

Untuk menghitung laju korosi berdasarkan nilai potensi yang didapat menurut standar ASTM G102 tentang “*Standard Practice for Calculation of Corrosion rates and Related Information from Electrochemical Measurements*” sebagai berikut:

$$CR = K_1 \frac{i_{cor}}{\rho} EW$$

dengan:

CR = Corrosion rate (mm/year)

K₁ = Nilai konstanta faraday menurut ASTM G102 (mm g/μA cm y)

I_{cor} = Kuat arus yang diperoleh dari pengujian (μA/cm²)

ρ = Massa jenis menurut ASTM G1 (g/cm^3)

EW = *Equivalent weight* menurut ASTM G102

Semakin kecil nilai laju korosi, maka sifat ketahanan korosi semakin baik. Menurut Fontana, 1987), ketahanan korosi material dapat digolongkan berdasarkan nilai laju korosinya sebagai berikut:

Tabel 2. 5 Kriteria Ketahanan Material Berdasarkan Laju Korosi

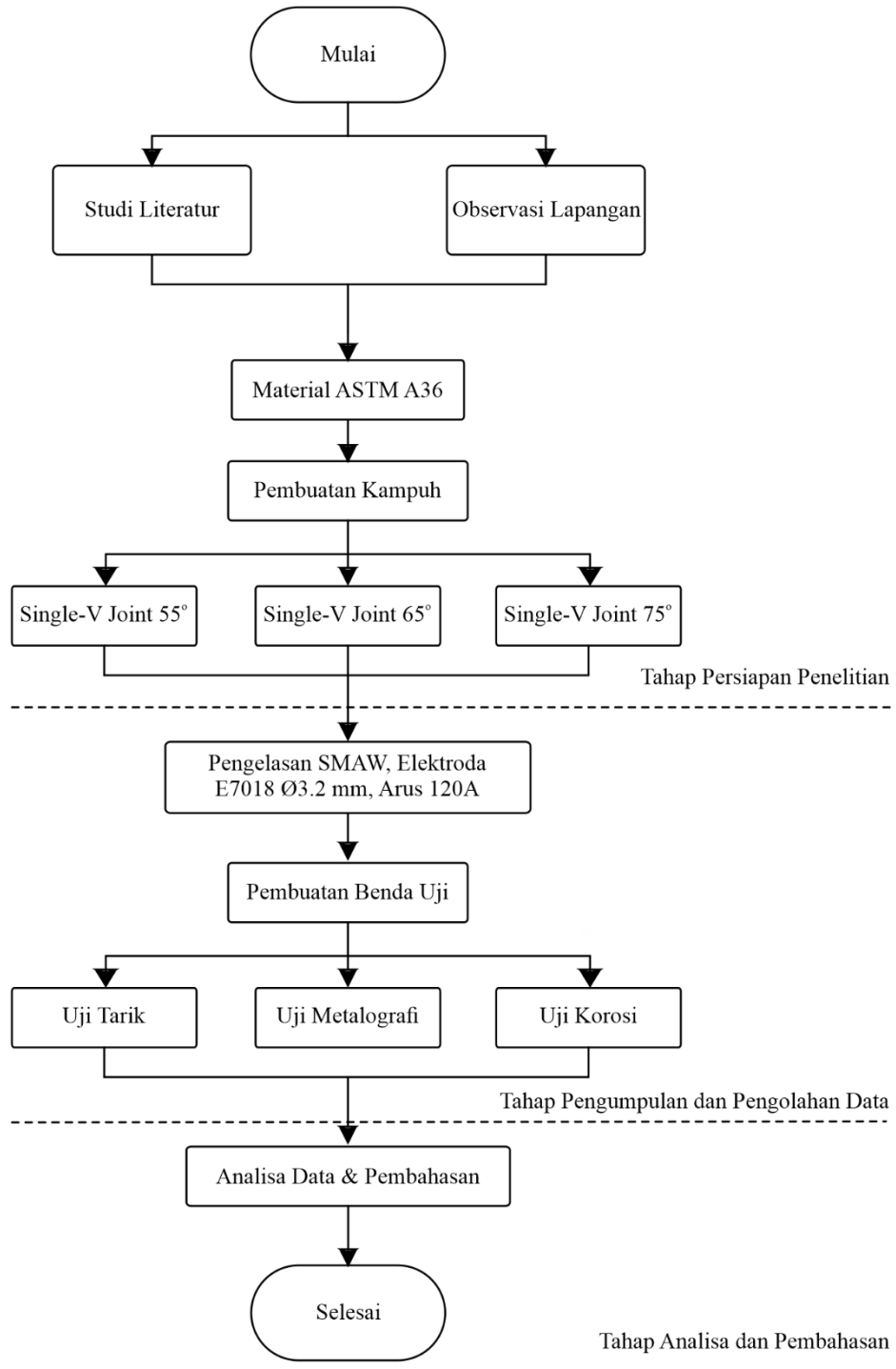
(Fontana, 1987)

Relative Corrosion Resistance	mpy	mm/yr
Outstanding	< 1	< 0.02
Excellent	1 - 5	0.02 – 0.1
Good	5	0.1 – 0.5
Fair	20 – 50	0.5 – 1
Poor	50 – 200	1 – 5
Unacceptable	200+	5+

BAB III METODOLOGI

3.1 Metode yang Digunakan

3.1.1 Diagram Alir Penelitian



3.1.2 Studi Literatur

Untuk melakukan penelitian ini, pengumpulan materi dan literatur berupa buku, jurnal, *paper* dan tugas akhir menjadi referensi dalam pelaksanaan penelitian. Studi literatur ini nantinya akan menjadi referensi atau acuan yang permasalahannya saling berhubungan dengan penelitian yang dilakukan ini.

3.1.3 Observasi Lapangan

Tahap ini merupakan proses pemerolehan data informasi sebagai bukti konkret yang nantinya akan dianalisis. Observasi lapangan ini akan menjadi referensi yang saling berhubungan dengan penelitian yang akan dilakukan. Metode eksperimental digunakan dalam penelitian ini yang melibatkan modifikasi untuk mencapai target yang akan dicapai.

3.1.4 Material ASTM A36

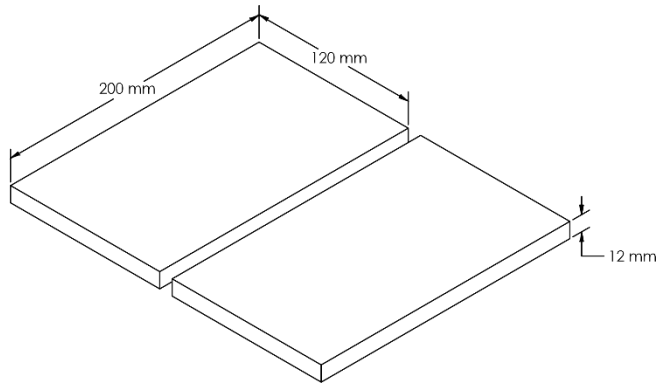
Penelitian ini menggunakan material ASTM A36. Struktur *deck platform*, kaki *jacket*, pipa transmisi minyak dan pipa tekanan gas rendah menjadi fokus utama kekuatan material ASTM A36.

Tabel 3. 1 Tabel Spesifikasi ASTM A36

(ASTM International, 2005)

ASTM/ASME	JIS	DIN/BS	GB	
A36	JIS G3101 SS330	EN10025 S185	GB700 Q235	
C	Si	Mn	P	S
≤0,25	≤0,40	≤0,80 – 1,20	≤0,04	≤0,05
Tensile Strength, Ultimate	Tensile Strength, Yield		Elongation	
ksi [MPa]	Min, ksi [MPa]		2in. [50mm], mnt, %	
50-80 [400-550]	36 [250]		23	

Material ASTM A36 dibentuk persegi dengan panjang 200 mm, lebar 120 mm dan tebal 12 mm. Gambar 3.1 menunjukkan ilustrasi dimensi base metal ASTM A36:



Gambar 3. 1 Dimensi Base Metal

Pemotongan pelat dilakukan di Science Techno Park Institut Teknologi Sepuluh Nopember (STP ITS) dengan menggunakan alat gergaji listrik hidrolik horizontal. Material ASTM A36 dipotong dengan panjang 200 mm, lebar 120 mm dan tebal 12 mm. Berikut ini merupakan proses pemotongan pelat ASTM A36.

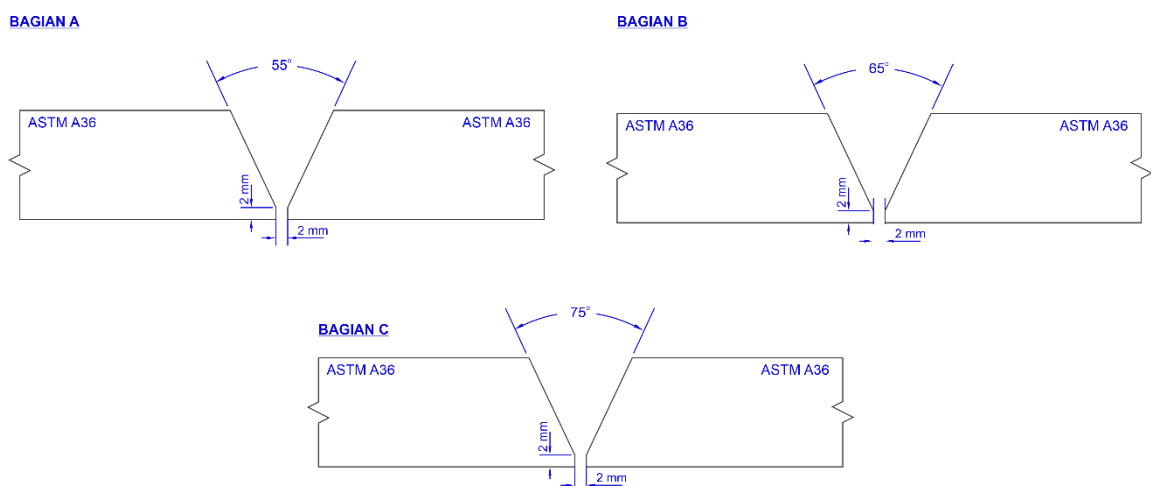


Gambar 3. 2 Pemotongan Pelat ASTM A36

Setelah dilakukan pemotongan, pelat yang sudah dipotong dibersihkan dengan menggunakan kain kering agar kotoran yang berada pada permukaan pelat bersih. Kemudian pelat yang sudah dipotong dilakukan kalibrasi ukuran sebagai validasi atas ukuran yang telah ditentukan

3.1.5 Pembuatan Kampuh

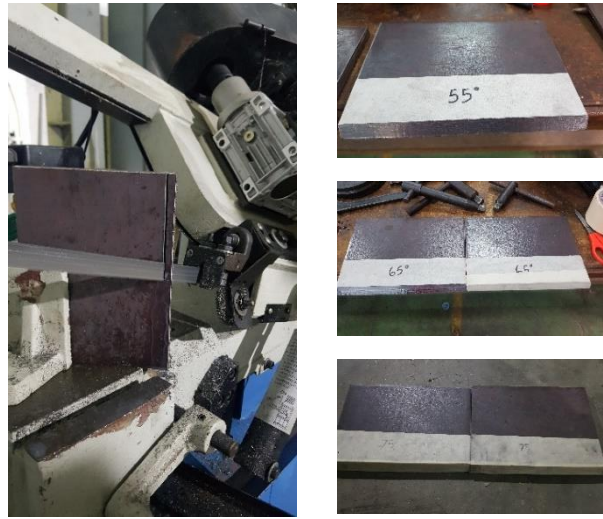
Kampuh las merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi pengelasan karena menampung bahan pengisi (*filler*) agar merekat pada *base metal*. Kekuatan hasil sambungan akan dinilai dari pemilihan kampuh yang optimal, mulai dari ketebalan, jenis, kekuatan las dan juga posisi pengelasan. Jenis kampuh yang digunakan dalam penelitian ini adalah *single V joint*.



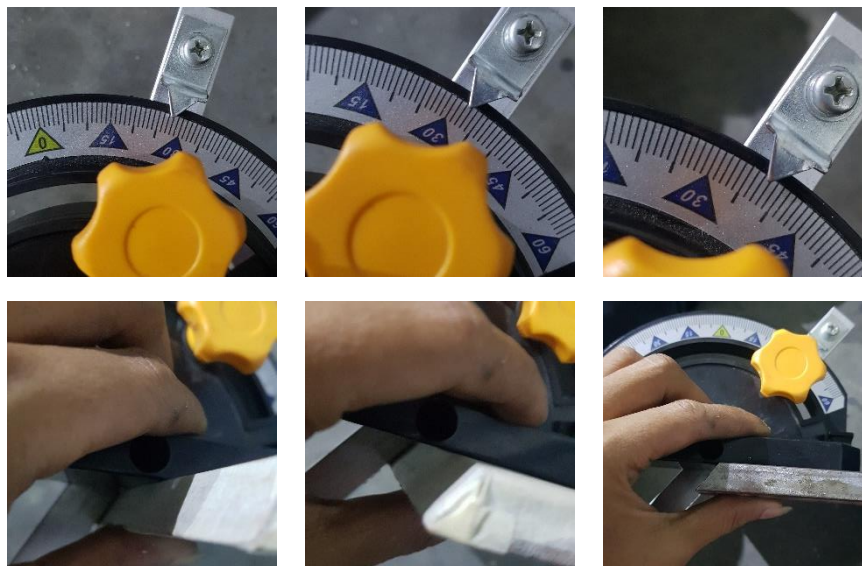
Gambar 3. 3 Kampuh Single V joint

Pembuatan kampuh dilakukan di Science Techno Park Institut Teknologi Sepuluh Nopember (STP ITS) dengan menggunakan alat gergaji listrik hidrolik horizontal. Jenis

kampuh yang digunakan dalam penelitian ini adalah *single V joint* dengan variasi sudut 55° , 65° , dan 75° . Berikut ini merupakan proses pemotongan sudut kampuh pelat ASTM A36.



Gambar 3. 4 Pembuatan Kampuh



Sudut Kampuh 55°

Sudut Kampuh 65°

Sudut Kampuh 75°

Gambar 3. 5 Kalibrasi Sudut Kampuh

Setelah dilakukan pemotongan sudut, pelat yang sudah dipotong dibersihkan dengan menggunakan kain kering agar kotoran yang berada pada permukaan pelat bersih. Kemudian pelat yang sudah dipotong dilakukan kalibrasi sudut dan diberi keterangan dengan menggunakan *masking tape* agar tidak mengalami kesalahan pengukuran saat dilakukan proses pengelasan.

3.1.6 Tahap Pengelasan

Proses pengelasan dan penggabungan dua pelat baja ASTM A36 ini memiliki parameter sebagai berikut:

Tabel 3. 2 Parameter Pengelasan

Logam Dasar	Detail Sambungan
ASTM A36	Sambungan : Single V joint
	Jumlah Layer : 4 Layer
Teknik	Jig : Ya
Proses : SMAW	Posisi Pengelasan: 1G
Elektroda : E7018 Ø3,2	Sudut Kampuh : 55°, 65° dan 75°
Arus : 120A	Root Gap : 2 mm
Polaritas : DCEP	Root Face : 2 mm
Preheat : Tidak	Ketebalan Pelat : 12 mm

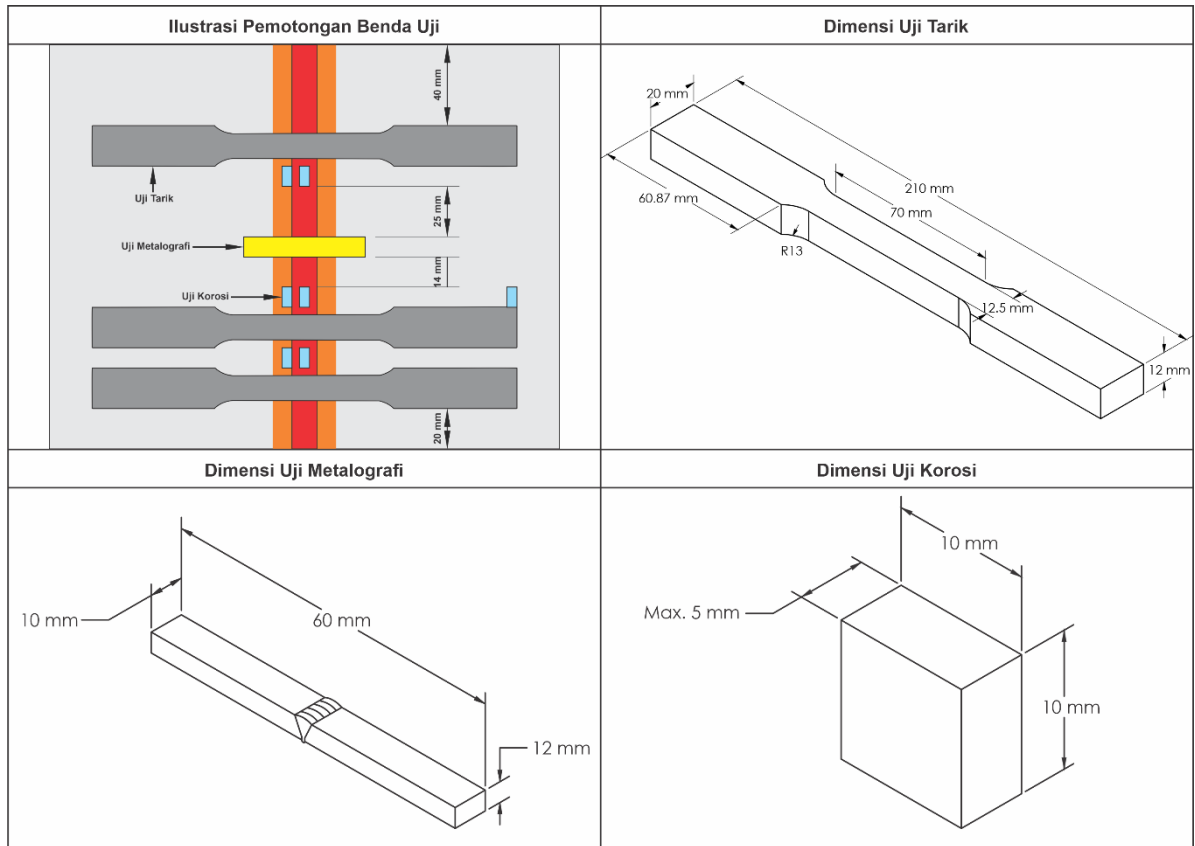
Seluruh rangkaian pengelasan akan tercatat pada *Procedure Qualification Record* (PQR) sebagai data catatan pengelasan. Tabel 3.3 menunjukkan PQR dalam penelitian ini.

Tabel 3. 3 Procedure Qualification Record (PQR)

Bagian	Sudut Kampuh	Pass No	Weld Pass	Panjang (mm)	Waktu (detik)	Kecepatan Pengelasan (mm/min)

3.1.7 Pembuatan Benda Uji

Proses pembuatan spesimen pada material ASTM A36 dilakukan sesuai dengan pengujian yang akan dilakukan. Pembuatan benda uji ini akan dilakukan sesuai dengan dimensi standar ASTM yang tertera pada gambar 3.6 sebagai berikut.



Gambar 3. 6 Dimensi Benda Uji

3.1.8 Tahap Pengujian

Tahap pengujian merupakan proses untuk menjamin kualitas hasil lasan sesuai dengan ketentuan dan standar yang digunakan. Pengujian yang dilaksanakan menggunakan pengujian tarik, metalografi dan korosi. Tujuan dari pengujian penelitian ini adalah untuk mengetahui variasi sudut kampuh terhadap laju korosi baja ASTM A36 pada lingkungan laut.

3.1.8.1 Uji Korosi

Uji korosi bertujuan untuk mengetahui laju korosi pada suatu material. Uji korosi pada penelitian ini menggunakan metode tiga sel elektroda yang berdasarkan ASTM G5 “*Standard Reference Test Method for Making Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements*”. Sedangkan untuk perhitungan laju korosi pada material mengacu pada standar ASTM G102 “*Standard Practice for Calculation of Corrosion rates and Related Information from Electrochemical Measurements*”.

Elektroda kerja sebagai penguji dalam sel elektrokimia merupakan sampel hasil pengelasan. Pengambilan sampel berdasarkan daerah *weld metal*, *heat affected zone* (HAZ) dan *base metal* guna mengetahui laju korosi pada setiap daerah tersebut. Elektroda acuan menggunakan *saturated calomel electrode* (SCE), sedangkan elektroda pembantu menggunakan grafit. Pengujian dilakukan menggunakan larutan NaCl dengan salinitas 3,5% sebagai media pengkorosi dengan menggunakan alat CorrTest

Electrochemical Workstation yang terhubung dengan *software* CS Studio5. Pengujian korosi dilakukan di laboratorium korosi dan kegagalan material, Departemen Teknik Material, ITS.



Gambar 3. 7 CorrTest Electrochemical Workstation

Setelah dilakukan pengujian terhadap material ASTM A36 hasil pengelasan menggunakan variasi sudut kampuh *single V joint*, maka didapat data uji korosi pada setiap daerah *base metal*, HAZ dan *weld metal* yang tertera pada rencana pengujian tabel 3.4.

Tabel 3. 4 Rencana Pengujian Laju Korosi

Spesimen	Bagian	Laju Korosi (mm/year)	Tanggal Pengujian
55°	BM 1		
	HAZ 1		
	HAZ 2		
	HAZ 3		
	WM 1		
	WM 2		
	WM 3		
65°	BM 1		
	HAZ 1		
	HAZ 2		
	HAZ 3		
	WM 1		

Spesimen	Bagian	Laju Korosi (mm/year)	Tanggal Pengujian
65°	WM 2		
	WM 3		
75°	BM 1		
	HAZ 1		
	HAZ 2		
	HAZ 3		
	WM 1		
	WM 2		
	WM 3		

3.1.8.2 Uji Tarik

Pengujian tarik ini menggunakan standar ASTM E8 “*Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*”. Pengujian ini bertujuan untuk mengukur ketahanan material ASTM 36 terhadap gaya statis yang diberikan secara lambat. Pengujian tarik dilakukan di laboratorium Departemen Teknik Mesin Universitas Negeri Malang (UM) dengan menggunakan Universal Testing Machine Cap 15 Ton.



Gambar 3. 8 Universal Testing Machine Cap 15 Ton

Setelah dilakukan pengujian terhadap material ASTM A36 hasil pengelasan menggunakan variasi sudut kampuh *single V joint*, maka didapat data uji tarik yang tertera pada rencana pengujian tabel 3.5.

