



TESIS - TM 185400

# Pengaruh Variabel Pengelasan Terhadap Laju Korosi Pada Sambungan Pengelasan Bawah Air Baja Karbon Rendah

RIZKY HAURA NINDYA SAFITRI

NRP 6007201033

Dosen Pembimbing

Suwarno. S.T., M.Sc., PhD.

NIP. 198005202005011003

Program Studi Magister  
Departemen Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
2022





**TESIS - TM185400**

# **Pengaruh Variabel Pengelasan Terhadap Laju Korosi Pada Sambungan Pengelasan Bawah Air Baja Karbon Rendah**

**RIZKY HAURA NINDYA SAFITRI**

**NRP 6007201033**

**Dosen Pembimbing**

**Suwarno. S.T., M.Sc., PhD.**

**NIP. 198005202005011003**

**Program Studi Magister**

**Departemen Teknik Mesin**

**Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem**

**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Surabaya**

**2022**





**THESIS - TM185400**

# **The Effect Of Underwater Wet Welding Variables On The Corrosion Rate Of Low Carbon Steel Weldment**

**RIZKY HAURA NINDYA SAFITRI**

**NRP 6007201033**

*Advisor Lecturer*

**Suwarno. S.T., M.Sc., PhD.**

**NIP. 198005202005011003**

**Study Program Magister**

Departemen of Mechanical Engineering

Faculty of Industrial Technology and System Engineering

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



## LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar

**Magister Teknik (M.T.)**  
di

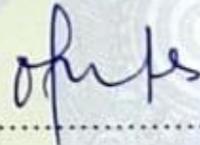
**Program Studi S-2 Magister Departemen Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Oleh:

**RIZKY HAURA NINDYA SAFITRI**  
**NRP. 6007211033**

Tanggal Ujian: 13 Juli 2022  
Periode Wisuda: September 2022

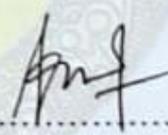
Disetujui oleh:  
**Pembimbing:**



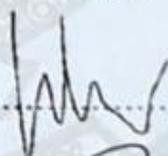
1. Suwarno, S.T., M.Sc., Ph.D  
NIP : 198005202005011003

**Penguji :**

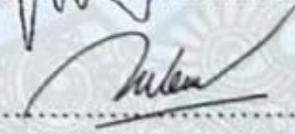
1. Ika Dewi Wijayanti, S.T., M.Sc., Ph.D.  
NIP : 198512022014042002



2. Dr. Eng. Sutikno, S.T., M.T.  
NIP : 197407032000031001



3. Dr. Ir. Helena Carolina Kis Agustin  
NIP : 196308151989032001



Kepala Departemen Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem



Dr. Ir. Atok Setiawan, M.Eng.Sc.  
NIP. 19660402198903100



# Pengaruh Variabel Pengelasan Terhadap Laju Korosi Pada Sambungan Pengelasan Bawah Air Baja Karbon Rendah

Nama Mahasiswa : Rizky Haura Nindya Safitri  
NRP : 6007201033  
Departemen : Teknik Mesin  
Dosen Pembimbing : Suwarno, S.T., M.Sc., PhD.

Pengelasan bawah air merupakan metode paling praktis dan ekonomis yang digunakan dalam proses perbaikan dan perawatan di daerah lepas pantai. Hal ini disebabkan karena tidak ada alternatif lain untuk penyambungan bagian konstruksi yang rusak pada fixed offshore structure. Sementara, struktur bangunan lepas pantai umumnya terbuat dari logam. Sehingga tidak dapat dipungkiri bahwa korosi akan terjadi. Pada penelitian kali ini akan bertujuan mengetahui efek dari parameter pengelasan terhadap laju korosi pengelasan bawah air material Plat A36 dan Pipa A106. Pada penelitian ini, proses pengelasan dilakukan dengan jenis *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) dengan posisi pengelasan 1G didalam kolam dengan kedalaman 3 meter dan 10 meter. Elektroda yang digunakan adalah elektroda jenis E6013 dan E7018 dengan diameter elektroda 4 mm spesifikasi AWS yang divariasikan ke dalam dua jenis arus yaitu sebesar 90 A dan 120 A. Pengujian laju korosi dilakukan dengan menggunakan metode *Linear Polarization* dan *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS) dengan menggunakan elektrolit NaCl 3,5%. Pada Plat A36 diketahui bahwa laju korosi tertinggi yang didapatkan dari pengujian *Linear Polarization* yaitu 0,093 mm/yr dengan kedalaman pengelasan 10 meter menggunakan elektroda E6013 pada arus 120A, pada pengujian EIS nilai tahanan polarisasinya adalah 581,2  $\Omega$  dan laju korosi terendah pada Plat A36 terjadi pada pengelasan dengan kedalaman 3 meter menggunakan elektroda E7018 dengan arus 90A yaitu 0,011 mm/yr. Sementara itu, pada Pipa A106 nilai laju korosi tertinggi yaitu 0,299 mm/yr dengan kedalaman pengelasan 10 meter menggunakan elektroda E6013 pada arus 120A pada pengujian EIS nilai tahanan polarisasinya 641,67  $\Omega$ , dan laju korosi terendah juga terjadi pada pengelasan dengan kedalaman 3 meter dengan elektroda E7018 pada arus 90A dengan laju korosi yaitu 0,004 mm/yr. Sehingga, diketahui bahwa kedalaman pengelasan berpengaruh terhadap laju korosi, semakin dalam proses pengelasan dilakukan, maka laju korosi akan semakin cepat karena pengaruh dari laju pendinginan cepat. Hal ini disebabkan oleh semakin tingginya laju pendinginan maka akan semakin mudah terbentuknya *hydrogen crack*. Dimana faktor tersebut adalah penyebab korosi pada sambungan pengelasan bawah air.

**Kata Kunci** : Pengelasan Bawah Air, Laju Korosi, Elektroda, Arus, Kedalaman.

*HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN*

# The Effect Of Underwater Wet Welding Variables On The Corrosion Rate Of Low Carbon Steel Weldment

Student Name : Rizky Haura Nindya Safitri  
Study ID : 6007201033  
Departemen : Teknik Mesin  
Advisor Lecturer : Suwarno, S.T., M.Sc., PhD.

Underwater welding is the most practical and economical method used in the repair and maintenance process in offshore areas. This is because there is no other alternative for joining the damaged parts of the construction to the fixed offshore structure. Meanwhile, offshore structures are generally made of metal. So it is undeniable that corrosion will occur. This study aims to determine the welding parameters on the corrosion rate of welding air material under A36 Plate and A106 Pipe. In this study, the welding process was carried out with the type of Shielded Metal Arc Welding (SMAW) with a welding position of 1G in a pool with a depth of 3 meters and 10 meters. The electrodes used are electrodes of type E6013 and E7018 with an electrode diameter of 4 mm AWS specifications which are varied into two types of current, namely 90 A and 120 A. Corrosion rate testing is carried out using the Linear Polarization method and Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) using an electrolyte. 3.5% NaCl. On Plate A36 it is known that the highest corrosion rate obtained from the Linear Polarization test is 0.093 mm/year with a welding depth of 10 meters using an E6013 electrode at a current of 120A, in the EIS test the polarization resistance value is 581.2 and the lowest corrosion rate on Plate A36 occurs at welding with a depth of 3 meters using an E7018 electrode with a current of 90A which is 0.011 mm/year. Meanwhile, on Pipe A106 the highest corrosion rate value is 0.299 mm/year with a welding depth of 10 meters using an E6013 electrode at 120A in the EIS test the polarization resistance value is 641.67 , and the lowest corrosion rate also occurs in welding with a depth of 3 meters with an E7018 electrode. at a current of 90A with a corrosion rate of 0.004 mm/year. Thus, it is known that the welding depth on the corrosion rate, the deeper the welding process is carried out, and the faster the corrosion rate will be due to the influence of the fast cooling rate. This is due to the increase in the cooling rate, the easier it will be to form hydrogen cracks. Where these factors are the cause of corrosion in underwater welding joints.

**Keywords :** Underwater wet welding, Corrosion Rate, Electrode, Welding Current, Water Depth

***HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN***

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah Subhana Wa Ta'ala karena atas segala nikmat yang ia berikan sehingga thesis dengan judul “Pengaruh Variabel Pengelasan Terhadap Mekanisme Laju Korosi Pada Sambungan Pengelasan Bawah Air Baja Karbon Rendah” ini dapat selesai dengan baik.

Penulis sadar bahwa proposal thesis ini tidak dapat diselesaikan tanpa bantuan dari beberapa pihak yang oleh karenanya dalam hal ini penyusun ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ibu **Kusrini Umi Kasih** selaku mama yang telah mencurahkan doa, kasih sayang yang dukungan tiada henti hingga semua dapat dimudahkan dengan baik oleh Allah SWT.
2. Bapak **Arief Kristanto, S.T.** selaku papa yang telah memberikan doa, dukungan moral maupun material yang terus memberikan semangat kepada penulis.
3. **Aulia Anisa Putri**, selaku adik dari penulis yang telah membantu memberikan doa, support dan bantuan sehingga penulis dapat terbantu menyelesaikan thesis ini.
4. Bapak **Suwarno, S.T., M.Sc., PhD.** selaku dosen pembimbing yang selalu memberikan ilmu dan bimbingan selama pengerjaan thesis.
5. Para dosen penguji yang telah memberikan kritik dan saran sedari proposal thesis hingga thesis ini dapat terselesaikan.
6. **Abri Denny Noya, S.Pd.** yang selalu sabar mendampingi penulis sedari Program Diploma hingga Program Magister dan inshaAllah untuk pencapaian hebat bersama mendatang lainnya.
7. Rekan rekan Lab. Metalurgi Teknik Mesin ITS, terutama **Rizali Ahmadin, Faradesil Yuliani, Risca Awalia Purnamasari, dan Indra Surya Iwanata** dalam pelaksanaan pengerjaan thesis maupun hal apapun lainnya sebagai *support system* bagi penulis.
8. Seluruh sahabat penulis yang juga tidak henti memberikan support dan doa bagi penulis dimanapun mereka berada.
9. Dosen dosen dan para staff teknik Mesin, ITS. Terimakasih atas ilmu dan segala bantuan yang telah diberikan, semoga bermanfaat di dunia maupun akhirat.
10. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu, terimakasih atas semua bantuan dan doa yang diberikan.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penyusunan thesis ini. Oleh karena itu, penulis mengharapkan saran dan masukan dari semua pihak. Semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan sumbangsih bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Surabaya, 10 Juli 2022

**Penulis**

***HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN***

## DAFTAR ISI

<b>COVER</b> .....	<b>i</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN TESIS</b> .....	<b>i</b>
<b>Abstrak</b> .....	<b>i</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>iii</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>v</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>vii</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xi</b>
<b>BAB 1</b> .....	<b>1</b>
<b>PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah .....	3
1.4 Tujuan Penelitian .....	3
1.5 Manfaat Penelitian .....	4
<b>BAB II</b> .....	<b>5</b>
2.1 Tinjauan Pustaka.....	5
2.2 Baja .....	8
<b>2.2.1. Klasifikasi Baja</b> .....	<b>8</b>
<b>2.2.2. Baja ASTM A106</b> .....	<b>10</b>
<b>2.2.3. Baja ASTM A36</b> .....	<b>10</b>
2.3 Pengelasan .....	11
<b>Pengelasan Basah Bawah Air</b> .....	<b>11</b>
<b>Shielded Metal Arc Welding (SMAW)</b> .....	<b>11</b>
<b>Heat Input</b> .....	<b>13</b>
<b>Elektroda</b> .....	<b>13</b>
<b>Siklus Thermal Pengelasan</b> .....	<b>14</b>
2.4 Korosi.....	16
<b>2.4.1 Dasar Terjadinya Korosi</b> .....	<b>16</b>
<b>2.4.2 Faktor Penyebab Korosi</b> .....	<b>19</b>
<b>2.4.3 Jenis Jenis Korosi</b> .....	<b>20</b>

2.4.4	<b>Korosi Pada Pengelasan .....</b>	<b>22</b>
2.4.5	<b>Persamaan Laju Korosi.....</b>	<b>23</b>
2.4.6	<b>Metode Elektrokimia .....</b>	<b>24</b>
2.4.7	<b>Teori Sel Tiga Elektroda .....</b>	<b>25</b>
<b>BAB 3 .....</b>	<b>27</b>	
<b>METODOLOGI.....</b>	<b>27</b>	
3.1	<b>Diagram Alir .....</b>	<b>27</b>
3.2	<b>Penjelasan Diagram Alir .....</b>	<b>28</b>
3.2.1	<b>Studi Literatur .....</b>	<b>28</b>
3.2.2	<b>Identifikasi Masalah .....</b>	<b>28</b>
3.2.3	<b>Persiapan Penelitian .....</b>	<b>29</b>
3.2.4	<b>Persiapan material.....</b>	<b>29</b>
3.2.5	<b>Proses pengelasan bawah air .....</b>	<b>33</b>
3.2.6	<b>Pengamatan Visual .....</b>	<b>34</b>
3.2.7	<b>Pembuatan Spesimen Uji Korosi.....</b>	<b>35</b>
3.2.8	<b>Persiapan Pengujian Korosi .....</b>	<b>37</b>
3.2.9	<b>Persiapan Struktur Makro .....</b>	<b>40</b>
3.2.10	<b>Analisa Hasil Pengujian.....</b>	<b>40</b>
3.2.11	<b>Kesimpulan dan Saran.....</b>	<b>40</b>
<b>BAB 4 .....</b>	<b>41</b>	
<b>ANALISA HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>41</b>	
4.1	<b>Hasil Pengujian Korosi.....</b>	<b>41</b>
4.1.1	<b>Hasil Pengujian Polarisasi Linear .....</b>	<b>41</b>
4.1.2	<b>Hasil Pengujian EIS .....</b>	<b>53</b>
4.2	<b>Hasil Pengamatan Struktur Makro .....</b>	<b>59</b>
4.3	<b>Mekanisme Korosi .....</b>	<b>62</b>
4.4	<b>Hasil Desain Eksperimen .....</b>	<b>64</b>
<b>BAB V .....</b>	<b>67</b>	
<b>KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>67</b>	
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>69</b>	

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1. Diagram skema pengelasan basah bawah air dengan elektroda terbungkus (Surojo, Eko et al, 2021) .....	12
Gambar 2. 2. Perbandingan laju pendinginan pengelasan udara dan dalam air ....	15
Gambar 2. 3. Contoh diagram tafel yang diidealkan (Lee, Dasol et al, 2016) .....	26
Gambar 3. 1. Diagram Alir Penelitian.....	28
Gambar 3. 2. Dimensi spesimen (A) Pipa A106 dan (B) Plat A36 .....	30
Gambar 3. 3. Kampuh V pengelasan .....	31
Gambar 3. 4. Proses pembuatan kampuh V .....	31
Gambar 3. 5. Hasil pembuatan kampuh V pada (A) pipa A106 dan (B) Plat A36..	32
Gambar 3. 6. Proses Pengelasan Bawah Air yang dilakukan di Solo Techno Park	34
Gambar 3. 7. Hasil pengelasan dalam air pada material pipa A106 yang dilakukan di Solo Techno Park dilakukan pengamatan secara visual.....	34
Gambar 3. 8. Hasil pengelasan dalam air pada material Plat A36 yang dilakukan di Solo Techno Park dilakukan pengamatan secara visual.....	35
Gambar 3. 9. Pemotongan spesimen uji korosi.....	35
Gambar 3. 10. Sketsa Makroskopis untuk posisi pengujian korosi elektrokimia ...	36
Gambar 3. 11. Contoh spesimen uji korosi yang sudah dipotong .....	36
Gambar 3. 12. Tampilan Software NOVA 2.1.4 .....	37
Gambar 3. 13. (A) elektroda acuan / refrence electrode (Ag/AgCl), (B) elektroda pembantu / counter electrode (Pt).....	38
Gambar 3. 14. Alat uji korosi sel tiga elektroda .....	38
Gambar 3. 15. Alat potensiostat yang digunakan dalam uji korosi .....	39
Gambar 4. 1. Proses plotting diagram tafel.....	42
Gambar 4. 2. Kurva Polarisasi dari base metal plat A36 .....	43
Gambar 4. 3. Diagram tafel untuk pengujian di tiap parameter pengelasan Plat A36 .....	44
Gambar 4. 4. Nilai Laju Korosi pada Plat A36 - Elektroda E6013 .....	45
Gambar 4. 5. Standar Deviasi nilai laju korosi Plat A36 - Elektroda E6013.....	46
Gambar 4. 6. Nilai Laju Korosi pada Plat A36 - Elektroda E7018 .....	47
Gambar 4. 7. Standar Deviasi nilai laju korosi Plat A36 - Elektroda E7018.....	47
Gambar 4. 8. Kurva Polarisasi dari base metal pipa A106 .....	48
Gambar 4. 9. Diagram tafel untuk pengujian di tiap parameter pengelasan Pipa A106 .....	49
Gambar 4. 10. Nilai laju korosi pada Pipa A106-Elektroda E6013.....	50
Gambar 4. 11. Standar Deviasi nilai laju korosi pada Pipa A106-Elektroda E6013 .....	50
Gambar 4. 12. Nilai laju korosi pada Pipa A106-Elektroda E7018.....	51
Gambar 4. 13. Standart Deviasi nilai laju korosi pada Pipa A106-Elektroda E7018 .....	52
Gambar 4. 14. Equivalent circuit yang digunakan untuk fitting.....	54
Gambar 4. 15. Nyquist Plot Plat A36-Elektroda E6013 .....	55
Gambar 4. 16. Nyquist Plot Plat A36-Elektroda E7018 .....	56
Gambar 4. 17. Nyquist Plot Pipa A106-Elektroda E7018 .....	57
Gambar 4. 18. Nyquist Plot Pipa A106-Elektroda E6013 .....	58
Gambar 4. 19. a) Foto Struktur Makro pada Plat A36 dengan arus 90A	

menggunakan elektroda E6013 pada kedalaman 3m (b) Foto Struktur Makro pada Plat A36 dengan arus 90A menggunakan elektroda E6013 pada kedalaman 10m...	59
<b>Gambar 4. 20.</b> (a) Foto Struktur Makro pada Plat A36 dengan arus 120A menggunakan elektroda E6013 pada kedalaman 3m (b) Foto Struktur Makro pada Plat A36 dengan arus 120A menggunakan elektroda E6013 pada kedalaman 10m.	60
<b>Gambar 4. 21.</b> (a) Foto Struktur Makro pada Plat A36 dengan arus 90A menggunakan elektroda E7018 pada kedalaman 3m (b) Foto Struktur Makro pada Plat A36 dengan arus 90A menggunakan elektroda E7018 pada kedalaman 10m...	60
<b>Gambar 4. 22.</b> a) Foto Struktur Makro pada Plat A36 dengan arus 120A menggunakan elektroda E7018 pada kedalaman 3m (b) Foto Struktur Makro pada Plat A36 dengan arus 120A menggunakan elektroda E7018 pada kedalaman 10m.	60
<b>Gambar 4. 23.</b> (a) Foto Struktur Makro pada Pipa A106 dengan arus 90A menggunakan elektroda E6013 pada kedalaman 3m (b) Foto Struktur Makro pada Pipa A106 dengan arus 90A menggunakan elektroda E6013 pada kedalaman 10m.	61
<b>Gambar 4. 24.</b> (a) Foto Struktur Makro pada Pipa A106 dengan arus 120A menggunakan elektroda E6013 pada kedalaman 3m (b) Foto Struktur Makro pada Pipa A106 dengan arus 120A menggunakan elektroda E6013 pada kedalaman 10m.	61
<b>Gambar 4. 25.</b> Foto Struktur Makro pada Pipa A106 dengan arus 90A menggunakan elektroda E7018 pada kedalaman 3m (b) Foto Struktur Makro pada Pipa A106 dengan arus 90A menggunakan elektroda E7018 pada kedalaman 10m.	61
<b>Gambar 4. 26.</b> (a) Foto Struktur Makro pada Pipa A106 dengan arus 120A menggunakan elektroda E7018 pada kedalaman 3m (b) Foto Struktur Makro pada Pipa A106 dengan arus 120A menggunakan elektroda E7018 pada kedalaman 10m	62
<b>Gambar 4. 27.</b> Pengujian ANOVA pada Plat A36	65
<b>Gambar 4. 28.</b> Pengujian ANOVA pada pipa A106	65

## DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1. Spesifikasi Material ASTM A106 .....	10
Tabel 2. 2. Spesifikasi Material ASTM A36 .....	10
Tabel 2. 3. Klasifikasi Elektroda (AWS A5.1 / A5.1M: 2012.) .....	14
Tabel 2. 4. Tingkat Ketahanan Korosi Berdasarkan Laju Korosi (Fontana, 1989) .....	24
Tabel 3. 1. Komposisi Kimia Baja Karbon dan Elektroda .....	29
Tabel 3. 2. Jenis elektroda yang akan digunakan .....	32
Tabel 3. 3. Parameter pengelasan dalam air .....	33
Tabel 3. 4. Jumlah Spesimen Pengujian Korosi .....	36
Tabel 4. 1. Output NOVA 2.14 pada base metal plat A36.....	43
Tabel 4. 2. Output NOVA 2.1 4 dengan pengelasan menggunakan elektroda E6013 pada plat A36 .....	45
Tabel 4. 3. Output NOVA 2.14 dengan pengelasan menggunakan elektroda E7018 pada plat A36 .....	46
Tabel 4. 4. Output NOVA 2.1.4 pada base metal pipa A106 .....	48
Tabel 4. 5. Output NOVA 2.14 dengan pengelasan menggunakan elektroda E6013 pada pipa A106.....	49
Tabel 4. 6. Output NOVA 2.14 dengan pengelasan menggunakan elektroda E7018 pada pipa A106.....	51
Tabel 4. 7. Output NOVA 2.1.4 pengujian EIS pada base metal Plat A36 .....	55
Tabel 4. 8. Output NOVA 2.1.4 pengujian EIS dengan menggunakan elektroda E6013 pada Plat A36.....	55
Tabel 4. 9. Output NOVA 2.1.4 pengujian EIS dengan menggunakan elektroda E7018 pada Plat A36.....	56
Tabel 4. 10. Output NOVA 2.1.4 pengujian EIS pada base metal Pipa A106.....	57
Tabel 4. 11. Output NOVA 2.1.4 pengujian EIS dengan menggunakan elektroda E6013 pada Pipa A106.....	57
Tabel 4. 12. Output NOVA 2.1.4 pengujian EIS dengan menggunakan elektroda E7018 pada Pipa A106.....	58

***HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN***

# BAB 1

## PENDAHULUAN

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai hal-hal yang melatarbelakangi pembuatan tesis, rumusan masalah yang digunakan untuk menyelesaikan tesis, batasan masalah pada tesis, tujuan dan manfaat.

### 1.1 Latar Belakang

Di zaman yang semakin berkembang ini, teknik pengelasan tidak hanya untuk memperbaiki benda atau struktur yang berada di udara terbuka, namun juga dapat memperbaiki yang tercelup di dalam air laut. Pengelasan basah bawah air atau yang biasa disebut pengelasan bawah air metode yang digunakan. Umumnya pengelasan bawah air dibagi menjadi 2 jenis yaitu *dry welding* dan *wet welding*. Dalam penelitian ini yang digunakan adalah metode pengelasan basah atau *wet welding*. *Shield Metal Arc Welding* (SMAW) adalah metode tradisional yang digunakan disini. (Teran, 2014)

Pengelasan bawah air, merupakan salah satu kebutuhan pokok untuk menunjang reparasi bangunan lepas pantai. Hal ini disebabkan karena tidak ada alternatif lain untuk penyambungan bagian konstruksi yang patah atau rusak di bawah garis air misalnya pada fixed offshore structure. Pengelasan bawah air mulai berkembang pada waktu Perang Dunia I, ketika Angkatan Laut Inggris memperbaiki kapalnya pada bagian bawah garis air dengan pengelasan. Sejak saat itu pengelasan bawah air terus dikembangkan. Hal ini disebabkan karena pentingnya pengelasan bawah air untuk menunjang kebutuhan perbaikan pada konstruksi kapal di bawah garis air, penyambungan dan perbaikan pipa-pipa di bawah permukaan air dan reparasi untuk anjungan minyak lepas pantai (Muvida, 2008)

Pengelasan bawah air memiliki kelemahan mendasar, yaitu kualitas pengelasan yang kurang baik dibandingkan dengan pengelasan di atas permukaan air, karena terbentuknya banyak cacat las. Selain itu, pengelasan

bawah air memiliki kecepatan pendinginan yang tinggi dimana sangat mempengaruhi sifat mekanisnya, seperti lebih getasnya logam lasan, mengurangi keuletan, dan meningkatkan porositas. Ini merupakan beberapa perbedaan antara pengelasan bawah air dan pengelasan di udara terbuka. Perbedaan lainnya adalah pada pengelasan bawah air banyak kandungan hidrogen yang terdapat pada logam lasan sehingga menyebabkan embrittlement, retak, dan porositas. (Huda, 2014)

Elektroda adalah salah satu faktor penting dalam proses pengelasan. Tiap jenis elektroda las memiliki komposisi kimia dan sifat mekanik yang berbeda. Oleh karena itu, dengan membandingkan jenis elektroda yang berbeda berdasarkan kekuatan mekaniknya pada pengelasan *wet welding* akan memberikan informasi elektroda manakah yang paling cocok digunakan untuk pengelasan bawah air pada material baja karbon rendah. (Nizar, 2014)

Korosi merupakan salah satu peristiwa yang banyak terjadi pada struktur bangunan yang ada di laut. Korosi tersebut umumnya dapat terjadi karena bahan dari bangunan lepas pantai tersebut terbuat dari bahan dasar logam. Pada kasus korosi pada konstruksi bawah laut yang banyak dijumpai adalah pada sambungan las, maka dari itu dalam melakukan pengelasan perlu adanya pemilihan elektroda yang baik sehingga hasil pengelasan akan maksimal. Pada penelitian sebelumnya, Sun (2018) telah melakukan pengujian pada laju korosi terhadap pengelasan basah namun material yang digunakan adalah *Stainless Steel S32101*. Pada penelitian sebelumnya pula, Surojo (2020) juga telah meneliti tentang efek dari parameter pengelasan terhadap laju korosi pada SS400 low carbon steel, Surojo menggunakan parameter pengelasan berupa elektroda, arus dan kedalaman pengelasan. Dan didapatkan hasil dan kesimpulan bahwa, untuk parameter kedalaman sendiri, semakin dalam pengelasan, maka laju korosi akan semakin meningkat. Lalu untuk arus yang digunakan, surojo mendapatkan hasil bahwa arus yang lebih tinggi akan menghasilkan laju korosi yang lebih tinggi pula. Terakhir yaitu elektroda yang digunakan, didapatkan hasil bahwa tiap elektroda akan menghasilkan laju korosi yang berbeda pula.