Tabel 3. 5 Rencana Pengujian Tarik

Variabel Pengujian		Yield Strength (MPa)	Ultimate Strength (MPa)	Tanggal Pengujian
Sudut Kampuh 55°	1			
	2			
	3			
Sudut Kampuh 65°	1			
	2			
	3			
Sudut Kampuh 75°	1			
	2			
	3			

3.1.8.3 Uji Metalografi

Pengujian metalografi ini menggunakan standar ASTM E3-01 “*Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*”. Pembesaran yang dilakukan dari pengamatan struktur mikro menggunakan pembesaran 500x. Pengujian ini menggunakan larutan HNO₃ dan larutan alkohol 98% sebagai larutan etsa. Berikut tabel rencana pengujian yang akan dilakukan:

Tabel 3. 6 Rencana Pengujian Metalografi

Variabel Pengujian	Daerah Pengelasan	Tanggal Pengujian
Sudut Kampuh 55°	Base Metal	
	HAZ	
	Weld Metal	
Sudut Kampuh 65°	Base Metal	
	HAZ	
	Weld Metal	
Sudut Kampuh 75°	Base Metal	

Variabel Pengujian	Daerah Pengelasan	Tanggal Pengujian
Sudut Kampuh 75°	HAZ	
	Weld Metal	

3.1.9 Analisa Data

Tahapan akhir dari penelitian ini adalah analisa data dari hasil eksperimen pengujian. Data tersebut dianalisa sesuai dengan standar yang menjadi pedoman penelitian sehingga tujuan dari permasalahan yang sudah ditetapkan dapat tercapai.

3.2 Bahan dan Peralatan yang Digunakan

Dalam penelitian, dibutuhkan persiapan alat dan bahan yang dibutuhkan. Alat dan bahan digunakan sebagai persiapan proses pembuatan sudut *single V joint* yang kemudian sebagai dasar proses pengujian selanjutnya. Berikut merupakan alat dan bahan yang digunakan:

Alat:

1. Mesin SMAW.
2. Alat pemotong baja.
3. *Welding gauge*.
4. Jig.
5. Alat uji metalografi mikro.
6. Alat uji korosi tiga sel elektroda.
7. Wadah Pengujian Korosi.
8. Spesimen uji.
9. Kamera.

Bahan:

1. Elektroda E7018 Ø3,2mm.
2. Pelat ASTM A36 berukuran panjang 200 mm, lebar 120 mm dan tebal 12 mm.
3. Amplas.
4. Larutan NaCl 3,5%.
5. Elektroda acuan *saturated calomel electrode* (SCE).
6. Elektroda pembantu (grafit).
7. Larutan HNO₃.
8. Larutan Alkohol 98%.

3.3 Urutan Pelaksanaan Penelitian

Kegiatan	Bulan								
	Okt	Nov	Des	Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun
Studi literatur	■	■	■	■					
Observasi lapangan	■	■	■	■					
Perumusan Masalah		■	■	■					
Pelaksanaan Seminar Proposal Proyek Akhir				■					
Persiapan Alat dan Bahan					■	■	■		
Pelaksanaan eksperimen dan pengumpulan data							■	■	
Pengolahan dan analisis data							■	■	
Menginterpretasikan temuan, membuat kesimpulan dan saran							■	■	
Penulisan Laporan Proyek Akhir							■	■	
Pelaksanaan Sidang Proyek Akhir									■

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pelaksanaan Penelitian

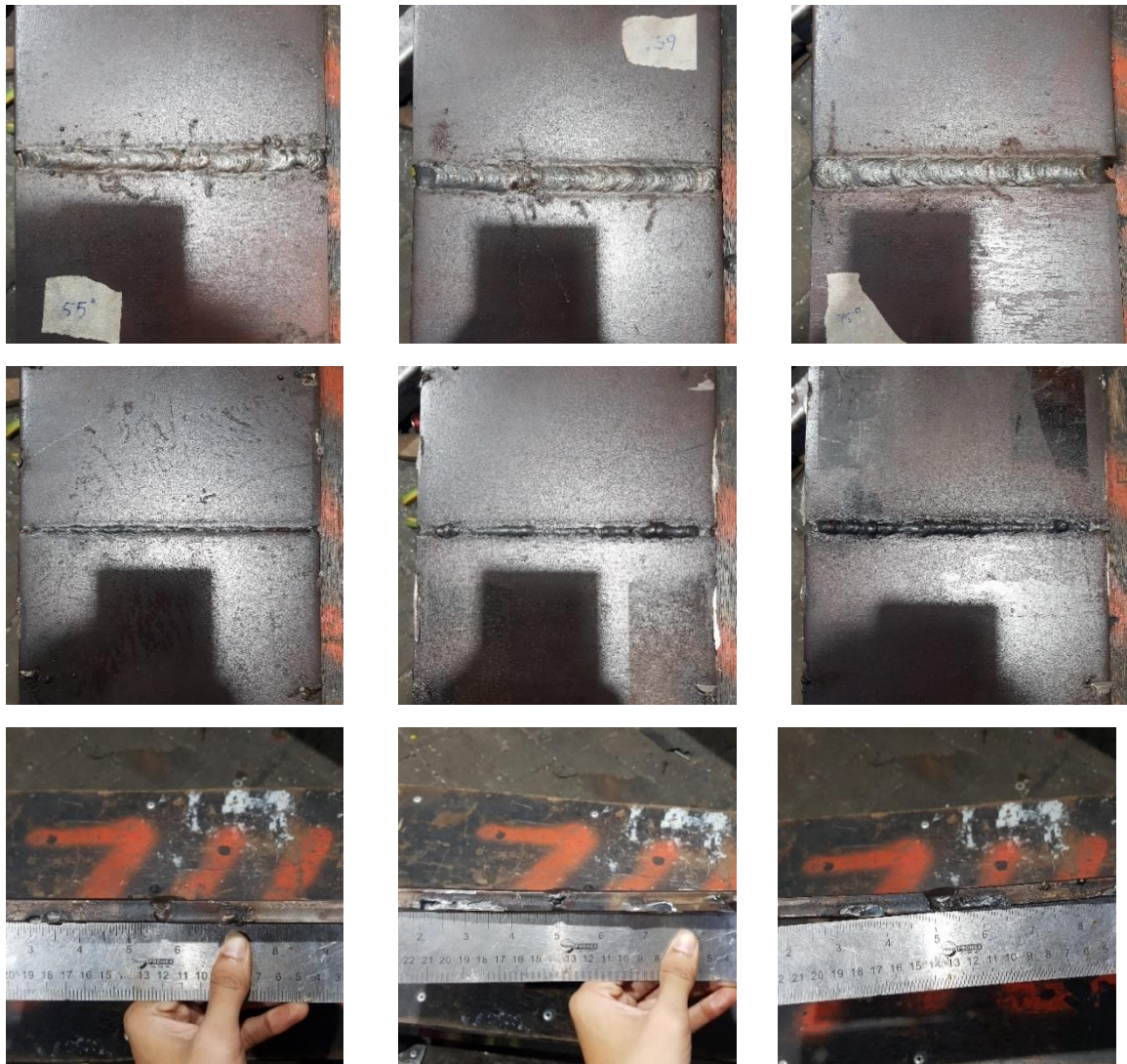
Tahap pelaksanaan penelitian merupakan proses dilaksanakannya pengelasan sesuai dengan ketentuan dan standar yang digunakan. Pelaksanaan penelitian ini dilakukan di Departemen Teknik Mesin Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Seluruh rangkaian pengelasan akan tercatat pada *Procedure Qualification Record* (PQR) sebagai data catatan pengelasan. Tabel berikut menunjukkan PQR dalam penelitian ini.

Tabel 4. 1 Procedure Qualification Record (PQR)

Sudut Kampuh	Pass No	Weld Pass	Panjang (mm)	Waktu (detik)	Kecepatan Pengelasan (mm/min)
55°	1	Root	200	1 Menit 14 Detik	162.16 mm/min
	2	Hot Pass	200	1 Menit 31 Detik	131.87 mm/min
	3	Fill	200	2 Menit 17 Detik	87.59 mm/min
	4	Cap	200	2 Menit 24 Detik	83.30 mm/min
65°	1	Root	200	3 Menit 6 Detik	64.52 mm/min
	2	Hot Pass	200	1 Menit 38 Detik	122.45 mm/min
	3	Fill	200	2 Menit 46 Detik	71.43 mm/min
	4	Cap	200	3 Menit 2 Detik	65.93 mm/min
75°	1	Root	200	4 Menit 49 Detik	41.52 mm/min
	2	Hot Pass	200	2 Menit 16 Detik	88.24 mm/min
	3	Fill	200	3 Menit 12 Detik	62.50 mm/min
	4	Cap	200	3 Menit 19 Detik	60.30 mm/min

Penelitian ini dilaksanakan pengelasan SMAW dengan elektroda E7018 terhadap baja karbon rendah ASTM A36 dengan variasi sudut *single V joint* (55°, 65°, 75°). Proses pelaksanaan dilakukan sesuai dengan parameter pengelasan yang telah ditetapkan. Gambar 4.1

menunjukkan hasil pengelasan terhadap variasi sudut *single V joint* yang telah terdokumentasi sebagai berikut.



(a) *Single V Joint* 55°

(b) *Single V Joint* 65°

(c) *Single V Joint* 75°

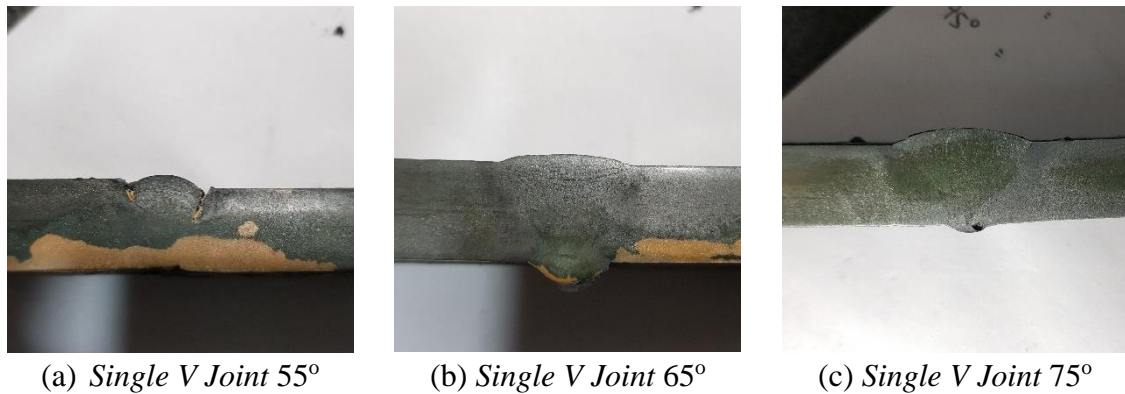
Gambar 4. 1 Hasil Pengelasan Material Baja ASTM A36

4.2 Pengujian

4.2.1 Pengujian Makro

Uji etsa makro adalah sebuah teknik untuk mengevaluasi struktur makro dari hasil pengelasan yang telah dilakukan. Metode ini melibatkan pemeriksaan material atau spesimen las dengan menggunakan pengamatan secara langsung oleh mata telanjang atau dengan menggunakan mikroskop dengan perbesaran rendah. Tujuan dari uji etsa makro adalah untuk mengamati dan menganalisis daerah pengelasan secara lebih detail, sehingga dapat memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang karakteristik dan kualitas dari sambungan las tersebut.

Hasil yang didapat dari pengujian makro adalah sebagai acuan dalam menentukan daerah HAZ yang nantinya akan dilakukan pengujian korosi. Gambar 4.2 yang diperoleh melalui proses etsa menunjukkan gambaran rinci tentang struktur makro material, termasuk *Heat-Affected Zone* (HAZ), *weld metal*, dan daerah *base metal*. Melalui analisis makro, batas-batas antara masing-masing daerah dapat diidentifikasi secara visual, yang kemudian memudahkan proses pemotongan spesimen uji untuk pengujian korosi.



Gambar 4. 2 Spesimen Hasil Etsa Makro

Pengujian material ASTM A36 setelah dilakukan proses pengelasan SMAW dengan arus 120A dan menggunakan elektroda E7018 menghasilkan ukuran dan sudut *Heat-Affected Zone* (HAZ) sebagaimana tertera pada Tabel 4.2 berikut ini:

Tabel 4. 2 Data Lebar dan Sudut HAZ

Sudut Kampuh	Lebar HAZ		Sudut HAZ
55°	Kanan	2,12 mm	62°
	Kiri	2,26 mm	
65°	Kanan	2,79 mm	53°
	Kiri	2,80 mm	
75°	Kanan	3,00 mm	46°
	Kiri	3,14 mm	

4.2.2 Pengujian Korosi

Pengujian korosi menggunakan metode potensiostat dilaksanakan untuk memperoleh pemahaman dan karakterisasi mengenai perilaku korosi pada material hasil pengelasan ASTM A36 *single V joint* dengan variasi sudut kampuh. Setelah spesimen uji dipotong sesuai dimensi yang ditentukan, permukaannya dibersihkan secara menyeluruh untuk menghilangkan kotoran dan produk korosi yang ada. Langkah ini penting untuk memastikan pembacaan yang akurat selama proses pengujian potensiostat. Setelah proses

pembersihan, permukaan yang akan diuji korosinya diselimuti oleh lapisan *masking tape* dan dilindungi oleh lapisan plastik bening sebagai langkah persiapan dalam pengujian korosi. Tindakan ini dilakukan untuk melindungi area yang ingin diuji dari kontaminasi atau paparan lingkungan yang dapat mempengaruhi hasil pengujian korosi.



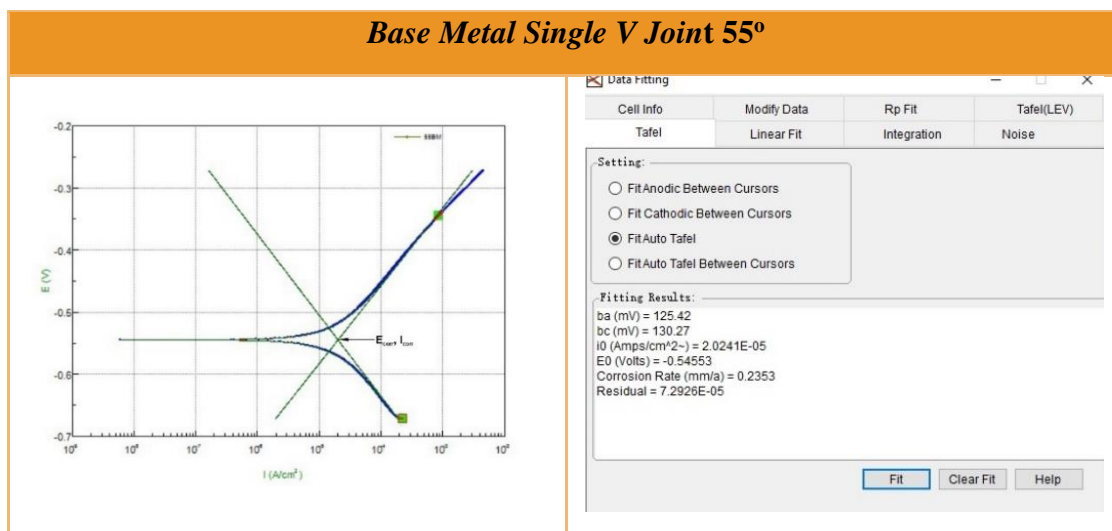
Gambar 4. 3 Preparasi Sampel Korosi

Pengujian korosi pada material ASTM A36 yang telah mengalami proses pengelasan dengan variasi sudut kampuh *single V joint*, telah dilakukan di Laboratorium Korosi dan Kegagalan Material, Departemen Teknik Material, ITS. Dalam pengujian ini, berbagai daerah pada sambungan las, termasuk *base metal*, *Heat-Affected Zone (HAZ)*, dan *weld metal*, diuji untuk mendapatkan data yang relevan tentang karakteristik korosinya. Hasil pengujian ini akan memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai respons material terhadap proses korosi dalam kondisi yang telah mengalami proses pengelasan dengan sudut kampuh *single V joint* yang berbeda. Data uji korosi ini akan berfungsi sebagai landasan penting untuk evaluasi dan analisis keandalan serta performa material dalam variabel yang berbeda.

4.3.2.1. Laju Korosi Single V Joint 55°

Grafik Tafel merupakan suatu jenis grafik pola polarisasi yang khusus, yang memetakan potensial terhadap logaritma arus. Grafik ini digunakan secara luas dalam penelitian korosi untuk memvisualisasikan persamaan tafel dan menganalisis respons korosi dari suatu material. Pada penelitian ini, grafik Tafel digunakan sebagai salah satu metode pengujian korosi yang penting untuk memperoleh pemahaman mendalam tentang laju korosi pada sudut *single V joint* 55°.

Tabel 4. 3 Diagram Tafel *Base Metal Single V Joint 55°*



Pada tabel 4.3, dilakukan pengukuran potensial *base metal single V joint 55°* dari reaksi tafel anodik (b_a) yang menghasilkan nilai sebesar 125.42 mV, dan reaksi tafel katodik (b_c) yang memberikan nilai sebesar 130.27 mV. Untuk menghubungkan kedua reaksi ini, dilakukan plotting potensial versus logaritma arus ($\log I$), yang pada akhirnya menghasilkan plot garis lurus. Titik di mana kedua reaksi tafel ini bertemu pada plot linier, menunjukkan nilai dari arus korosi dan potensial korosi. Titik potong ini mewakili titik keseimbangan antara reaksi oksidasi (anodik) dan reaksi reduksi (katodik) yang terjadi selama proses korosi. Pada tabel 4.3, dapat dilihat bahwa spesimen *base metal single V joint 55°* memiliki E_{corr} sebesar -0.55V, I_{corr} sebesar 2.02×10^{-5} A/cm² dan laju korosi sebesar 0,24 mm/year.

Spesimen HAZ *single V joint 55°* benda uji 1 memiliki E_{corr} sebesar -0.52 V, I_{corr} sebesar 2.37×10^{-5} A/cm² dan laju korosi sebesar 0.28 mm/year. Pada HAZ *single V joint 55°* benda uji 2 memiliki E_{corr} sebesar -0.52 V, I_{corr} sebesar 2.39×10^{-5} A/cm² dan laju korosi sebesar 0.28 mm/year. Sementara pada HAZ *single V joint 55°* benda uji 3 memiliki E_{corr} sebesar -0.52 V, I_{corr} sebesar 2.81×10^{-5} A/cm² dan laju korosi sebesar 0.33 mm/year. Dari hasil pengujian pada ketiga benda uji tersebut, dapat dihitung rata-rata laju korosi pada HAZ *single V joint 55°* sebesar 0.29 mm/year.

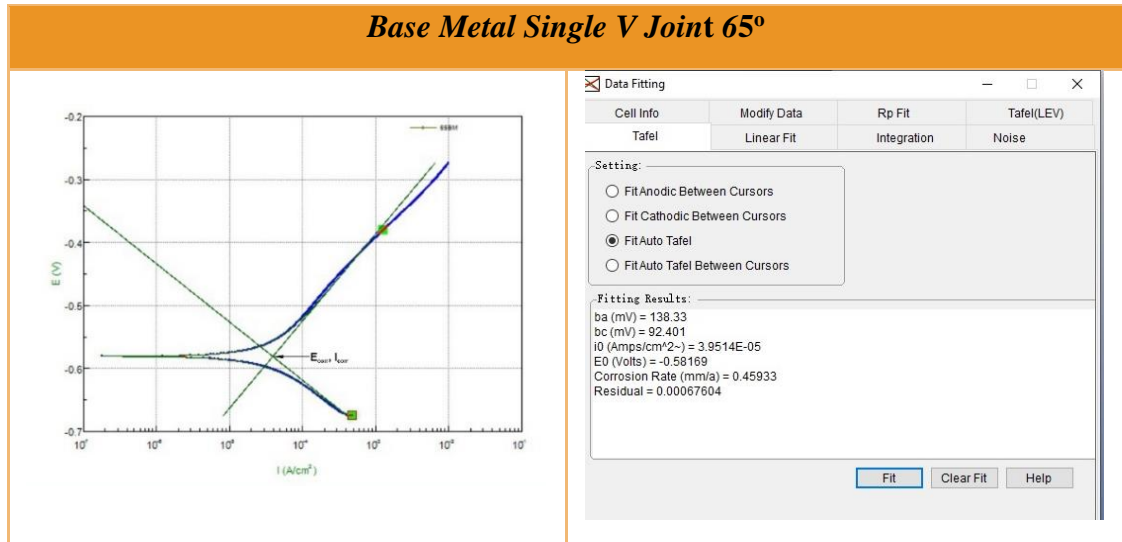
Spesimen *weld metal single V joint 55°* benda uji 1 memiliki E_{corr} sebesar -0.53 V, I_{corr} sebesar 2.82×10^{-5} A/cm² dan laju korosi sebesar 0.33 mm/year. Pada *weld metal single V joint 55°* benda uji 2 memiliki E_{corr} sebesar -0.58V, I_{corr} sebesar 2.83×10^{-5} A/cm² dan laju korosi sebesar 0.33 mm/year. Sementara pada *weld metal single V joint 55°* benda uji 3 memiliki E_{corr} sebesar -0.68V, I_{corr} sebesar 3.75×10^{-5} A/cm² dan laju korosi sebesar 0.44 mm/year. Dari hasil pengujian pada ketiga benda uji tersebut, dapat dihitung rata-rata laju korosi pada *weld metal single V joint 55°* sebesar 0.36 mm/year.

4.3.2.2. Laju Korosi Single V Joint 65°

Grafik Tafel merupakan suatu jenis grafik pola polarisasi yang khusus, yang memetakan potensial terhadap logaritma arus. Grafik ini digunakan secara luas dalam

penelitian korosi untuk memvisualisasikan persamaan tafel dan menganalisis respons korosi dari suatu material. Pada penelitian ini, grafik Tafel digunakan sebagai salah satu metode pengujian korosi yang penting untuk memperoleh pemahaman mendalam tentang laju korosi pada sudut *single V joint* 65°.

Tabel 4. 4 Diagram Tafel *Base Metal Single V Joint* 65°



Pada tabel 4.4, dilakukan pengukuran potensial *base metal single V joint* 65° dari reaksi tafel anodik (b_a) yang menghasilkan nilai sebesar 138.33 mV, dan reaksi tafel katodik (b_c) yang memberikan nilai sebesar 92.401 mV. Untuk menghubungkan kedua reaksi ini, dilakukan plotting potensial versus logaritma arus ($\log I$), yang pada akhirnya menghasilkan plot garis lurus. Titik di mana kedua reaksi tafel ini bertemu pada plot linier, menunjukkan nilai dari arus korosi dan potensial korosi. Titik potong ini mewakili titik keseimbangan antara reaksi oksidasi (anodik) dan reaksi reduksi (katodik) yang terjadi selama proses korosi. Pada tabel 4.6, dapat dilihat bahwa spesimen *base metal single V joint* 65° memiliki E_{corr} sebesar -0.58V, I_{corr} sebesar $3.95 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ dan laju korosi sebesar 0.46 mm/year.

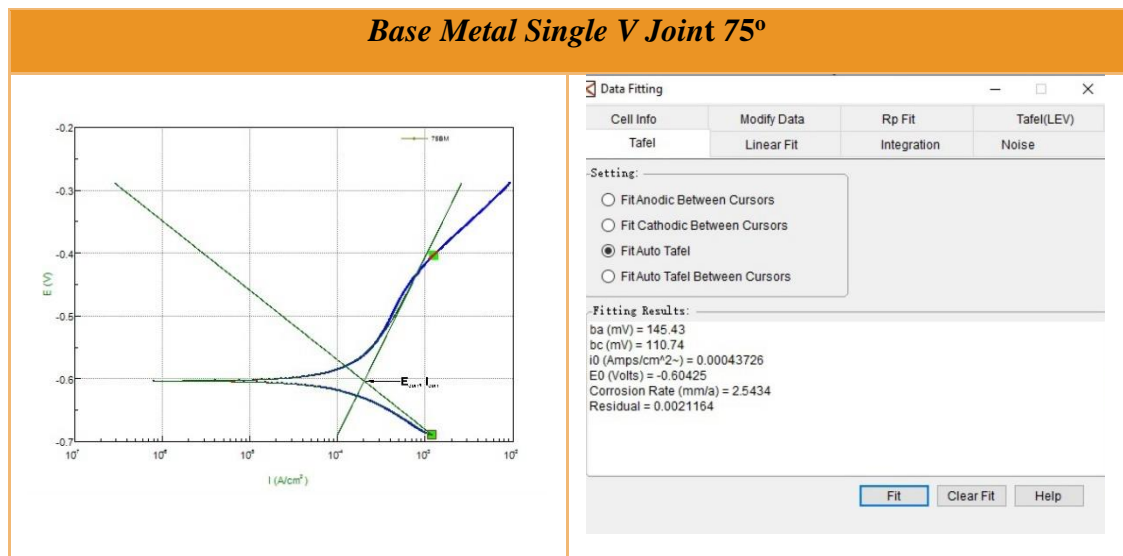
Spesimen HAZ *single V joint* 65° benda uji 1 memiliki E_{corr} sebesar -0.60V, I_{corr} sebesar $6.27 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ dan laju korosi sebesar 0.73 mm/year. Pada HAZ *single V joint* 65° benda uji 2 memiliki E_{corr} sebesar -0.62V, I_{corr} sebesar $7.77 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ dan laju korosi sebesar 0.90 mm/year. Sementara pada HAZ *single V joint* 65° benda uji 3 memiliki E_{corr} sebesar -0.60V, I_{corr} sebesar $10.15 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ dan laju korosi sebesar 1.18 mm/year. Dari hasil pengujian pada ketiga benda uji tersebut, dapat dihitung rata-rata laju korosi pada HAZ *single V joint* 65° sebesar 0.94 mm/year.

Spesimen *weld metal single V joint* 65° benda uji 1 memiliki E_{corr} sebesar -0.62V, I_{corr} sebesar $13.32 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ dan laju korosi sebesar 1.55 mm/year. Pada *weld metal single V joint* 65° benda uji 2 memiliki E_{corr} sebesar -0.65V, I_{corr} sebesar $13.37 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ dan laju korosi sebesar 1.55 mm/year. Sementara pada *weld metal single V joint* 65° benda uji 3 memiliki E_{corr} sebesar -0.58, I_{corr} sebesar $16.16 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ dan laju korosi sebesar 1.88 mm/year. Dari hasil pengujian pada ketiga benda uji tersebut, dapat dihitung rata-rata laju korosi pada *weld metal single V joint* 65° sebesar 1.66 mm/year.

4.3.2.3. Laju Korosi Single V Joint 75°

Grafik Tafel merupakan suatu jenis grafik pola polarisasi yang khusus, yang memetakan potensial terhadap logaritma arus. Grafik ini digunakan secara luas dalam penelitian korosi untuk memvisualisasikan persamaan tafel dan menganalisis respons korosi dari suatu material. Pada penelitian ini, grafik Tafel digunakan sebagai salah satu metode pengujian korosi yang penting untuk memperoleh pemahaman mendalam tentang laju korosi pada sudut *single V joint* 75°.

Tabel 4. 5 Diagram Tafel *Base Metal Single V Joint 75°*



Pada tabel 4.5, dilakukan pengukuran potensial *base metal single V joint 75°* dari reaksi tafel anodik (b_a) yang menghasilkan nilai sebesar 153.43 mV, dan reaksi tafel katodik (b_c) yang memberikan nilai sebesar 110.74 mV. Untuk menghubungkan kedua reaksi ini, dilakukan plotting potensial versus logaritma arus ($\log I$), yang pada akhirnya menghasilkan plot garis lurus. Titik di mana kedua reaksi tafel ini bertemu pada plot linier, menunjukkan nilai dari arus korosi dan potensial korosi. Titik potong ini mewakili titik keseimbangan antara reaksi oksidasi (anodik) dan reaksi reduksi (katodik) yang terjadi selama proses korosi. Pada tabel 4.9, dapat dilihat bahwa spesimen *base metal single V joint 75°* memiliki E_{corr} sebesar -0.60V, I_{corr} sebesar 4.37×10^{-5} A/cm² dan laju korosi sebesar 0.54 mm/year.

Spesimen HAZ *single V joint 75°* benda uji 1 memiliki E_{corr} sebesar -0.50V, I_{corr} sebesar 23.43×10^{-5} A/cm² dan laju korosi sebesar 2.72 mm/year. Pada HAZ *single V joint 75°* benda uji 2 memiliki E_{corr} sebesar -0.59V, I_{corr} sebesar 23.59×10^{-5} A/cm² dan laju korosi sebesar 2.74 mm/year. Sementara pada HAZ *single V joint 75°* benda uji 3 memiliki E_{corr} sebesar -0.60V, I_{corr} sebesar 40.07×10^{-5} A/cm² dan laju korosi sebesar 4.66 mm/year.

Dalam hasil uji korosi HAZ *single V joint 75°*, terdapat variasi data yang tinggi antara tiga benda uji. Standar deviasi yang tercatat sebesar 1,04419 digunakan sebagai variabel perhitungan standar error pada data. Nilai persentase standar error pada hasil uji korosi HAZ *single V joint 75°* sebesar 60,3%, dapat disimpulkan bahwa data HAZ 3 *single V joint 75°* dapat dieliminasi (Dibuang dari perhitungan rata – rata) karena

memberikan nilai standar eror yang paling tinggi. Maka, rata – rata laju korosi pada HAZ *single V joint 75°* sebesar 2.73 mm/year.

Spesimen *weld metal single V joint 75°* benda uji 1 memiliki E_{corr} sebesar -0.60V, I_{corr} sebesar 55.18×10^{-5} A/cm² dan laju korosi sebesar 6.41 mm/year. Pada *weld metal single V joint 75°* benda uji 2 memiliki E_{corr} sebesar -0.61V, I_{corr} sebesar 57.55×10^{-5} A/cm² dan laju korosi sebesar 6.69 mm/year. Sementara pada *weld metal single V joint 75°* benda uji 3 memiliki E_{corr} sebesar -0.59V, I_{corr} sebesar 102.35×10^{-5} A/cm² dan laju korosi sebesar 11.90mm/year.

Dalam hasil uji korosi *weld metal single V joint 75°*, terdapat variasi data yang tinggi antara tiga benda uji. Standar deviasi yang tercatat sebesar 2,52461 digunakan sebagai variabel perhitungan standar eror pada data. Nilai persentase standar eror pada hasil uji korosi *weld metal single V joint 75°* sebesar 145,76%, dapat disimpulkan bahwa data *weld metal 3 single V joint 75°* dapat dieliminasi karena memberikan nilai standar eror yang paling tinggi. Maka, rata – rata laju korosi pada *weld metal single V joint 75°* sebesar 6.55 mm/year.

4.3.2.4. Analisa Laju Korosi

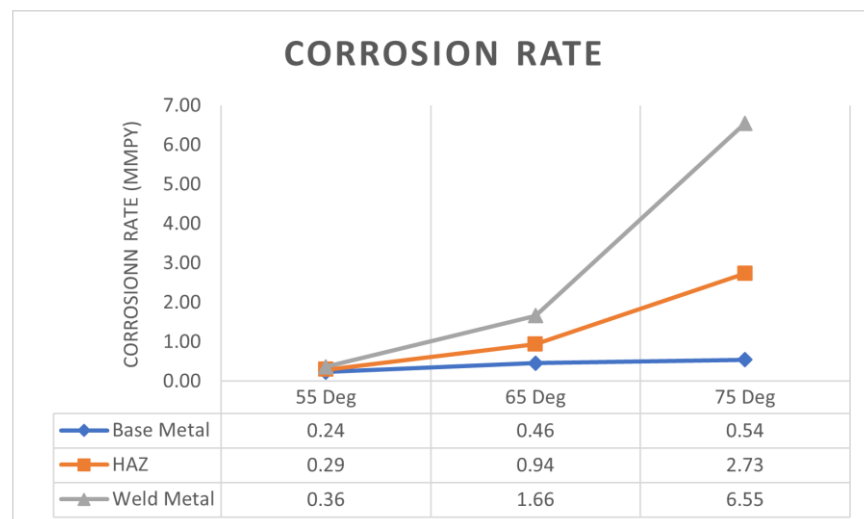
Berdasarkan hasil uji korosi pada baja ASTM A36 dengan sudut pengelasan *single V joint* yang berbeda, dapat dilihat bahwa laju korosi meningkat seiring dengan peningkatan sudut pengelasan *single V joint*. Hasil ini menunjukkan adanya pengaruh sudut pengelasan *single V joint* terhadap laju korosi pada setiap daerah pengelasan (*Base Metal*, HAZ, dan *Weld Metal*).

Tabel 4. 6 Hasil Uji Korosi

Sudut		b_a (mV)	b_c (mV)	I_0 (Amps/cm ²)	E_0 (Volts)	Corrosion Rate (mm/year)	
55°	BM	125.42	130.27	2.02×10^{-5}	-0.55	0.24	
	HAZ	1	98.90	191.67	2.37×10^{-5}	-0.52	0.28
		2	96.32	162.81	2.39×10^{-5}	-0.52	0.28
		3	95.11	148.62	2.81×10^{-5}	-0.52	0.33
	WM	1	103.96	125.36	2.82×10^{-5}	-0.53	0.33
		2	145.70	87.69	2.83×10^{-5}	-0.58	0.33
3		403.05	72.46	3.75×10^{-5}	-0.68	0.44	
65°	BM	138.33	92.40	3.95×10^{-5}	-0.58	0.46	
	HAZ	1	215.76	77.66	6.27×10^{-5}	-0.60	0.73

Sudut		b_a (mV)	b_c (mV)	I_0 (Amps/cm ²)	E_0 (Volts)	Corrosion Rate (mm/year)	
65°	HAZ	2	260.07	71.26	7.77×10^{-5}	-0.62	0.90
		3	309.80	74.66	10.15×10^{-5}	-0.60	1.18
	WM	1	285.32	72.81	13.32×10^{-5}	-0.62	1.55
		2	333.79	69.12	13.37×10^{-5}	-0.65	1.55
		3	517.28	74.66	16.16×10^{-5}	-0.58	1.88
75°	BM		145.43	110.74	4.37×10^{-5}	-0.60	0.54
	HAZ	1	761.86	87.60	23.43×10^{-5}	-0.50	2.72
		2	358.76	91.49	23.59×10^{-5}	-0.59	2.74
		3	368.17	79.83	40.07×10^{-5}	-0.60	4.66
	WM	1	588.24	96.28	55.18×10^{-5}	-0.60	6.41
		2	401.33	109.03	57.55×10^{-5}	-0.61	6.69
		3	961.43	142.96	102.35×10^{-5}	-0.59	11.90

Setelah dilakukan pembuangan data eror berdasarkan standar deviasi dan standar eror, hasil tersebut kemudian dirata – rata untuk memberikan gambaran umum tentang karakteristik keseluruhan data pada hasil pengelasan baja ASTM A36 dengan variasi sudut *single V joint*. Berikut merupakan grafik laju korosi dengan variasi sudut *single V joint*.



Gambar 4. 4 Rata – Rata Corrosion Rate

Berdasarkan data uji korosi pada baja ASTM A36 dengan sudut pengelasan yang berbeda, ditemukan bahwa laju korosi meningkat seiring dengan peningkatan sudut pengelasan. Pada sudut 55 derajat, rata-rata laju korosi tercatat sebesar 0.24 mm/year untuk *base metal* (BM), 0.29 mm/year untuk *heat-affected zone* (HAZ), dan 0.36 mm/year untuk *weld metal* (WM). Pada sudut 65 derajat, laju korosi meningkat menjadi 0.46 mm/year untuk BM, 0.94 mm/year untuk HAZ, dan 1.66 mm/year untuk WM. Pada sudut 75 derajat, laju korosi mencapai nilai rata-rata 0.54 mm/year untuk BM, 2,73 mm/year untuk HAZ, dan 6,55 mm/year untuk WM.

Berdasarkan data yang telah diperoleh, ditemukan bahwa pada baja ASTM A36, *base metal* memiliki laju korosi yang paling rendah, sementara *weld metal* menunjukkan laju korosi yang paling tinggi dalam larutan korosif NaCl 3,5%. Peningkatan besar sudut *single V joint* memberikan efek negatif yang signifikan terhadap sifat korosi baja ASTM A36. Semakin besar volume logam las, semakin tinggi pula panas yang diterima selama proses pengelasan, dan ini menyebabkan peningkatan tegangan sisa dalam daerah *weld metal* dan HAZ.

Gambar 4.4 menunjukkan grafik laju korosi dengan variasi sudut *single V joint* yang sesuai dengan rencana penelitian. Data grafik menunjukkan kenaikan nilai laju korosi dari sudut 55 derajat, 65 derajat dan 75 derajat. Daerah *weld metal* mewakili tegangan tarik selama proses pendinginan pengelasan, sementara *base metal* dan HAZ mewakili tegangan tekan selama proses pendinginan pengelasan. Penggunaan jig pada penelitian ini dapat menghambat kontraksi, sehingga HAZ dapat mengalami tegangan tekan.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Silva et al., 2016), peningkatan input panas pada proses pengelasan mengakibatkan peningkatan tegangan sisa. Tegangan sisa memiliki dampak signifikan pada laju korosi, di mana semakin tinggi tegangan sisa, semakin tinggi pula laju korosi yang terjadi. Ditemukan hubungan positif antara tingkat tegangan sisa dan tingkat korosi, di mana peningkatan tegangan sisa cenderung menyebabkan peningkatan laju korosi pada material yang terkena pengaruh tegangan tersebut.

Penelitian ini juga mengevaluasi variasi sudut pada sambungan las *single V joint* dan dampaknya terhadap laju korosi pada daerah *weld metal*, HAZ (*Heat-Affected Zone*) dan *base metal*. Pada daerah *weld metal* yang mengalami tegangan tarik sisa, ditemukan peningkatan laju korosi seiring dengan peningkatan sudut dari 55 derajat menjadi 65 derajat. Laju korosi meningkat dari 0,36 mm/year menjadi 1,66 mm/year. Selanjutnya, ketika sudut *single V joint* meningkat menjadi 75 derajat, terjadi peningkatan laju korosi yang lebih signifikan sebesar 6,55 mm/year. Hal serupa juga terjadi pada daerah HAZ yang mengalami tegangan tekan sisa, di mana peningkatan sudut *single V joint* dari 55 derajat menjadi 65 derajat menyebabkan peningkatan laju korosi dari 0,29 mm/year menjadi 0,94 mm/year. Kemudian, peningkatan sudut menjadi 75 derajat menghasilkan peningkatan laju korosi sebesar 2,73 mm/year.

Data tersebut menjelaskan bahwa peningkatan tegangan tarik sisa dan tegangan tekan sisa pada sambungan las menyebabkan peningkatan energi dalam dan tingkat energi rata-rata elektron. Selain itu, terjadi pengurangan energi aktivasi rata-rata yang

diperlukan untuk transformasi atom logam menjadi ion logam. Tegangan sisa juga meningkatkan kekuatan ikatan dalam struktur logam dan menghasilkan kerapatan arus korosi yang lebih tinggi dalam proses korosi. Dengan demikian, laju korosi meningkat karena terjadi percepatan laju transformasi dari atom logam menjadi ion logam yang disebabkan oleh tegangan sisa (Bai et al., 2018).

Menurut penelitian yang dilakukan oleh (Soleimani et al., 2019), mekanisme korosi dapat dikaitkan dengan ukuran butir pada material. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa ukuran butir yang lebih besar cenderung mengurangi laju korosi dalam mekanisme korosi umum. Namun, penelitian ini lebih menekankan pengaruh tegangan sisa terhadap laju korosi. Ditemukan bahwa batas butir dengan lebih banyak cacat (yang memiliki tegangan lebih tinggi) cenderung lebih sensitif terhadap korosi intergranular. Hal ini dapat disebabkan oleh perlindungan yang lebih lemah dalam larutan asam pereduksi. Selain itu, batas butir dengan tekanan yang lebih tinggi memiliki energi batas butir yang lebih tinggi dan laju disolusi yang lebih tinggi dalam larutan. Akibatnya, laju korosi meningkat pada logam las dan HAZ ketika sudut *single V joint* meningkat, karena peningkatan tegangan sisa terkait dengan volume pengisian logam las yang lebih besar. Penelitian ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh (Shang et al., 2022).

Hasil pengujian korosi memberikan kesimpulan bahwa dengan semakin besar sudut *single V joint*, maka laju korosi semakin meningkat. Hal ini mengindikasikan bahwa semakin besar sudut kampuh, semakin banyak deposit bahan tambah dalam mengisi volume kampuh, sehingga dapat menimbulkan tegangan sisa yang lebih besar dan menyebabkan laju korosi semakin tinggi. Oleh karena itu, sudut *single V joint* yang besar dapat memperburuk sifat korosi baja ASTM A36 dalam lingkungan korosif.

4.2.3 Pengujian Tarik

Pengujian tarik adalah pengujian untuk mengevaluasi kekuatan dan keuletan sambungan las. Pengujian ini dibutuhkan dalam rangka penentuan material yang tepat dalam pembuatan konstruksi. Dengan adanya pengujian ini, diharapkan sifat mekanis dari suatu material akan terlihat seperti *yield stress* dan *stress ultimate*.

Gambar 4.5 dibawah ini menunjukkan gambaran visual tentang bagaimana benda uji mengalami deformasi dan kegagalan saat dikenakan beban tarik. Gambar tersebut mengindikasikan benda uji saat mencapai titik kegagalan melalui adanya retakan, patahan, atau perubahan bentuk permanen yang mengindikasikan bahwa material telah mencapai batas kekuatannya.



(a) *Single V Joint 55°*

(b) *Single V Joint 65°*

(c) *Single V Joint 75°*

Gambar 4. 5 Hasil Visual Benda Uji Tarik

Setelah dilakukan pengujian terhadap material ASTM A36 hasil pengelasan menggunakan variasi sudut kampuh *single V joint*, maka didapat data uji tarik sebagai berikut:

Tabel 4. 7 Hasil Uji Tarik

Benda Uji	Initial Length (mm)	Area (mm ²)	Yield Force (Kgf)	Force Ultimate (Kgf)	Yield Stress (MPa)	Stress Ultimate (MPa)	Patahan	
55°	1	70.00	166.8	5626.6	7857.0	330.8	461.9	Weld Metal
	2	65.00	144.00	5386.3	6281.0	366.8	427.7	Weld Metal
	3	65.00	159.6	5634.2	7796.6	346.2	479.0	Base Metal
65°	1	75.00	159.60	5694.3	7991.8	349.9	491.1	Base Metal
	2	70.00	154.80	5826.4	7730.1	369.1	489.7	Weld Metal
	3	65.00	152.40	5594.7	6969.7	360.0	448.5	Weld Metal
75°	1	65.00	147.60	5652.1	7194.3	375.5	478.0	Base Metal
	2	70.00	154.80	5347.4	7476.3	338.8	473.6	Base Metal
	3	70.00	162.00	5661.9	7702.5	342.7	466.3	Base Metal

Dari data yang diberikan, terdapat dua parameter yang diamati, yaitu *Yield Stress* dan *Ultimate Stress*, yang diukur dalam Megapascal (MPa). Data ini terkait dengan tiga benda uji yang memiliki sudut kampuh yang berbeda, yaitu 55°, 65° dan 75°.

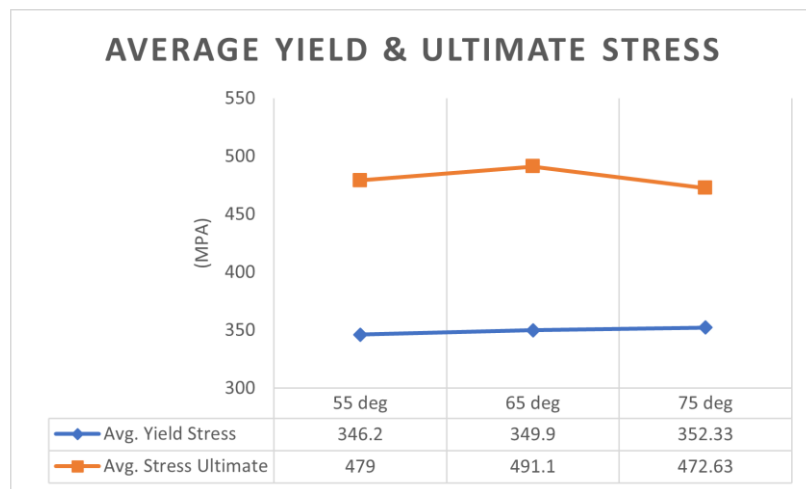
4.2.3.1. Analisa Patahan pada Base Metal

Pada hasil uji tarik yang telah dilakukan, terdapat benda uji yang patah pada daerah *base metal*. Kehadiran patahan pada daerah *weld metal* menyebabkan data menjadi tidak homogen, sehingga patahan yang terjadi pada *weld metal* tidak dapat dianggap sama dengan patahan yang terjadi pada base metal secara merata. Oleh karena itu, patahan yang muncul pada daerah *weld metal* dikecualikan dari analisis patahan pada *base metal* dan tidak diikutsertakan dalam perhitungan rata-rata dari hasil uji tarik yang mengalami patah di *base metal*. Tabel 4.8 menampilkan benda uji yang terdapat patahan di daerah *base metal*.

Tabel 4. 8 Hasil Uji Tarik pada Patahan Base Metal

Benda Uji	Initial Length (mm)	Area (mm ²)	Yield Force (Kgf)	Force Ultimate (Kgf)	Yield Stress (MPa)	Stress Ultimate (MPa)	Patahan
55°	3	65.00	5634.2	7796.6	346.2	479.0	Base Metal
65°	1	75.00	5694.3	7991.8	349.9	491.1	Base Metal
75°	1	65.00	5652.1	7194.3	375.5	478.0	Base Metal
	2	70.00	5347.4	7476.3	338.8	473.6	Base Metal
	3	70.00	5661.9	7702.5	342.7	466.3	Base Metal

Tabel 4.8 menampilkan perubahan *stress ultimate* dan *yield stress* saat terjadi patah pada daerah *base metal* dengan variasi sudut *single V joint*. Patahan di *base metal* menunjukkan bahwa daerah tersebut memiliki kekuatan yang cukup baik untuk menahan tegangan tarik sebelum patah. Hal ini juga mengindikasikan bahwa pemilihan elektroda dan penggunaan metode *multipass* pada proses pengelasan yang tepat telah berkontribusi dalam menghasilkan sambungan yang kuat dan tahan terhadap beban tarik.