Melalui thesis ini akan dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh arus dan elektroda terhadap laju korosi baja ASTM A106 dan A36

pada pengelasan basah bawah air. Analisis akan dilakukan dengan pengujian elektrokimia dengan metode polarisasi dan *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS) menggunakan media pengkorosif air laut.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, maka dapat diambil beberapa rumusan masalah yang akan dibahas dalam penelitian tesis ini, diantaranya:

1. Bagaimana pengaruh variasi elektroda terhadap laju korosi pada proses pengelasan bawah air baja karbon rendah?
2. Bagaimana pengaruh variasi heat input terhadap laju korosi pada proses pengelasan bawah air baja karbon rendah?
3. Bagaimana pengaruh variasi kedalaman pengelasan terhadap laju korosi pada proses pengelasan bawah air baja karbon rendah?

## 1.3 Batasan Masalah

Pada penelitian thesis ini dibuat Batasan masalah sebagai berikut :

1. Proses pengelasan yang digunakan adalah *Shield Metal Arc Welding* (SMAW)
2. Elektrode yang digunakan adalah E 6013 dan E 7018
3. Kedalaman pengelasan 3 meter dan 10 meter
4. Pengujian dilakukan dengan metode *ELECTROCHEMICAL IMPEDANCE SPECTROSCOPY* (EIS) dan *Linear Polarization*.
5. Media pengkorosif yang digunakan adalah NaCl dengan salinitas 3,5%
6. Pengelasan bawah air dilakukan di kolam dengan kedalaman 10m.
7. Proses pengelasan didasarkan pada *Welding Procedure Spesification* (WPS)

## 1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisa laju korosi pada proses pengelasan bawah air baja karbon rendah dengan variasi arus
2. Menganalisa laju korosi pada proses pengelasan bawah air baja

karbon rendah dengan variasi elektroda

3. Menganalisa laju korosi pada proses pengelasan bawah air baja karbon rendah dengan variasi kedalaman pengelasan

### **1.5 Manfaat Penelitian**

Adapun manfaat dari penulisan thesis ini adalah:

1. Memberikan penjelasan tentang pengaruh variable pengelasan terhadap sambungan material ASTM A106 dan A36, terhadap laju korosi pada pengelasan bawah air.
2. Menunjang penelitian-penelitian sebelumnya.
3. Sebagai bahan referensi untuk penelitian selanjutnya.
4. Sebagai bahan referensi untuk meminimalisir terjadinya korosi

## **BAB II**

### **KAJIAN PUSTAKA**

#### **2.1 Tinjauan Pustaka**

- a. Yingsamphancharoen (2016) melakukan penelitian tentang laju korosi pada pipa gas dengan material A106 Grade B, Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menyelidiki laju korosi pipa baja karbon yang dilas (ASTM (American Society for Testing and Materials) A106 Grade B) oleh GTAW di bawah arus dari 60, 70, dan 80 A. Hasil penelitian menunjukkan korelasi antara laju alir dan laju korosi pipa; semakin besar laju alir, semakin tinggi laju korosi. Selain itu, pipa yang dilas dari arus pengelasan 70 A menunjukkan kekuatan tarik dan ketahanan korosi yang lebih tinggi daripada yang berasal dari arus 60 dan 80 A. Selain itu, struktur mikro pipa yang dilas diamati dengan: SEM. Transformasi fasa dan ukuran kristal dianalisis dengan XRD dan persamaan Sherrer. Hasil penelitian menunjukkan bahwa arus pengelasan dapat mengubah struktur mikro dan fasa dari pipa yang dilas menyebabkan perubahan laju korosi.
- b. Huang (2016) melakukan pengujian untuk mengetahui perilaku korosi pada S355JR/316L pada sambungan las yang berbeda oleh proses pengelasan multi pass dengan gas tungsten. Ditarik kesimpulan bahwa ketahanan korosi pada WM menurun dibandingkan dengan BM 316L.
- c. Liu (2016) melakukan penelitian untuk mengetahui pengaruh dari lapisan produk korosi yang dihasilkan pada baja paduan rendah kekuatan tinggi yang dilas oleh bawah air pengelasan basah dengan elektroda *stainless steel* di air laut. Hasilnya menunjukkan bahwa WZ bertindak sebagai katoda dan tidak ada korosi produk di atasnya selama periode perendaman dalam air laut. HAZ dan BM bertindak sebagai anoda. Laju korosi dari HAZ dan BM berubah dengan bertambahnya waktu perendaman. Pada periode perendaman awal, HAZ memiliki laju korosi

tertinggi karena memiliki struktur martensit temper kasar dan BM menunjukkan struktur mikro dengan butiran ferit dan perlit yang sangat halus. Setelah periode perendaman, BM memiliki laju korosi tertinggi. Alasannya adalah karena lapisan produk korosi pada HAZ padat dan memiliki sifat pelindung yang lebih baik sedangkan pada BM longgar dan tidak dapat menghambat difusi oksigen

- d. Liduino (2017) melakukan pengujian untuk mengetahui potensi korosi pada API 5L X65 yang terekspos dengan air laut secara langsung. Air laut yang digunakan berasal dari Guenabara Bay Brazil, diuji korosi menggunakan standard ASTM G1-03. Dan didapatkan hasil Baja karbon API X65 menunjukkan tren laju korosi yang cepat setelah terkena air laut yang diautoklaf. Fakta ini lebih berbahaya ketika mikroorganisme asli air laut bebas untuk menempel ke permukaan baja, mengintensifkan korosi pitting. Oleh karena itu, sangat disarankan untuk penggunaan pelapis antifouling untuk perlindungan struktur baja karbon yang terpapar terhadap lingkungan laut.
- e. Sun (2018) juga melakukan pengujian pada laju korosi terhadap pengelasan bawah air dengan *dry* dan *wet welded joints* material yang digunakan adalah *Stainless Steel S32101*. Didapatkan hasil logam las menunjukkan ketahanan yang lebih baik terhadap korosi lokal daripada zona yang terpengaruh panas. suhu tinggi zona yang terkena panas dari sambungan las yang disiapkan menggunakan pengelasan kering bawah air menunjukkan peningkatan kinerja dibandingkan dengan yang disiapkan menggunakan pengelasan basah bawah air di bawah masukan panas yang sama karena: berkurangnya presipitasi nitrida kaya kromium. Ketahanan terhadap korosi lokal pada suhu rendah zona yang terkena panas meningkat dengan meningkatnya masukan panas untuk sambungan las basah bawah air, sedangkan kebalikannya tren diamati untuk zona terpengaruh panas suhu rendah dari sambungan las kering bawah air.
- f. Jegdic (2018) melakukan pengujian untuk mengetahui resistensi korosi pada pengelasan sambungan X5CrNi18-10 Stainless Steel. Didapatkan

hasil dan kesimpulan bahwa ketahanan korosi lubang sambungan las (logam las dan zona yang terkena panas) lebih tinggi dengan adanya nitrogen dalam gas pelindung, sementara ketahanan korosi integral tetap tidak berubah. Dengan sebuah peningkatan tingkat arus pengelasan, ketahanan korosi pitting dan ketahanan terhadap korosi intergranular dari sambungan las berkurang. Kepadatan arus pasivasi terbukti menjadi indikator yang baik untuk korosi pitting ketahanan sambungan las. Nilai kekerasan logam las dan zona yang terkena panas sedikit lebih rendah dari nilai kekerasan logam dasar.

- g. Ouali (2018) melakukan pengujian untuk mengetahui resistensi korosi dari efek heat input pada sambungan las UNS 32101 *Lean Duplex Stainless Steel*. Didapatkan hasil tes polarisasi potensiodinamik dari sambungan las yang berbeda dievaluasi dalam larutan NaCl 3,5% menunjukkan ketahanan korosi yang tinggi dari logam las yang dihasilkan dengan *heat input* rendah.
- h. Sinhmar (2019) melakukan pengujian untuk mengetahui efek dari *weld thermal* terhadap metalografi dan perilaku korosi pada material AA2014 paduan aluminium. Didapatkan hasil, dari tiga jenis uji korosi yang berbeda dapat ditarik kesimpulan bahwa kecepatan putaran alat dan kecepatan pengelasan berbanding terbalik terhadap laju korosi. Sehingga apabila kecepatan putaran alat dan kecepatan pengelasan tinggi maka akan lebih rentan terhadap korosi. Zona bebas endapan tidak baik untuk sifat mekanik maupun untuk ketahanan korosi. Ini menghasilkan ketidakseragaman dalam struktur mikro yang merupakan faktor melemahnya sambungan las.
- i. Surojo (2020) meneliti tentang efek dari parameter pengelasan terhadap laju korosi pada SS400 low carbon steel, Surojo menggunakan parameter pengelasan berupa elektroda, arus dan kedalaman pengelasan. Dan didapatkan hasil dan kesimpulan bahwa, untuk parameter kedalaman sendiri, semakin dalam pengelasan, maka laju korosi akan semakin meningkat. Lalu untuk arus yang digunakan, surojo mendapatkan hasil bahwa arus yang lebih tinggi akan menghasilkan laju korosi yang lebih

tinggi pula. Terakhir yaitu elektroda yang digunakan, didapatkan hasil bahwa tiap elektroda akan menghasilkan laju korosi yang berbeda pula.

- j. Wang (2020) juga melakukan penelitian tentang pengaruh *heat input* terhadap mikrostruktur dan resistansi korosi pada pengelasan basah bawah air dengan material E40. Didapatkan hasil bahwa resistansi korosi pada *WELD METAL* (WM) menurun seiring dengan naiknya *heat input* dan ketika kecepatan pengelasan cenderung konstan.
- k. Giarola (2021) melakukan pengujian tentang perilaku korosi dari pengelasan *friction stir welding* yang diinduksi dengan hidrogen pada plat API 5L X70. Didapatkan hasil BM menunjukkan ketahanan korosi yang lebih baik daripada lasan wilayah, Eb dan Ecorr lebih positif. Struktur mikro dari feritik poligonal dan pita perlit terdegenerasi di BM tetap endapan karbonat pada permukaan baja. Daerah las memiliki wilayah yang kurang pasif daripada BM.
- l. Allou (2021) melakukan penelitian pengaruh perlakuan panas pasca las terhadap struktur mikro dan mekanik perilaku weld overlay inconel 182 pada substrat baja 4130 menggunakan proses SMAW. Dan didapatkan hasil dan kesimpulan bahwa potensi korosi (Ecorr), Rapat arus (Icorr) dan laju korosi meningkat secara signifikan setelah PWHT.

## 2.2 Baja

Pada dasarnya baja merupakan paduan dari besi dan karbon yang memiliki kandungan karbon maksimum 1,7%. Unsur lain yang ada dalam baja selain karbon umumnya kadarnya ditekan serendah mungkin. Sebagian berasal dari pengotoran bijih besi (contohnya belerang serta phosphor) yang umumnya kadarnya ditekan serendah mungkin. Sebagian lagi unsur yang dipergunakan di proses pembuatan besi/baja (contohnya silikon serta mangan). Selain itu, seringkali sejumlah unsur paduan sengaja ditambahkan ke dalam agar memperoleh sifat tertentu sehingga jenis baja akan memiliki banyak jenis. [Zakharov, 1962].

### 2.2.1. Klasifikasi Baja

Berdasarkan komposisinya, baja dapat dikelompokkan menjadi beberapa golongan, diantaranya:

- Baja karbon rendah (*Low Carbon Steel / Mild Steel*) yang mengandung karbon antara 0,1% - 0,3%. Baja karbon rendah sangat luas penggunaannya, yaitu menjadi baja konstruksi umum yang digunakan untuk baja profil rangka bangunan, baja tulangan beton, rangka kendaraan, mur-baut, pipa, pelat dan lain-lain. Strukturnya terdiri dari ferrit serta sedikit perlit yang mengakibatkan kekuatan baja ini relative rendah, lunak namun keuletannya tinggi, praktis pada bending serta pada machining. Baja ini tidak bisa dikeraskan (kecuali menggunakan pengerasan permukaan). terdapat juga baja yang mempunyai kadar karbon sangat rendah, yaitu kurang dari 0,15% menjadi baja ringan yang umumnya dipergunakan untuk besi lembaran, besi ton, besi ditrip serta lainnya. [Zakharov, 1962].
- Baja karbon menengah (*Medium Carbon Steel*) yang mempunyai kandungan karbon sebesar 0,30% - 0,70%. Baja ini terdiri dari ferrit dan perlit, tetapi dengan perlit yang cukup banyak. Dengan kandungan perlit yang cukup banyak, baja karbon ini lebih kuat dan keras serta dapat dikeraskan akan tetapi akan membuatnya lebih getas. Baja karbon jenis ini banyak digunakan untuk konstruksi mesin, seperti poros, poros engkol, batang torak, roda gigi, pegas dan lain-lain, yang lebih memerlukan kekuatan dan ketangguhan yang tinggi [Zakharov, 1962].
- Baja karbon tinggi (*High Carbon Steel*) yang mempunyai kadar karbon di atas 0,70%. Baja ini bersifat lebih kuat dan lebih keras, tetapi keuletan dan ketangguhannya rendah. Baja jenis ini digunakan untuk konstruksi mesin yang membutuhkan kekuatan dan ketangguhan yang tinggi dan untuk perkakas yang memerlukan sifat tahan aus, misalnya untuk gunting, mata bor, reamer dan perkakas yang lain [Zakharov, 1962].
- Baja campuran atau baja khusus (*alloy steel*) adalah baja yang sudah mengalami proses penambahan unsur-unsur paduan yang bertujuan untuk memperbaiki sifat kekerasan dan keuletan
- Baja tahan karat yang biasanya disebut *stainless steel*, bersifat memberikan perlawanan terhadap karat. Dan untuk menghasilkan baja

tahan karat, baja karbon ditambahi unsur paduan kromium sebesar 2%.

### 2.2.2. Baja ASTM A106

Dalam penelitian ini, material pipa yang digunakan adalah baja karbon rendah ASTM A106, adalah spesifikasi standar untuk pipa baja karbon untuk penggunaan suhu tinggi. Sebagian besar umumnya digunakan pada kilang dan pabrik ketika gas atau cairan yang diangkut pada suhu tinggi dan tekanan. Pipa A106 ASTM termasuk tiga kelas: ASTM A106 Grade A, ASTM A106 Grade B, ASTM A106 Grade C.

**Tabel 2. 1. Spesifikasi Material ASTM A106**

Pengujian Komposisi Kimia							
Komposisi (%)							
Fe	C	Si	Mn	Cr	Me	Ni	Al
96.1	0.307	0.199	0.82	0.0551	0.0077	<0.0050	<0.0030
Ce	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb	
<0.0050	2.42	0.0151	<0.0030	<0.0050	<0.0050	<0.0030	

(Sumber: Dokumen Pribadi)

### 2.2.3. Baja ASTM A36

ASTM A36 merupakan baja baja ringan yang digunakan dalam industri perkapalan. Spesifikasi dari baja ini telah ditetapkan oleh *American Society for testing and Material* (ASTM) dengan komposisi kimia seperti tabel berikut pada tabel 2.2:

**Tabel 2. 2. Spesifikasi Material ASTM A36**

Pengujian Komposisi Kimia							
Komposisi (%)							
Plate	C	Si	Mn	Cr	Me	P	S
	0.2	0.15	0.29	-	-	0.01	0.006

(Sumber: *Mill Test Certificate* Krakatau Posco)

## 2.3 Pengelasan

Menurut *American Welding Society* (AWS), proses pengelasan didefinisikan sebagai proses penyambungan antara dua bagian logam menjadi suatu bagian yang menyatu dan terikat. Proses penyambungan tersebut memerlukan suhu pengelasan tertentu baik dengan atau tanpa penekanan dan dengan atau tanpa logam pengisi (*filler metal*). Sedangkan berdasarkan *Deutsche Industrie Normen* (DIN), las didefinisikan sebagai ikatan metalurgi pada sambungan logam maupun logam paduan yang terjadi pada fase lumer atau cair.

### 2.3.1 Pengelasan Basah Bawah Air

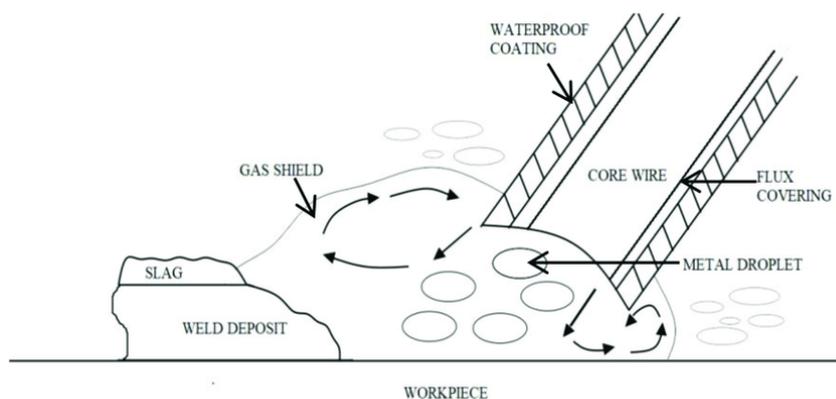
Pengelasan bawah air merupakan proses pengelasan yang dilakukan di dalam air sehingga prinsip dan prosedurnya berbeda dengan pengelasan biasa di ruang udara pada umumnya (ASM, 1993). Pengelasan bawah air umumnya dapat dibagi menjadi dua metode yakni metode pengelasan basah dan pengelasan kering. Pada metode pengelasan basah, pengelasan dilakukan dalam keadaan basah dalam artian elektroda, busur las, dan logam induk bersentuhan secara langsung dengan air. Proses pengelasan yang sering digunakan pada metode ini adalah pengelasan SMAW, FCAW, dan MIG. Peranan yang dimiliki oleh pengelasan bawah air cukup penting khususnya dalam proses perbaikan struktur bawah laut yang mengalami kerusakan akibat insiden, tabrakan, *dropped object*, kesalahan desain, kesalahan instalasi, adanya retakan pada sambungan, maupun untuk proses pemasangan anoda.

### 2.3.2 Shielded Metal Arc Welding (SMAW)

Pengelasan SMAW merupakan pengelasan busur listrik pada proses pengelasan yang menggunakan arus listrik sebagai sumber panas untuk melelehkan material dasar (*base metal*) dan bahan pengisi (*Filler Metal*). Panas tersebut dihasilkan oleh hubungan pendek yang timbul diantara katoda dan anoda (ujung elektroda dan permukaan baja yang akan dilas). Sumber tegangan listrik yang digunakan pada pengelasan SMAW biasanya menggunakan tegangan AC (alternating current) / arus bolak balik dan DC (Direct Current) / arus searah. Untuk

proses pengelasan dalam air untuk teknik SMAW menggunakan arus DC.

Mesin Las dengan arus DC terdapat dua cara dalam penggunaannya yaitu polaritas lurus dan polaritas terbalik. Mesin las DC polaritas lurus (DC) digunakan pada material yang memiliki titik leleh yang tinggi, untuk prosesnya elektroda diletakan pada kutup negatif sedangkan material dasar pada kutup positif, sedangkan pada untuk penggunaan DC polaritas terbalik penggunaannya pada material yang memiliki titik leleh yang lebih rendah, dengan prosesnya terbalik dari DC polaritas Lurus. Besarnya arus listrik untuk pengelasan bergantung pada ukuran diameter dan macam-macam elektroda las. Sebagai penunjang pengelasan teknik pengelasan dalam air, pada umumnya menggunakan pengelasan dengan elektroda terbungkus atau sering juga disebut pengelasan *shielded Metal Arc Welding* (SMAW), pengelasan SMAW merupakan penyambungan antara logam dengan menggunakan panas yang ditimbulkan dari aliran listrik, Pengelasan SMAW memiliki banyak kelebihan salah satunya karena dapat digunakan pada semua posisi pengelasan sehingga mendukung dalam pengerjaan pengelasan dalam air. Mekanisme pengelasan SMAW pada pengelasan dalam air dapat dilihat dari pada Gambar 2.1, dimana busur las yang meleleh akibat panas dari arus listrik akan membentuk terak dan area las, dampak dari panas yang muncul akan menimbulkan gelembung gas yang terjadi akibat reaksi dari  $H_2O$ .



**Gambar 2. 1. Diagram skema pengelasan basah bawah air dengan elektroda terbungkus (Surojo, Eko et al, 2021)**

### 2.3.3 Heat Input

Proses untuk mencairkannya *base metal* dan *filler* diperlukan energi panas yang memadai. Saat pengelasan dengan busur listrik, sumber energi utama adalah energi listrik yang diubah menjadi energi panas. Secara umum, masukan panas adalah laju energi listrik dan kecepatan pengelasan yang diserap dari busur las ke elektroda. Masukan panas dapat dirumuskan dari ketiga parameter tersebut menggunakan persamaan berikut:

$$H = \eta \cdot E \cdot I \cdot V \quad (2.1)$$

Dimana :

H = heat input (J/mm)

$\eta$  = efisiensi pengelasan (%)

E = tegangan (volt)

I = arus (Ampere)

V = kecepatan pengelasan (mm/detik)

Adanya heat input mempengaruhi daerah sekitar las, membentuk daerah yang terdiri dari daerah leleh, daerah leleh sebagian (PMZ), dan daerah HAZ. Daerah ini dipengaruhi oleh kepadatan atau ketebalan lasan. Pengelasan bahan logam. Secara umum kualitas hasil las dipengaruhi oleh energi panas yang diserap oleh logam las, yang mempengaruhi struktur mikro dari logam yang akan dilas pada heat-affected zone (HAZ), sehingga menyebabkan perubahan kualitas secara langsung.

### 2.3.4 Elektroda

Elektroda las merupakan bahan pengisi yang dilebur untuk mengisi celah pada sambungan las. Jenis elektroda tergantung pada bahan yang akan dilas dan proses pengelasan yang akan dilakukan.

Ada elektroda yang berbeda untuk setiap jenis las, maka ada beberapa faktor yang perlu dipertimbangkan saat pemilihan elektroda

- harus diketahui jenis logam yang akan dilas

- tebal dan bentuk logam yang akan dilas
- bentuk sambungan
- posisi pengelasan
- spesifikasi teknis yang diharapkan

Saat pengelasan di air hidrogen, laju pendinginan dan posisi pengelasan merupakan masalah yang mempengaruhi hasil pengelasan dan terjadinya cacat pada hasil pengelasan berdasarkan kriteria pemilihan filler metal dengan flux high titanium dan flux low hydrogen dapat menjadi pilihan Tabel 2.3 menunjukkan karakteristik elektroda yang digunakan dalam tugas ini menurut AWS A5.1 / A5.1M: 2012.

**Tabel 2.3. Klasifikasi Elektroda (AWS A5.1 / A5.1M: 2012.)**

AWS Classification				
A5.1	A5.1M	Type of Covering	Welding Position	Type of Current <sup>b</sup>
E6013	E4313	Hight titania potassium	F, V, OH, H	AC, DCep or DCen
E7018	E4918	Low-hydrogen potassium, iron powder	F, V, OH, H	AC or DCep

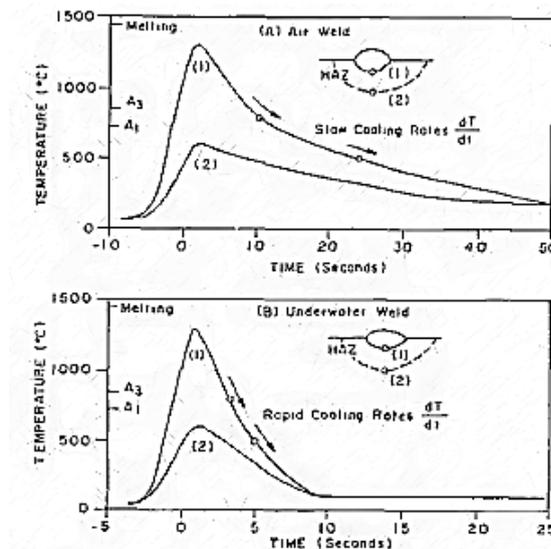
### 2.3.5 Siklus Thermal Pengelasan

Lamanya laju pendinginan pada daerah las siklus thermal las sangat berpengaruh terhadap baik buruknya hasil sambungan las. Untuk alasan ini, ada pendekatan untuk menentukan waktu pendinginan. Secara umum, struktur mikro dan sifat mekanik sangat tergantung pada laju pendinginan dari temperatur 800 ° C hingga 500 ° C. Sedangkan Cold cracking dimana hidrogen memegang peranan penting, sangat bergantung pada lamanya proses pendinginan antara temperatur antara temperature 800° sampai 300°C atau 100°C.