Gambar 4. 6 Average Yield & Ultimate Stress pada Patahan Base Metal

Data gambar 4.6 menunjukkan bahwa nilai *stress ultimate* mencapai titik optimum pada sudut *single V joint* 65 derajat. Pada sudut 55 derajat, ditemukan bahwa *stress ultimate* memiliki nilai 479 MPa. Selanjutnya, terjadi peningkatan sebesar 2.53% dari sudut 55 derajat menjadi 491.1 MPa pada sudut 65 derajat. Namun, saat sudut mencapai 75 derajat, terjadi penurunan sebesar 3.76% dari nilai sebelumnya dengan rata – rata sebesar 472.63 MPa.

Sementara itu pada nilai *yield stress* menunjukkan bahwa pada variasi sudut 55 derajat menunjukkan nilai *yield stress* yang optimum. Pada sudut 55 derajat, ditemukan bahwa *yield stress* memiliki nilai sebesar 346.2 MPa. Selanjutnya, terjadi kenaikan sebesar 1.07% dari sudut 55 derajat menjadi 349,9 MPa pada sudut 65 derajat. Saat sudut mencapai 75 derajat, terjadi kenaikan sebesar 0,69% dari nilai sebelumnya dengan rata – rata sebesar 352,33 MPa.

Patahan yang terjadi pada *base metal* dalam uji tarik menunjukkan adanya kesesuaian dalam pemilihan elektroda dan penggunaan metode *multipass* dalam proses pengelasan. Hal ini mengindikasikan bahwa kekuatan pada *weld metal* (logam las) dan HAZ (zona yang terpengaruh panas) meningkat, sehingga terjadi patahan pada *base metal*. Temuan ini sejalan dengan penelitian yang dilaporkan oleh (Kou, 2002), yang menyatakan bahwa dalam proses pengelasan berulang atau *multipass* pada baja, zona yang terpengaruh panas dari pengelasan berikutnya dapat menggantikan zona fusi dari pengelasan sebelumnya. Dalam konteks ini, peningkatan kekuatan dan ketahanan logam las dapat terjadi melalui peningkatan kepadatan butir dalam zona fusi yang kasar. Pada sudut *single V joint* yang berbeda, pemilihan elektroda dan metode *multipass* dapat mempengaruhi kekuatan tarik dan sifat mekanik material. Adanya variasi ini menyoroti pentingnya pemilihan elektroda yang tepat dan metode *multipass* yang sesuai untuk mencapai kekuatan yang optimal dalam pengelasan dan uji tarik. Dengan memilih elektroda yang sesuai dan menggunakan metode *multipass* yang tepat, dapat dicapai peningkatan kekuatan dan ketahanan logam las dan HAZ

Perbedaan variasi data yang terlihat pada *base metal* dalam tabel 4.8 dan gambar 4.6 dapat dijelaskan oleh ketidakpengaruhannya terhadap panas selama proses pengelasan. Fluktuasi data pada *base metal* terjadi akibat adanya anisotrop dimana bahan akan menunjukkan respons mekanik yang berbeda ketika dikenakan gaya tarik dalam arah yang berbeda. Sifat ini terjadi karena orientasi dan distribusi mikrostruktur bahan tidak seragam dalam semua arah. Dengan kata lain, bahan akan menunjukkan perbedaan dalam karakteristik mekaniknya ketika dikenakan beban tarik pada arah yang berbeda.

4.2.3.2. Analisa Patahan pada Weld Metal

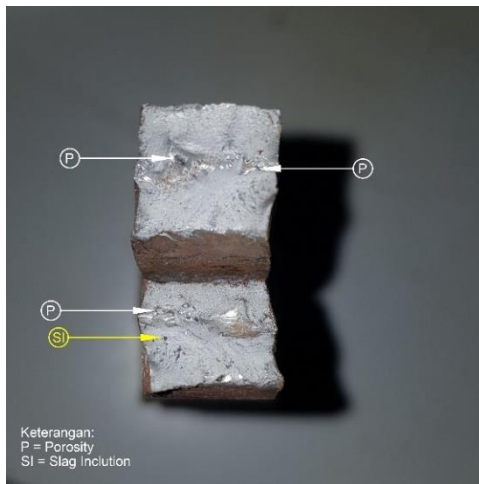
Pada hasil uji tarik yang telah dilakukan, terdapat benda uji yang patah pada daerah *weld metal*. Tabel 4.9 menampilkan benda uji yang terdapat patahan di daerah *weld metal*.

Tabel 4. 9 Hasil Uji Tarik Pada Patahan Weld Metal

Benda Uji	Initial Length (mm)	Area (mm ²)	Yield Force (Kgf)	Force Ultimate (Kgf)	Yield Stress (MPa)	Stress Ultimate (MPa)	Patahan	
55°	1	70.00	166.8	5626.6	7857.0	330.8	461.9	Weld Metal
	2	65.00	144.00	5386.3	6281.0	366.8	427.7	Weld Metal

Benda Uji	Initial Length (mm)	Area (mm ²)	Yield Force (Kgf)	Force Ultimate (Kgf)	Yield Stress (MPa)	Stress Ultimate (MPa)	Patahan	
65°	2	70.00	154.80	5826.4	7730.1	369.1	489.7	Weld Metal
	3	65.00	152.40	5594.7	6969.7	360.0	448.5	Weld Metal

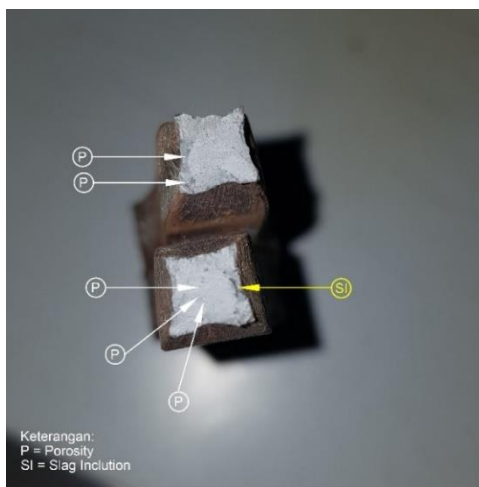
Tabel 4.9 mencantumkan data benda uji yang mengalami patah di daerah *weld metal*. Patahan ini terjadi pada sudut 55 derajat pada benda kerja 1 dan 2, serta pada sudut 65 derajat pada benda kerja 2 dan 3. Penyebab patahan pada *weld metal* adalah *porosity* (keberadaan pori-pori dalam material) dan *slag inclusion*. Porositas dan *slag inclusion* berperan sebagai konsentrator tegangan, yang mengakibatkan peningkatan tegangan di sekitar porositas dan *slag inclusion*. Hal ini memicu inisiasi dan propagasi retakan, yang pada akhirnya menyebabkan patahnya material. Porositas dan *slag inclusion* yang terdeteksi menyebabkan nilai *stress ultimate* yang signifikan menurun.



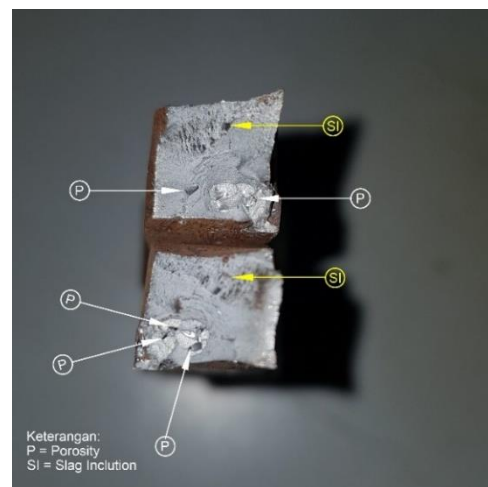
a) *Single V joint 55°* Benda Uji 1



b) *Single V joint 55°* Benda Uji 2



c) *Single V joint 65°* Benda Uji 2



d) *Single V joint 65°* Benda Uji 3

Gambar 4. 7 Porositas Pada Weld Metal

Pada spesimen dengan bentuk sambungan *single V joint* 55 derajat benda uji 1, diperoleh hasil uji tarik dengan nilai *yield stress* sebesar 330.8MPa dan *stress ultimate* sebesar 461.9 MPa. Sedangkan pada benda uji 2 pada sudut 55 derajat, diperoleh hasil uji tarik dengan nilai *yield stress* sebesar 366.8 MPa dan *stress ultimate* sebesar 427.7 MPa. Pada spesimen dengan bentuk sambungan *single V joint* 65 derajat benda uji 2, diperoleh hasil uji tarik dengan nilai *yield stress* sebesar 369.1 MPa dan *stress ultimate* sebesar 489.7 MPa. Sedangkan pada benda uji 3, diperoleh hasil uji tarik dengan nilai *yield stress* sebesar 360.0 MPa dan *stress ultimate* sebesar 448.5 MPa. Patahan pada empat benda uji ini terjadi di daerah *weld metal*.

Berdasarkan data yang tercantum pada tabel 4.9 dan gambar 4.7, terdapat persentase patahan *weld metal* yang disebabkan oleh cacat pada sudut 55 derajat benda kerja 1 sebesar 2.6% dan pada sudut 55 derajat benda kerja 2 sebesar 9.2%. Selain itu, pada sudut 65 derajat benda kerja 2 persentase patahan *weld metal* akibat cacat mencapai 1.3%, sedangkan pada sudut 65 derajat benda kerja 3 mencapai 8.4%. Data ini menunjukkan bahwa semakin tinggi persentase cacat las, maka kekuatan tarik material akan semakin menurun. Cacat las, seperti porositas dan *slag inclusion*, dapat menjadi titik lemah dalam pengelasan dan dapat mengurangi kekuatan struktural dari sambungan tersebut.

Salah satu penyebab terbentuknya porositas dalam pengelasan adalah kecepatan pengelasan yang tinggi. Saat kecepatan pengelasan meningkat, logam cair tidak memiliki waktu yang cukup untuk mengisi rongga-rongga gas yang terperangkap dalam logam dasar. Seiring dengan pendinginan dan pengerasan logam cair, rongga-rongga ini tetap ada dan membentuk porositas. Pada sudut-sudut 55 dan 65 derajat, volume pengisian menjadi lebih sempit, yang mengakibatkan peningkatan kecepatan pengelasan. Hal ini disebabkan oleh volume pengisian yang cepat pada sudut *single V joint*. Dengan kecepatan pengelasan yang tinggi, kemungkinan terbentuknya porositas dalam proses pengelasan menjadi lebih besar. Data mengenai kecepatan pengelasan dapat ditemukan pada tabel 4.1.

Pada penelitian ini, perhitungan pendekatan nilai *stress ultimate* tanpa porosity dilakukan untuk mengetahui nilai kekuatan efektif tanpa adanya porosity. Benda uji yang mengalami patahan di daerah *weld metal* akibat adanya *porosity* dan *slag inclusion* difoto untuk dibuat sketsa menggunakan aplikasi CorelDraw 2019. Tujuan dari sketsa ini adalah untuk mengukur luas permukaan sketsa dan luas *porosity* sketsa guna mendapatkan informasi yang lebih terperinci.

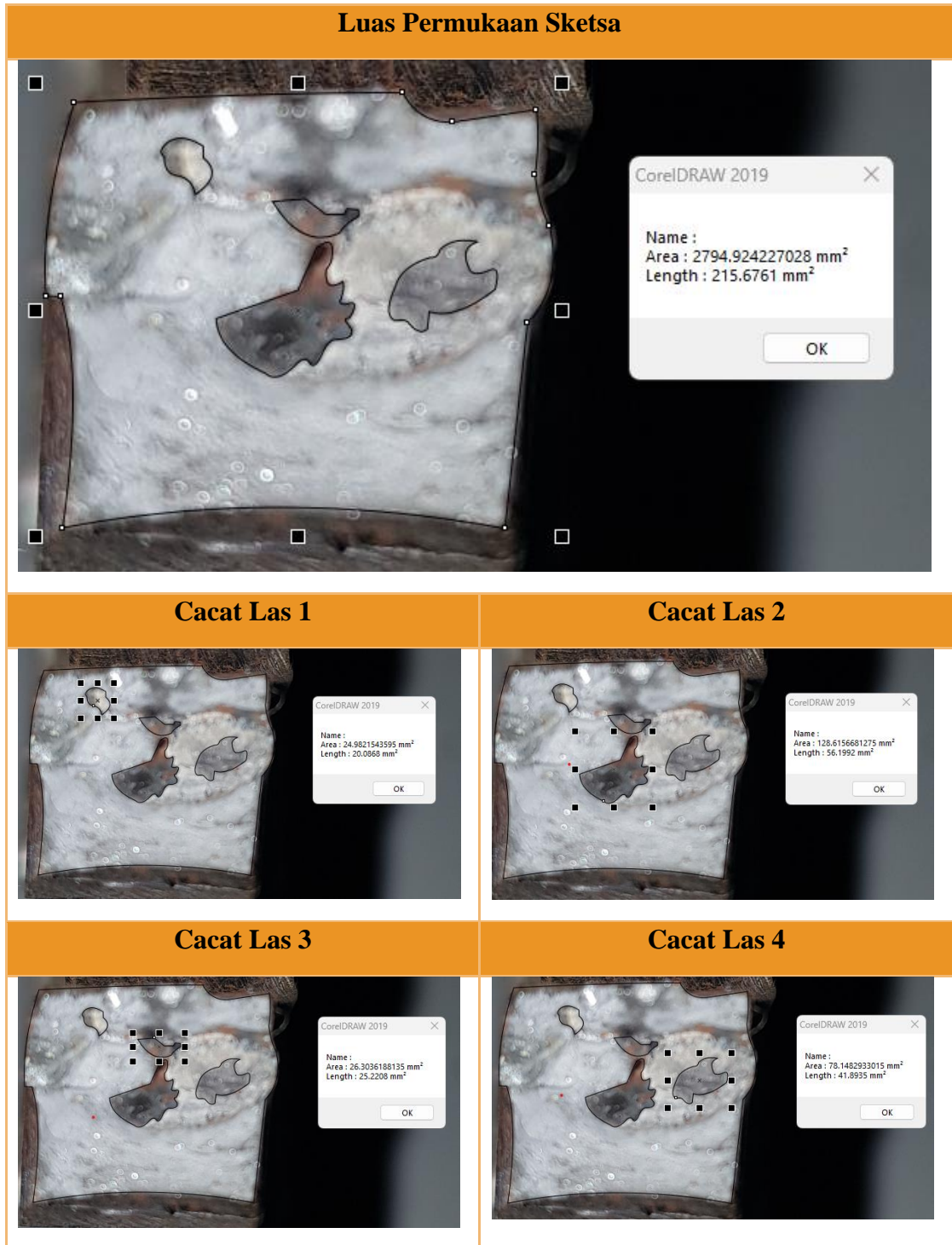
Sebagai contoh, pada *single V joint* 55 derajat benda uji 2, diperoleh luas permukaan sketsa dari aplikasi CorelDraw sebesar 2794.9 mm². Selanjutnya, terdapat 4 luas sketsa cacat las yang diidentifikasi pada benda uji tersebut, yaitu 24.9 mm², 128.6 mm², 26.3 mm², dan 78.1 mm². Total luas sketsa cacat las yang teridentifikasi pada aplikasi CorelDraw adalah 257.9 mm². Untuk mendapatkan perkiraan luas cacat las yang sebenarnya, dilakukan pendekatan perbandingan antara luasan sketsa dan luasan sebenarnya (sebesar 144 mm²), yang dapat dihitung sebagai berikut:

$$\text{Luas Cacat Las Aktual} = \frac{\text{Luas Sketch Cacat Las} \times \text{Luas Aktual Area}}{\text{Luas Sketch Area}}$$

$$\text{Luas Cacat Las Aktual} = \frac{257,9 \text{ mm}^2 \times 144 \text{ mm}^2}{2794,9 \text{ mm}^2}$$

$$\text{Luas Cacat Las Aktual} = 13,3 \text{ mm}^2$$

Tabel 4. 10 Luas Sketsa Permukaan dan Luas Sketsa Cacat Las



Setelah memperoleh luas cacat las aktual, dilakukan perhitungan luas permukaan tanpa adanya cacat las. Penghitungan luas permukaan tanpa cacat las ini penting karena luas permukaan tersebut berkontribusi pada nilai *stress ultimate* sebesar 427.7 MPa pada benda uji 2 *single V joint* dengan sudut 55 derajat.

$$\begin{aligned} \text{Luas Tanpa Cacat Las} &= \text{Luas Area Aktual} - \text{Luas Cacat Las Aktual} \\ \text{Luas Tanpa Cacat Las} &= 144 \text{ mm}^2 - 13,3 \text{ mm}^2 \\ \text{Luas Tanpa Cacat Las} &= 130,7 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Selanjutnya, dilakukan perbandingan antara nilai *force ultimate* efektif dan nilai *force ultimate* hasil pengujian (yang muncul akibat adanya cacat pada las). Berikut ini adalah perhitungan perbandingan *force ultimate* efektif:

$$\begin{aligned} \text{Force Ultimate Efektif} &= \frac{\text{Force Ultimate} \times \text{Area Efektif}}{\text{Luas Tanpa Cacat Las}} \\ \text{Force Ultimate Efektif} &= \frac{6281 \text{ kgf} \times 144 \text{ mm}^2}{130,7 \text{ mm}^2} \\ \text{Force Ultimate Efektif} &= 6919,5 \text{ kgf} \\ \text{Stress Ultimate Efektif} &= \frac{\text{Force Ultimate Efektif}}{\text{Area Efektif}} \\ \text{Stress Ultimate Efektif} &= \frac{6919,5 \text{ kgf}}{144 \text{ mm}^2} \\ \text{Stress Ultimate Efektif} &= 48,05 \text{ kgf/mm}^2 \\ \text{Stress Ultimate Efektif} &= 471,23 \text{ MPa} \end{aligned}$$

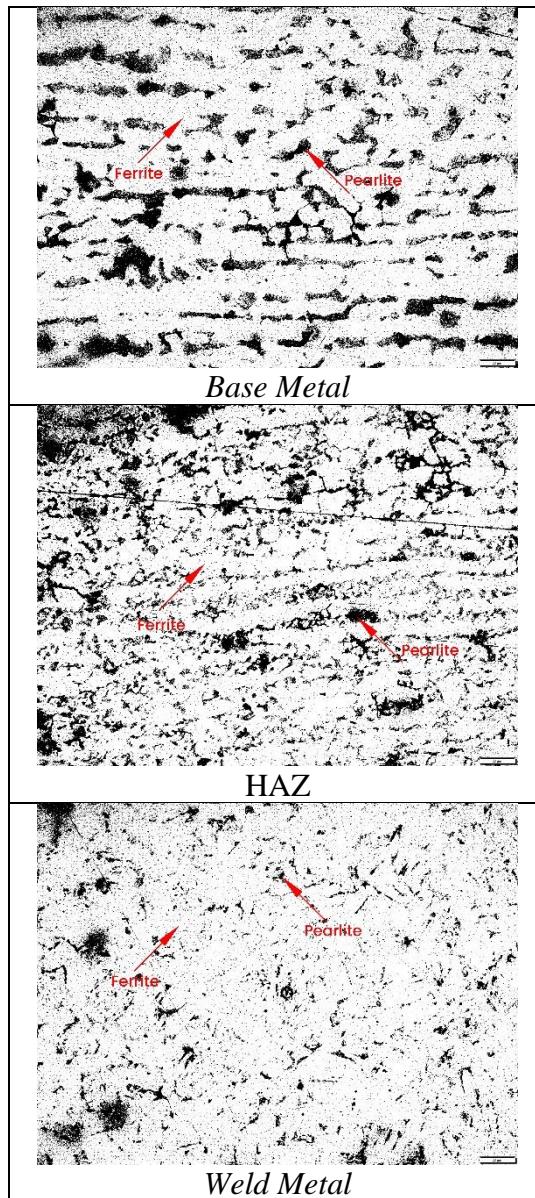
Pendekatan nilai *stress ultimate* efektif pada *single V joint* 55 derajat benda uji 1 sebesar 474.1 MPa, sementara pada benda uji 2 sebesar 471.2 MPa. Kemudian pada *single V joint* 65 derajat, didapatkan pendekatan nilai *stress ultimate* efektif pada benda uji 2 sebesar 496.2 MPa, sedangkan pada benda uji 3 sebesar 489.8 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa kekuatan tarik *single V joint* 55° benda uji 1 dan 2, serta *single V joint* 65° benda uji 2 dan 3, melebihi kekuatan tarik *base metal* jika tidak ada cacat las. Adanya *porosity* dan *slag inclusion* pada benda uji yang patah di *weld metal* menyebabkan kekuatan tarik turun secara signifikan. Perhitungan pendekatan nilai *stress ultimate* efektif terdapat pada lampiran.

4.2.4 Pengujian Metalografi

Pengujian metalografi adalah pengujian untuk mengevaluasi mendalam tentang struktur mikro dari sambungan pelat ASTM A36. Pengujian ini menggunakan mikroskop optik dalam mengamati struktur mikro seperti butir, fase, inklusi dan cacat dalam sambungan las.

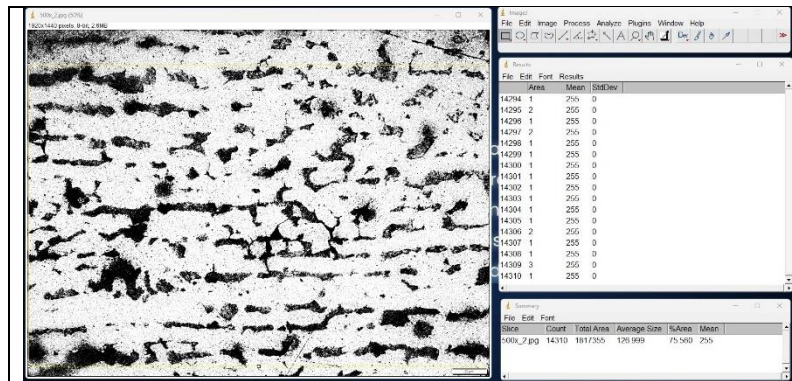
Pengujian metalografi dilakukan di laboratorium metalurgi jurusan Teknik Mesin ITS. Dilakukan penembakan tiga lokasi yang meliputi logam induk (*base metal*), HAZ (*heat affected zone*), dan logam las (*weld metal*). Pengujian ini dilakukan dengan perbesaran sebesar 500x. Setelah dilakukan pengujian, maka foto hasil dari proses tersebut akan dilakukan perhitungan *point counting* menggunakan software ImageJ.