Pengaruh laju pendinginan pada hasil pengelasan dalam air menyebabkan perubahan sifat logam las sebagai akibat dari laju pendinginan yang cepat. Laju pendinginan sangat bergantung pada proses pengelasan yang digunakan, karena berkaitan dengan heat input dan desain sambungan las. Pada umumnya struktur yang terbentuk dari baja bergantung pada laju pendinginan dari temperatur

pengelasan, sehingga juga mempengaruhi dan merubah sifat mekanik yang dimiliki.

Laju pendinginan yang cepat dapat menyebabkan pembentukan komponen seperti martensit dan bainit saat mengelas baja konvensional. Komponen-komponen ini mempunyai kekuatan yang tinggi, rapuh, dan rentan terhadap hydrogen crack (Omajene, J., et al., 2014). Pendinginan yang terjadi pada pengelasan udara akan berbeda dengan pengelasan dalam air. Pengelasan dalam air mengubah sifat material di area las mekanis karena laju pendinginan meningkat tergantung pada jarak area las dan sumber panas pengelasan, yang mempengaruhi bentuk dan mengubah struktur mikro. Gambar 2.2 menunjukkan perbandingan laju pendinginan yang terjadi saat pengelasan di bawah air dan saat pengelasan di luar ruangan.



**Gambar 2. 2. Perbandingan laju pendinginan pengelasan udara dan dalam air**

Laju pendinginan yang terjadi pada pengelasan dalam air 10 sampai 15 kali lebih cepat dari pada pengelasan udara, menyebabkan transformasi non-ekuilibrium dari produk campuran seperti struktur bainit dan martensit atau struktur Widmanstätten. Akibatnya, struktur HAZ cenderung berubah saat dilas dalam air, dibandingkan dengan pengelasan udara yang lebih seragam. Karena lebar HAZ pengelasan lapangan 20% hingga 50% lebih lebar dari lebar HAZ pengelasan bawah air, HAZ bahan baja karbon dan logam las menghasilkan struktur getas kekerasan rendah. Struktur tersebut sensitif terhadap retak dingin (HICC) dan cacat

las terjadi ketika lasan terbentuk dalam struktur yang rentan terhadap retak. Selain itu, laju pendinginan yang lebih cepat membuat logam las lebih keras daripada las luar. Ini menyebabkan porositas yang buruk. Berbagai teknik digunakan untuk mengatasi masalah tersebut. Metode pengelasan input panas tinggi, menurunkan laju pendinginan dan menurunkan kecepatan busur. Hal ini dimaksudkan untuk memperlambat laju pendinginan daerah HAZ saat mengelas di bawah air, sehingga menghasilkan hasil las dengan sifat mekanik yang sangat baik.

## 2.4 Korosi

Korosi didefinisikan sebagai kerusakan suatu material karena reaksinya terhadap lingkungan. Beberapa berpendapat bahwa definisi ini terbatas pada logam. Namun, insinyur korosi sering perlu mempertimbangkan logam dan non-logam, termasuk keramik, plastik, karet, dan non-logam lainnya. [Fontana, 1986]

Korosi berasal dari kata latin “corrosion” yang berarti karat. Untuk lebih memahami pengertian korosi itu sendiri, berikut beberapa pengertian korosi :

1. Korosi merupakan serangan yang bersifat menghambat pada suatu logam oleh reaksi kimia atau elektrokimia dengan lingkungannya. kata karat dipergunakan untuk korosi besi atau campuran besi (ferrous alloy) dengan pembentukan produksi korosi berupa oksida besi.
2. Korosi adalah penurunan kualitas logam akibat reaksi elektrokimia dengan menggunakan lingkungan. Istilah karat adalah istilah yang digunakan khusus untuk korosi besi. Korosi adalah kerusakan atau kerusakan suatu material karena interaksinya dengan lingkungan. Istilah karat hanya digunakan untuk korosi logam.

Dari definisi di atas, maka dapat disimpulkan, korosi adalah suatu reaksi kimia atau elektrokimia antara logam dengan lingkungannya, yang dapat mengakibatkan penurunan sifat atau mutu dari logam.

### 2.4.1 Dasar Terjadinya Korosi

Berdasarkan mekanisme proses terjadinya, korosi dapat dibedakan atas:

1. Korosi sebagai Reaksi Kimia

Korosi secara kimia adalah korosi yang terjadi dengan reaksi kimia murni. Pada proses ini terjadinya korosi tanpa ikut sertanya electron. Reaksinya dapat digambarkan pada reaksi besi yang dicelup ke dalam

asam klorida (HCl) dengan reaksi:



## 2. Korosi sebagai Reaksi Elektrokimia

Reaksi elektrokimia dapat digunakan untuk menerangkan mekanisme terjadinya korosi. Reaksi elektrokimia dapat digambarkan pada reaksi besi yang dicelupkan dalam asam klorida (HCl). Pada proses besi dalam HCl, reaksinya berlangsung dengan cepat, gas hydrogen dilepas dan besi akan larut membentuk FeCl<sub>2</sub>, dengan reaksi:



Dengan memperhatikan bahwa ion Cl<sup>-</sup> tidak terlibat dalam reaksi, maka persamaan tersebut dapat disederhanakan menjadi:

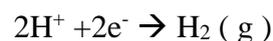


Pada persamaan di atas, besi bereaksi dengan ion hidrogen dalam larutan asam membentuk ion Fe<sup>2+</sup> dan gas hidrogen. Dapat dimengerti bahwa selama reaksi, Fe teroksidasi menjadi ion Fe<sup>2+</sup> dan ion hidrogen tereduksi menjadi H<sub>2</sub>.

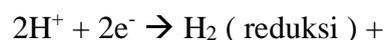
Reaksi oksidasi besi bersifat anodik (anoda)



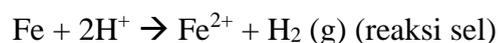
Sedangkan reduksi ion hidrogen bersifat katodik (katoda)



Reaksi oksidasi atau reaksi anodik ditandai dengan kenaikan valensi atau produksi electron dari 0 menjadi 2, sedangkan ion hidrogen akan direduksi menjadi gas hidrogen. Penulisan reaksi yang lengkap dapat dijelaskan dengan menggunakan persamaan reaksi oksidasi dan reaksi reduksi seperti di bawah ini :



-----



Kedua reaksi tersebut melibatkan muatan listrik pada daerah anodik

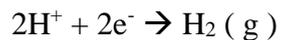
dan katodik. Reaksi ini dapat berlangsung bila elektron mengalir dari anodik ke katodik melalui suatu elektrolit dan aliran electron hanya dapat terjadi bila ada perbedaan tegangan antara anodik dan katodik. Ini berarti bahwa suatu logam akan terkorosi bila pada permukaan logam terdapat daerah yang bersifat anodik dan katodik.

Reaksi anodik pada peristiwa korosi secara umum digambarkan sebagai:

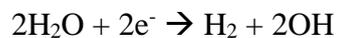


Sedangkan untuk reaksi katodik yang mungkin selama proses korosi logam adalah: [Widharto, 1987]

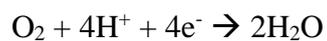
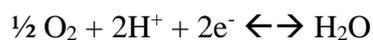
1. Evolusi Hidrogen:



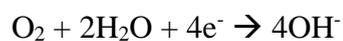
2. Reduksi Air:



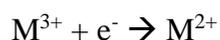
3. Reduksi Oksigen (lingkungan asam):



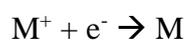
4. Reduksi Oksigen ( lingkungan netral atau basa ):



5. Reduksi Ion Logam

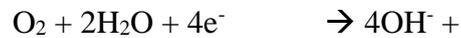


6. Pengendapan Logam:



Bila permukaan Fe kontak dengan air maka akan terjadi reaksi anodik

sebagai berikut:



Dan produk akhir yaitu  $2\text{Fe}(\text{OH})_2$  yang diperoleh adalah karat. Jadi selama logam terkorosi, laju oksidasi sama dengan laju reduksi.

#### 2.4.2 Faktor Penyebab Korosi

Ada dua aspek penting yang mempengaruhi proses korosi: logam dan lingkungannya. Korelasi antara logam dan lingkungannya sangat relatif. Beberapa logam bersifat korosif di lingkungan, sementara yang lain tidak korosif di lingkungan. Misalnya, jika baja tahan karat sangat korosif terhadap elektrolit asam klorida pekat, korelasi antara logam dan lingkungannya cukup (83% asam klorida), tetapi pada konsentrasi yang sama, baja karbon tidak korosif. [Widharto, 1987].

Lingkungan adalah salah satu media yang berada pada sekeliling atau sekitar bahan logam. Adapun faktor yang mempengaruhi korosi dari lingkungan ini adalah:

- a. Adanya Oksigen terlarut atau bahan oksidator lain dapat mempengaruhi laju korosi yang terjadi.



Dalam hubungannya dengan aktif-pasif metal apabila *oxidizer* ditambah akan berakibat pada bertambahnya laju korosi, pada tingkat tertentu nilai laju korosi akan konstan dan apabila diadakan penambahan *oxidizer* lagi maka akan berakibat pada meningkatnya laju korosi secara dramatik.

- b. Kecepatan Media

Seperti pada penambahan *oxidizer* pengaruh kecepatan media

terhadap laju korosi tergantung pada karakteristik logam dan lingkungan dimana benda tersebut berada. Ada tiga jenis karakteristik logam dalam hubungannya dengan kecepatan media yaitu:

- Jenis A: Proses korosi dikontrol oleh difusi katodik sehingga kecepatan media berpengaruh pada laju korosi.
- Jenis B: Proses korosi dikontrol oleh aktivasi polarisasi dan kecepatan media tidak berpengaruh terhadap laju korosi.
- Jenis C: Beberapa logam mempunyai ketahanan korosi di dalam media tertentu, apabila agitasi diberikan pada larutan media, maka akan terjadi perilaku hubungan kecepatan dengan laju korosi.

c. Garam Terlarut

Tingkat garam terlarut di lingkungan sangat mempengaruhi laju korosi, dan semakin tinggi kandungan garam, semakin tinggi laju korosi, tetapi didasarkan pada teori pasivasi, yang menimbulkan korosi pada kadar garam tertentu, yaitu, pada salinitas tinggi Ini akan melambat. Kondisi ini disebut kondisi pasif, sehingga larutan garam tidak hanya berperan sebagai katalis tetapi juga sebagai inhibitor.

d. Konsentrasi Gas

Selain garam terlarut, kondisi udara juga berpengaruh signifikan terhadap proses korosi. Fasa gas adalah karena adalah zat yang mudah bereaksi dengan senyawa. Dengan menganalisis kandungan gas yang ada, gas yang sangat berpengaruh harus sekecil mungkin. Jenis gas yang berpengaruh signifikan terhadap proses korosi adalah CO<sub>2</sub>, , dan O<sub>2</sub>. Selain , ada jenis gas lain yang bertindak, seperti NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S, Cl<sub>2</sub>, , H<sub>2</sub>. gas adalah katalis untuk proses korosi.

### 2.4.3 Jenis Jenis Korosi

1. Korosi seragam, atau korosi yang biasa disebut dengan korosi homogen, adalah jenis korosi yang terjadi secara merata pada semua permukaan material yang terpapar.

2. Korosi galvanik, atau korosi yang biasa disebut dengan galvanic coupling, adalah korosi yang diakibatkan oleh kontak dua jenis logam dengan nilai potensial yang berbeda. Logam dengan potensial elektroda kecil berfungsi sebagai anoda dan korosi.
3. Korosi celah, atau korosi yang biasa disebut dengan Crevice corrosion, adalah korosi yang terjadi pada celah-celah kecil pada logam. Korosi jenis ini terjadi dalam skala kecil dan umumnya disebabkan oleh larutan yang terperangkap dalam lubang, gasket, sambungan pangkuan, atau baut.
4. Korosi intergranular atau biasa disebut intergranular corrosion adalah korosi yang terjadi pada batas butir, dimana pengotor pada material menumpuk.
5. Korosi sumuran, atau korosi yang biasa disebut dengan korosi pitting, adalah korosi yang terjadi pada logam karena adanya konsentrasi ion Cl<sup>-</sup> yang tinggi. Jenis korosi ini menyebabkan lubang halus pada logam.
6. Korosi erosi, atau disebut erosion corrosion, adalah korosi yang disebabkan oleh pergerakan relatif cairan korosif pada permukaan logam.
7. Korosi kavitasi, juga dikenal sebagai cavitation corrosion, adalah bentuk khusus dari korosi erosi yang dihasilkan dari pembentukan gelembung uap pada permukaan logam. Jenis korosi ini biasa terjadi pada turbin hidrolik, baling-baling dan pompa di mana kecepatan aliran dan tekanan fluida dihasilkan.
8. Korosi fretting, atau korosi yang biasa disebut dengan fretting corrosion, adalah jenis korosi yang terjadi pada bahan yang saling bersentuhan akibat getaran dan beban geser. Fretting adalah lubang atau alur pada logam yang menyebabkan korosi pada daerah sekitarnya.
9. Korosi biologis atau yang biasa disebut dengan biological corrosion adalah korosi yang disebabkan oleh aktivitas mikroba dan metabolitnya. Mikroorganisme ini umumnya terdiri dari bakteri aerob, bakteri anaerob, dan beberapa jenis jamur.
10. Stress Corrosion Cracking atau yang biasa disebut dengan korosi retak

tegangan adalah korosi yang disebabkan oleh adanya retakan secara simultan akibat tegangan tarik dan media korosif.

11. Korosi Retak Lelah, atau biasa disebut *fatigue corrosion cracking* yakni korosi yang terjadi pada material yang terdapat retak akibat pembebanan siklis yang dapat menyebabkan terjadinya kepatahan atau kepecahan pada material.

#### 2.4.4 Korosi Pada Pengelasan

Komponen yang berasal dari sambungan biasanya dapat berbentuk logam homogen atau struktur dan komposisi yang heterogen. logam dan non-logam, atau semua non-logam, tetapi disini kita akan meninjau sambungan dengan pengelasan pada logam. Dimana pada tahapan tertentu asal suatu fabrikasi manufaktur didominasi oleh proses penyambungan.

Pengujian makrografik berasal dari sambungan pengelasan menghasilkan dua zona secara kentara, yaitu zona fusi yang menggunakan areanya mahkota las yang dekat pada sekitarnya serta zona logam induk. Lebih jelasnya dapat perbedaan pada komposisi kimia terjadi dampak pembakaran elemen-elemen paduan secara tidak sengaja atau disengaja. ciri lainnya dari pengelasan ialah:

- Membentuk suatu tegangan residual yang mana terjadi sesudah pengelasan selesai serta di daerah sekitar pengelasan, yang mana tegangan tersebut dapat mencapai ke *yield point*.
- Pada masalah pengelasan fusi, permukaan lapisan logam keadaannya kasar yang dapat mengakibatkan tegangan semakin tinggi dan menjadi kawasan kondensasi (lembab).
- Wilayah sambungan ditutupi oleh kerak oksida serta memungkinkan lapisan tersebut secara kimia menjadi reaktif terutama jika keadaan lembab.
- Lapisan pelindung pada logam yang akan dilas akan terbakar habis, akibatnya mahkota las serta logam induk menjadi tidak terlindungi.

[Sherir, Jarman&Burstein, 1994]

Jika pada saat proses fabrikasi dilakukan pada logam, tidak mungkin menghasilkan las yang bebas retak. Hasil las adalah kombinasi dari sifat-sifat

logam dasar, bahan pengisi (jika digunakan), dan faktor-faktor lain, daripada sifat-sifat bahan spesifik . Karena struktur material, yang biasanya memiliki lasan yang tidak lengkap, mungkin ada cacat las di mahkota las atau area HAZ ( zona yang terkena panas). Ini dapat membahayakan sifat mekanik dan juga dapat menyebabkan masalah korosi pada lasan seperti seperti korosi sumuran pada slag inclusion yang dangkal pada hasil las dan korosi celah (crevice) pada cacat porosity atau retak (crack).

Korosi celah pada butt joint disebabkan oleh penetrasi yang buruk. Di sisi lain, jika mahkota las menonjol dari las pipa bagian dalam, turbulensi yang dihasilkan dapat menyebabkan korosi atau erosi. Terjadinya korosi celah lain yang dapat terjadi dari jarak butt joint yang tidak tepat.

Dalam kondisi tertentu, fusion line crack di area toe weld metal, yang disebut knifeline attack , dapat menimbulkan korosi pada hasil las. Hal ini dapat terjadi pada pengelasan baja stabil setelah mengalami asam kuat nitric yang panas. Dengan membatasi kandungan karbon dari logam hingga maksimum 0,6%, terjadinya knifeline attack dapat diminimalkan. [sherir, Jarman& Burstein, 1994]

Untuk kondisi HAZ untuk *knifeline attack* akibat panas selama pengelasan dan lamanya waktu pada temperatur tersebut dapat secara kritis menyebabkan serangan pada kekerasan logam. Tetapi faktor ini berbeda dari satu juru las ke juru las lainnya.

Dalam kasus retakan korosi lelah, dianggap berbahaya karena merupakan fenomena yang tersembunyi. Peningkatan tegangan sisa akibat pengelasan sering mencapai titik leleh dan dapat diperburuk oleh kontaminasi klorida lingkungan, yang dapat menyebabkan transgranular. Cara terbaik untuk mengatasi masalah ini adalah dengan menganihil tegangan sisa dan menambahkan molibdenum ke logam.

#### **2.4.5 Persamaan Laju Korosi**

Laju korosi adalah terjadinya proses korosi yang terjadi pada material . Pada beberapa pengujian korosi, sebagian besar yang dilakukan adalah laju korosi. Hal ini karena laju korosi erat kaitannya dengan nilai ekonomis dan teknis material. Laju korosi merupakan parameter yang digunakan untuk mengukur ketahanan terhadap korosi pada material sehingga nantinya dapat diperkirakan kapan

material tersebut dinyatakan layak dan kapan dinyatakan tidak layak. Satuan yang digunakan adalah mpy (mm/year).

Ketahanan terhadap korosi umumnya memiliki nilai laju korosi antara 1 – 200 mpy. Dapat dilihat pada tabel di bawah yang menggolongkan tingkat ketahanan material berdasarkan laju korosinya [Fontana, 1987].

**Tabel 2. 4. Tingkat Ketahanan Korosi Berdasarkan Laju Korosi (Fontana, 1989)**

Relative corrosion resistance	Approximate Metric Equivalent				
	m/year	mm/year	$\mu\text{m}/\text{year}$	nm/year	pm
Outstanding	< 1	< 0.02	< 25	< 2	<1
Excellent	1 - 5	0.02 - 0.1	25 - 100	2 - 10	1 - 5
Good	5 -20	0.1 - 0.5	100 -500	10 - 50	5 - 20
Fair	20 - 50	0.5 - 1	500 - 1000	50 - 100	20 - 50
Poor	50 - 200	1 - 5	1000 - 5000	100 - 500	50 - 200
Unacceptable	200 +	5 +	5000 +	500 +	200 +

Menghitung laju korosi pada umumnya menggunakan 2 cara yaitu:

1. Metode Polarisasi Linear
2. Metode *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS)

Pada tabel 2.3 menjelaskan tentang tingkat ketahanan suatu material berdasarkan laju korosinya. Adapun tingkat yang baik yaitu antara 0.1 mm/year – 0.5mm/year.

#### 2.4.6 Metode Elektrokimia

Metode elektrokimia adalah metode pengukuran laju korosi dengan

mengukur beda potensial benda terhadap laju korosi yang terjadi. Metode ini hanya mengukur laju korosi, sehingga memperkirakan laju korosi dalam jangka waktu yang lama (hasilnya dapat bervariasi, tetapi merupakan perkiraan). Kelemahan dari metode ini adalah tidak dapat secara akurat menggambarkan laju korosi yang terjadi, karena hanya dapat mengukur laju korosi pada titik waktu tertentu. Oleh karena itu, masa pakai dan kondisi pemrosesan tidak diketahui. Keuntungan dari metode ini adalah laju korosi dapat langsung diukur pada saat pengukuran, sehingga waktu pengukuran menjadi singkat.

Metode elektrokimia ini menggunakan rumus yang didasari pada Hukum Faraday (ASTM G1-90 vol 3.2 2002) yaitu menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\text{Laju Korosi} = k \frac{ai}{nD}$$

dimana :

Laju korosi dengan satuan mm/year atau mmpy

a = berat atom logam yang terkorosi (gram / mol)

i = ikor = kerapatan arus ( $\mu\text{A} / \text{cm}^2$ )

k = konstanta (0.129 untuk satuan mpy dan 0.00327 untuk satuan mmpy)

n = jumlah elektron yang dilepas pada logam terkorosi

D = massa jenis logam terkorosi (gram /  $\text{cm}^3$ )

#### 2.4.7 Teori Sel Tiga Elektroda

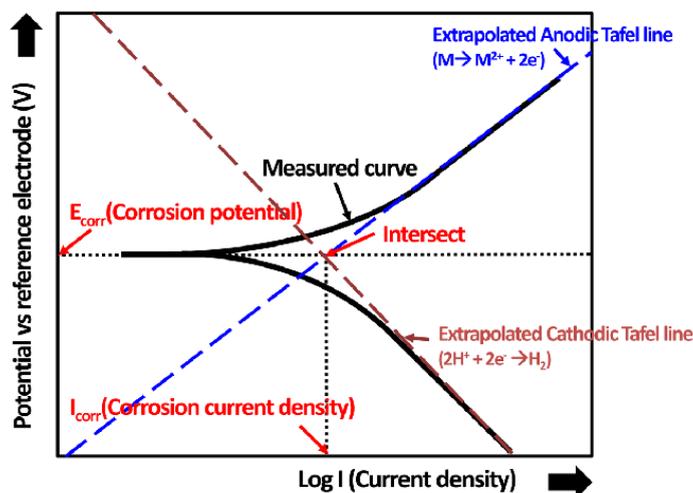
Sel tiga elektroda merupakan perangkat laboratorium baku yang berfungsi untuk melakukan pengujian korosi pada suatu material berdasarkan metode elektrolisis.

Konfigurasi sel tiga elektroda tersebut terdiri dari beberapa komponen sebagai berikut :

- a. Elektroda kerja (*working electrode*), yakni elektroda yang diteliti atau benda uji (anoda) yang dicelupkan pada fluida kerja.
- b. Elektroda bantu (*auxiliary electrode*), yakni elektroda yang berfungsi untuk memberikan potensial pada elektroda kerja serta untuk mengangkut arus listrik yang timbul akibat reaksi kimia.

- c. Elektroda acuan (*reference electrode*), yakni elektroda yang berfungsi sebagai pembanding potensial yang diberikan pada elektroda kerja serta potensial yang diberikan pada elektroda bantu. Arus yang mengalir pada elektroda acuan ini diusahakan sekecil mungkin sehingga dapat diabaikan.
- d. Larutan Elektrolit (*electrolyte solution*), berfungsi sebagai penghantar arus ionik dalam reaksi korosi. Oleh karena itu, persiapan larutan elektrolit harus dilakukan dengan cermat. Volume larutan elektrolit yang dibutuhkan adalah sebanyak 1 liter.