4.2.4.1. Metalografi Single V Joint 55°

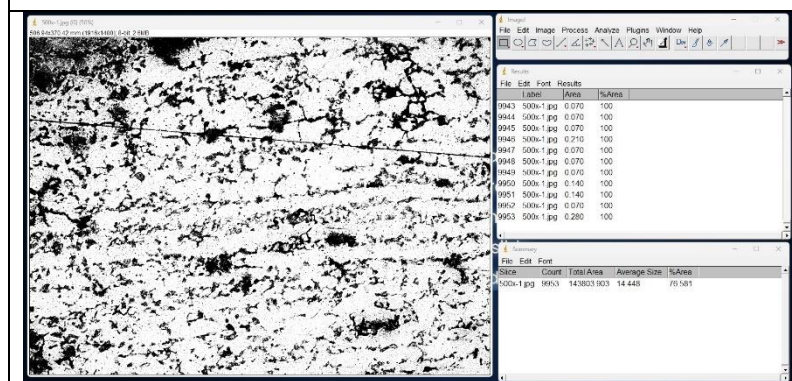


Gambar 4. 8 Metalografi Single V Joint 55°

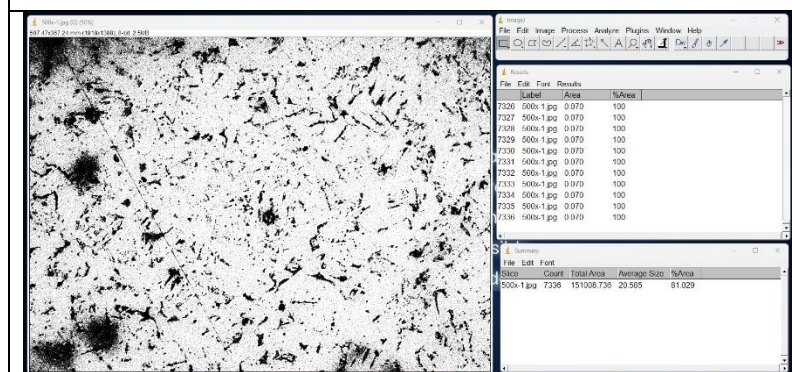
Berdasarkan hasil uji metalografi pada baja ASTM A36 dengan sudut kampuh *single V joint 55°*, dapat diamati bahwa struktur mikro hasil pengelasan didominasi oleh fasa ferit yang ditunjukkan dengan zona terang dan perlit yang ditunjukkan dengan zona gelap. Persentase ferit dan perlit bervariasi dalam tiga area yang dianalisis: *base metal*, HAZ (*Heat Affected Zone*), dan *weld metal*. Pada *base metal*, terdapat persentase ferit sebesar 75,560% dan perlit sebesar 24,440%. Pada HAZ, terdapat persentase ferit sebesar 76,581% dan perlit sebesar 23,419%. Pada *weld metal*, terdapat persentase ferit sebesar 81,029% dan perlit sebesar 18,971%. Hasil uji metalografi pada spesimen *single V joint 55°* ini menunjukkan bahwa jumlah zona gelap terbesar terletak pada *base metal* dan terendah pada *weld metal*.



ImageJ pada *base metal single V joint 55°*



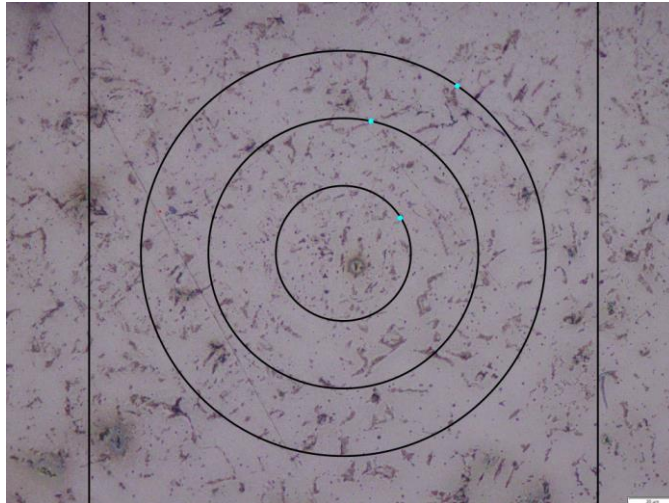
ImageJ pada *HAZ single V joint 55°*



ImageJ pada *weld metal single V joint 55°*

Gambar 4.9 Hasil ImageJ Pada *Single V Joint 55°*

Perhitungan *grain size number* dilakukan guna mengamati besar kecilnya butir pada struktur mikro *single V joint 55°*. Perhitungan *grain size number* dilakukan dengan prosedur *intercept* sesuai dengan standar ASTM E112. Berikut merupakan contoh perhitungan *grain size number* pada *weld metal single V joint 55°*.



Gambar 4. 10 Pola untuk Penghitungan Intersep *Single V Joint 55°*

Dari pola pada gambar 4.10 didapatkan data untuk perhitungan *intercept weld metal single V joint 55* derajat sebagai berikut:

$$PI = \frac{\text{Jumlah Titik Potong}}{\left(\frac{\text{Keliling Lingkaran}}{\text{Perbesaran}}\right)}$$

$$L3 = \frac{1}{PI}$$

Tabel 4. 11 Data perhitungan *intercept weld metal single V joint 55°*

Number Intercept	Perbesaran	Keliling Lingkaran	PL	L3
33	500	250.00	66.00	0.015151515
32	500	166.70	95.98	0.01041875
18	500	83.30	108.04	0.009255556

$$G = [-6.646 \log L_3] - 3.298$$

$$G = [-6.646 \log 0.015151515] - 3.298$$

$$G = 8.794143132$$

$$G = [-6.646 \log L_3] - 3.298$$

$$G = [-6.646 \log 0.01041875] - 3.298$$

$$G = 9.875002753$$

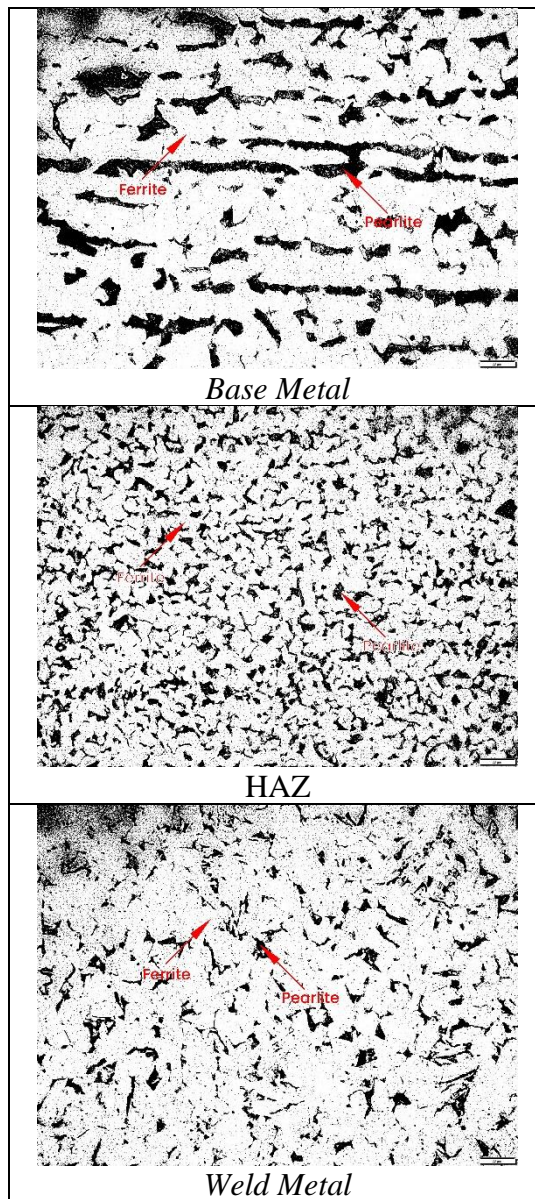
$$G = [-6.646 \log L_3] - 3.298$$

$$G = [-6.646 \log 0.009255556] - 3.298$$

$$G = 10.21667896$$

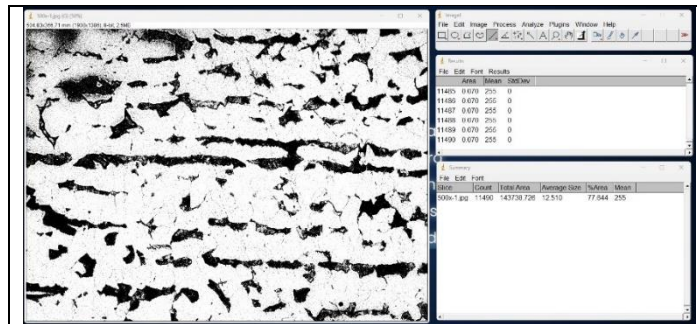
Dari hasil perhitungan *grain size number* di atas, diperoleh rata-rata *grain size number* sebesar 9,40. Oleh karena itu, pada daerah *weld metal* memiliki *grain size number* 9,5 dengan luas rata-rata butir sebesar $178 \mu\text{m}^2$ (Perhitungan *grain size number* terlampir). Pada daerah *base metal*, diperoleh luas rata-rata butir sebesar $178 \mu\text{m}^2$. Sedangkan pada daerah HAZ, diperoleh luas rata-rata butir sebesar $44,6 \mu\text{m}^2$.

4.2.4.2. Metalografi Single V Joint 65°

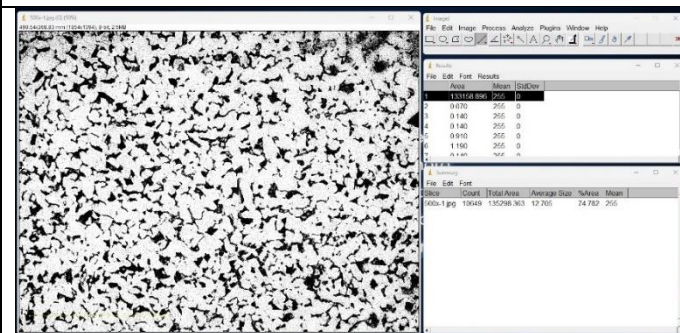


Gambar 4. 11 Metalografi Single V Joint 65°

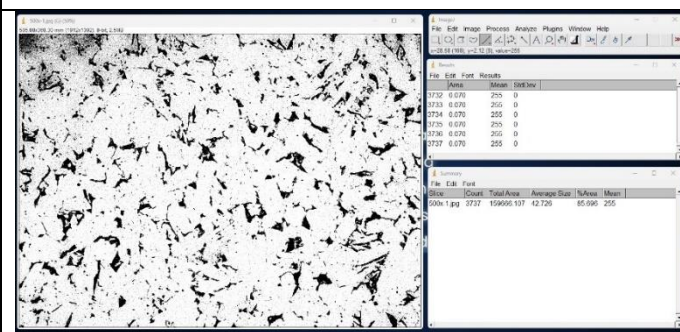
Berdasarkan hasil uji metalografi pada baja ASTM A36 dengan sudut *kampuh single V joint* 65°, dapat diamati bahwa struktur mikro hasil pengelasan didominasi oleh fasa ferit yang ditunjukkan dengan zona terang dan perlit yang ditunjukkan dengan zona gelap. Persentase ferit dan perlit bervariasi dalam tiga area yang dianalisis: *base metal*, HAZ (*Heat Affected Zone*), dan *weld metal*. Pada spesimen *base metal*, terdapat persentase ferit sebesar 77,644% dan perlit sebesar 22,356%. Pada HAZ, terdapat persentase ferit sebesar 74,782% dan perlit sebesar 25,218%. Pada *weld metal*, terdapat persentase ferit sebesar 85,696% dan perlit sebesar 14,304%.



ImageJ pada *base metal single V joint* 65°



ImageJ pada HAZ *single V joint* 65°

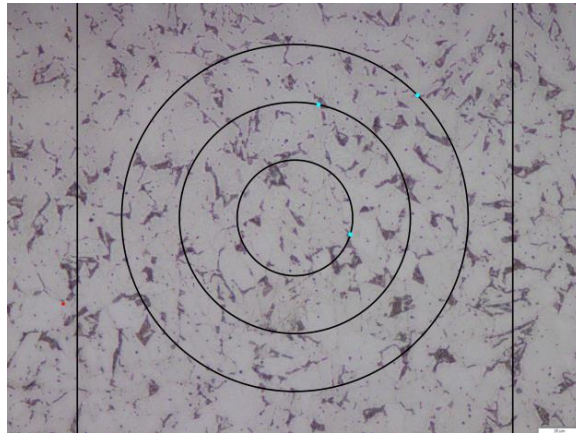


ImageJ pada *weld metal single V joint* 65°

Gambar 4. 12 Hasil ImageJ Pada *Single V Joint* 65°

Perhitungan *grain size number* dilakukan guna mengamati besar kecilnya butir pada struktur mikro *single V joint* 65°. Perhitungan *grain size number* dilakukan dengan

prosedur *intercept* sesuai dengan standar ASTM E112. Berikut merupakan contoh perhitungan *grain size number* pada *weld metal single V joint 65°*.



Gambar 4. 13 Pola untuk Penghitungan Intersep *Single V Joint 65°*

Dari pola pada gambar 4.13 didapatkan data untuk perhitungan *intercept weld metal single V joint 65* derajat sebagai berikut:

$$Pl = \frac{\text{Jumlah Titik Potong}}{\left(\frac{\text{Keliling Lingkaran}}{\text{Perbesaran}}\right)}$$

$$L3 = \frac{1}{Pl}$$

Tabel 4. 12 Data perhitungan *intercept weld metal single V joint 65°*

Number Intercept	Perbesaran	Keliling Lingkaran	PL	L3
32	500	250.00	64.00	0.015625
24	500	166.70	71.99	0.013891667
15	500	83.30	90.04	0.011106667

$$G = [-6.646 \log L_3] - 3.298$$

$$G = [-6.646 \log 0.015625] - 3.298$$

$$G = 8.705330253$$

$$G = [-6.646 \log L_3] - 3.298$$

$$G = [-6.646 \log 0.013891667] - 3.298$$

$$G = 9.044697391$$

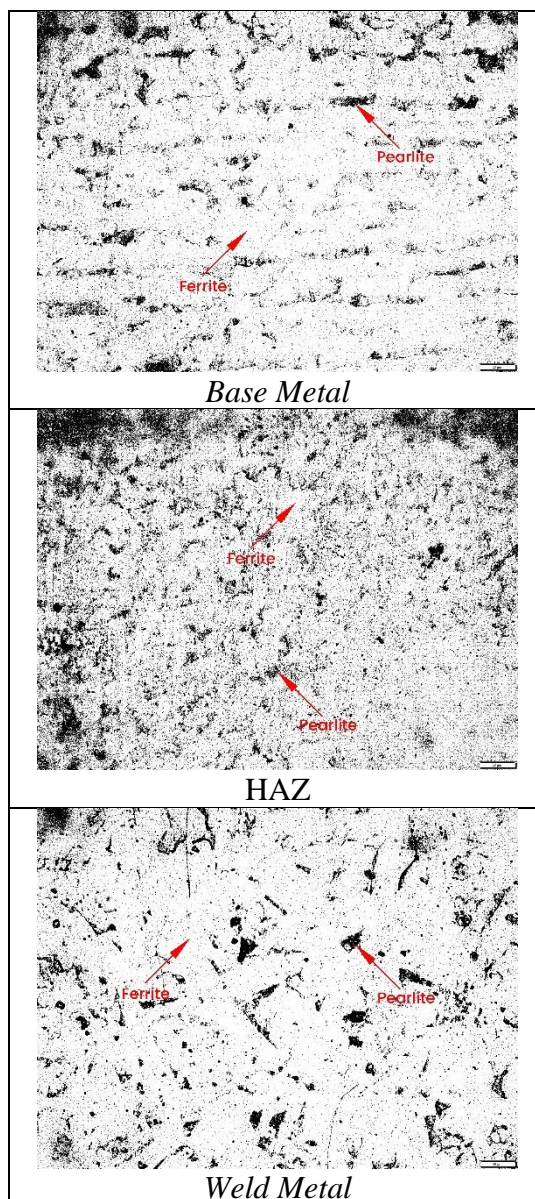
$$G = [-6.646 \log L_3] - 3.298$$

$$G = [-6.646 \log 0.011106667] - 3.298$$

$$G = 9.690464152$$

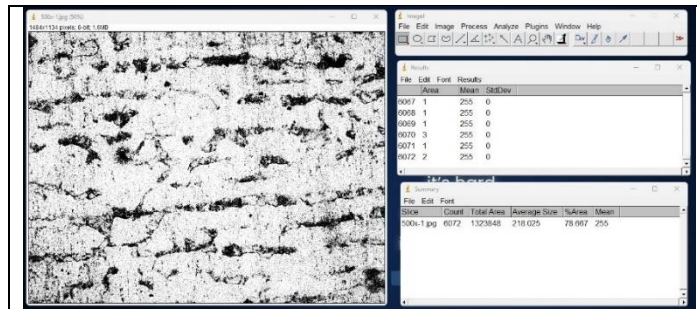
Dari hasil perhitungan *grain size number* di atas, diperoleh rata-rata *grain size number* sebesar 9,15. Oleh karena itu, pada daerah *weld metal* memiliki *grain size number* 9 dengan luas rata-rata butir sebesar $252 \mu\text{m}^2$ (Perhitungan *grain size number* terlampir). Pada daerah *base metal*, diperoleh luas rata-rata butir sebesar $178 \mu\text{m}^2$. Sedangkan pada daerah HAZ, diperoleh luas rata-rata butir sebesar $63 \mu\text{m}^2$.

4.2.4.3. Metalografi Single V Joint 75°

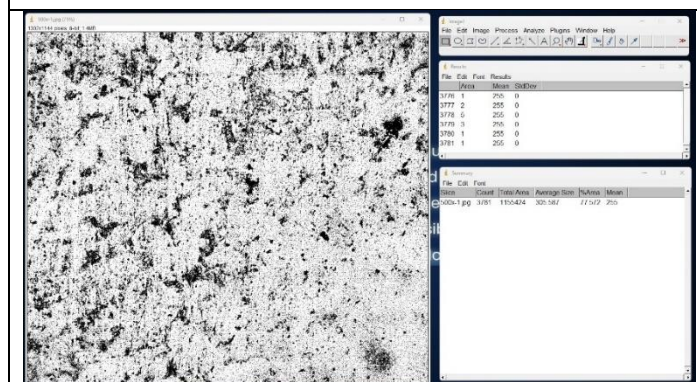


Gambar 4. 14 Metalografi Single V Joint 75°

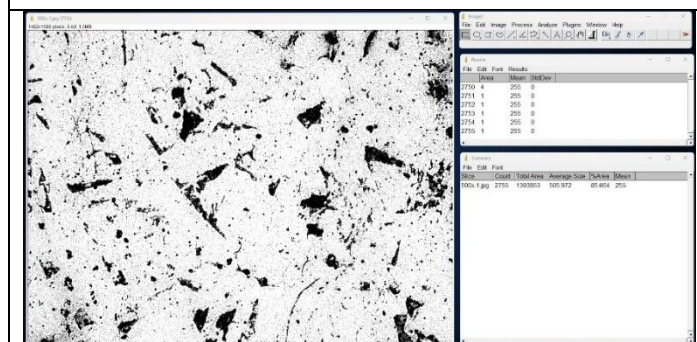
Berdasarkan hasil uji metalografi pada baja ASTM A36 dengan sudut kampuh *single V joint 75°*, dapat diamati bahwa struktur mikro hasil pengelasan didominasi oleh fasa ferit yang ditunjukkan dengan zona terang dan perlit yang ditunjukkan dengan zona gelap. Persentase ferit dan perlit bervariasi dalam tiga area yang dianalisis: *base metal*, HAZ (*Heat Affected Zone*), dan *weld metal*. Pada spesimen *base metal*, terdapat persentase ferit sebesar 78,667% dan perlit sebesar 21,333%. Pada HAZ, terdapat persentase ferit sebesar 77,572% dan perlit sebesar 22,428%. Pada *weld metal* dengan sudut *single V joint 75°*, terdapat persentase ferit sebesar 85,664% dan perlit sebesar 14,336%. %.



ImageJ pada *base metal single V joint 75°*



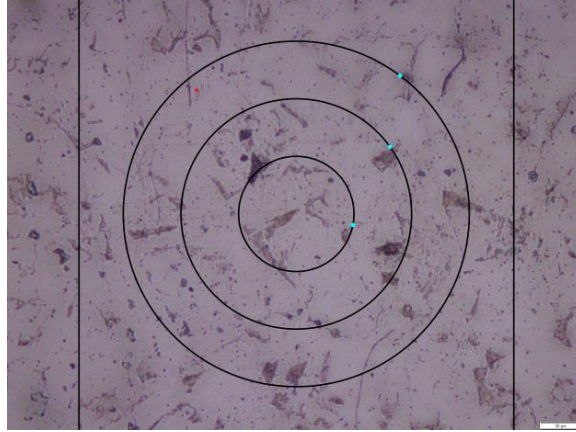
ImageJ pada HAZ *single V joint 75°*



ImageJ pada *weld metal single V joint 75°*

Gambar 4. 15 Hasil ImageJ Pada Single V Joint 75°

Perhitungan *grain size number* dilakukan guna mengamati besar kecilnya butir pada struktur mikro *single V joint 75°*. Perhitungan *grain size number* dilakukan dengan prosedur *intercept* sesuai dengan standar ASTM E112. Berikut merupakan contoh perhitungan *grain size number* pada *weld metal single V joint 75°*.



Gambar 4. 16 Pola untuk Penghitungan Intersep *Single V Joint 65°*

Dari pola pada gambar 4.16 didapatkan data untuk perhitungan *intercept weld metal single V joint 75* derajat sebagai berikut:

$$PI = \frac{\text{Jumlah Titik Potong}}{\left(\frac{\text{Keliling Lingkaran}}{\text{Perbesaran}}\right)}$$

$$L3 = \frac{1}{PI}$$

Tabel 4. 13 Data perhitungan *intercept weld metal single V joint 75°*

Number Intercept	Perbesaran	Keliling Lingkaran	PL	L3
26	500	250.00	52.00	0.019230769
20	500	166.70	59.99	0.01667
10	500	83.30	60.02	0.01666

$$G = [-6.646 \log L_3] - 3.298$$

$$G = [-6.646 \log 0.019230769] - 3.298$$

$$G = 8.106043421$$

$$G = [-6.646 \log L_3] - 3.298$$

$$G = [-6.646 \log 0.01667] - 3.298$$

$$G = 8.518482584$$

$$G = [-6.646 \log L_3] - 3.298$$

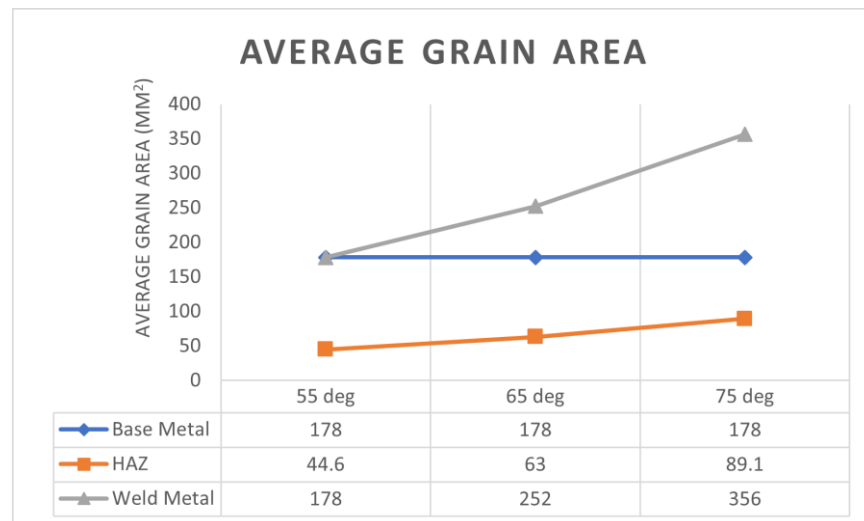
$$G = [-6.646 \log 0.01666] - 3.298$$

$$G = 8.520214472$$

Dari hasil perhitungan *grain size number* di atas, diperoleh rata-rata *grain size number* sebesar 8,4. Oleh karena itu, pada daerah *weld metal* memiliki *grain size number* 8,5 dengan luas rata-rata butir sebesar $356 \mu\text{m}^2$ (Perhitungan *grain size number* terlampir). Pada daerah *base metal*, diperoleh luas rata-rata butir sebesar $178 \mu\text{m}^2$. Sedangkan pada daerah HAZ, diperoleh luas rata-rata butir sebesar $89.1 \mu\text{m}^2$.

4.2.4.4. Analisa Struktur Mikro

Pada penelitian ini, struktur mikro pada ketiga variabel didominasi oleh *ferrite* dan *pearlite*. Butir – butir ferit ditunjukkan dengan zona terang, sementara butir – butir perlit ditunjukkan dengan zona gelap.



Gambar 4. 17 Average Grain Area

Gambar 4.17 menjelaskan pengaruh variasi sudut dalam sambungan las *single V joint* terhadap *average grain area* pada daerah *weld metal*, *base metal*, dan HAZ (*Heat-Affected Zone*). Pada *weld metal*, terdapat peningkatan nilai *grain size area* yang signifikan pada setiap sudut *single V joint* 55° , 65° , dan 75° dengan angka masing – masing $178 \mu\text{m}^2$, $252 \mu\text{m}^2$, dan $356 \mu\text{m}^2$ secara berturut-turut. Hal ini disebabkan oleh peningkatan volume pengisian logam las dan masukan panas yang lebih besar akibat peningkatan sudut sambungan las. Tingkat masukan panas ini dapat diamati melalui kecepatan pengelasan yang tercatat dalam Tabel 4.1, di mana semakin lambat kecepatan pengelasan, semakin tinggi masukan panas yang diterima oleh logam.

Di sisi lain, pada daerah *base metal*, perhitungan *grain size number* menunjukkan nilai konstan dengan *grain size area* sebesar $178 \mu\text{m}^2$ pada setiap variasi sudut *single V joint*. Hal ini menunjukkan bahwa panas yang dihasilkan selama proses pengelasan tidak mempengaruhi daerah *base metal*. Namun, daerah HAZ cenderung mengalami peningkatan nilai *grain size area* pada setiap variasi sudut *single V joint* 55° , 65° , 75° dengan angka masing – masing sebesar $44.6 \mu\text{m}^2$, $63 \mu\text{m}^2$ dan $89.1 \mu\text{m}^2$. Dampak dari masukan panas yang tinggi juga menyebabkan penurunan laju pendinginan, yang pada akhirnya dapat menyebabkan ukuran butiran yang lebih kasar di daerah *weld metal* dan HAZ jika suhu cukup tinggi untuk mendorong pertumbuhan butiran sebelum terjadinya transformasi.

Penelitian ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh (Xie et al., 2022) dan (Kh Hamd et al., 2018), dimana masukan panas yang tinggi menyebabkan adanya penurunan laju pendinginan, yang pada gilirannya dapat menyebabkan ukuran butiran yang kasar di daerah *weld metal* dan HAZ jika suhu cukup tinggi untuk mendorong pertumbuhan butiran sebelum terjadinya transformasi. Analisis ini menunjukkan bahwa variasi sudut sambungan las *single V joint* memiliki dampak signifikan terhadap karakteristik butiran pada daerah *weld metal* dan HAZ. Pengaruh masukan panas yang tinggi dalam proses pengelasan dapat menghasilkan butiran yang lebih kasar dan mengubah laju pendinginan, yang berpotensi mempengaruhi sifat mekanik dan kekuatan sambungan las.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian pengaruh sudut *single V joint* terhadap laju korosi, kekuatan tarik dan struktur mikro pelat baja A36 dengan pengelasan SMAW menggunakan elektroda E7018 pada lingkungan laut, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Laju korosi meningkat sejalan dengan peningkatan sudut *single V joint*. *Base metal* memiliki laju korosi yang paling rendah, sedangkan *weld metal* memiliki laju korosi yang paling tinggi dalam larutan korosif NaCl 3,5%. Laju korosi di daerah logam las pada setiap variasi sudut *single V joint* 55°, 65°, dan 75° adalah 0,36 mm/year, 1,66 mm/year, dan 6,55 mm/year secara berturut-turut.
2. Peningkatan variasi sudut pada sambungan las *single V joint* tidak memiliki efek pada hasil uji tarik karena patahan terjadi di *base metal*, menandakan bahwa pemilihan elektroda dan metode *multipass* dalam proses pengelasan sesuai. Fluktuasi nilai uji tarik dengan patahan di *base metal* menunjukkan adanya anisotropi, di mana bahan menunjukkan respons mekanik yang berbeda dalam arah tarik yang berbeda. Namun, terdapat beberapa spesimen yang mengalami patahan pada daerah *weld metal* karena adanya porositas dan *slag inclusions*.
3. Peningkatan variasi sudut *single V joint* menyebabkan transformasi ukuran butir struktur mikro daerah HAZ dan *weld metal*. Semakin besar sudut *single V joint*, semakin besar pula volume pengisian logam las yang menyebabkan peningkatan ukuran butiran pada daerah HAZ dan *weld metal*. Dalam seluruh variasi sudut *single V joint*, tidak ditemukan transformasi fasa.

5.2 Saran

Terdapat beberapa hal yang dapat dijadikan saran yang sifatnya membangun penelitian berikutnya adalah sebagai berikut:

1. Diperlukan penelitian lebih lanjut yang mempertimbangkan *temperature interpass* pengelasan.
2. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk memahami hubungan antara tegangan internal dan laju korosi pengelasan dengan membandingkan penggunaan jig dan tanpa jig.
3. Disarankan untuk melakukan penelitian lebih lanjut dengan menggunakan metode inspeksi daerah las menggunakan NDT Penetrant Test atau Radiografi Test.
4. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk mengevaluasi nilai laju korosi pada setiap lapisan *weld metal*, sehingga data yang dihasilkan menjadi lebih valid.

DAFTAR PUSTAKA

- Aditia Siregar, H., Wiratno, S. S., & Baharudin, B. (n.d.). *Analisa Pengaruh Variasi Derajat Kampuh Terhadap Distorsi Yang Dihasilkan Pada Posisi Pengelasan 3G SMAW Sambungan Butt-Joint*.
- American Welding Society. (2020). *Structural Welding Code-Steel* (American Welding Society, Ed.; 24th ed.). American National Standards Institute.
- ASTM International. (2005). *Standard Specification for Carbon Structural Steel*.
https://doi.org/10.1520/A0036_A0036M-08
- ASTM International. (2014). *Standard Reference Test Method for Making Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements*. <https://doi.org/10.1520/G0005-14>
- Bai, L., Jiang, K., & Gao, L. (2018). The Influence and Mechanism of Residual Stress on the Corrosion Behavior of Welded Structures. *Materials Research*, 21(5).
<https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2018-01660>
- Edra, R. (2017, December). *Pengertian Korosi dan Faktor Penyebabnya*. Ruangguru.
<https://www.ruangguru.com/blog/pengertian-korosi-dan-faktor-penyebabnya>
- Fontana, M. (1987). *Corrosion Engineering* (S. Rao, Ed.; 3rd ed.). McGraw-Hill.
- Jones, R. H., & Ricker, R. E. (1992). *Mechanisms of Stress-Corrosion Cracking*.
<https://doi.org/10.1361/sccmpae1992p001>
- Kh Hamd, E., Sh Alwan, A., & Khalaf Irthiea, I. (2018). Study the Effect of Welding Heat Input on the Microstructure, Hardness, and Impact Toughness of AISI 1015 Steel. *Journal Al-Khwarizmi Engineering Journal*, 14(1).
<https://doi.org/10.22153/kej.2018.08.005>
- Khalifeh, A. (2019). *Stress Corrosion Cracking Damages* (Z.-M. Huang, Ed.; 1st ed.). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.80826>
- Khan, I. (2007). *Welding Science and Technology*. New Age International (P) Ltd., Publishers.
- Kou, S. (2002). *Welding Metallurgy* (2nd ed.). John Wiley & Sons, Inc.
<https://doi.org/10.1002/0471434027>
- Messler, R. W. (2004). *PRINCIPLES OF WELDING Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
- Shang, B., Lei, L., Wang, X., He, P., Yuan, X., Dai, W., Li, J., Jiang, Y., & Sun, Y. (2022). Effects of Grain Boundary Characteristics Changing With Cold Rolling Deformation on Intergranular Corrosion Resistance of 443 Ultra-Pure Ferritic Stainless steel. *Corrosion Communications*, 8, 27–39. <https://doi.org/10.1016/j.corcom.2022.07.002>
- Sikiru Olaide, B. (2015). *Investigation of stress corrosion cracking in low carbon API-5L X65 pipeline steel in simulated marine environment*. Newcastle University.
- Silva, C. C., De Assis, J. T., Philippov, S., & Farias, J. P. (2016). Residual Stress, Microstructure and Hardness of Thin-Walled Low-Carbon Steel Pipes Welded Manually. *Materials Research*, 19(6), 1215–1225. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2016-0217>
- Soleimani, M., Mirzadeh, H., & Dehghanian, C. (2019). Effect of Grain Size on the Corrosion Resistance of Low Carbon Steel. *Materials Research Express*, 7(1).
<https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab62fa>
- Sonawan, H., & Suratman, R. (2006). *Pengantar Untuk Memahami Proses Pengelasan Logam* (2nd ed.). Alfabeta.cv.

- Wirjosumarto, H., & Okumura, T. (2000). *Teknologi Pengelasan Logam* (8th ed.). PT Pertja.
- Xie, S., Xu, C., Wang, X., Feng, X., Xiao, K., & Liu, P. (2022). Effect of welding heat input on microstructure and properties of coarse grain zone in heat affected zone of ultra-low carbon bainitic steel. *Materials Research*, 25. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2021-0180>
- Zhang, X., Wang, S., Wang, X., Cui, Z., Cui, H., & Li, Y. (2023). The Stress Corrosion Cracking Behavior of N80 Carbon Steel under a Crevice in an Acidic Solution Containing Different Concentrations of NaCl. *Corrosion Science*, 216, 111068. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2023.111068>

LAMPIRAN

Lampiran 1. Sertifikat Material



SeAH Besteel Corp.
1-6, SORYONG-DONG, KUNSAN,
CHEONGBUK, KOREA(573-711)

MILL CERTIFICATE

TEL : +82-(0)63-460-8572, 8318(QA)
+82-(0)63-460-8114(Repres.)
FAX : +82-(0)63-460-8423 Page(0/0)

Date : 2017-04-20
Cert. No. : 201704-207465
Customer :
Heat No. : 269824

Steel Grade : ASTM A36 / SS 400
Shape of Product : Plate Bar
Delivery Condition : Plate Rolled

Size (mm) : 10 X 1200
Length (mm) : 2,400
Weight (kg) : 230
Quantity(pcs) : 1,000

Inspection Items		Chemical Composition (wt. %)				
		C	SI	MN	P	S
		x 100	x 100	x 100	x 1000	x 1000
Spec.	Min.	15	20	0.85		
	Max.	20	24	1.067	0.016	0.021
	Result	20	24	1.067	0.025	0.024
Inspection Items		Product Hardness (HB)				
		SURFACE				

Mechanical Properties ASTM A36 / SS 400

Mechanical Properties	Symbol	Steel
Yield strength (MPa)	S_y	245 - 300
Tensile strength (MPa)	S_t	420 - 440
Elongation (%)		27 - 30

<<Remarks>>

B/DS : 4

----- End of report -----

We hereby certify that the material described herein has been made in accordance with the rules of the contract.

Certified by

O. Y. Cho

Manager of Quality Assurance Dept

Lampiran 2. Datasheet Elektroda

COVERED (STICK) ELECTRODES (SMAW)
MILD STEEL ELECTRODES



OK 48.04

AC/DC, general purpose, LMA electrode for welding mild and low alloy steels. It has very good welding properties and deposits a high quality weld metal with good mechanical properties. The electrode can be used for welding restrained structures where high stresses cannot be avoided.

Classifications	SFA/AWS A5.1 : E7018 EN ISO 2560-A : E 42 4 B 32 H5
Approvals	ABS : E7018 ABS : 3Y H5 BV : 3Y H5 CE : EN 13479 DNV-GL : 3 YH5 LR : 3Ym H15 NAKS/HAKC : 2.5-5.0 mm PRS : 3Y H5 RS : 3Y H5 Seproz : UNA 272580

Welding Current	AC, DC+(-)
Diffusible Hydrogen	< 5.0 ml/100g
Alloy Type	Carbon Manganese
Coating Type	Basic covering

Typical Tensile Properties

Condition	Yield Strength	Tensile Strength	Elongation
ISO			
As Welded	480 MPa	560 MPa	28 %

Typical Charpy V-Notch Properties

Condition	Testing Temperature	Impact Value
ISO		
As Welded	-30 °C	110 J
As Welded	-40 °C	100 J

Typical Weld Metal Analysis %

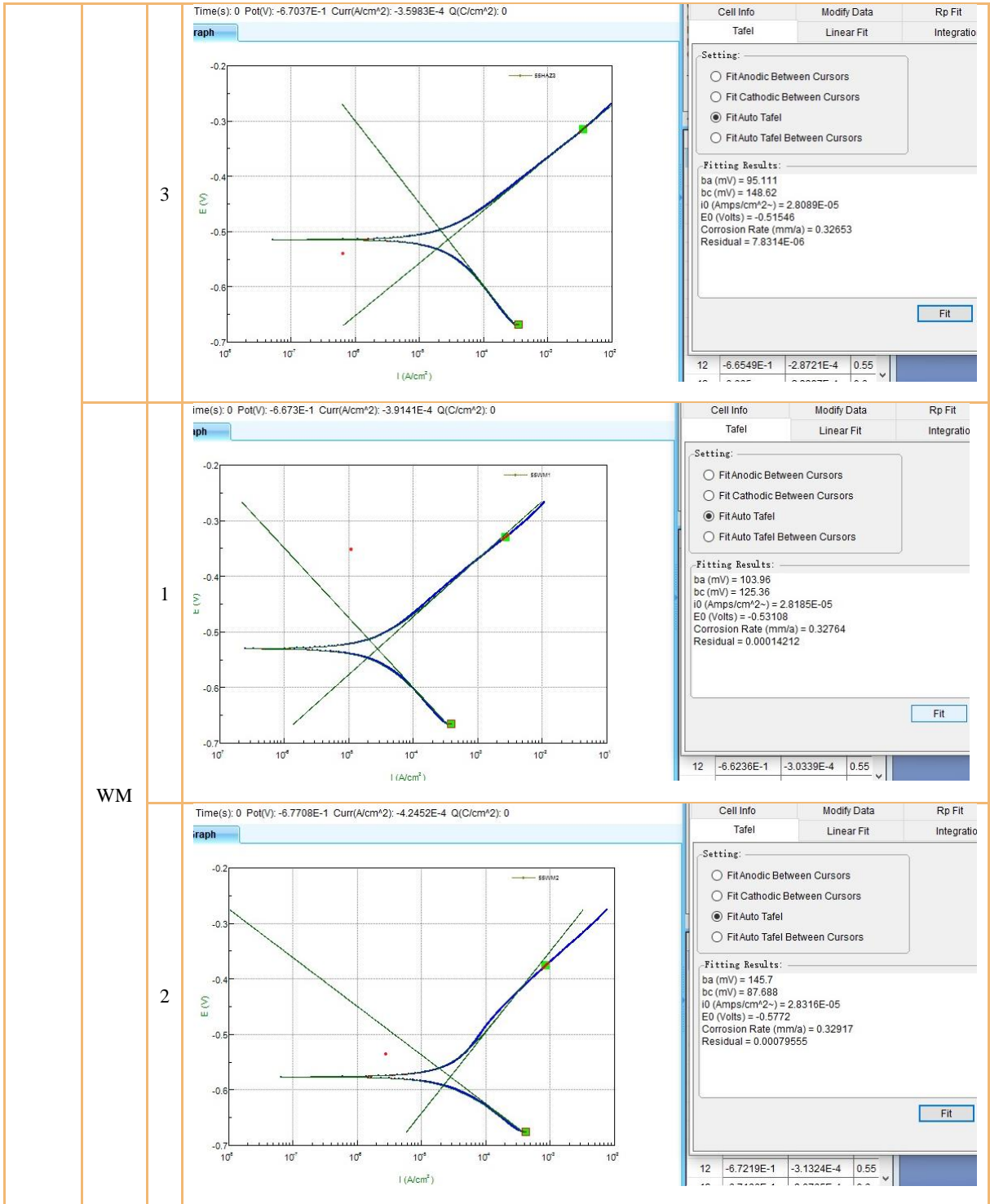
C	Mn	Si
0.06	1.2	0.4

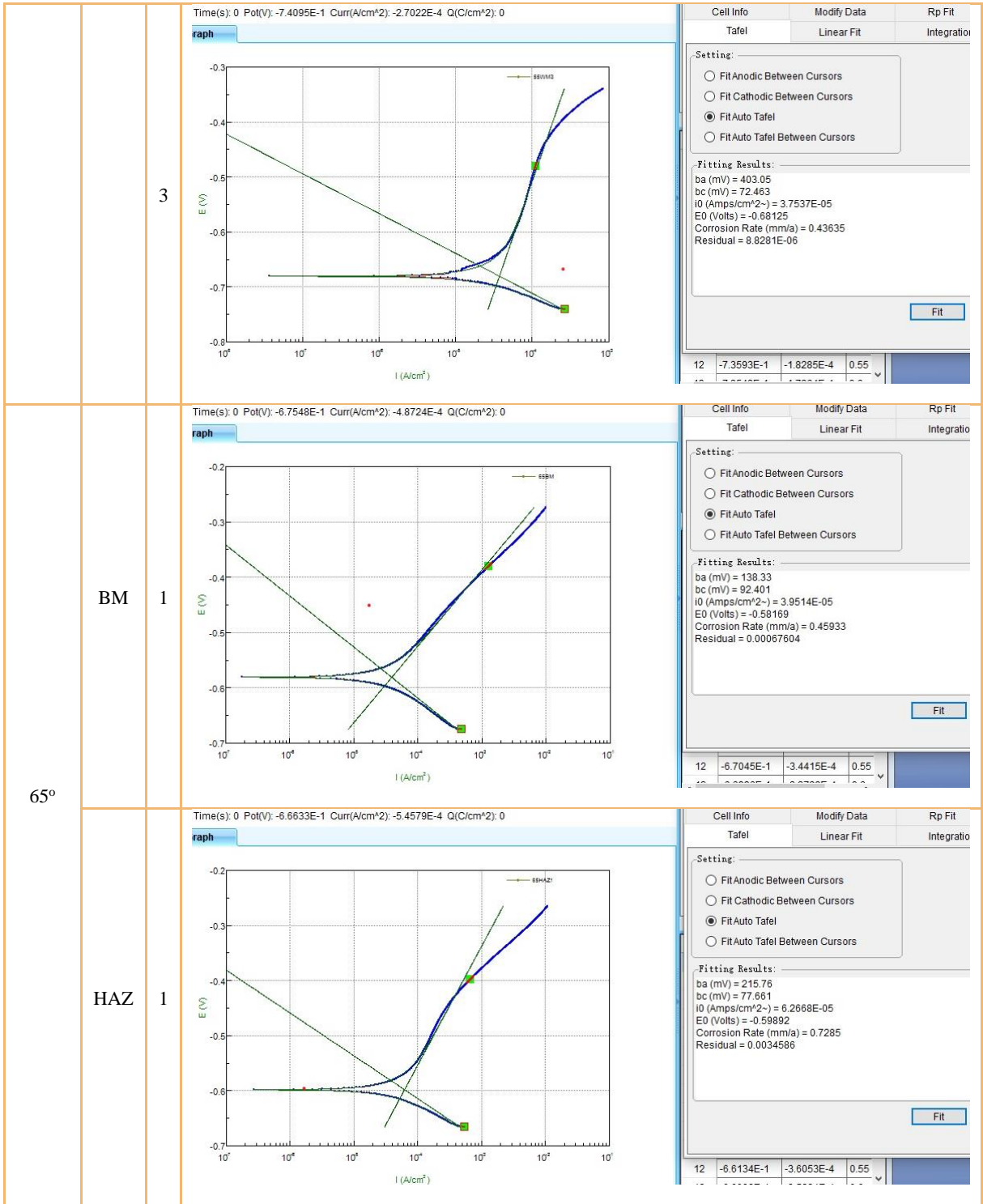
Deposition Data

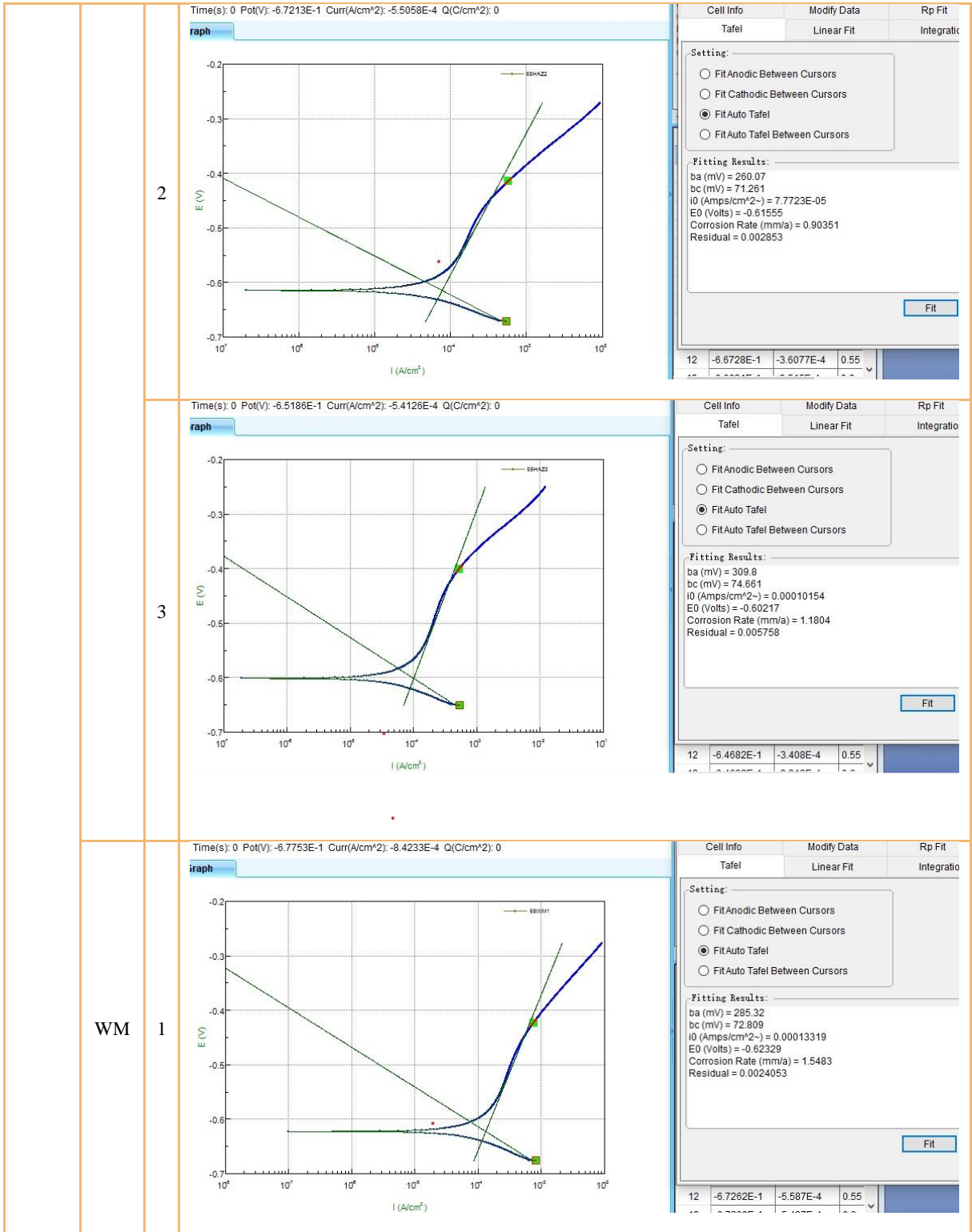
Diameter	Current	Voltage	Efficiency (%)	Number of electrodes/kg weld metal	Fusion time per electrode at 90% I max	Deposition Rate
2.5 x 350.0 mm	75-110 A	23 V	64 %	67.0	59 sec	1.0 kg/h
3.2 x 350.0 mm	90-155 A	22 V	63 %	42.3	62.4 sec	1.37 kg/h
3.2 x 450.0 mm	90-155 A	25 V	67 %	30.0	92 sec	1.5 kg/h
4.0 x 450.0 mm	125-200 A	26 V	68 %	20.0	101 sec	2.0 kg/h
5.0 x 450.0 mm	190-260 A	26 V	72 %	13.0	106 sec	2.8 kg/h