Pengujian laju korosi sel tiga elektroda adalah uji laju korosi yang dipercepat dengan potensial korosi dan polarisasi. Dari percobaan ini, kita dapat memperoleh data tentang arus masing-masing tegangan. Data tersebut digunakan untuk menentukan nilai  $I_o$  sama dengan  $I_{corr}$



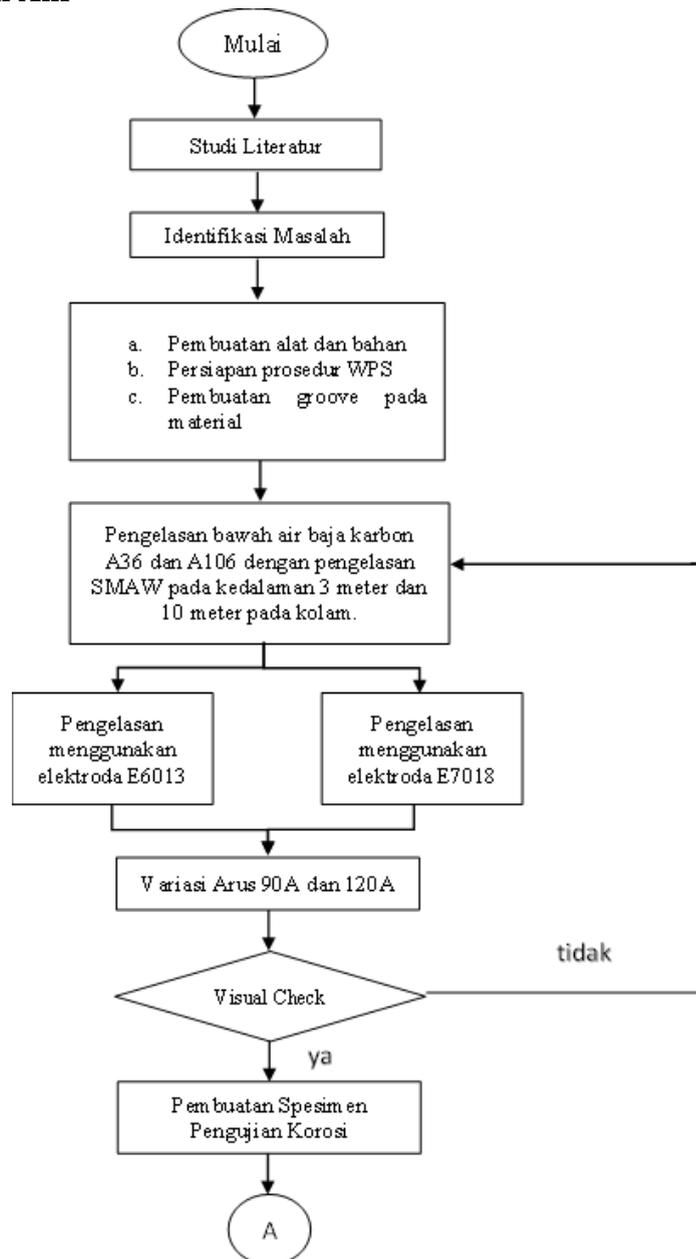
Gambar 2.3. Contoh diagram tafel yang diidealkan (Lee, Dasol et al, 2016)

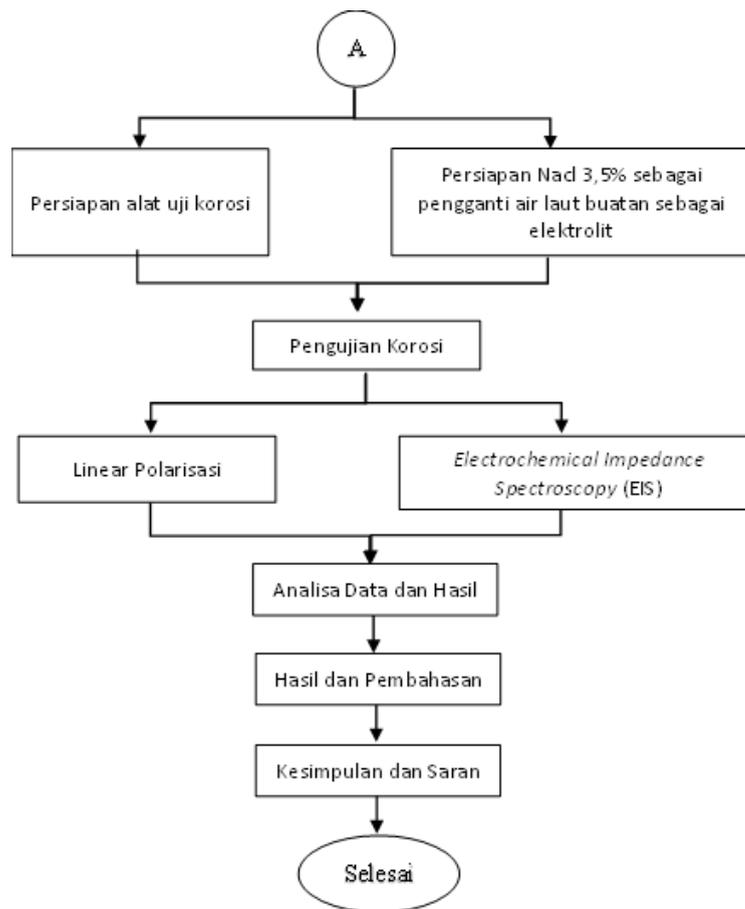
## BAB 3

### METODOLOGI

Metodologi penelitian yang berkaitan dengan tesis ini dapat diuraikan secara singkat sebagai berikut :

#### 3.1 Diagram Alir





**Gambar 3. 1. Diagram Alir Penelitian**

## 3.2 Penjelasan Diagram Alir

### 3.2.1 Studi Literatur

Sebelum melakukan penelitian tesis ini dilakukan studi literatur dan mencari referensi yang terkait dengan penelitian ini. Literatur dan referensi tersebut yang akan menunjang pembahasan mengenai rumusan masalah, dasar teori dan lingkup dari penelitian

### 3.2.2 Identifikasi Masalah

Pengelasan bawah air umum dilakukan pada industri *offshore*, kelebihan pada pengelasan bawah air salah satunya relatif mudah untuk dilakukan, namun memang hasil dari pengelasan ini belum sempurna seperti pengelasan yang dilakukan di atas tanah. Laju pendinginan yang cukup

cepat dibandingkan pengelasan di udara adalah salah satu contoh perbedaan antara pengelasan bawah air dan pengelasan di udara, dimana kondisi pengelasan bawah air yang memang kurang ideal. Kendala lainnya adalah saat proses yang mengacu pada AWS D3.6:1999 *Specification for underwater welding*, dimana *porosity* yang lebih banyak dan *ductility* yang lebih rendah. Sehingga pengelasan dalam air dilakukan hanya untuk kebutuhan yang sifatnya sementara.

### 3.2.3 Persiapan Penelitian

Dalam melakukan penelitian ini adapaun yang harus dilakukan adalah antara lain :

1. proses persiapan material dan peralatan
2. proses pengelasan material
3. proses pembuatan specimen uji
4. proses pengujian
5. analisa dan kesimpulan

### 3.2.4 Persiapan material

#### a. Material

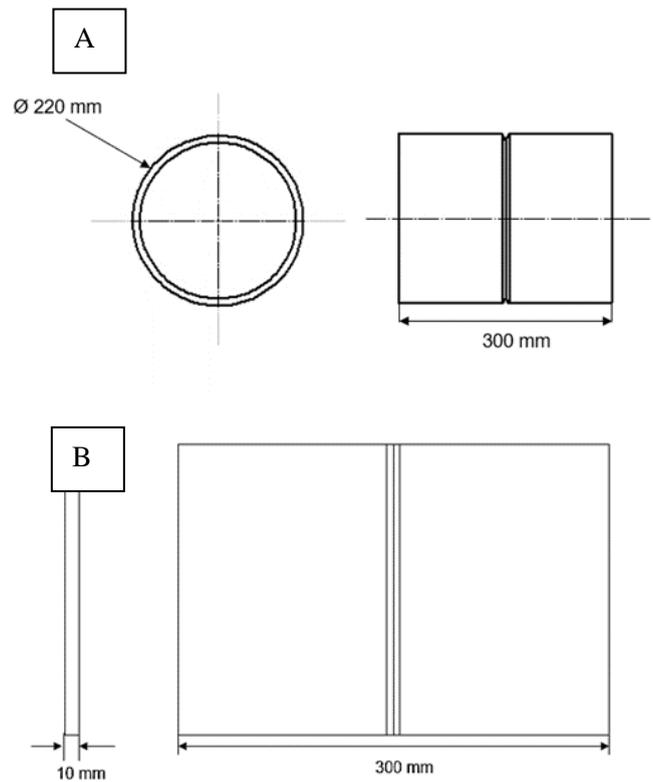
Dalam thesis ini, material yang akan digunakan pada penelitian ini adalah baja ASTM A106 dan A36 dengan kandungan karbon dan bentuk dimensi yang berbeda.

**Tabel 3.1. Komposisi Kimia Baja Karbon dan Elektroda**

Material ASTM	Komposisi Kimia (%)									Equevalen Karbon	Kriteria
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Fe		
Baja A106	0.307	0.199	0.82	0.0551	0.199	0.0551	<0.0050	2.42	96.1	0.65	Poor
Baja A36	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Fe		
	0.105	0.0158	0.82	0.0128	0.0149	0.0035	0.0073	0.0184	98.8	0.25	Good
Elektroda AWS	Komposisi Kimia (%)									Equevalen Karbon	Kriteria
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Fe		
E6013	0.06	0.3	0.37	0.012	0.01	-	-	-	-	0.17	Good
E7018	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Fe		
	0.07	0.59	0.97	0.013	0.007	-	-	-	-	0.33	Good

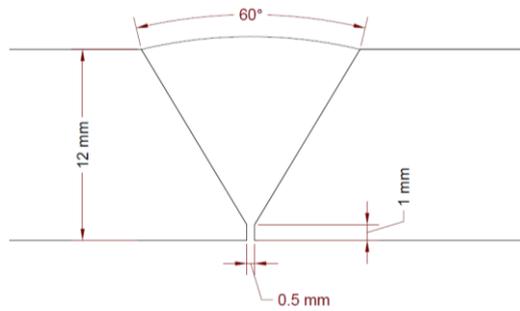
**b. Desain Pengelasan**

Desain pengelasan dalam air dibuat menggunakan Pipa baja karbon A106 dan Plat A36 dengan desain sebagai berikut :



**Gambar 3. 2. Dimensi spesimen (A) Pipa A106 dan (B) Plat A36**

Pembuatan kampuh pengelasan dengan menggunakan mesin bubut dan mesin skrap untuk mendapatkan hasil yang seragam dan sesuai dengan bentuk kampuh V sebesar 60°.



**Gambar 3. 3. Kampuh V pengelasan**

Proses pembuatan kampuh v menggunakan mesin bubut yang dilakukan di bengkel las bubut yang berada di jalan semolowaru, surabaya ditunjukkan pada gambar 3.4, menunjukkan proses dari hasil pemesinan. Dan gambar 3.5 adalah hasil proses pemesinan pembuatan kampuh v pada pipa dan plat.



**Gambar 3. 4. Proses pembuatan kampuh V**



**Gambar 3. 5. Hasil pembuatan kampuh V pada (A) pipa A106 dan (B) Plat A36**

c. Elektroda

Elektroda yang digunakan adalah elektroda E6013 dan E7018. Untuk pemilihan elektroda, digunakan elektroda E6013 sebagai filler metal pengelasan dama air karena memiliki fungsi untuk industry konstruksi, perbaikan dan perawatan, juga dapat digunakan pada arus rendah serta tinggi dan memiliki hasil *beads* pengelasan yang baik. Untuk pengelasan dengan segala posisi yang mengacu pada AWS 5.1, sedangkan untuk elektroda dengan kode E7018 dipilih karna elektroda tipe ini memiliki flux dengan bahan hydrogen yang rendah (kurang dari 0.5 %), dan dapat digunakan pada amper yang tinggi dan cocok untuk pengelasan pipa dan bejana tekan mengacu pada AWS 5.1 sehingga nantinya dapat menghindari cacat yang timbul akibat hidrogen. Spesifikasi dari elektroda tersebut sebagai berikut:

**Tabel 3. 2. Jenis elektroda yang akan digunakan**

<b>Elektroda (Filler Metal)</b>	<b>Diameter</b>	<b>Proses</b>
E7018	4 mm	SMAW
E6013	4 mm	SMAW

d. Persiapan peralatan

Peralatan yang digunakan pada tahap persiapan material yaitu :

- Mesin gerinda : digunakan untuk memotong material sesuai dengan dimensi
- Mesin pemotong : digunakan untuk meratakan sisi material yang telah digerinda

### 3.2.5 Proses pengelasan bawah air

Proses pengelasan basah bawah air dilakukan dengan metode SMAW, pengelasan dilakukan di Solo Techno Park. Pengelasan dilakukan di kolam dengan kedalaman 10 meter, menggunakan elektroda E6013 dan E7018 dengan variasi arus 90A dan 120A dengan bentuk kampuh V groove dengan posisi 1G/2G pada material. Proses pengelasan dapat dilihat pada gambar 3.6 Dengan parameter pengelasan seperti dijelaskan dalam table 3.3

**Tabel 3. 3. Parameter pengelasan dalam air**

Efisiensi ( $\eta$ )	Ampere (A)	Voltage (V)	Tipe Current	Welding Speed mm/min	Heat Input kJ/mm
0.8	90	30	DC (-)	3.71	0.58
0.8	120	30	DC (-)	3.71	0.78



**Gambar 3. 6. Proses Pengelasan Bawah Air yang dilakukan di Solo Techno Park**

### **3.2.6 Pengamatan Visual**

Pengujian visual ini dilakukan pada spesimen yang telah dilas sebelumnya untuk mengetahui apakah ada cacat pengelasan, sehingga pada saat melakukan pengujian untuk mengetahui sifat mekanik material tidak terjadi kegagalan.

Apabila seluruh hasil pengelasan telah diperiksa dan tidak ada cacat maka pengujian laboratorium dapat dilaksanakan. Seperti pada gambar 3.7 dan 3.8 dilakukan pengamatan secara visual



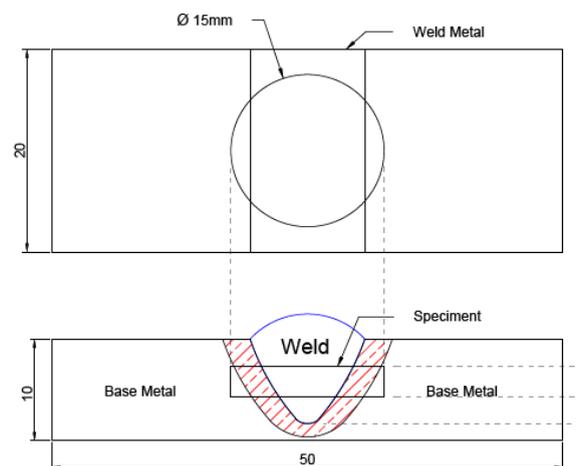
**Gambar 3. 7. Hasil pengelasan dalam air pada material pipa A106 yang dilakukan di Solo Techno Park dilakukan pengamatan secara visual**



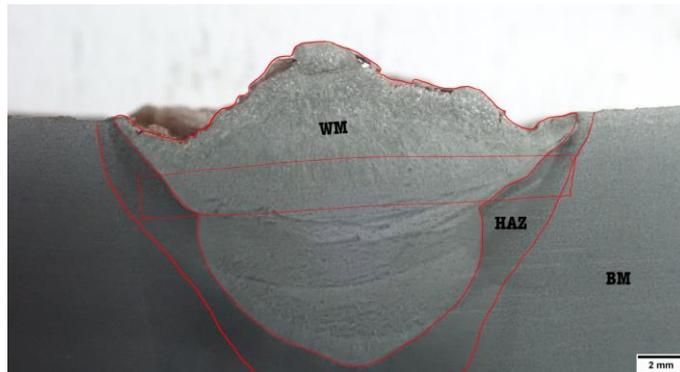
**Gambar 3. 8. Hasil pengelasan dalam air pada material Plat A36 yang dilakukan di Solo Techno Park dilakukan pengamatan secara visual**

### 3.2.7 Pembuatan Spesimen Uji Korosi

Pembuatan specimen uji korosi yang akan dilakukan pada penelitian thesis ini berbentuk seperti koin pipih dengan diameter 15 mm dan tebal 3mm. specimen uji akan dipotong seperti gambar dibawah, diambil bagian *base metal*, *welding zone* dan HAZ. Lalu akan diambil bagian tengahnya bagian setebal 3mm – 4mm.



**Gambar 3. 9. Pemotongan spesimen uji korosi**



Gambar 3. 10. Sketsa Makroskopis untuk posisi pengujian korosi elektrokimia



Gambar 3. 11. Contoh spesimen uji korosi yang sudah dipotong

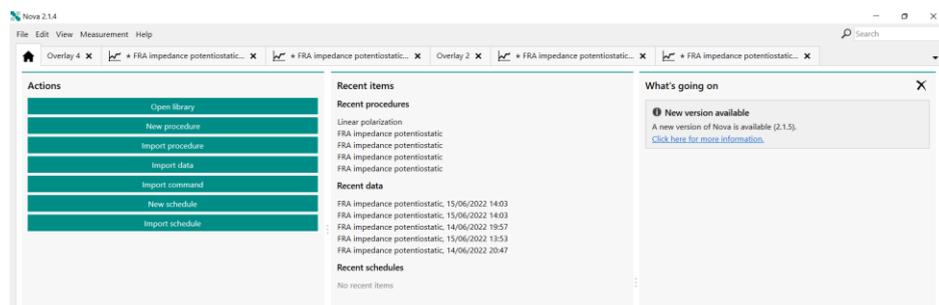
Tabel 3. 4. Jumlah Spesimen Pengujian Korosi

Material	Elektroda	Arus	Kedalaman	Jumlah Spesimen
PLAT	E6013	90A	3 meter	1
			10 meter	1
		120A	3 meter	1
			10 meter	1
	E7018	90A	3 meter	1
			10 meter	1
		120A	3 meter	1
			10 meter	1
PIPA	E6013	90A	3 meter	1
			10 meter	1
		120A	3 meter	1
			10 meter	1
	E7018	90A	3 meter	1
			10 meter	1
		120A	3 meter	1
			10 meter	1
Total Spesimen				16

### 3.2.8 Persiapan Pengujian Korosi

Pada penelitian laju korosi dengan menggunakan metode sel tiga elektroda ini, ada beberapa tahap persiapan yang mengacu pada prosedur pengujian korosi yang harus dilakukan. Tahap–tahap yang dilakukan dalam proses pengujian laju korosi adalah sebagai berikut :

- Mempersiapkan peralatan tabung reaksi, *reference electrode* atau elektroda acuan yang berupa unsur Ag dalam larutan AgCl jenuh, *counter electrode* atau elektroda pembantu yang berupa platina dan *working electrode* atau elektroda kerja yang merupakan spesimen uji.
- Mempersiapkan peralatan sumber potensial yang berupa alat dan *Software NOVA 2.1.4* seperti pada gambar 3.1



Gambar 3. 12. Tampilan Software NOVA 2.1.4

Pada pengujian korosi dengan metode elektrokimia, adapun langkah-langkah yang dilakukan sebagai berikut:

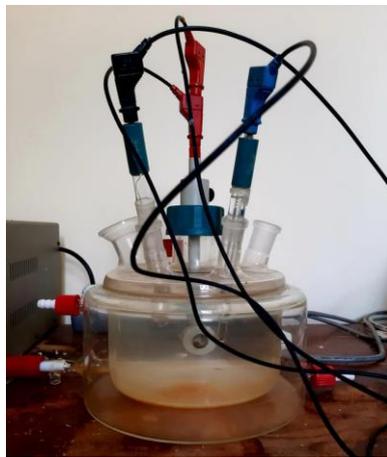
- a. Mempersiapkan alat dan bahan yang dibutuhkan seperti: spesimen uji, elektroda acuan (Ag/AgCl), elektroda pembantu (Pt), larutan elektrolit NaCl 3.5%, dan alat uji potensiostat sel tiga elektroda.





**Gambar 3. 13.** (A) elektroda acuan / refrence electrode (Ag/AgCl), (B) elektroda pembantu / counter electrode (Pt)

- b. Spesimen uji yang digunakan merupakan spesimen dengan ukuran diameter 15 mm. Pengujian korosi difokuskan pada daerah sambungan las dimana terjadi pencampuran antara elektroda dan logam induk yang mempengaruhi perubahan elektropotensial dan laju korosinya.
- c. Persiapan larutan elektrolit yang berupa larutan pengganti air laut yaitu dengan NaCl 3,5% dengan mencampurkan 35.24 gram NaCl dan 1000 mL *aquades*
- d. Spesimen uji, elektroda acuan, dan elektroda pembantu dipasang pada tabung uji



**Gambar 3. 14.** Alat uji korosi sel tiga elektroda

- e. Potensiostat yang berfungsi sebagai sumber potensial diatur pada rentang -0,1 V sampai dengan +0,1 V. Secara otomatis, software NOVA 2.1.4 yang terintegrasi dengan alat uji akan menampilkan grafik tafel yang terbentuk secara bertahap ketika nilai potensial dari spesimen uji ditemukan.



**Gambar 3. 15.** Alat potensiostat yang digunakan dalam uji korosi

- f. Setelah grafik tafel terbentuk, maka data-data mengenai spesimen uji seperti massa jenis ( $\text{g/cm}^3$ ), berat atom logam ( $\text{g/mol}$ ), serta luas permukaan spesimen uji ( $\text{cm}^2$ ) diinputkan pada software NOVA 2.1.4 untuk dapat menghitung laju korosinya.
- g. Parameter-parameter yang dibutuhkan untuk mengetahui besarnya laju korosi pada spesimen seperti kuat arus korosi dan beda potensial korosi dapat diketahui dengan melakukan pengeplotan pada grafik tafel
- h. Untuk pengujian *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS) Langkah yang dilakukan masih sama dan juga menggunakan software yang sama yaitu NOVA 2.14 yang terintegrasi secara otomatis.
- i. Pengujian EIS ini dilakukan dengan *Open Circuit Potential* (OCP) menggunakan amplitude 0,01V pada rentang frekuensi  $1\text{E}+05$  Hz sampai 0,1 Hz.
- j. Pengujian dilakukan selama kisaran 200 detik, setelah itu didapatkan plot berupa *Nyquist Plot* dan *Bode Plot*, data mentah tersebut lalu akan dianalisa nilai Zview impedansinya.

### 3.2.9 Persiapan Struktur Makro

1. *grinding* dilakukan dengan kertas gosok dengan grit bertingkat mulai dari grit 220 hingga 2000, pemolesan dilakukan hingga permukaan spesimen bersih, mengkilap, dan tidak ada lagi goresan
2. kemudian permukaan spesimen dipoles menggunakan metal polisher dengan kain beludru.
3. permukaan spesimen dietsa dengan nital 3% (Alkohol 100 % 100 ml + HNO<sub>3</sub> 3 ml)
4. untuk foto makro dilakukan menggunakan kamera digital dengan skala.

### 3.2.10 Analisa Hasil Pengujian

Data data yang telah didapat selanjutnya akan dianalisa mengenai pengaruh dari parameter terhadap respon yang dihasilkan mengenai apa yang terjadi berdasarkan refrensi dari dasar teori maupun penelitian penelitian sebelumnya yang mendukung hasil dari penelitian ini.

### 3.2.11 Kesimpulan dan Saran

Setelah melakukan analisis, maka dapat ditarik kesimpulan dari hasil pengujian yang telah dilakukan serta saran untuk penelitian berikutnya

## BAB 4

### ANALISA HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam bab ini menjelaskan hasil dari penelitian beserta hipotesisnya yang akan dibahas pada bagian akhir, hasil dan pembahasan akan di bahas pada masing masing sub-bab hasil penelitian.

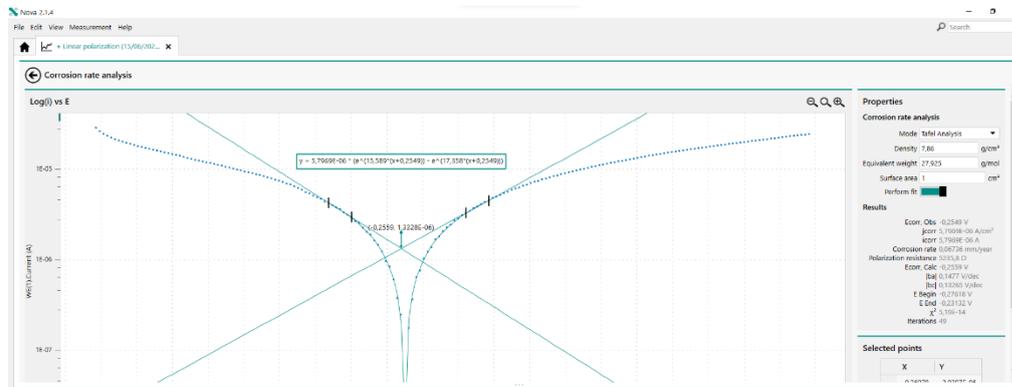
#### 4.1 Hasil Pengujian Korosi

Pada pengujian korosi digunakan spesimen hasil pengelasan dengan ukuran  $\varnothing 14$  mm. Pengujian korosi ini dilakukan untuk mengetahui nilai laju korosi dari spesimen hasil pengelasan bawah air dengan parameter pengelasan seperti yang telah dijabarkan diatas. Pengujian laju korosi dilakukan dengan dua metode polarisasi linear (*Linear Polarization*) dan *Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)* yang terintegrasi dengan software NOVA 2.1.4 di komputer. Kedua pengujian korosi ini dilakukan di Laboratorium Metalurgi Korosi, Departemen Teknik Mesin, FTIRS – ITS. Software NOVA 2.1.4 ini nantinya akan menghitung laju korosi secara otomatis. Selain itu, data material dari spesimen uji seperti massa jenis ( $\text{g/cm}^3$ ), berat atom ( $\text{g/mol}$ ), dan luas permukaan spesimen uji ( $\text{cm}^2$ ) juga diinputkan pada software NOVA 2.1.4 ini.