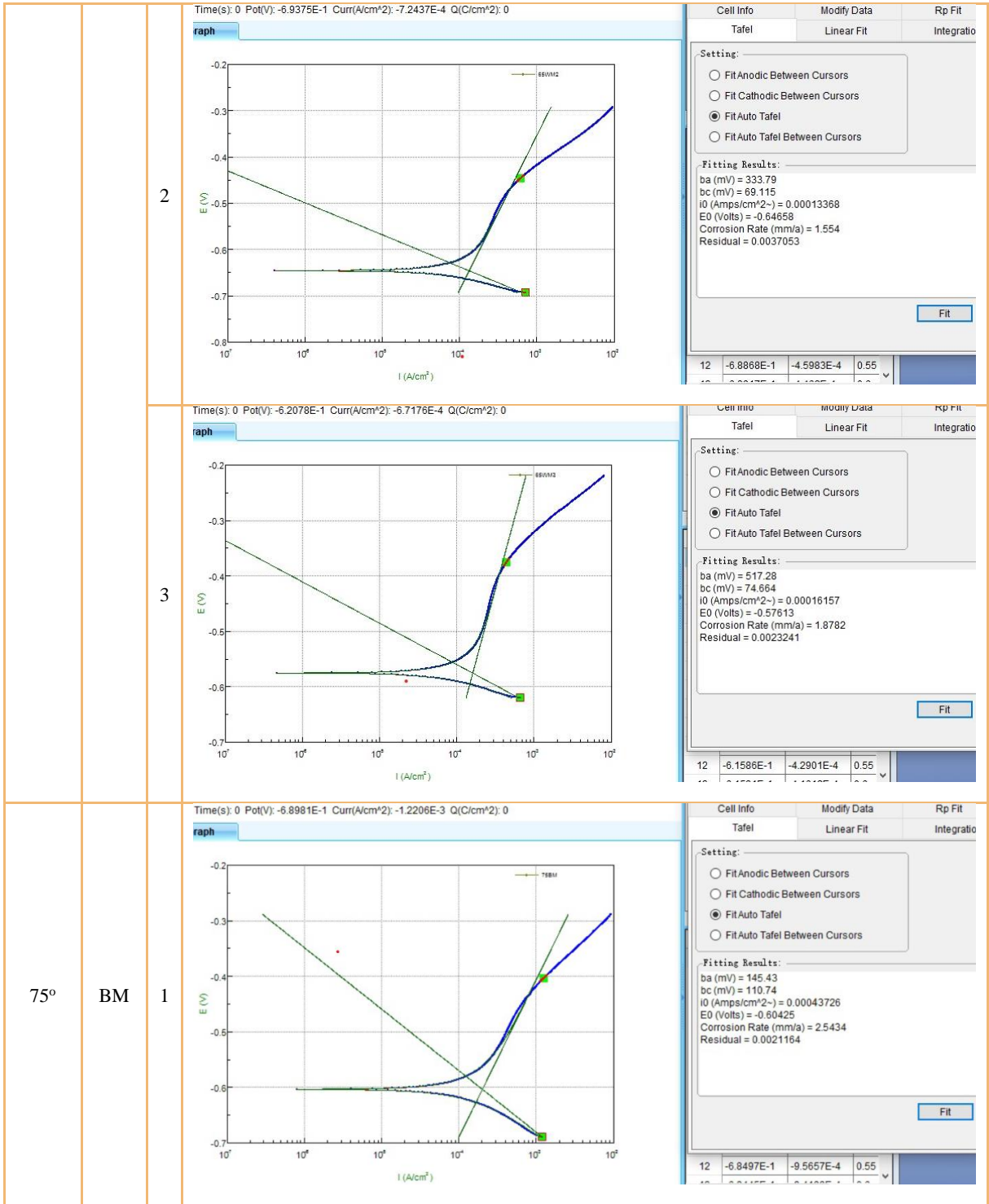
Lampiran 3. Hasil Uji Korosi

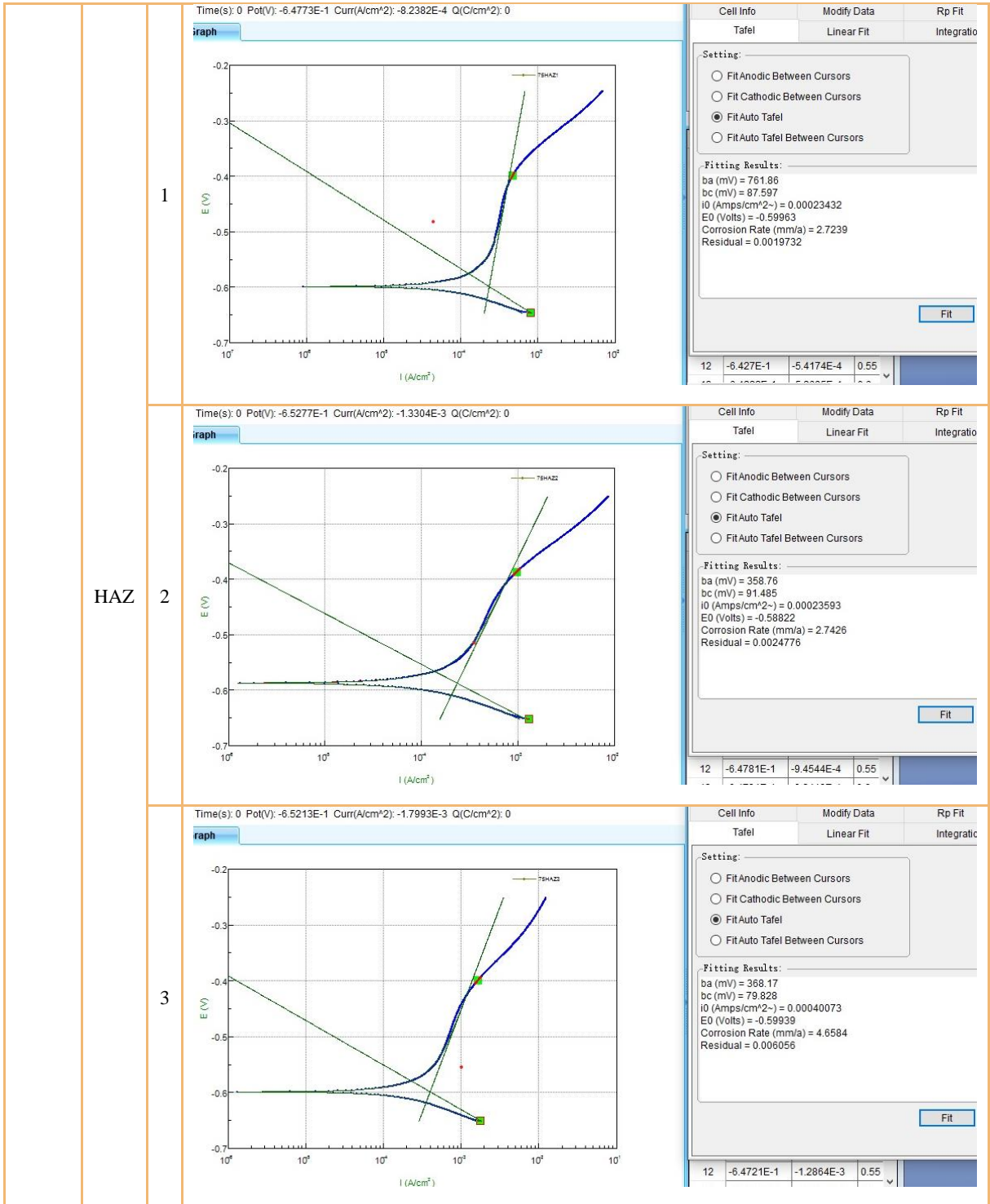
Sudut	Daerah	Diagram Tafel
55°	BM 1	<p>Time(s): 0 Pot(V): -6.7293E-1 Curr(A/cm²): -2.2515E-4 Q(C/cm²): 0</p> <p>Cell Info: Tafel, Modify Data: Linear Fit, Rp Fit: Integratio</p> <p>Setting:</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="radio"/> Fit Anodic Between Cursors <input type="radio"/> Fit Cathodic Between Cursors <input checked="" type="radio"/> Fit Auto Tafel <input type="radio"/> Fit Auto Tafel Between Cursors <p>Fitting Results:</p> <p>ba (mV) = 125.42 bc (mV) = 130.27 i0 (Amps/cm²-) = 2.0241E-05 E0 (Volts) = -0.54553 Corrosion Rate (mm/a) = 0.2353 Residual = 7.2926E-05</p> <p>12 -6.6802E-1 -1.7503E-4 0.55</p>
	HAZ 1	<p>Time(s): 0 Pot(V): -6.8411E-1 Curr(A/cm²): -2.0687E-4 Q(C/cm²): 0</p> <p>Cell Info: Tafel, Modify Data: Linear Fit, Rp Fit: Integratio</p> <p>Setting:</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="radio"/> Fit Anodic Between Cursors <input type="radio"/> Fit Cathodic Between Cursors <input checked="" type="radio"/> Fit Auto Tafel <input type="radio"/> Fit Auto Tafel Between Cursors <p>Fitting Results:</p> <p>ba (mV) = 98.9 bc (mV) = 131.67 i0 (Amps/cm²-) = 2.3729E-05 E0 (Volts) = -0.52017 Corrosion Rate (mm/a) = 0.27584 Residual = 2.9334E-08</p> <p>12 -6.7927E-1 -1.7077E-4 0.55</p>
	HAZ 2	<p>Time(s): 0 Pot(V): -6.7993E-1 Curr(A/cm²): -2.6532E-4 Q(C/cm²): 0</p> <p>Cell Info: Tafel, Modify Data: Linear Fit, Rp Fit: Integratio</p> <p>Setting:</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="radio"/> Fit Anodic Between Cursors <input type="radio"/> Fit Cathodic Between Cursors <input checked="" type="radio"/> Fit Auto Tafel <input type="radio"/> Fit Auto Tafel Between Cursors <p>Fitting Results:</p> <p>ba (mV) = 96.318 bc (mV) = 162.81 i0 (Amps/cm²-) = 2.3907E-05 E0 (Volts) = -0.52265 Corrosion Rate (mm/a) = 0.27791 Residual = 1.3423E-06</p> <p>12 -6.7512E-1 -2.145E-4 0.55</p>

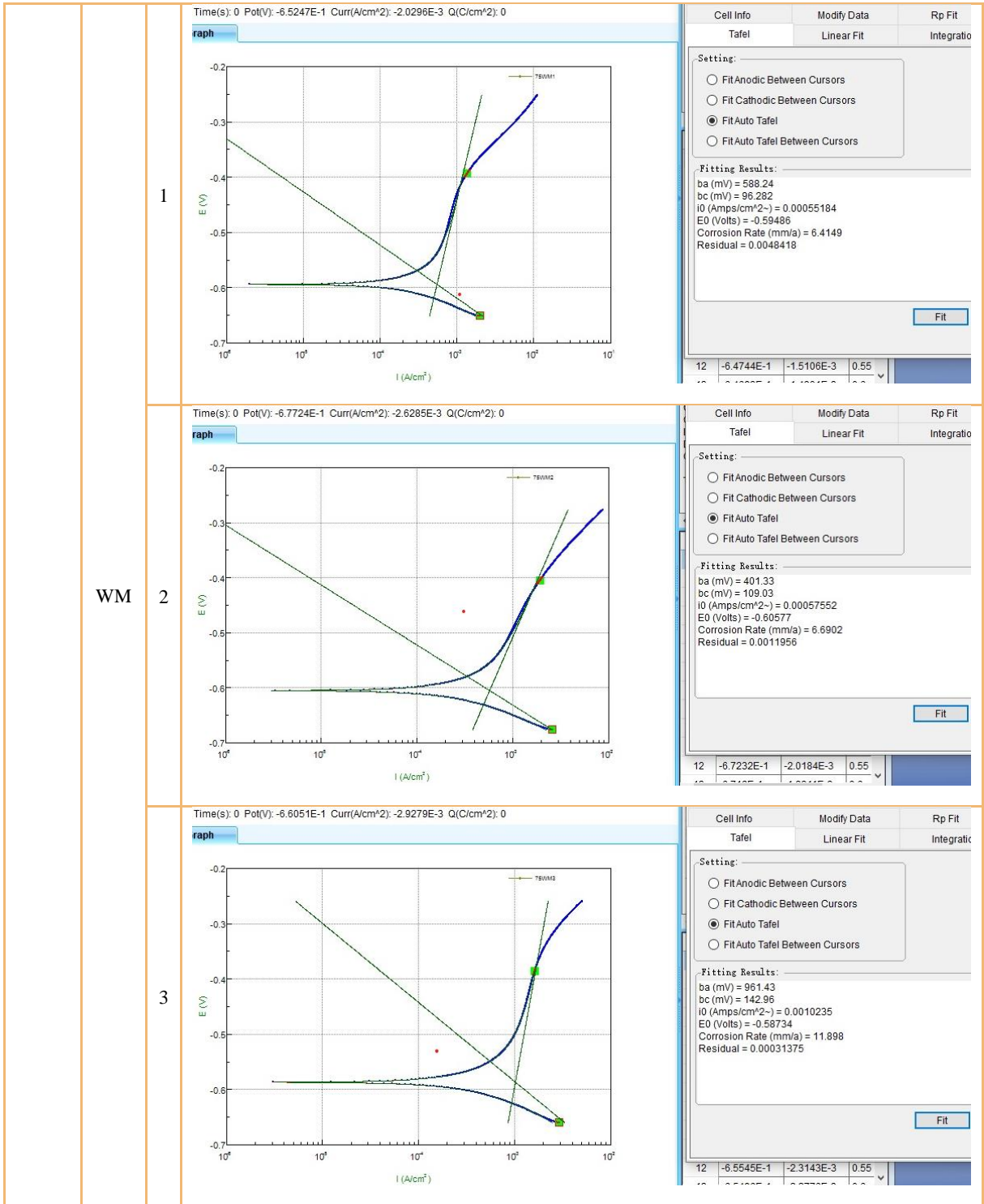












Lampiran 4. Perhitungan Standar Deviasi dan Error

- Single V Joint 75° (HAZ)

$$\text{Rata - Rata Laju Korosi} = \frac{2,72 + 2,74 + 4,66}{3}$$

$$\text{Rata - Rata Laju Korosi} = 3,37$$

$$\text{Standar Deviasi} = \frac{\sqrt{\Sigma(xi - x)^2}}{N}$$

$$\text{Standar Deviasi} = \frac{\sqrt{(2,72 - 3,37)^2 + (2,74 - 3,37)^2 + (4,66 - 3,37)^2}}{3}$$

$$\text{Standar Deviasi} = 1,04419$$

$$\text{Standar Error} = \frac{\text{Standar Deviasi}}{\sqrt{N}}$$

$$\text{Standar Error} = \frac{1,04419}{\sqrt{3}}$$

$$\text{Standar Error} = 60,30\%$$

- Single V Joint 75° (Weld Metal)

$$\text{Rata - Rata Laju Korosi} = \frac{6,41 + 6,69 + 11,90}{3}$$

$$\text{Rata - Rata Laju Korosi} = 8,33$$

$$\text{Standar Deviasi} = \frac{\sqrt{\Sigma(xi - x)^2}}{N}$$

$$\text{Standar Deviasi} = \frac{\sqrt{(6,41 - 8,33)^2 + (6,69 - 8,33)^2 + (11,90 - 8,33)^2}}{3}$$

$$\text{Standar Deviasi} = 2,52461$$

$$\text{Standar Error} = \frac{\text{Standar Deviasi}}{\sqrt{N}}$$

$$\text{Standar Error} = \frac{2,52461}{\sqrt{3}}$$

$$\text{Standar Error} = 145,76\%$$

Lampiran 5. Hasil Uji Tensile

Single V Joint 55°

Benda Uji 1



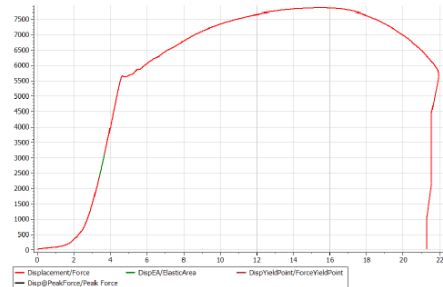
Test Report

Tuesday, 05-Jun-2023 9:25:13 AM

Tensile With Yield

No. Pengujian : T-34
 Kode Benda Uji : FPC1
 Nama : FAJAR PUTRA CAHYADI
 Type : A36
 Standard : ASTM
 Remark : 551

Shape	Area (mm ²)	Initial length (mm)	Yield Point (%)
Rectangular	166.80	70.00	0.20

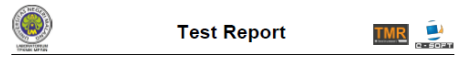


Ultimate			
Force Ultimate (kgf)	Elongation @Ultimate (mm)	Stress Ultimate (MPa)	Strain @Ultimate (%)
7657.0	15.51	461.9	22.15

Yield			
Yield Force (kgf)	Elongation @Yield (mm)	Yield Stress (MPa)	Strain @Yield (%)
5626.6	4.83	330.8	6.90

Modulus Elasticity (MPa)
2532.1

Benda Uji 2



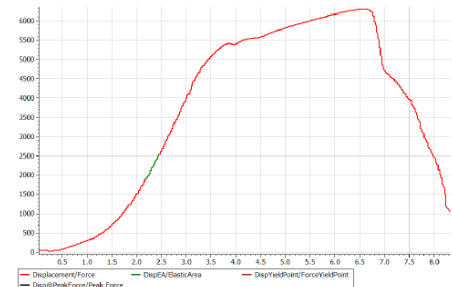
Test Report

Tuesday, 05-Jun-2023 10:10:09 AM

Tensile With Yield

No. Pengujian : T-34
 Kode Benda Uji : FPC2
 Nama : FAJAR PUTRA CAHYADI
 Type : A36
 Standard : ASTM
 Remark : 552

Shape	Area (mm ²)	Initial length (mm)	Yield Point (%)
Rectangular	144.00	65.00	0.20



Ultimate			
Force Ultimate (kgf)	Elongation @Ultimate (mm)	Stress Ultimate (MPa)	Strain @Ultimate (%)
6281.0	6.59	427.7	10.14

Yield			
Yield Force (kgf)	Elongation @Yield (mm)	Yield Stress (MPa)	Strain @Yield (%)
5396.3	3.80	366.8	5.85

Modulus Elasticity (MPa)
2393.5

Benda Uji 3



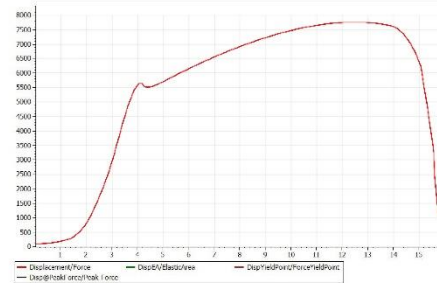
Test Report

Tuesday, 06-Jun-2023 10:13:30 AM

Tensile With Yield

No. Pengujian : T-34
 Kode Benda Uji : FPC3
 Nama : FAJAR PUTRA CAHYADI
 Type : A36
 Standard : ASTM
 Remark : 553

Shape	Area (mm ²)	Initial length (mm)	Yield Point (%)
Rectangular	159.60	65.00	0.20



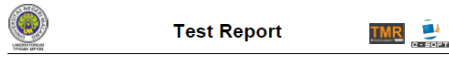
Ultimate			
Force Ultimate (kgf)	Elongation @Ultimate (mm)	Stress Ultimate (MPa)	Strain @Ultimate (%)
7796.6	13.65	479.0	21.00

Yield			
Yield Force (kgf)	Elongation @Yield (mm)	Yield Stress (MPa)	Strain @Yield (%)
5634.3	4.39	348.2	6.76

Modulus Elasticity (MPa)
2583.2

Single V Joint 65°

Benda Uji 1



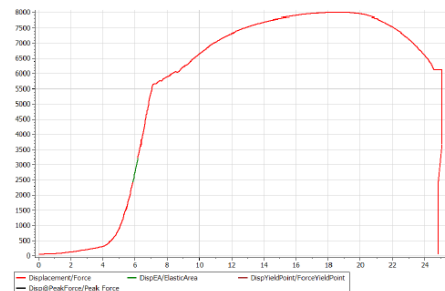
Test Report

Tuesday, 06-Jun-2023 10:21:21 AM

Tensile With Yield

No. Pengujian : T-34
 Kode Benda Uji : FPC4
 Nama : FAJAR PUTRA CAHYADI
 Type : A36
 Standard : ASTM
 Remark : 651

Shape	Area (mm ²)	initial length (mm)	Yield Point (%)
Rectangular	159.60	75.00	0.20

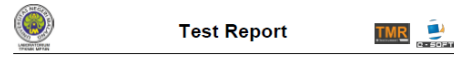


Ultimate			
Force Ultimate (kgf)	Elongation @Ultimate (mm)	Stress Ultimate (MPa)	Strain @Ultimate (%)
7991.8	18.56	491.1	24.74

Yield			
Yield Force (kgf)	Elongation @Yield (mm)	Yield Stress (MPa)	Strain @Yield (%)
5694.3	7.39	349.9	9.86

Modulus Elasticity (MPa)
2410.2

Benda Uji 2



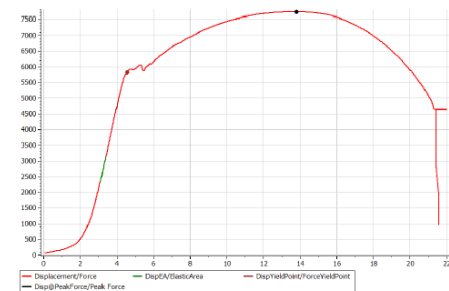
Test Report

Tuesday, 06-Jun-2023 10:27:37 AM

Tensile With Yield

No. Pengujian : T-34
 Kode Benda Uji : FPC5
 Nama : FAJAR PUTRA CAHYADI
 Type : A36
 Standard : ASTM
 Remark : 652

Shape	Area (mm ²)	initial length (mm)	Yield Point (%)
Rectangular	154.80	70.00	0.20

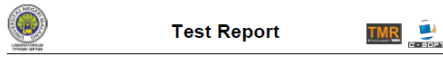


Ultimate			
Force Ultimate (kgf)	Elongation @Ultimate (mm)	Stress Ultimate (MPa)	Strain @Ultimate (%)
7730.1	13.80	489.7	19.72

Yield			
Yield Force (kgf)	Elongation @Yield (mm)	Yield Stress (MPa)	Strain @Yield (%)
5826.4	4.57	369.1	6.54

Modulus Elasticity (MPa)
2632.9

Benda Uji 3



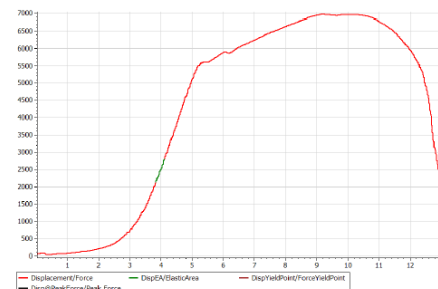
Test Report

Tuesday, 06-Jun-2023 10:37:07 AM

Tensile With Yield

No. Pengujian : T-34
 Kode Benda Uji : FPC6
 Nama : FAJAR PUTRA CAHYADI
 Type : A36
 Standard : ASTM
 Remark : 653

Shape	Area (mm ²)	initial length (mm)	Yield Point (%)
Rectangular	152.40	65.00	0.20



Ultimate			
Force Ultimate (kgf)	Elongation @Ultimate (mm)	Stress Ultimate (MPa)	Strain @Ultimate (%)
6969.7	9.20	448.5	14.16

Yield			
Yield Force (kgf)	Elongation @Yield (mm)	Yield Stress (MPa)	Strain @Yield (%)
5594.7	5.43	360.0	8.35

Modulus Elasticity (MPa)
2415.3

Single V Joint 75°

Benda Uji 1



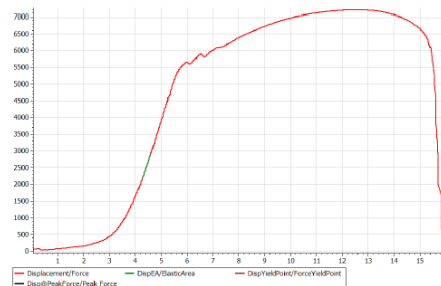
Test Report

Tuesday, 06-Jun-2023 10:41:08 AM

Tensile With Yield

No. Pengujian : T-34
 Kode Benda Uji : FPC7
 Nama : FAJAR PUTRA CAHYADI
 Type : A36
 Standard : ASTM
 Remark : 751

Shape	Area (mm ²)	Initial length (mm)	Yield Point (%)
Rectangular	147.60	65.00	0.20



Ultimate			
Force Ultimate (kgf)	Elongation @Ultimate (mm)	Stress Ultimate (MPa)	Strain @Ultimate (%)
7194.3	12.51	478.0	19.25

Yield			
Yield Force (kgf)	Elongation @Yield (mm)	Yield Stress (MPa)	Strain @Yield (%)
5652.1	6.02	375.5	9.26

Modulus Elasticity (MPa)
2178.5

Benda Uji 2



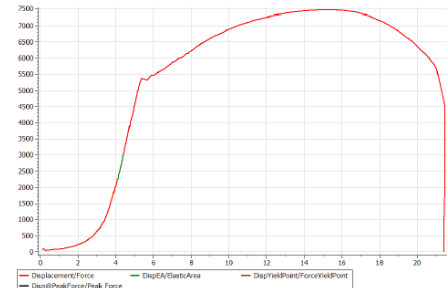
Test Report

Tuesday, 06-Jun-2023 10:46:12 AM

Tensile With Yield

No. Pengujian : T-34
 Kode Benda Uji : FPC8
 Nama : FAJAR PUTRA CAHYADI
 Type : A36
 Standard : ASTM
 Remark : 752

Shape	Area (mm ²)	Initial length (mm)	Yield Point (%)
Rectangular	154.80	70.00	0.20

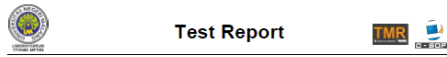


Ultimate			
Force Ultimate (kgf)	Elongation @Ultimate (mm)	Stress Ultimate (MPa)	Strain @Ultimate (%)
7476.3	15.22	473.6	21.75

Yield			
Yield Force (kgf)	Elongation @Yield (mm)	Yield Stress (MPa)	Strain @Yield (%)
5347.4	5.56	338.8	7.94

Modulus Elasticity (MPa)
2373.8

Benda Uji 3



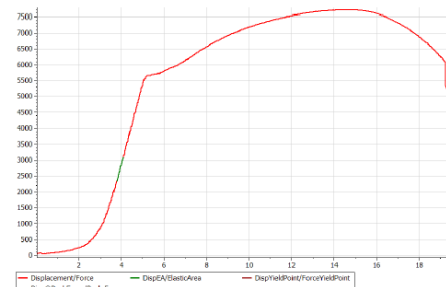
Test Report

Tuesday, 06-Jun-2023 10:49:41 AM

Tensile With Yield

No. Pengujian : T-34
 Kode Benda Uji : FPC9
 Nama : FAJAR PUTRA CAHYADI
 Type : A36
 Standard : ASTM
 Remark : 753

Shape	Area (mm ²)	Initial length (mm)	Yield Point (%)
Rectangular	162.00	70.00	0.20



Ultimate			
Force Ultimate (kgf)	Elongation @Ultimate (mm)	Stress Ultimate (MPa)	Strain @Ultimate (%)
7702.5	14.37	466.3	20.53

Yield			
Yield Force (kgf)	Elongation @Yield (mm)	Yield Stress (MPa)	Strain @Yield (%)
5661.9	5.35	342.7	7.64

Modulus Elasticity (MPa)
2368.0

Lampiran 6. Pendekatan Nilai Stress Ultimate Tanpa Porosity

- Single V joint 55° (Benda Uji 1)

$$\text{Luas Sketch Area} = 2306,9 \text{ mm}^2$$

$$\text{Luas Sketch Cacat Las} = 59,4 \text{ mm}^2$$

$$\text{Luas Area Aktual} = 166,8 \text{ mm}^2$$

$$\text{Luas Cacat Las Aktual} = \frac{\text{Luas Sketch Cacat Las} \times \text{Luas Aktual Area}}{\text{Luas Sketch Area}}$$

$$\text{Luas Cacat Las Aktual} = \frac{59,4 \text{ mm}^2 \times 166,8 \text{ mm}^2}{2306,9 \text{ mm}^2}$$

$$\text{Luas Cacat Las Aktual} = 4,29 \text{ mm}^2$$

$$\text{Luas Tanpa Cacat Las} = \text{Luas Area Aktual} - \text{Luas Cacat Las Aktual}$$

$$\text{Luas Tanpa Cacat Las} = 166,8 \text{ mm}^2 - 4,29 \text{ mm}^2$$

$$\text{Luas Tanpa Cacat Las} = 162,5 \text{ mm}^2$$

$$\text{Force Ultimate Efektif} = \frac{\text{Force Ultimate} \times \text{Area Efektif}}{\text{Luas Tanpa Cacat Las}}$$

$$\text{Force Ultimate Efektif} = \frac{7857 \text{ kgf} \times 166,8 \text{ mm}^2}{162,6 \text{ mm}^2}$$

$$\text{Force Ultimate Efektif} = 8064,6 \text{ kgf}$$

$$\text{Stress Ultimate Efektif} = \frac{\text{Force Ultimate Efektif}}{\text{Area Efektif}}$$

$$\text{Stress Ultimate Efektif} = \frac{8064,6 \text{ kgf}}{166,8 \text{ mm}^2}$$

$$\text{Stress Ultimate Efektif} = 48,3 \text{ kgf/mm}^2$$

$$\text{Stress Ultimate Efektif} = 474,1 \text{ MPa}$$

- Single V joint 55° (Benda Uji 2)

$$\text{Luas Sketch Area} = 2794,9 \text{ mm}^2$$

$$\text{Luas Sketch Cacat Las} = 257,9 \text{ mm}^2$$

$$\text{Luas Area Aktual} = 144 \text{ mm}^2$$

$$\text{Luas Cacat Las Aktual} = \frac{\text{Luas Sketch Cacat Las} \times \text{Luas Aktual Area}}{\text{Luas Sketch Area}}$$

$$\text{Luas Cacat Las Aktual} = \frac{257,9 \text{ mm}^2 \times 144 \text{ mm}^2}{2794,9 \text{ mm}^2}$$

$$\text{Luas Cacat Las Aktual} = 13,3 \text{ mm}^2$$

$$\text{Luas Tanpa Cacat Las} = \text{Luas Area Aktual} - \text{Luas Cacat Las Aktual}$$

$$\text{Luas Tanpa Cacat Las} = 144 \text{ mm}^2 - 13,3 \text{ mm}^2$$

$$\text{Luas Tanpa Cacat Las} = 130,7 \text{ mm}^2$$

$$\text{Force Ultimate Efektif} = \frac{\text{Force Ultimate} \times \text{Area Efektif}}{\text{Luas Tanpa Cacat Las}}$$

$$\text{Force Ultimate Efektif} = \frac{6281 \text{ kgf} \times 144 \text{ mm}^2}{130,7 \text{ mm}^2}$$

$$\text{Force Ultimate Efektif} = 6919,5 \text{ kgf}$$

$$\text{Stress Ultimate Efektif} = \frac{\text{Force Ultimate Efektif}}{\text{Area Efektif}}$$

$$\text{Stress Ultimate Efektif} = \frac{6919,5 \text{ kgf}}{144 \text{ mm}^2}$$

$$\text{Stress Ultimate Efektif} = 48,05 \text{ kgf/mm}^2$$

$$\text{Stress Ultimate Efektif} = 471,23 \text{ MPa}$$

- Single V joint 65° (Benda Uji 2)

$$\text{Luas Sketch Area} = 889,5 \text{ mm}^2$$

$$\text{Luas Sketch Cacat Las} = 11,6 \text{ mm}^2$$

$$\text{Luas Area Aktual} = 154,8 \text{ mm}^2$$

$$\text{Luas Cacat Las Aktual} = \frac{\text{Luas Sketch Cacat Las} \times \text{Luas Aktual Area}}{\text{Luas Sketch Area}}$$

$$\text{Luas Cacat Las Aktual} = \frac{11,6 \text{ mm}^2 \times 154,8 \text{ mm}^2}{889,5 \text{ mm}^2}$$

$$\text{Luas Cacat Las Aktual} = 2,02 \text{ mm}^2$$

$$\text{Luas Tanpa Cacat Las} = \text{Luas Area Aktual} - \text{Luas Cacat Las Aktual}$$

$$\text{Luas Tanpa Cacat Las} = 154,8 \text{ mm}^2 - 2,02 \text{ mm}^2$$

$$\text{Luas Tanpa Cacat Las} = 152,78 \text{ mm}^2$$

$$\text{Force Ultimate Efektif} = \frac{\text{Force Ultimate} \times \text{Area Efektif}}{\text{Luas Tanpa Cacat Las}}$$

$$\text{Force Ultimate Efektif} = \frac{7730,1 \text{ kgf} \times 154,8 \text{ mm}^2}{152,78 \text{ mm}^2}$$

$$\text{Force Ultimate Efektif} = 7832,24 \text{ kgf}$$

$$\text{Stress Ultimate Efektif} = \frac{\text{Force Ultimate Efektif}}{\text{Area Efektif}}$$

$$\text{Stress Ultimate Efektif} = \frac{7832,24 \text{ kgf}}{154,8 \text{ mm}^2}$$

$$\text{Stress Ultimate Efektif} = 50,60 \text{ kgf/mm}^2$$

$$\text{Stress Ultimate Efektif} = 496,18 \text{ MPa}$$

- Single V joint 65° (Benda Uji 3)

$$\text{Luas Sketch Area} = 2333 \text{ mm}^2$$

$$\text{Luas Sketch Cacat Las} = 197 \text{ mm}^2$$

$$\text{Luas Area Aktual} = 152,4 \text{ mm}^2$$

$$\text{Luas Cacat Las Aktual} = \frac{\text{Luas Sketch Cacat Las} \times \text{Luas Aktual Area}}{\text{Luas Sketch Area}}$$


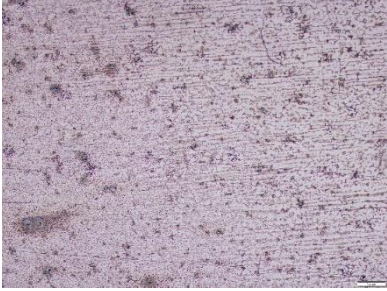
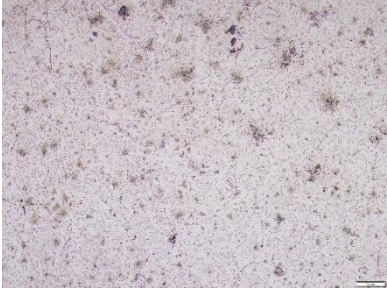

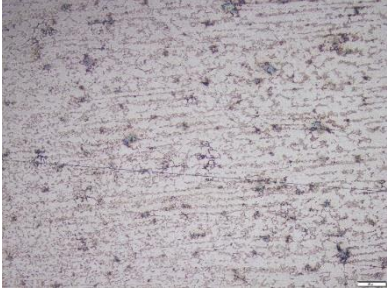
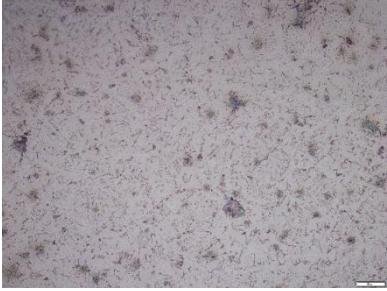
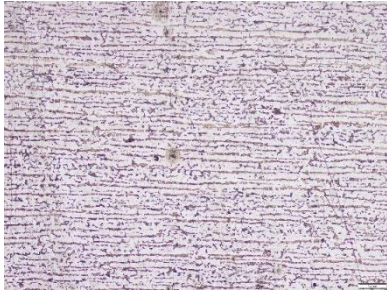

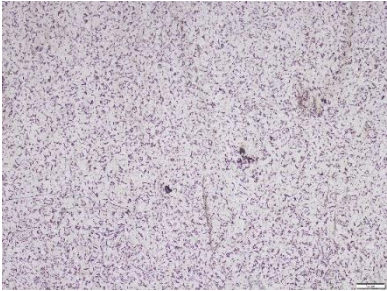
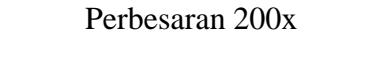
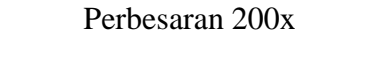

$$\text{Luas Cacat Las Aktual} = \frac{197 \text{ mm}^2 \times 152,4 \text{ mm}^2}{2333 \text{ mm}^2}$$
$$\text{Luas Cacat Las Aktual} = 12,87 \text{ mm}^2$$

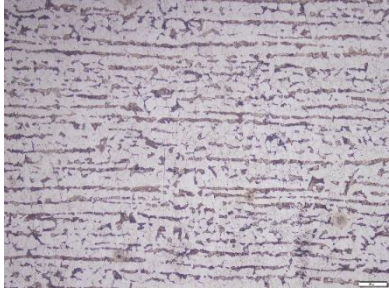

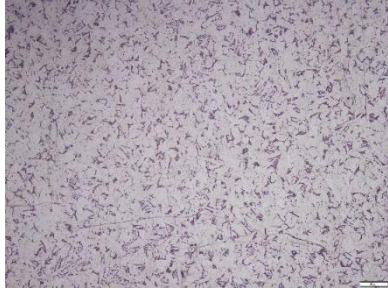


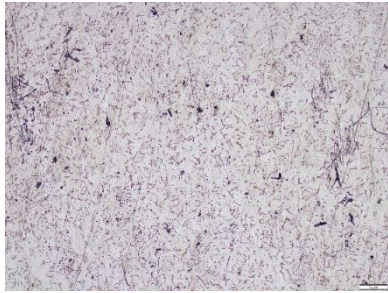
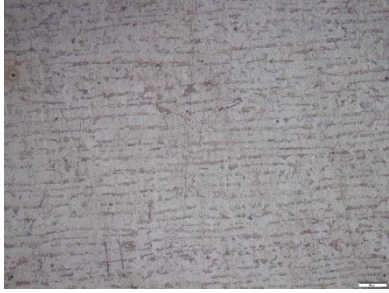

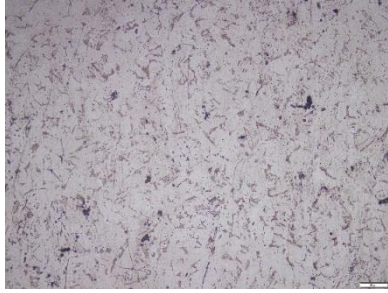
$$\text{Luas Tanpa Cacat Las} = \text{Luas Area Aktual} - \text{Luas Cacat Las Aktual}$$
$$\text{Luas Tanpa Cacat Las} = 152,4 \text{ mm}^2 - 12,87 \text{ mm}^2$$
$$\text{Luas Tanpa Cacat Las} = 139,53 \text{ mm}^2$$

$$\text{Force Ultimate Efektif} = \frac{\text{Force Ultimate} \times \text{Area Efektif}}{\text{Luas Tanpa Cacat Las}}$$
$$\text{Force Ultimate Efektif} = \frac{6969,7 \text{ kgf} \times 152,4 \text{ mm}^2}{139,53 \text{ mm}^2}$$
$$\text{Force Ultimate Efektif} = 7612,50 \text{ kgf}$$

$$\text{Stress Ultimate Efektif} = \frac{\text{Force Ultimate Efektif}}{\text{Area Efektif}}$$
$$\text{Stress Ultimate Efektif} = \frac{7612,50 \text{ kgf}}{152,4 \text{ mm}^2}$$
$$\text{Stress Ultimate Efektif} = 49,95 \text{ kgf/mm}^2$$
$$\text{Stress Ultimate Efektif} = 489,85 \text{ MPa}$$

Lampiran 7. Hasil Uji Metalografi

Single V Joint 55°		
Base Metal	HAZ	Weld Metal
Perbesaran 100x	Perbesaran 100x	Perbesaran 100x
		
Perbesaran 200x	Perbesaran 200x	Perbesaran 200x
		
Single V Joint 65°		
Base Metal	HAZ	Weld Metal
Perbesaran 100x	Perbesaran 100x	Perbesaran 100x
		
Perbesaran 200x	Perbesaran 200x	Perbesaran 200x
		

		
Single V Joint 75°		
Base Metal	HAZ	Weld Metal
Perbesaran 100x	Perbesaran 100x	Perbesaran 100x
		
Perbesaran 200x	Perbesaran 200x	Perbesaran 200x
		

Lampiran 8. Perhitungan Average Grain Size Area

Sudut	Titik Potong	Keliling Lingkaran	PL	L3	G	Avg G.	Standar Deviasi	G No.	Avg Grain Area (μm^2)	
55	BM 1	37	250.00	74.00	0.014	9.12	9.40	0.20	9.5	178
	BM 2	29	166.70	86.98	0.011	9.59				
	BM 3	14	83.30	84.03	0.012	9.49				
	HAZ 1	70	250.00	140.00	0.007	10.96	11.31	0.26	11.5	44.6
	HAZ 2	58	166.70	173.97	0.006	11.59				
	HAZ 3	27	83.30	162.06	0.006	11.39				
	WM 1	33	250.00	66.00	0.015	8.79	9.63	0.61	9.5	178
	WM 2	32	166.70	95.98	0.010	9.88				
	WM 3	18	83.30	108.04	0.009	10.22				
65	BM 1	41	250.00	82.00	0.012	9.42	9.65	0.28	9.5	178
	BM 2	28	166.70	83.98	0.012	9.49				
	BM 3	17	83.30	102.04	0.010	10.05				
	HAZ 1	66	250.00	132.00	0.008	10.79	11.08	0.21	11	63
	HAZ 2	52	166.70	155.97	0.006	11.28				
	HAZ 3	25	83.30	150.06	0.007	11.16				
	WM 1	32	250.00	64.00	0.016	8.71	9.15	0.41	9	252
	WM 2	24	166.70	71.99	0.014	9.04				
	WM 3	15	83.30	90.04	0.011	9.69				
75	BM 1	46	250.00	92.00	0.011	9.75	9.39	0.29	9.5	178
	BM 2	27	166.70	80.98	0.012	9.38				
	BM 3	12	83.30	72.03	0.014	9.05				
	HAZ 1	62	250.00	124.00	0.008	10.61	10.57	0.21	10.5	89.1
	HAZ 2	37	166.70	110.98	0.009	10.29				
	HAZ 3	22	83.30	132.05	0.008	10.80				
	WM 1	26	250.00	52.00	0.019	8.11	8.38	0.20	8.5	356
	WM 2	20	166.70	59.99	0.017	8.52				
	WM 3	10	83.30	60.02	0.017	8.52				

BIODATA PENULIS



Nama penulis adalah Fajar Putra Cahyadi, lahir pada tanggal 11 Mei 2001 yang merupakan anak pertama dari dua bersaudara. Penulis telah menyelesaikan pendidikan di SDN Kepuharjo 2, SMPN 1 Sukodono, dan SMAN 2 Lumajang. Selanjutnya, penulis melanjutkan pendidikan tinggi di Departemen Teknik Mesin Industri, Fakultas Vokasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), dengan NRP 1021191000022. Selama kuliah, penulis aktif berorganisasi di ITS, termasuk pernah menjabat sebagai staff *creative branding* pada periode 2021/2022 dan *non-technical manager* pada periode 2022/2023 di Nogogeni ITS Team.

Penulis telah menyelesaikan studi di Departemen Teknik Mesin Industri dengan menyelesaikan tugas akhir berjudul " Pengaruh Sudut *Single V Joint* terhadap Laju Korosi, Kekuatan Tarik dan Struktur Mikro Pelat Baja A36 dengan Pengelasan SMAW Menggunakan Elektroda E7018 pada Lingkungan Laut". Dalam penelitiannya, penulis dibimbing oleh Ir. Hari Subiyanto, MSc. Untuk diskusi lebih lanjut mengenai tugas akhir ini, penulis dapat dihubungi melalui email fajarpc01@gmail.com.