##### 4.1.1 Hasil Pengujian Polarisasi Linear

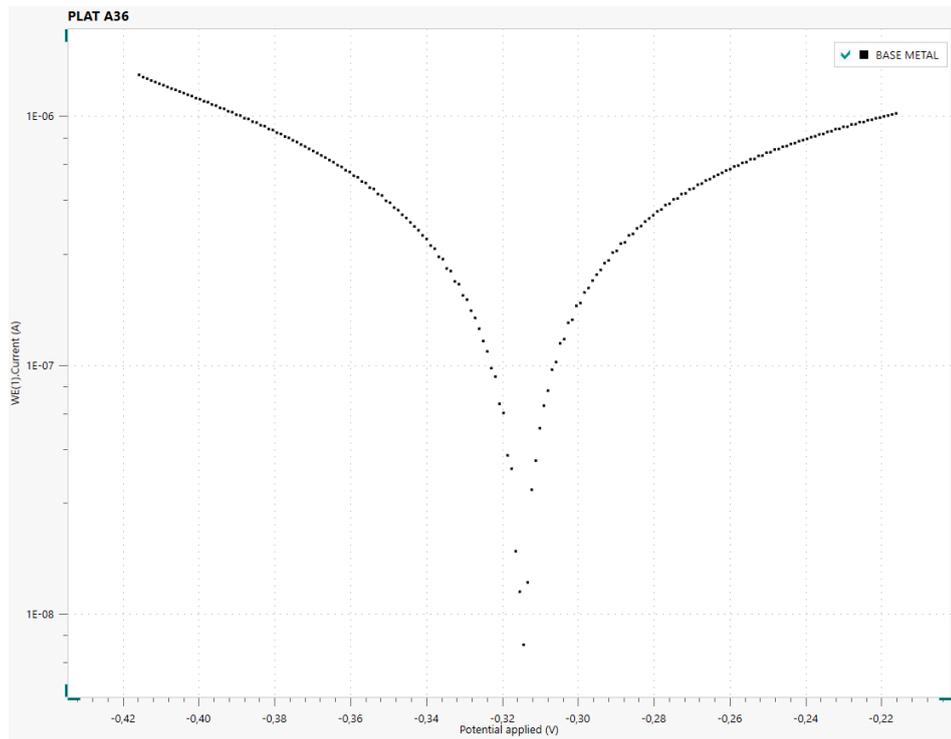
Pengujian polarisasi linear dilakukan Ketika nilai potensial terbuka dari sampel mencapai kondisi *steady* hingga 0,1 V, setelah kurang lebih 200 detik dilakukan pengujian dengan menggunakan elektrolit NaCl 3,5%, dari pengujian ini akan didapatkan sebuah plot diagram yang disebut *Tafel Plot*, diagram ini menunjukkan antara hubungan potensial dan kerapatan arus yang digunakan oleh peralatan uji terhadap nilai laju korosi pada spesimen. Pada diagram tafel, sumbu absis menunjukkan besarnya potensial, sedangkan sumbu ordinat menunjukkan nilai kerapatan arus. Setelah pengujian berakhir maka diagram tafel akan membentuk titik-titik sesuai dengan potensial dan kerapatan arus yang didapatkan dari pengujian. Lalu dilakukan analisa diagram tafel dengan menarik dua garis lurus

hingga bersilangan pada suatu titik yang menunjukkan nilai laju korosi spesimen seperti pada gambar 4.2



**Gambar 4. 1. Proses plotting diagram tafel**

Pengujian ini digunakan untuk melihat ketahanan sampel terhadap oksidasi bila diberi potensial dari luar sehingga korosi terjadi. Potensi korosi ( $E_{corr}$ ) ditentukan oleh jumlah muatan negatif yang terjadi ketika logam berada dalam larutan elektrolit dan menghasilkan ion klorida. Ion-ion ini akan merusak lapisan pelindung pada permukaan logam akibat ion klorida yang menyusup ke dalam rongga-rongga kecil. Unsur oksigen memanfaatkan kerusakan lapisan pelindung di sekitarnya sehingga akan mengalami korosi. Pada pengujian yang dilakukan terhadap base metal Plat A36 didapatkan hasil dari perhitungan software NOVA nilai laju korosinya sebesar 0,017 mm/yr adapun hasilnya dapat dilihat dari gambar 4.3 dan tabel 4.2



**Gambar 4. 2. Kurva Polarisasi dari base metal plat A36**

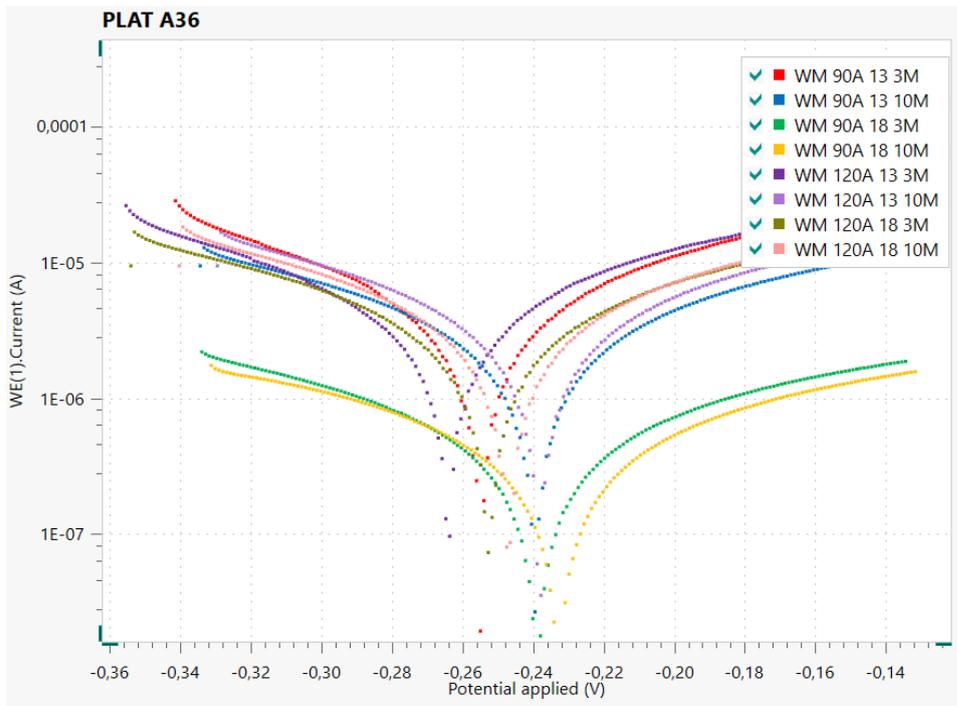
**Tabel 4. 1. Output NOVA 2.14 pada base metal plat A36**

Base Metal PLAT A36			
Ecorr, Obs (V)	Icorr (A)	Ecorr, Calc (V)	Corrosion Rate (mm/yr)
-0,21357	1,46E-06	-0,21304	0,017

Pada gambar grafik hasil pengujian laju korosi diatas dapat diketahui bahwa pada proses pengukuran laju korosi yang terjadi pada specimen yang diberi rentang -0,1 V sampai dengan +0,1 V, akan mengalami tiga fase yaitu fase pertama adalah arus akan mengalami penurunan secara perlahan secara terus menerus diakrenakan pada fase ini adalah proses terjadinya reaksi anodik, sehingga dengan turunnya arus mengakibatkan hilangnya butiran butiran halus pada spesimen yang diuji. Kedua adalah fase dimana arus yang turun terus menerus akan sampai di titik terendah dan tidak akan bisa mengalami penurunan lagi. Selanjutnya adalah fase ketiga dimana arus yang sudah di titik terendah akan naik Kembali sampai arus tersebut menjadi stabil karena pada fase ini terjadi proses reaksi katodik, maka dari

itu setelah besarnya arus mulai stabil maka software akan menghitung secara otomatis nilai laju korosi yang terjadi saat proses pengujian.

Lalu untuk hasil las atau *weld metal* pada plat A36 yang dilakukan las bawah air dengan beberapa parameter tersebut dilakukan pengujian korosi dengan metode yang sama yakni polarisasi linear, dan didapatkan kurva polarisasi seperti pada gambar 4.4 Hasil pengujian linear polarisasi linear pada plat A36 yang dijelaskan pada gambar menunjukkan grafik uji korosi yang saling berdekatan. Perbedaan terletak pada nilai  $E_{corr}$  dan  $I_{corr}$  serta kapasitannya. Garis pasivasi yang bentuknya mendekati garis singgung anodik dan katodik cenderung lebih tahan korosi.



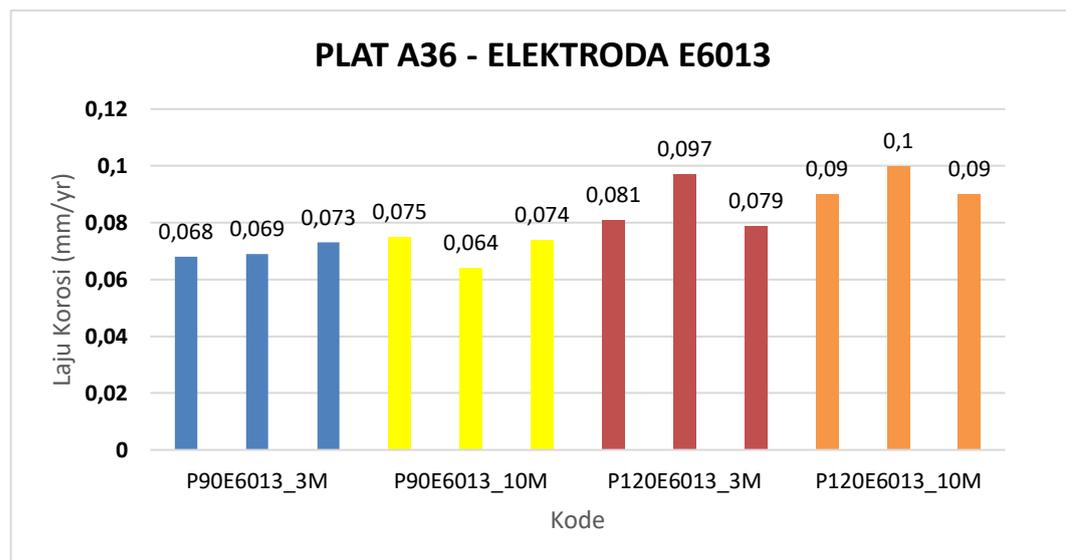
**Gambar 4. 3. Diagram tafel untuk pengujian di tiap parameter pengelasan Plat A36**

Pengujian polarisasi linear akan menghasilkan kurva pada grafik Tafel, dan kemudian menghasilkan nilai data  $E_{corr}$  dan  $I_{corr}$ . Banyaknya muatan negatif yang terbentuk akan menghasilkan nilai  $E_{corr}$  dan  $I_{corr}$ . Besar kecilnya nilai menunjukkan kecenderungan bahan untuk mengalami oksidasi. Nilai  $E_{corr}$  yang rendah cenderung menjadi lebih mudah berkarat, begitu pula sebaliknya. Dari gambar diatas nilai laju korosi tertinggi diperoleh dari pengelasan menggunakan

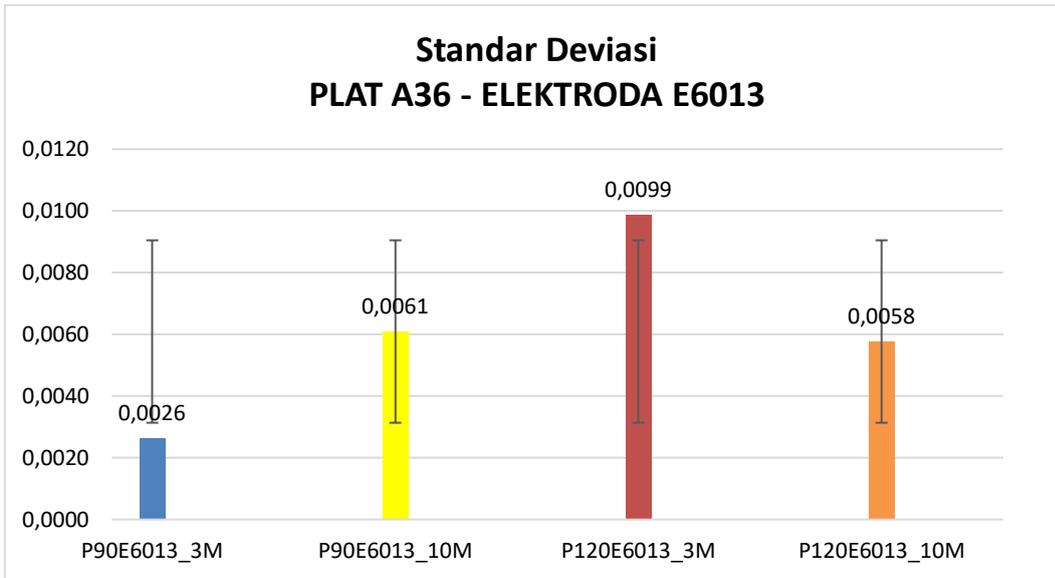
elektroda E6013 dengan arus pengelasan 120A dan kedalaman pengelasan 10 meter, dengan rata rata yaitu sebesar 0,093 mm/yr. Untuk yang memiliki nilai laju korosi terendah diperoleh dari pengelasan dengan elektroda E7018 dengan arus 90A, dengan rata rata yaitu sebesar 0,011 mm/yr. Data tersebut dijabarkan dalam table 4.3 dan 4.4 dibawah ini.

**Tabel 4. 2. Output NOVA 2.1 4 dengan pengelasan menggunakan elektroda E6013 pada plat A36**

PLAT A36 - ELEKTRODA E6013						
Parameter Las	Ecorr, Obs (V)	Icorr (A)	Ecorr, Calc (V)	Laju Korosi (mm/yr)	Rata-Rata (mm/yr)	StDev
P90E6013_3M	-0,2549	5,79E-06	-0,2555	0,068	0,070	0,0021
	-0,2549	6,00E-06	-0,2543	0,069		
	-0,2549	6,35E-06	-0,2544	0,073		
P90E6013_10M	-0,2390	6,53E-06	-0,2391	0,075	0,071	0,0049
	-0,2390	5,50E-06	-0,2387	0,064		
	-0,2390	6,38E-06	-0,2405	0,074		
P120E6013_3M	-0,2379	7,03E-06	-0,2378	0,081	0,085	0,0080
	-0,2695	8,38E-06	-0,2687	0,097		
	-0,2695	6,85E06	-0,2690	0,079		
P120E6013_10M	-0,2379	7,81E-06	-0,2368	0,090	0,093	0,0047
	-0,2419	8,66E-06	-0,2446	0,100		
	-0,2379	7,79E-06	-0,2357	0,090		



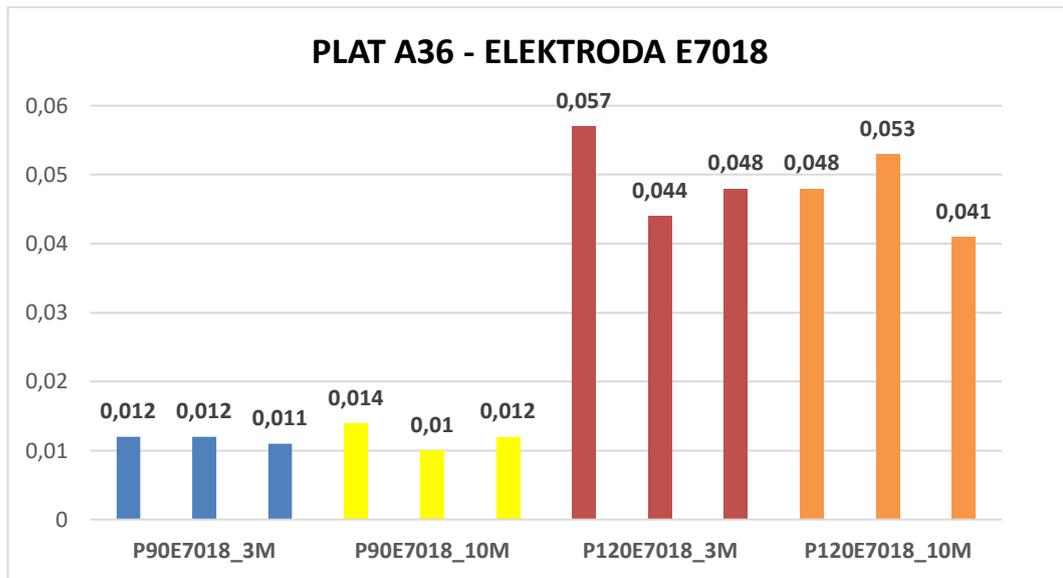
**Gambar 4. 4. Nilai Laju Korosi pada Plat A36 - Elektroda E6013**



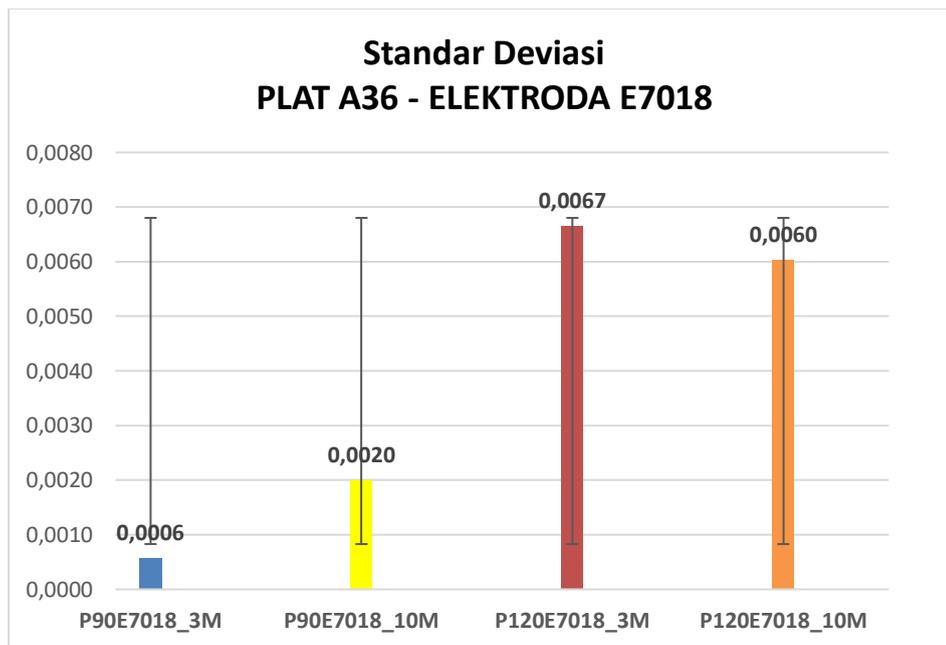
**Gambar 4. 5. Standar Deviasi nilai laju korosi Plat A36 - Elektroda E6013**

**Tabel 4. 3. Output NOVA 2.14 dengan pengelasan menggunakan elektroda E7018 pada plat A36**

PLAT A36 - ELEKTRODA E7018						
Parameter Las	Ecorr, Obs (V)	Icorr (A)	Ecorr, Calc (V)	Laju Korosi (mm/yr)	Rata-Rata (mm/yr)	StDev
P90E7018_3M	-0,2386	1,07E-06	-0,2386	0,012	0,011	0,0004
	-0,2386	1,01E-06	-0,2385	0,012		
	-0,2325	9,78E-07	-0,2326	0,011		
P90E7018_10M	-0,2325	1,17E-06	-0,2310	0,014	0,012	0,0016
	-0,2325	8,79E-07	-0,2323	0,010		
	-0,2325	1,07E-06	-0,2319	0,012		
P120E7018_3M	-0,2521	4,93E-06	-0,2519	0,057	0,049	0,0054
	-0,2521	3,86E-06	-0,2514	0,044		
	-0,2491	4,17E-06	-0,2482	0,048		
P120E7018_10M	-0,2325	1,46E-06	-0,2295	0,048	0,047	0,0049
	-0,2468	4,06E-06	-0,2463	0,053		
	0,2468	3,57E-06	-0,2465	0,041		

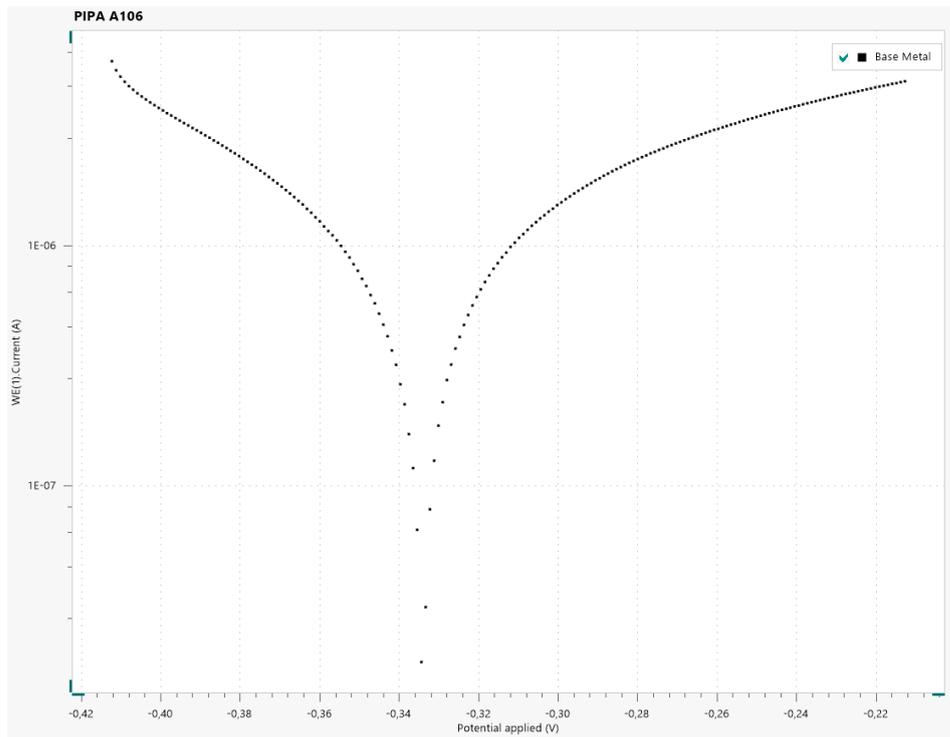


**Gambar 4. 6. Nilai Laju Korosi pada Plat A36 - Elektroda E7018**



**Gambar 4. 7. Standar Deviasi nilai laju korosi Plat A36 - Elektroda E7018**

Untuk spesimen base metal Pipa A106 didapatkan hasil dari perhitungan software nova nilai laju korosinya sebesar 0,053 mm/yr adapun hasilnya dapat dilihat dari gambar 4.5 dan tabel 4.5

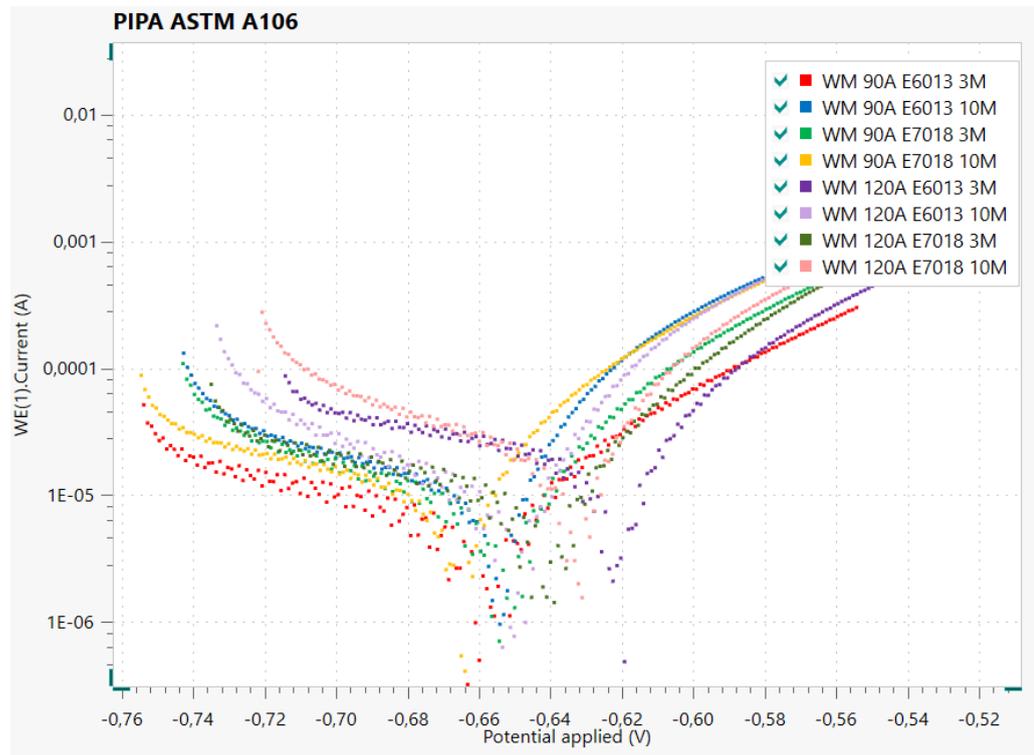


**Gambar 4. 8. Kurva Polarisasi dari base metal pipa A106**

**Tabel 4. 4. Output NOVA 2.1.4 pada base metal pipa A106**

Base Metal PIPA A106			
Ecorr, Obs (V)	Icorr (A)	Ecorr, Calc (V)	Corrosion Rate (mm/yr)
-0,3339	4,57E-06	-0,3334	0,053

Untuk Pipa A106 juga dilakukan pengelasan bawah air dengan parameter yang sama. Menghasilkan kurva polarisasi yang juga saling berdekatan seperti pada gambar 4.6



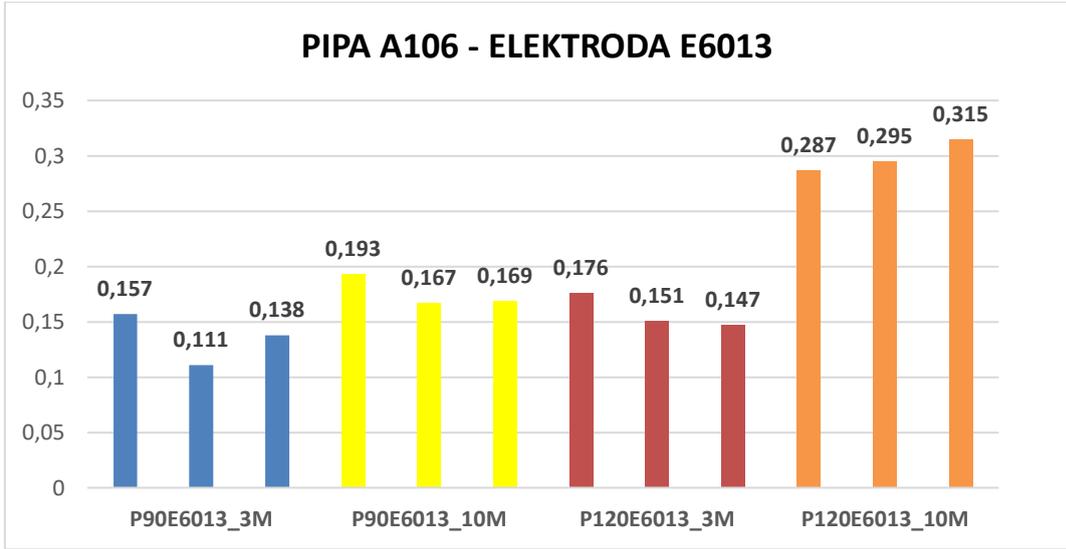
**Gambar 4. 9. Diagram tafel untuk pengujian di tiap parameter pengelasan Pipa A106**

Dari gambar diatas nilai laju korosi tertinggi diperoleh dari pengelasan menggunakan elektroda E6013 dengan arus pengelasan 120A dan kedalaman pengelasan 10 meter yaitu dengan rata rata sebesar 0,299 mm/yr. Untuk yang memiliki nilai laju korosi terendah diperoleh dari pengelasan dengan elektroda E7018 dengan arus 90A, dengan rata rata yaitu sebesar 0,073 mm/yr. Data tersebut dijabarkan dalam table 4.6 dan 4,7 dibawah ini.

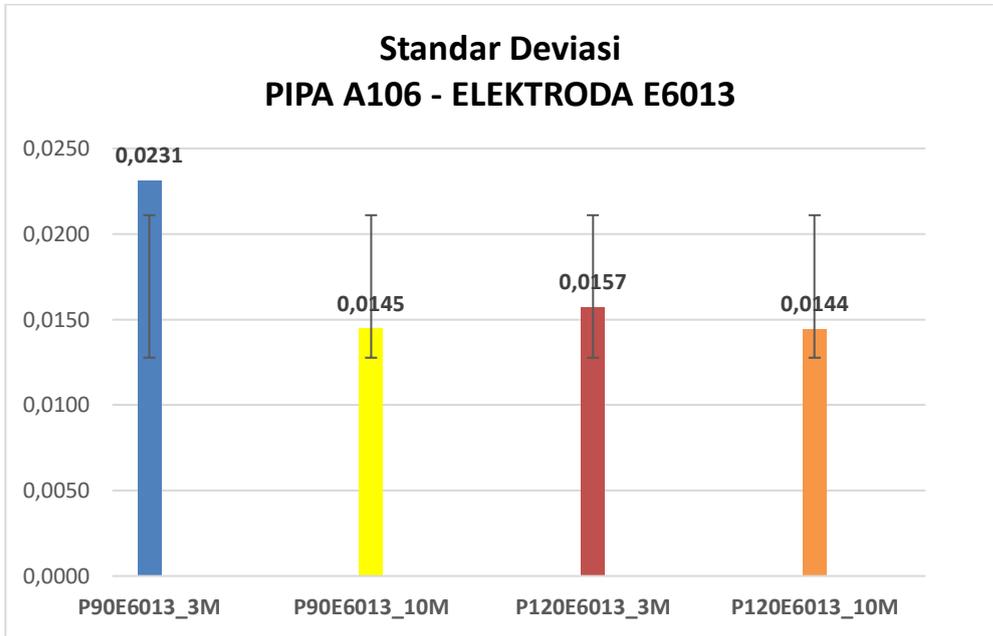
**Tabel 4. 5. Output NOVA 2.14 dengan pengelasan menggunakan elektroda E6013 pada pipa A106**

PIPA A106 - ELEKTRODA E6013						
Parameter Las	Ecorr, Obs (V)	Icorr (A)	Ecorr, Calc (V)	Laju Korosi (mm/yr)	Rata-Rata (mm/yr)	StDev
P90E6013_3M	-0,6581	1,34E-05	-0,6590	0,157	0,135	0,0188
	-0,6581	9,61E-06	-0,6604	0,111		
	-0,6581	1,19E-05	-0,6662	0,138		
P90E6013_10M	-0,6543	1,66E-05	-0,6563	0,193	0,176	0,0118
	-0,6543	1,44E-05	-0,6538	0,167		
	-0,6538	1,44E-05	-0,6538	0,169		

P120E6013_3M	-0,6486	1,51E-05	-0,6524	0,176	0,158	0,0128
	-0,6430	1,30E-05	-0,6404	0,151		
	-0,6430	1,27E-05	-0,6433	0,147		
P120E6013_10M	-0,6206	2,47E-05	-0,6219	0,287	0,299	0,0117
	-0,6206	2,53E-05	-0,6226	0,295		
	-0,6206	2,71E-05	-0,6191	0,315		



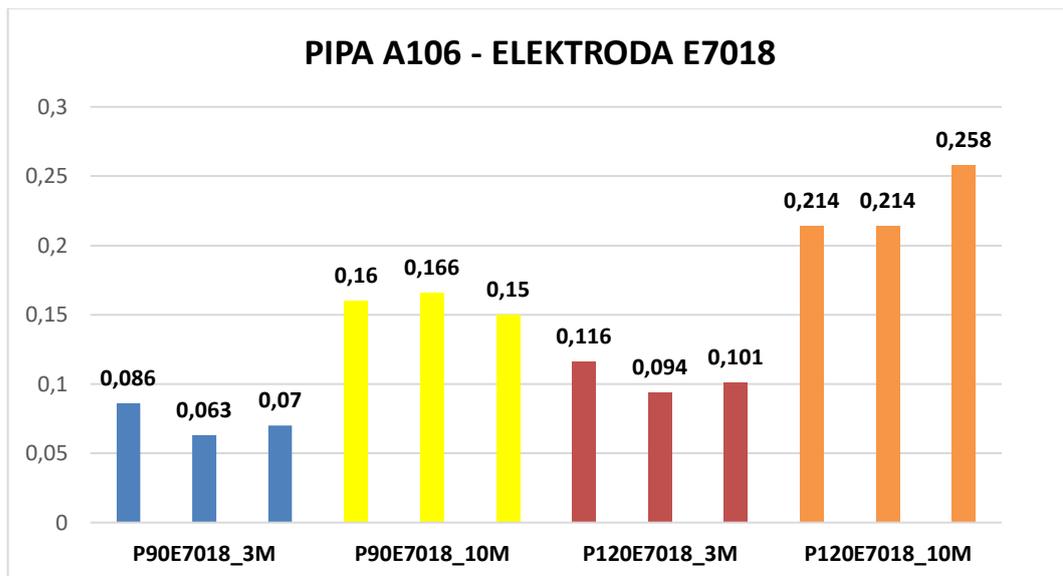
Gambar 4. 10. Nilai laju korosi pada Pipa A106-Elektroda E6013



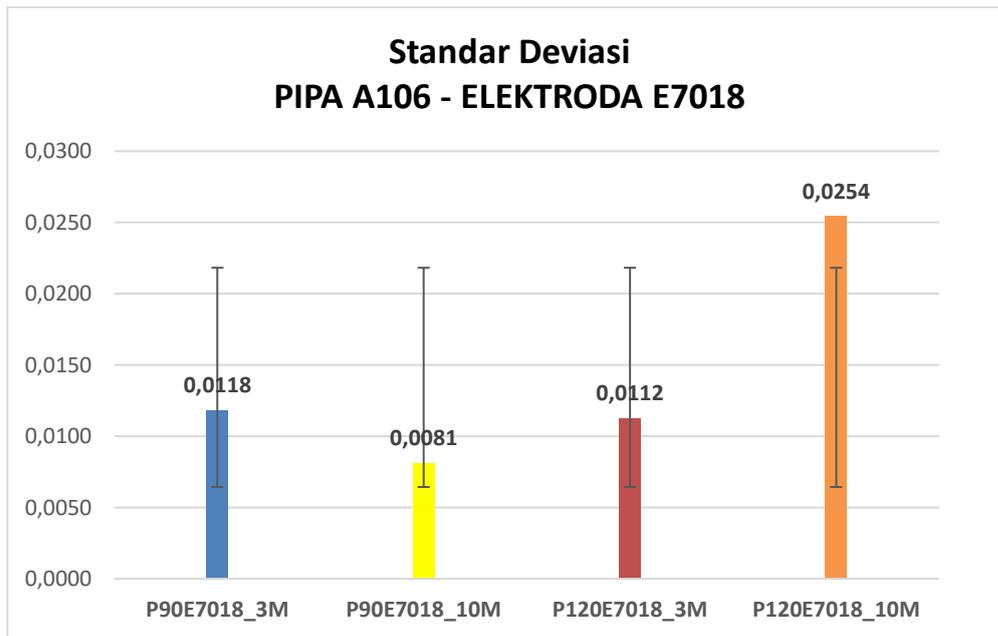
Gambar 4. 11. Standar Deviasi nilai laju korosi pada Pipa A106-Elektroda E6013

**Tabel 4. 6. Output NOVA 2.14 dengan pengelasan menggunakan elektroda E7018 pada pipa A106**

PIPA A106 - ELEKTRODA E7018						
Parameter Las	Ecorr, Obs (V)	Icorr (A)	Ecorr, Calc (V)	Laju Korosi (mm/yr)	Rata-Rata (mm/yr)	StDev
P90E7018_3M	-0,6543	7,46E-06	-0,6552	0,086	0,073	0,0096
	-0,6543	5,05E-06	-0,6543	0,063		
	-0,6514	6,06E-06	-0,657	0,070		
P90E7018_10M	-0,6543	1,37E-05	-0,6543	0,160	0,156	0,0065
	-0,6543	1,43E-05	-0,6538	0,166		
	-0,6543	1,29E-05	-0,6553	0,150		
P120E7018_3M	-0,643	1,00E-05	-0,6454	0,116	0,103	0,0091
	-0,643	8,14E-06	-0,642	0,094		
	-0,64303	8,74E-06	-0,6414	0,101		
P120E7018_10M	-0,6324	1,84E-05	-0,6315	0,214	0,228	0,0207
	-0,6324	1,84E-05	-0,6345	0,214		
	-0,6324	2,22E-05	0,635	0,258		



**Gambar 4. 12. Nilai laju korosi pada Pipa A106-Elektroda E7018**



**Gambar 4. 13. Standart Deviasi nilai laju korosi pada Pipa A106-Elektroda E7018**

Berdasarkan hasil data pengujian laju korosi yang telah dilakukan terhadap base metal dan hasil lasan disetiap parameter dapat diketahui bahwa laju korosi akan meningkat dengan bertambahnya kedalaman pengelasan, dapat dilihat dari grafik bahwa pengelasan pada kedalaman 3 meter memiliki nilai laju korosi yang lebih rendah dibandingkan pengelasan dengan kedalaman 10 meter. Hal ini diakarenakan oleh reaksi antara elektroda dan air ( $H_2O$ ) pada pengelasan bawah air akan menyebabkan porosity pada pengelasan. Meningkatnya kedalaman pengelasan juga akan menyebabkan peningkatan laju pendinginan yang akan berefek kepada hasil pengelasan.

Panas pengelasan yang terjadi akibat dari perbedaan *heat input* akan berpengaruh kepada nilai laju korosi dari masing masing material Plat A36 maupun Pipa A106. Perbedaan *heat input* dan elektroda pada material sambungan las menyebabkan panas yang diterima oleh material berbeda. Semakin besar *heat input* pada proses pengelasan, maka pengaruh panas yang diterima material juga semakin besar. Pengaruh panas tersebut juga dapat menyebabkan terjadinya difusi senyawa kimia air laut pada logam las maupun terjadinya dealloying senyawa kimia material yang menyebabkan nilai elektropotensial dari spesimen berubah. Dari pengujian korosi dengan menggunakan polarisasi linear mengasilkan data, bahwa di kedua

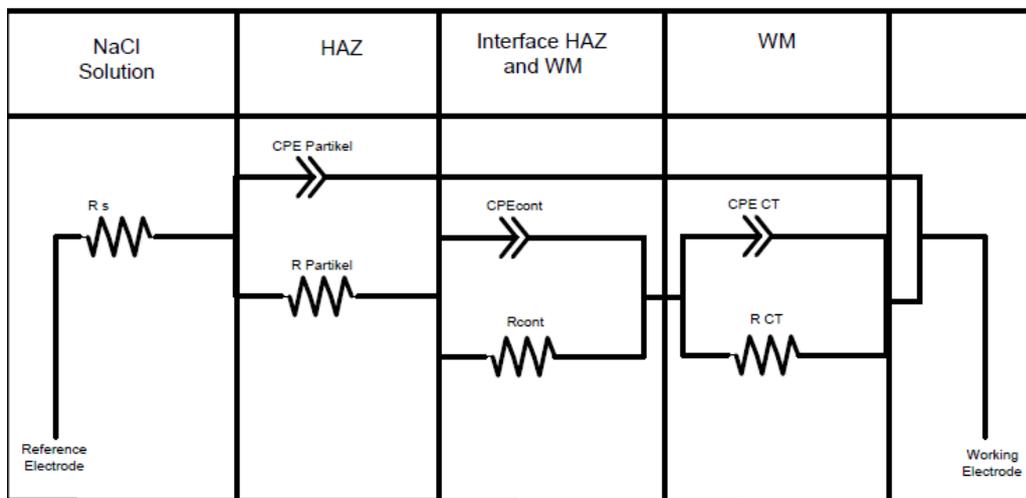
material yaitu plat A36 dan pipa A106 nilai laju korosi terbesar terdapat pada parameter pengelasan dengan menggunakan elektroda E6013 dan pada arus 120 dengan *heat input* 0,76 kJ/mm. Hal itu dapat dilihat pada nilai elektropotensialnya yang semakin kecil. Semakin kecil nilai elektropotensialnya, maka akan semakin mudah teroksidasi dan semakin besar kemungkinan terjadinya reaksi korosi.

Pengaruh dari arus dan elektroda juga memiliki hubungan, semakin tinggi *heat input* yang diberikan maka akan menyebabkan gangguan keseimbangan fasa pada *weld metal*. Disamping itu, elektroda E7018 lebih memerlukan *heat input* yang relative tinggi, karena jenis elektroda E7018 saat proses pengelasan busur listriknya lebih sulit menyala dibandingkan menggunakan elektroda E6013, hal ini disebabkan elektroda E7018 memiliki tipe *flux low-hydrogen* dimana elektroda jenis ini memiliki karakteristik jarak nyala busur yang lebih pendek dan harus dan terus dijaga agar tidak padam sehingga akan lebih sulit dilakukan pengelasan Ketika didalam air. Sehingga jika *heat input* yang digunakan relative rendah memungkinkan tidak tercapainya penetrasi las yang diinginkan (Lai et al, 2016). *Heat input* yang tidak berlebihan akan mendorong kurva polarisasi ke arah positif sehingga dapat memberikan resistensi korosi yang lebih baik (Paulraj, 2016). Dan maka dari itu pada elektroda jenis E6013 lebih mudah terkorosi karena mendapat *heat input* yang akan menyebabkan tegangan sisa yang dihasilkan besar dan tegangan sisa itu akan menyebabkan laju korosi yang lebih besar juga.

#### **4.1.2 Hasil Pengujian EIS**

Pada pengujian EIS dilakukan pada material Plat A36 dan Pipa A106 untuk mengetahui mekanisme laju korosi dari *base metal* dan daerah lasan dengan pengaruh parameter pengelasan. Pengujian EIS ini dilakukan di Laboratorium Korosi, Departemen Teknik Mesin ITS. Pada pengujian ini juga dilakukan juga menggunakan software yang sama dengan pengujian polarisasi linear yaitu NOVA 2.1.4 dengan elektrolit NaCl 3,5%. Sama seperti pengujian polarisasi linear, pengujian ini juga menggunakan tiga rangkaian elektroda yaitu WE (*working electrode*), CE (*counter electrode*), dan RE (*reference electrode*). Spesimen yang diuji juga menggunakan spesimen yang sama dengan digunakan saat pengujian polarisasi linear.

Hasil dari pengujian EIS adalah dalam bentuk kurva Nyquist. setelah kurva Nyquist didapat, lalu dilakukan *fitting* untuk mendapatkan *circuit equivalent* pada software NOVA 2.1.4. Dengan menggunakan rangkaian listrik yang disebut *equivalent circuit* maka dapat terbaca nilai impedansi atau tahanannya. Kemudian dari hasil *fitting* tersebut kita akan mendapatkan nilai R (Resistor) seperti dilihat pada tabel 4,9 dan 4.10 serta dalam diagram Nyquist pada gambar 4.15 dan 4.16



**Gambar 4. 14. Equivalent circuit yang digunakan untuk fitting**

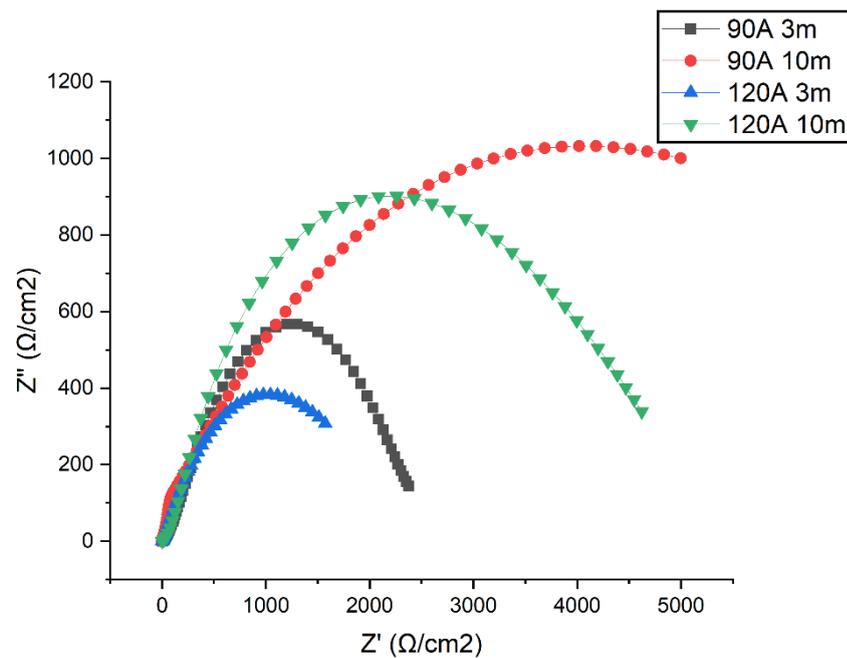
Gambar 4.16 diatas adalah model rangkaian sirkuit yang digunakan dalam penelitian kali ini, dimana juga banyak digunakan dalam studi elektrokimia media korosif / produk korosi. Elemen yang digunakan dalam model rangkaian adalah *resistance solution* ( $R_s$ ) atau resistensi pada larutan NaCl 3,5% sebagai media korosif yang berada diantara *working electrode* dan *refrence electrode*. Pada HAZ terdapat tahanan partikel atau ( $R_{partikel}$ ), pada interface HAZ dan WM terdapat hambatan kontak atau ( $R_{cont}$ ), dan pada WM terdapat tahanan transfer atau ( $R_{ct}$ ).  $R_{ct}$  merupakan parameter penting karena terbalik dengan laju korosi untuk setiap lapisan. (Hosking et al, 2007)

Tabel 4. 7. Output NOVA 2.1.4 pengujian EIS pada base metal Plat A36

Base Metal PLAT A36	
Rp (k $\Omega$ )	Rs (k $\Omega$ )
2807,3	913

Tabel 4. 8. Output NOVA 2.1.4 pengujian EIS dengan menggunakan elektroda E6013 pada Plat A36

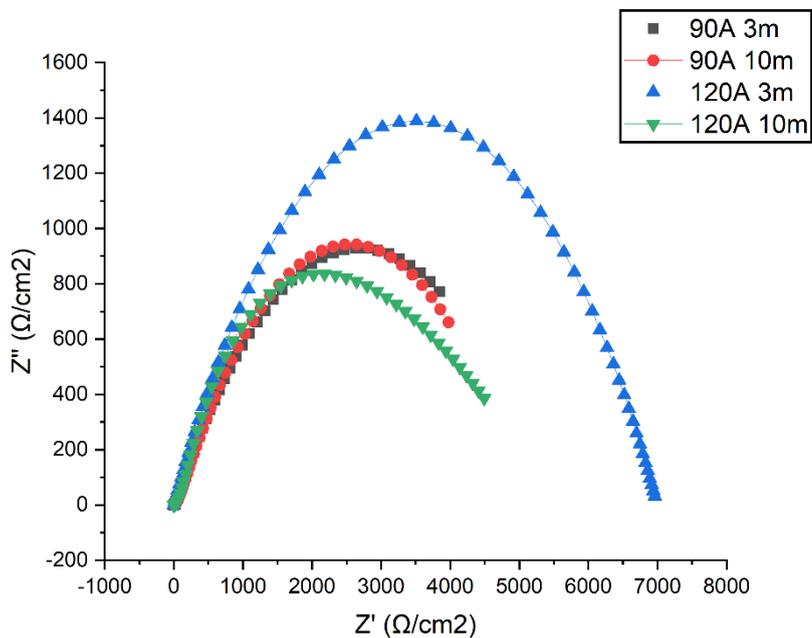
PLAT A36 - ELEKTRODA E6013		
Parameter Las	Rp ( $\Omega$ )	Rs ( $\Omega$ )
P90E6013_3M	3006,6	28,2
P90E6013_10M	4545	2725
P120E6013_3M	1075,7	59
P120E6013_10M	581,2	268,6



Gambar 4. 15. Nyquist Plot Plat A36-Elektroda E6013

**Tabel 4. 9. Output NOVA 2.1.4 pengujian EIS dengan menggunakan elektroda E7018 pada Plat A36**

PLAT A36 - ELEKTRODA E7018		
Parameter Las	$R_p$ ( $\Omega$ )	$R_s$ ( $\Omega$ )
P90E7018_3M	5626,2	1186,2
P90E7018_10M	6143	1010,4
P120E7018_3M	3941	3332,3
P120E7018_10M	608	225



**Gambar 4. 16. Nyquist Plot Plat A36-Elektroda E7018**

Dari tabel pengujian EIS diatas didapatkan nilai tahanan polarisasi ( $R_p$ ) dan tahanan larutan ( $R_s$ ). Dari hasil pengujian didapatkan bahwa pada pengelasan dengan elektroda E6013 pada arus 120A memiliki harga  $R_p$  lebih kecil dibandingkan specimen dengan parameter pengelasan lainnya yaitu sebesar 581,2  $\Omega$  dimana artinya laju korosi yang lebih tinggi dibandingkan dengan specimen dengan parameter pengelasan lainnya.

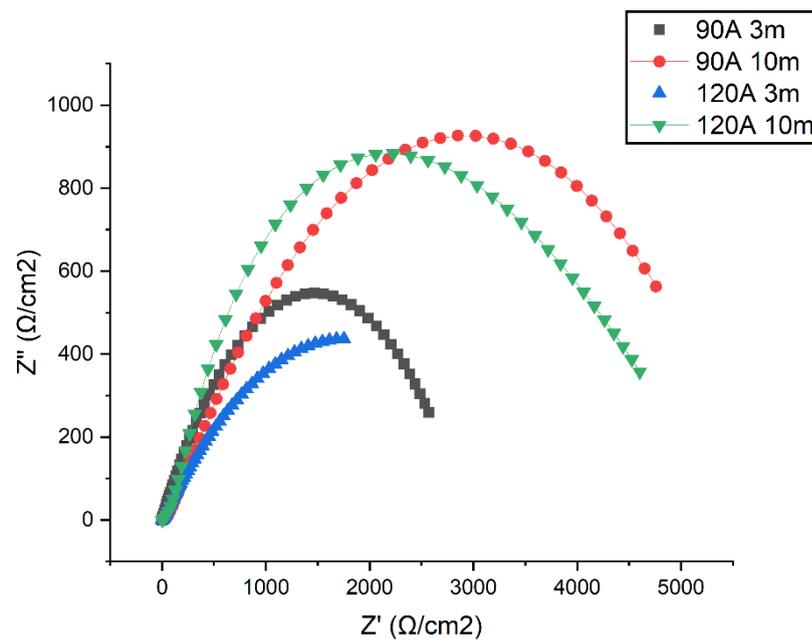
Untuk parameter pada pengelasan PIPA A106 didapatkan hasil pengujian EIS seperti gambar 4.17 dan 4.18 dan tabel 4.11 dan 4.12 dibawah ini.

**Tabel 4. 10. Output NOVA 2.1.4 pengujian EIS pada base metal Pipa A106**

Base Metal PIPA A106	
Rp ( $\Omega$ )	Rs ( $\Omega$ )
783	940

**Tabel 4. 11. Output NOVA 2.1.4 pengujian EIS dengan menggunakan elektroda E6013 pada Pipa A106**

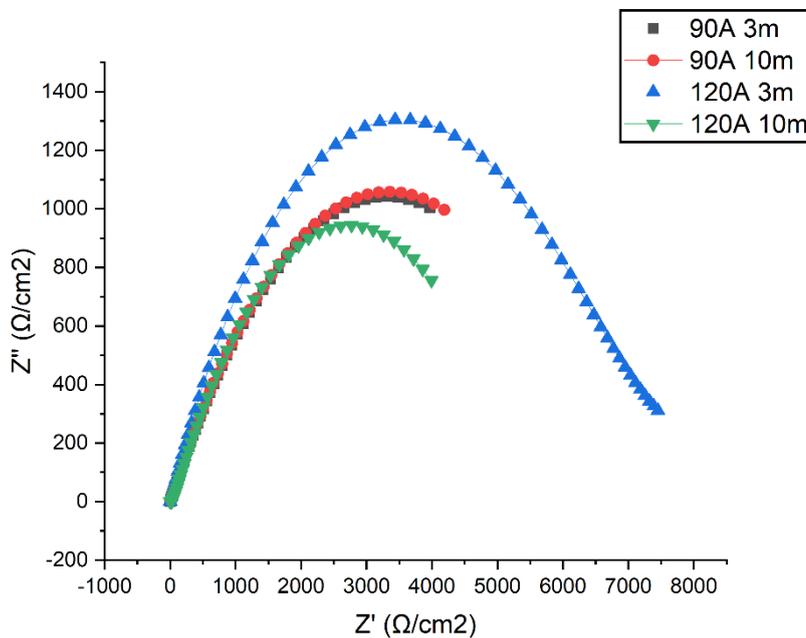
PIPA A106 - ELEKTRODA E6013		
Parameter Las	Rp ( $\Omega$ )	Rs ( $\Omega$ )
P90E6013_3M	2983	29,2
P90E6013_10M	2866,3	843,5
P120E6013_3M	3027,7	923,0
P120E6013_10M	641,67	245,7



**Gambar 4. 17. Nyquist Plot Pipa A106-Elektroda E7018**

**Tabel 4. 12. Output NOVA 2.1.4 pengujian EIS dengan menggunakan elektroda E7018 pada Pipa A106**

PIPA A106 - ELEKTRODA E7018		
Parameter Las	R <sub>p</sub> (Ω)	R <sub>s</sub> (Ω)
P90E7018_3M	5260,5	1199,1
P90E7018_10M	5983,5	1024,8
P120E7018_3M	4356,2	43,0
P120E7018_10M	1475,5	67,4



**Gambar 4. 18. Nyquist Plot Pipa A106-Elektroda E6013**

Dari tabel diatas didapatkan hasil pengujian EIS dengan beberapa parameter pengelasan pada PIPA 106 dan pada *base metal*. didapatkan nilai tahanan polarisasi (R<sub>p</sub>) dan tahanan larutan (R<sub>s</sub>). Tahanan tersebut mewakili adanya perpindahan muatan antar muka logam dengan larutan elektrolit. dengan peningkatan nilai tahanan, menunjukkan adanya lapisan pasif yang terjadi di permukaan logam, hal ini berkaitan dengan perpindahan elektron. Dari hasil pengujian didapatkan bahwa pada pengelasan dengan elektroda E6013 pada arus 90A memiliki harga R<sub>p</sub> terendah yaitu sebesar 641,67 Ω dimana artinya laju korosi

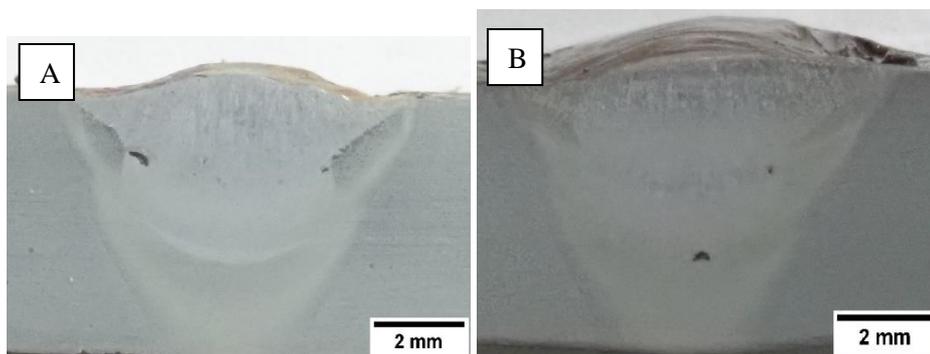
yang lebih tinggi dibandingkan dengan specimen dengan parameter lainnya.

Setelah dilakukan pengujian EIS pada material Plat A36 dan A106 dengan parameter pengelasan diatas. Data EIS disajikan dalam bentuk diagram Nyquist yang menyatakan hubungan antara impedansi real ( $Z_r$ ) dan impedansi imajiner ( $-Z_i$ ). Bentuk diagram Nyquist hampir semi lingkaran yang mengindikasikan bahwa proses korosi dari spesimen dikendalikan oleh transfer muatan. Namun terkadang, diagram Nyquist terkadang tidak benar benar berbentuk semi lingkaran seperti beberapa data yang ada diatas, hal ini disebabkan oleh adanya dispersi pada frekuensi yang tinggi akibat dari kekasaran permukaan elektroda (Sunarya, 2011). Didapatkan hasil bahwa nilai tahanan polarisasi ( $R_p$ ) yang relative lebih kecil, dimana artinya akan semakin mudah untuk mengalami transfer muatan akan semakin mempermudah untuk terjadinya korosi, berada pada parameter pengelasan dengan arus 120A menggunakan elektroda E6013 pada kedalaman 10m, hasil tersebut sama dengan yang didapatkan pada pengujian polarisasi linear.

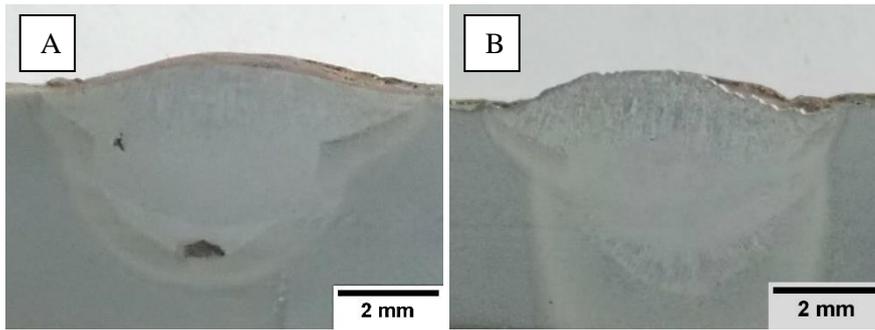
#### 4.2 Hasil Pengamatan Struktur Makro

Berikut ini adalah hasil pengamatan dari foto makro, fungsi dari foto makro adalah untuk mengetahui hasil lasan dan mengetahui adanya cacat las yang terjadi karna proses pengelasan bawah air.

- **Untuk pengelasan plat A36 dengan elektroda AWS E-6013**

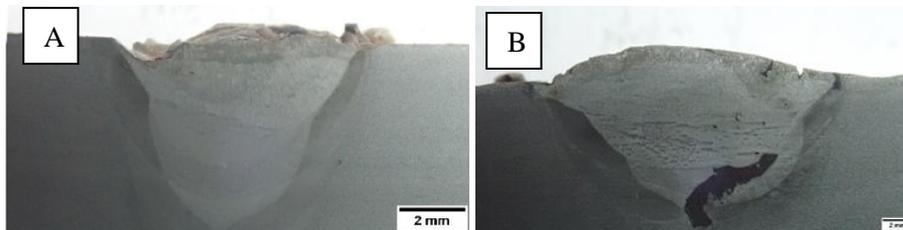


**Gambar 4. 19. a) Foto Struktur Makro pada Plat A36 dengan arus 90A menggunakan elektroda E6013 pada kedalaman 3m (b) Foto Struktur Makro pada Plat A36 dengan arus 90A menggunakan elektroda E6013 pada kedalaman 10m.**

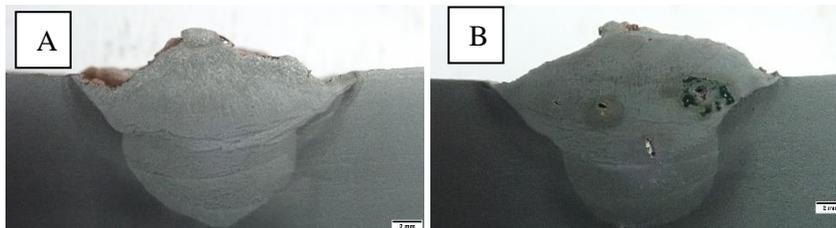


**Gambar 4. 20. (a) Foto Struktur Makro pada Plat A36 dengan arus 120A menggunakan elektroda E6013 pada kedalaman 3m (b) Foto Struktur Makro pada Plat A36 dengan arus 120A menggunakan elektroda E6013 pada kedalaman 10m.**

- Untuk pengelasan plat A36 dengan elektroda AWS E-7018

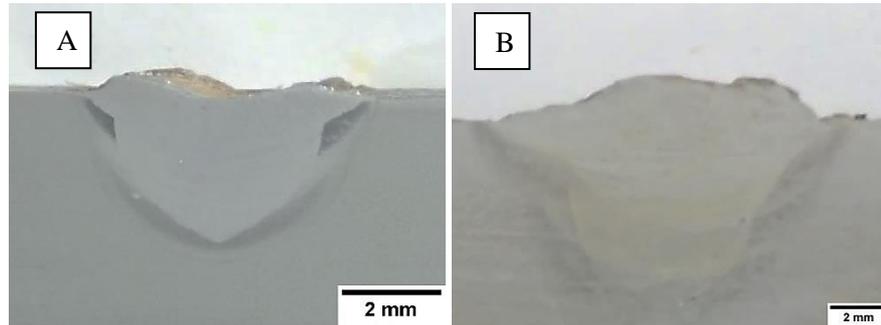


**Gambar 4. 21. (a) Foto Struktur Makro pada Plat A36 dengan arus 90A menggunakan elektroda E7018 pada kedalaman 3m (b) Foto Struktur Makro pada Plat A36 dengan arus 90A menggunakan elektroda E7018 pada kedalaman 10m.**

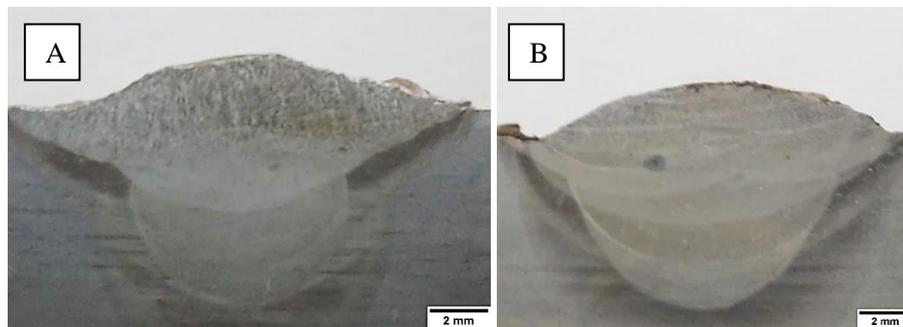


**Gambar 4. 22. a) Foto Struktur Makro pada Plat A36 dengan arus 120A menggunakan elektroda E7018 pada kedalaman 3m (b) Foto Struktur Makro pada Plat A36 dengan arus 120A menggunakan elektroda E7018 pada kedalaman 10m**

- Untuk pengelasan pipa A106 dengan elektroda AWS E-6013

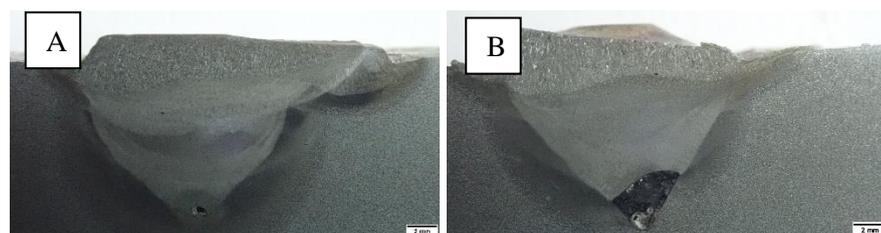


**Gambar 4. 23.** (a) Foto Struktur Makro pada Pipa A106 dengan arus 90A menggunakan elektroda E6013 pada kedalaman 3m (b) Foto Struktur Makro pada Pipa A106 dengan arus 90A menggunakan elektroda E6013 pada kedalaman 10m.

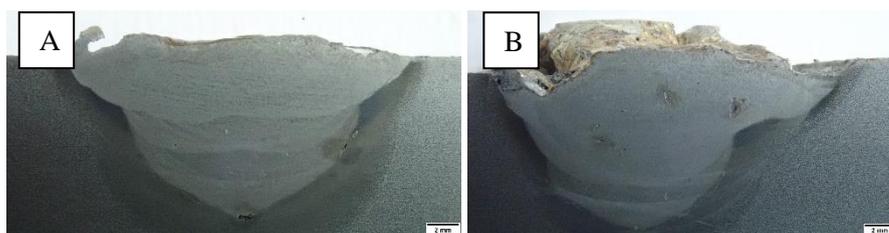


**Gambar 4. 24.** (a) Foto Struktur Makro pada Pipa A106 dengan arus 120A menggunakan elektroda E6013 pada kedalaman 3m (b) Foto Struktur Makro pada Pipa A106 dengan arus 120A menggunakan elektroda E6013 pada kedalaman 10m.

- Untuk pengelasan pipa A106 dengan elektroda AWS E-7018



**Gambar 4. 25.** Foto Struktur Makro pada Pipa A106 dengan arus 90A menggunakan elektroda E7018 pada kedalaman 3m (b) Foto Struktur Makro pada Pipa A106 dengan arus 90A menggunakan elektroda E7018 pada kedalaman 10m.



**Gambar 4. 26.** (a) Foto Struktur Makro pada Pipa A106 dengan arus 120A menggunakan elektroda E7018 pada kedalaman 3m (b) Foto Struktur Makro pada Pipa A106 dengan arus 120A menggunakan elektroda E7018 pada kedalaman 10m

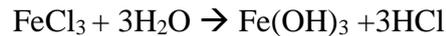
Berdasarkan foto makro dari specimen hasil pengelasan bawah air diatas, diamati bahwa daerah pengelasan seperti HAZ (*heat affected zone*), *Fusion Line* dan *Weld Metal* pada pengelasan. Ketidakteraturan pada batas daerah HAZ dapat terjadi akibat pembiasan media air yang mengganggu pandangan *welder* saat proses pengelasan. Semakin besar arus yang digunakan pada proses pengelasan maka akan menghasilkan daerah HAZ yang semakin lebar karena adanya pendinginan yang cepat. Pada hasil foto makro diatas tampak bahwa pengelasan menggunakan arus 120A menunjukkan warna yang lebih cenderung gelap dibandingkan dengan pengelasan menggunakan arus 90A.

#### 4.3 Mekanisme Korosi

Dari hasil pengujian polarisasi linear yang dilakukan kepada spesimen Plat A36 dan Pipa A106, baik di *base metal* maupun *weld metal*, didapatkan kedalaman air dalam proses pengelasan berpengaruh dalam laju korosi. Diketahui bahwa kedalaman pengelasan 3 meter memiliki resistensi korosi lebih baik dibandingkan pada kedalaman 10 meter, hal ini dikarenakan semakin dalam pengelasan yang dilakukan maka reaksi antara air dan elektroda akan semakin cepat, yang mana laju pendinginan akan lebih cepat jika semakin dalam pengelasan dilakukan, laju pendinginan yang cepat akan lebih mudah menyebabkan cacat las porositas. Porositas dalam pengelasan bawah air terjadi karna peningkatan jumlah oksigen dan hidrogen yang tinggi (Pesoa et. al, 2006). Secara negatif ion bermuatan klorida memainkan peran penting dalam proses oksidasi permukaan logam. Reaksi anodik dan katodik yang terjadi adalah :



Senyawa klorin dalam larutan elektrolit akan bereaksi dengan ion  $\text{Fe}^{3+}$  dan membentuk lapisan oksida padat ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) yang menutupi permukaan anoda sehingga terjadi korosi. Akibat reaksi di atas, lubang lubang menjadi bermuatan positif. Lubang bermuatan positif ini akan menarik ion  $\text{Cl}^-$  negatif sehingga dapat meningkatkan keasaman elektrolit sehingga mempercepat laju korosi (Ma, 2012) , berikut reaksinya:



Pengelasan bawah air memiliki beberapa efek yang buruk, salah satunya adalah laju pendinginan yang cepat dan hidrogen yang terdifusi dalam jumlah yang relative besar (Skorupa, 2009). Laju pendinginan dalam pengelasan bawah air lebih tinggi dibandingkan pengelasan tanah (Labanowski, 2016). Hidrogen yang terperangkap di dalam logam las yang akan menyebabkan cacat las porositas (Zhang, 2015). Cacat porositas yang juga menjadi salah satu penyebab terjadinya korosi sumuran (*pitting corrosion*). Cacat pengelasan yang muncul pada pengelasan dapat memperburuk ketahanan korosi suatu material. Banyaknya porositas yang terjadi pada hasil pengelasan bawah air juga mempengaruhi laju korosinya. Sehingga, kedalaman air pada proses pengelasan akan mempengaruhi laju korosi hasil pengelasan. Selain itu, jumlah oksigen dan hidrogen dalam kolam las meningkat karena disosiasi air, gas hidrogen disekitar busur las akan cepat menyebar dalam air. Tingginya kandungan hidrogen akan menyebabkan terbentuknya *hydrogen crack* yang merupakan salah satu sumber terjadinya korosi (Labanowski, 2016). Ditambah lingkungan pengelasan bawah air akan mempengaruhi keseimbangan saat proses pengelasan.

Pengelasan menggunakan elektroda E7018 cenderung memiliki resistensi korosi lebih baik, hal ini disebabkan karena elektroda E6013 oleh sulfur (S) yang mempengaruhi karakteristik penetrasi las yang baik, meskipun akan mempengaruhi ketahanan korosi, unsur S pada elektroda yang lebih tinggi yang dimiliki oleh elektroda E6013 yaitu sebesar 0,01% dimana akan mempengaruhi tingginya laju korosi pada pengelasan. Selain itu pada elektroda E7018 ditemukan bahwa unsur phosphor (P) juga lebih tinggi 0,001% dibandingkan elektroda E6013 dimana akan memberikan efek resistensi korosi yang lebih tinggi. Selain itu unsur lain yang mempengaruhi ketahanan korosi adalah Mangan (Mn), semakin tinggi unsur Mn

maka akan semakin tinggi pula resistensi korosinya, hal itu dapat dilihat dari unsur Mn yang lebih tinggi pada elektroda E7018.

Hasil pengujian polarisasi linear tersebut juga didukung oleh hasil dari pengujian *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS) bahwa nilai laju korosi tertinggi berada pada parameter pengelasan menggunakan arus 120A pada kedalaman 10 meter karena memiliki nilai Rp yang relative rendah dibandingkan dengan parameter pengelasan lain. Tahanan tersebut mewakili adanya perpindahan muatan pada antar muka antara spesimen uji dan larutan elektrolit. Dengan peningkatan nilai tahanan, menunjukkan adanya lapisan pasif yang dibentuk di permukaan logam, hal ini berkaitan dengan perpindahan elektron, semakin lama elektron berpindah maka tahanan yang terbentuk akan semakin besar dan laju korosi akan semakin tinggi, begitu juga sebaliknya.

#### 4.4 Hasil Desain Eksperimen

Desain Experimen digunakan untuk mengetahui faktor yang berpengaruh signifikan terhadap respon pengujian. Uji analysis of varian (ANOVA) digunakan untuk mengetahui faktor yang berpengaruh secara signifikan terhadap respon pengujian. Hipotesa awal ( $H_0$ ) dan Hipotesa alternatif ( $H_1$ ) merupakan bagian dari uji ANOVA. Software minitab digunakan untuk menghitung kriteria daerah penolakan. Penelitian ini memiliki hipotesa sebagai berikut:

- a. Hipotesis pada pengujian korosi:

$$H_0 = \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \tau_4 = 0 \text{ (Tidak Berpengaruh)}$$

$$H_1 = \tau_1 \neq 0 \text{ (Berpengaruh)}$$

Pada hipotesa alternatif dijelaskan untuk faktor yang tidak berpengaruh dari hasil pengujian korosi. Beberapa kriteria penolakan yaitu  $H_0$  ditolak ketika nilai dari P-value kurang dari  $\alpha_s$ , nilai dari  $\alpha_s$  adalah 0,05 yang berarti parameter mempunyai pengaruh pada hasil atau respon. Hasil ANOVA pada respon pengujian korosi dihitung dengan menggunakan *software* minitab 19, nilai P-value digunakan untuk acuan sebagai acuan faktor yang paling berpengaruh signifikan. Pada Gambar 4.29 dan 4.30 menyajikan hasil uji anova untuk uji korosi.

### Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Kedalaman	1	0,000006	0,000006	0,09	0,762
Elektroda	1	0,014113	0,014113	222,32	0,000
Ampere	1	0,004483	0,004483	70,61	0,000
Error	20	0,001270	0,000063		
Lack-of-Fit	4	0,000555	0,000139	3,11	0,045
Pure Error	16	0,000715	0,000045		
Total	23	0,019872			

**Gambar 4. 27. Pengujian ANOVA pada Plat A36**

### Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Kedalaman	1	0,04905	0,049051	25,58	0,000
Elektroda	1	0,02118	0,021182	11,05	0,003
Ampere	1	0,01617	0,016172	8,43	0,009
Error	20	0,03835	0,001917		
Lack-of-Fit	4	0,01301	0,003253	2,05	0,135
Pure Error	16	0,02533	0,001583		
Total	23	0,12475			

**Gambar 4. 28. Pengujian ANOVA pada pipa A106**

Berdasarkan pengujian ANOVA diatas, didapatkan bahwa faktor kedalaman pengelasan berpengaruh secara signifikan pada pipa A106, namun tidak signifikan terhadap Plat A36.

***HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN***

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1. Kesimpulan**

Adapun kesimpulan yang bisa diambil dari percobaan pengelasan bawah air menggunakan proses SMAW pada plat A36 dan pipa A106 dengan variasi parameter pengelasan adalah :

1. Dari hasil data pengujian laju korosi telah didapatkan, terlihat bahwa pengelasan dengan kedalaman 3 meter lebih memiliki resistensi korosi yang lebih baik dibandingkan dengan pengelasan pada kedalaman 10 meter. Hal tersebut ditunjukkan dengan hasil pengujian polarisasi linear dan EIS dimana tahanan polarisasi pada kedalaman 10 meter lebih rendah dibandingkan 3 meter. Sehingga diketahui bahwa kedalaman pengelasan berpengaruh terhadap laju korosi. Hal ini disebabkan oleh semakin tingginya laju pendinginan yang akan mempengaruhi hasil pengelasan, semakin tinggi laju pendinginan maka akan semakin mudah terbentuknya *hydrogen crack*. Dimana hal tersebut faktor tersebut adalah penyebab korosi.
2. Pada hasil pengujian ANOVA juga didapatkan bahwa faktor kedalaman pengelasan berpengaruh secara signifikan terhadap respon pengujian laju korosi pada Pipa A106, namun tidak signifikan pada Plat A36.

## 5.2. Saran

Saran yang dapat diberikan untuk penelitian lebih lanjut adalah sebagai berikut :

1. Untuk Plat A36 pada penelitian selanjutnya dapat dilakukan pengujian pengelasan dengan menambahkan rentang variasi arus dan replikasi agar didapatkan hasil yang signifikan, menambahkan pengujian SEM EDS untuk melihat lebih jelas mekanisme korosi yang terjadi, dan juga pengujian mekanik

## DAFTAR PUSTAKA

- Allou, D., Ould Brahim, I., Cheniti, B., Fides, M., Hvizdos, P., Miroud, D., & Ziouche, A. (2021). Effect of Post Weld Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Behaviors of Weld Overlay Inconel 182 on 4130 Steel Substrate Using SMAW Process. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 10(5), 567-578.
- Bresler, S.E., Zakharov, G.M. and Kirillov, S.V., 1962. The diffusion of synthetic polyisoprene macromolecules into natural rubber. *Polymer Science USSR*, 3(5), pp.832-837.
- Fontana, M. G. (1987). *Corrosion Engineering*. New York: Mc Graw - Hill Book Company.
- Giarola, J. M., Calderón-Hernández, J. W., Quispe-Avilés, J. M., Avila, J. A., & Bose Filho, W. W. (2021). Hydrogen-induced cracking and corrosion behavior of friction stir welded plates of API 5L X70 pipeline steel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(55), 28166-28179.
- Hassanzadeh, M. and Rahmani, K., 2021. Hydrostatic test of storage tanks using seawater and corrosion considerations. *Engineering Failure Analysis*, 122, p.105267.
- Huang, B. S., Yang, J., Lu, D. H., & Bin, W. J. (2016). Study on the microstructure, mechanical properties and corrosion behaviour of S355JR/316L dissimilar welded joint prepared by gas tungsten arc welding multi-pass welding process. *Science and Technology of Welding and Joining*, 21(5), 381-388.
- N.C. Hosking, M.A.Ström, P.H.Shipway and C.D.Rudd, *Corros. Sci.* 49, (2007), 3669
- Jegdić, B., Bobić, B., Radojković, B., Alić, B., & Radovanović, L. (2019). Corrosion resistance of welded joints of X5CrNi18-10 stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 266, 579-587.
- Jones, D., 1992. Principles and prevention of corrosion. *Macmillan Publishing Company(USA)*, 1992,, p.568.
- Ketta, Mc. J.J. and Cunningham, W.A., 1992, "Encyclopedia of Chemical Processing and Design", Vol. 40, Marcel Decker, Inc., New York
- Labanowski, J., Prokop-Strzelczynska, K., Rogalski, G. and Fydrych, D., 2016. The effect of wet underwater welding on cold cracking susceptibility of duplex stainless steel. *Advances in Materials Science*, 16(2), p.68.
- Lai, R., Cai, Y., Wu, Y., Li, F. and Hua, X., 2016. Influence of absorbed nitrogen on microstructure and corrosion resistance of 2205 duplex stainless steel joint processed by fiber laser welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 231, pp.397-405.

- Lee, Dasol & Lee, Hyunseop & Jeong, Haedo. (2016). Slurry components in metal chemical mechanical planarization (CMP) process: A review. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 17. 1751-1762. 10.1007/s12541-016-0201-y.
- Liduino, V. S., Lutterbach, M. T. S., & Sérvulo, E. F. C. (2017). Corrosion behavior of carbon steel API 5L X65 exposed to seawater. *International Journal of Engineering and Technical Research*, 7(10).
- Liu, G.J.; Zhu, S. Shaft corrosion problem for the circulating water pump treatment. *Electr. Power* 2006, 39, 52–55.
- Lu, Y., Jing, H., Han, Y. and Xu, L., 2016. Effect of welding heat input on the corrosion resistance of carbon steel weld metal. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 25(2), pp.565-576.
- Ma, F.Y., 2012. Corrosive effects of chlorides on metals. *Pitting corrosion*, 294, pp.139-78.
- Marsela, I. and Sunarya, Y., 2011. Uji Aktivitas Sistin, Simetidin dan Produk Modifikasi Sistin oleh Simetidin sebagai Inhibitor Korosi Baja Karbon dalam HCl 0,5 M. *stk*, 158.
- Omajene, J.E., Martikainen, J., Kah, P. and Pirinen, M., 2014. Fundamental difficulties associated with underwater wet welding. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 4(6), pp.26-31.
- Ouali, N., Khenfer, K., Belkessa, B., Fajoui, J., Cheniti, B., Idir, B., & Branchu, S. (2019). Effect of heat input on microstructure, residual stress, and corrosion resistance of UNS 32101 lean duplex stainless steel weld joints. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 28(7), 4252-4264.
- Paulraj, P. and Garg, R., 2016. Effect of welding parameters on pitting behavior of GTAW of DSS and super DSS weldments. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 19(2), pp.1076-1083.
- Pessoa, E.C.P., Bracarense, A.Q., Zica, E.M., Liu, S. and Perez-Guerrero, F., 2006. Porosity variation along multipass underwater wet welds and its influence on mechanical properties. *Journal of Materials Processing Technology*, 179(1-3), pp.239-243.
- Sinhmar, S., & Dwivedi, D. K. (2019). Effect of weld thermal cycle on metallurgical and corrosion behavior of friction stir weld joint of AA2014 aluminium alloy. *Journal of Manufacturing Processes*, 37, 305-320.
- Skorupa, A. and Bal, M., 1996. The effect of aqueous environments on the quality of underwater-welded joints. *Welding international*, 10(2), pp.95-98.
- Sun, K., Zeng, M., Shi, Y., Hu, Y., & Shen, X. (2018). Microstructure and corrosion behavior of S32101 stainless steel underwater dry and wet welded joints. *Journal*

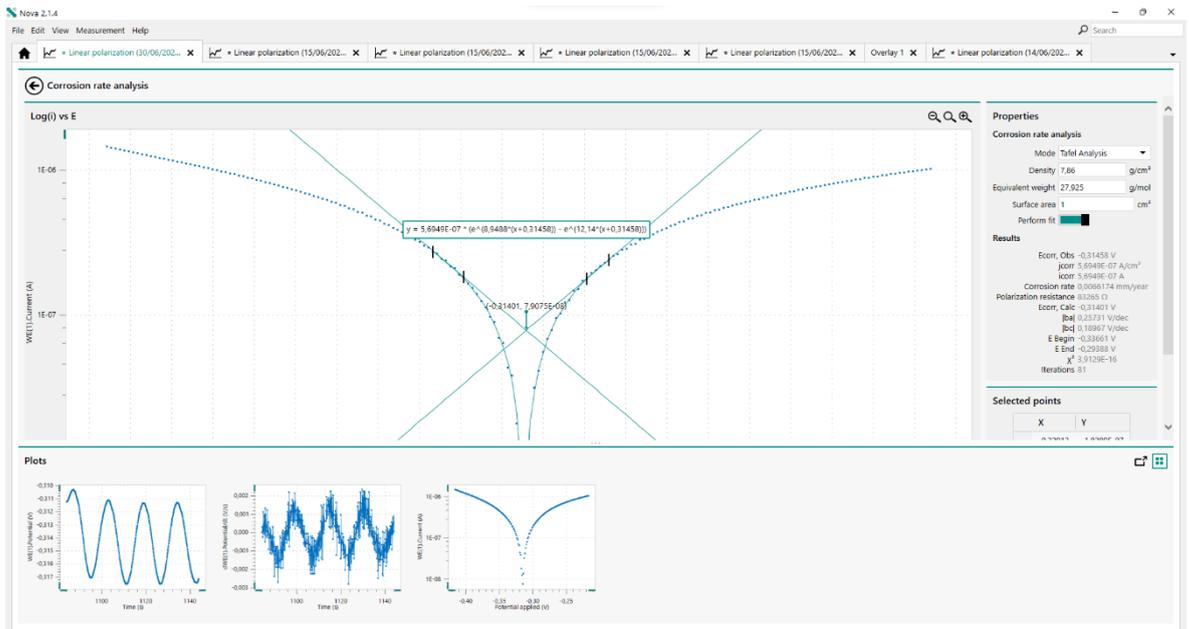
- of Materials Processing Technology, 256, 190-201.
- Surojo, E., Wicaksana, N. I., Saputro, Y. C. N., Budiana, E. P., Muhayat, N., & Prabowo, A. R. (2020). Effect of Welding Parameter on the Corrosion Rate of Underwater Wet Welded SS400 Low Carbon Steel. *Applied Sciences*, 10(17), 5843.
- Surojo, Eko & Gumilang, Aziz & Triyono, Triyono & Prabowo, Aditya & Budiana, Eko & Muhayat, Nurul. (2021). Effect of Water Flow on Underwater Wet Welded A36 Steel. *Metals*. 11. 682. 10.3390/met11050682.
- Terán, G., Cuamatzi-Meléndez, R., Albiter, A., Maldonado, C., & Bracarense, A. Q. (2014). Characterization of the mechanical properties and structural integrity of T-welded connections repaired by grinding and wet welding. *Materials Science and Engineering: A*, 599, 105-115.
- Trethewey, K. R. (1991). *Korosi Untuk Mahasiswa dan Rekayasawan*. Jakarta: PT. Gramedia Pustaka Utama.
- Wang, J., Ma, J., Liu, Y., Zhang, T., Wu, S., & Sun, Q. (2020). Influence of Heat Input on Microstructure and Corrosion Resistance of Underwater Wet-Welded E40 Steel Joints. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 29(11), 6987-6996.
- Yingsamphancharoen, T., Srisuwan, N. and Rodchanarowan, A., 2016. The electrochemical investigation of the corrosion rates of welded pipe ASTM A106 grade B. *Metals*, 6(9), p.207.
- Zakharov, B. (1962). *Heat treatment of metals*. Foreign Languages Publishing House.
- Zhang, H.T., Dai, X.Y., Feng, J.C. and Hu, L.L., 2015. Preliminary investigation on real-time induction heating-assisted underwater wet welding. *Welding Journal*, 1, pp.8-15.

***HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN***

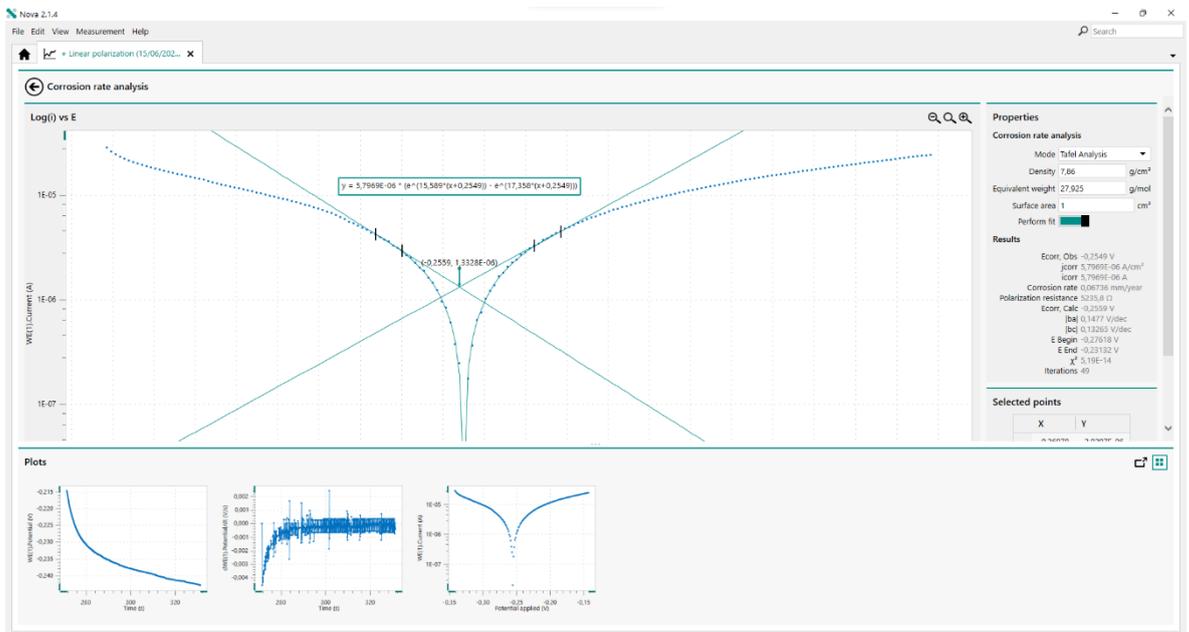
# LAMPIRAN A

## HASIL PENGUJIAN POLARISASI LINEAR PADA PLAT A36

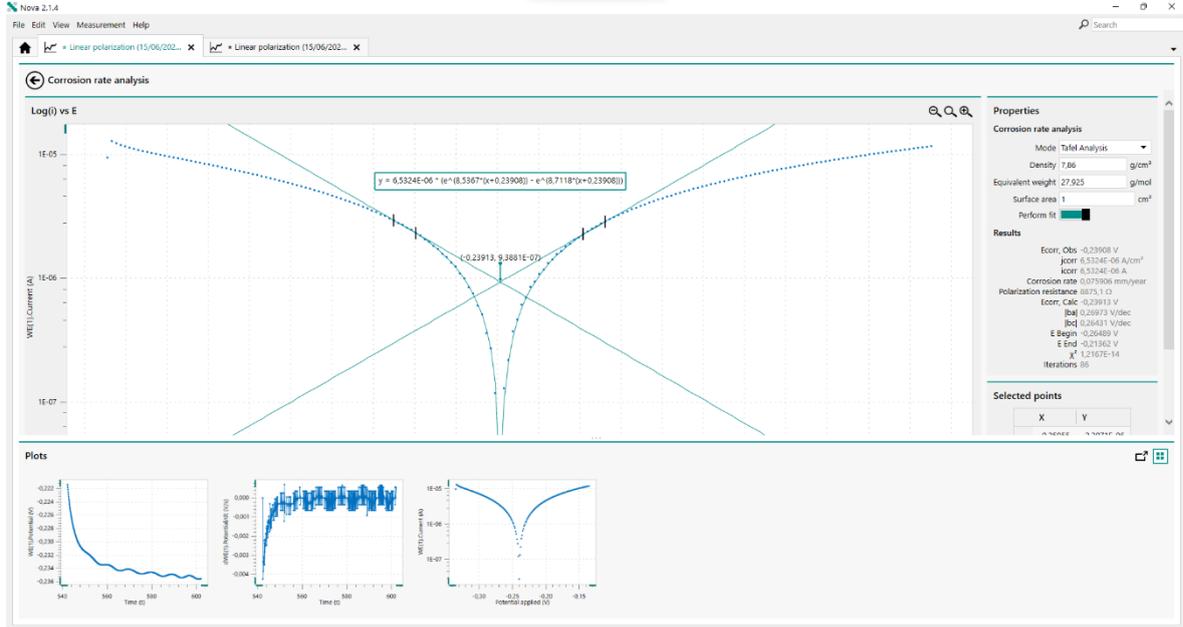
Base Metal Plat A36



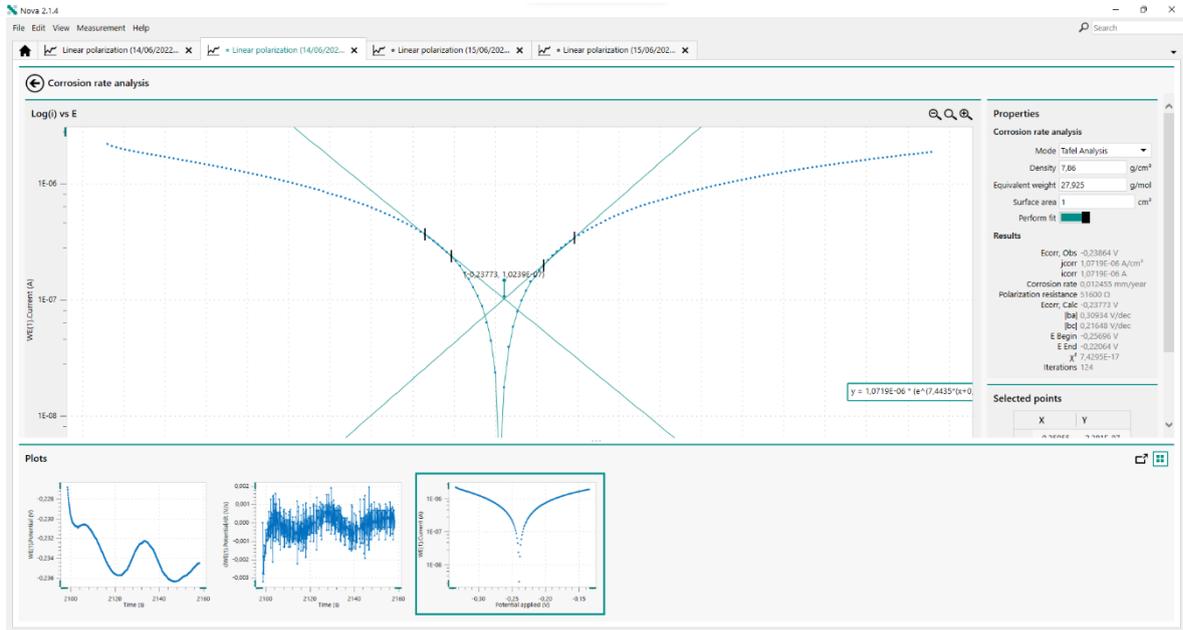
Spesimen Pengelasan 90A elektroda E6013 kedalaman 3m



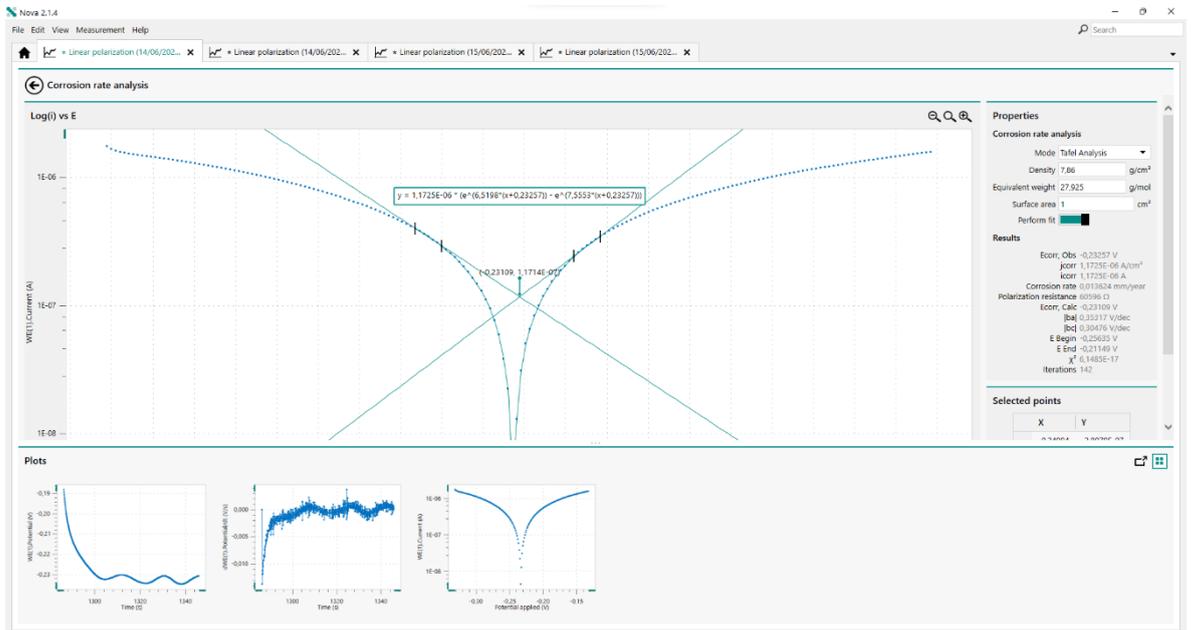
Spesimen Pengelasan 90A elektroda E6013 kedalaman 10m



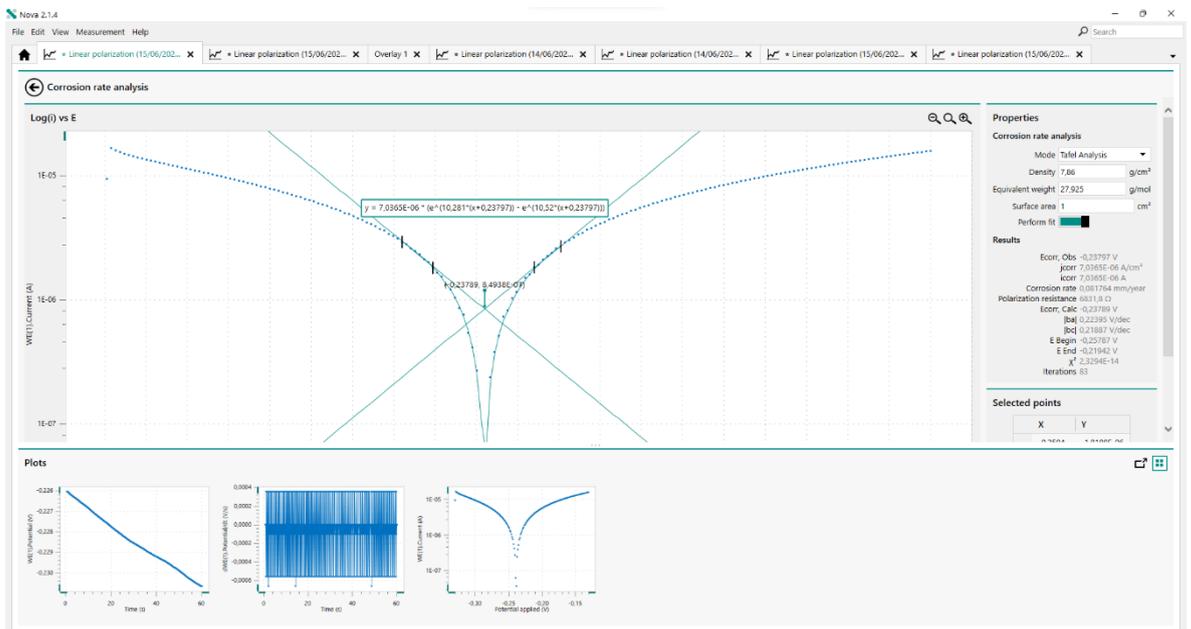
Spesimen Pengelasan 90A elektroda E7018 kedalaman 3m



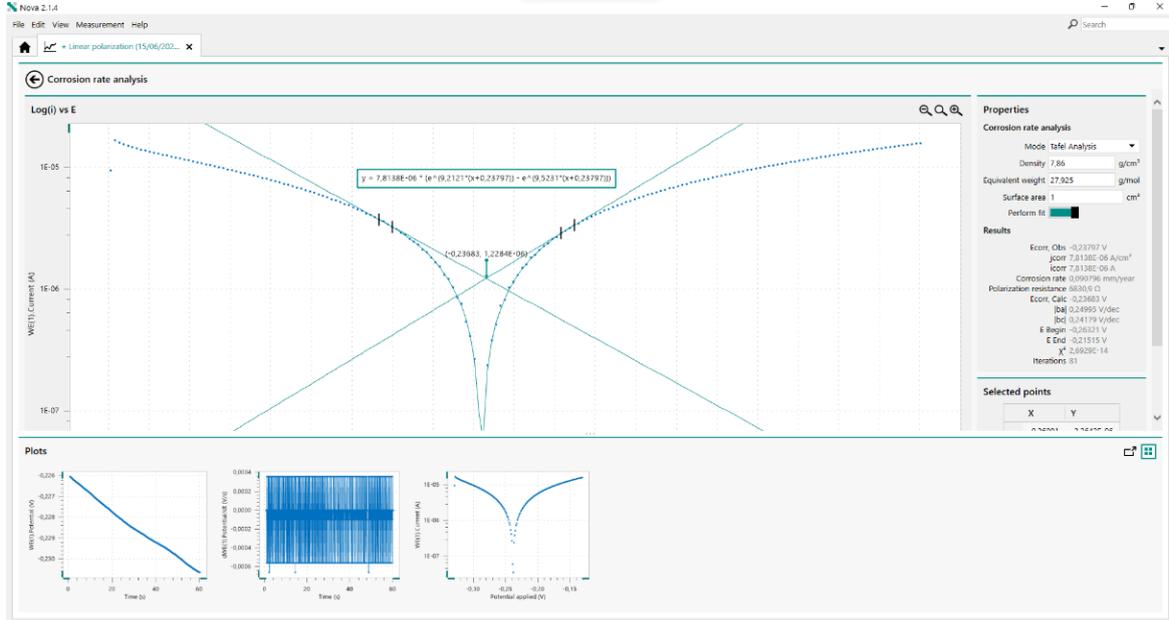
Spesimen Pengelasan 90A elektroda E7018 kedalaman 10m



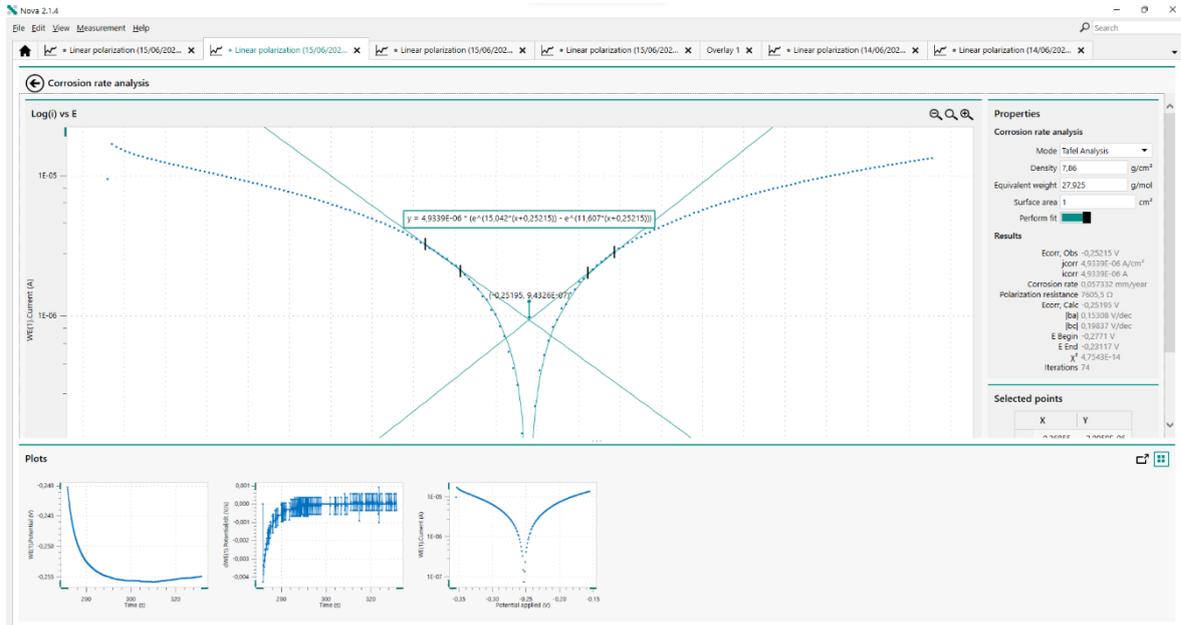
Spesimen Pengelasan 120A elektroda E6013 kedalaman 3m



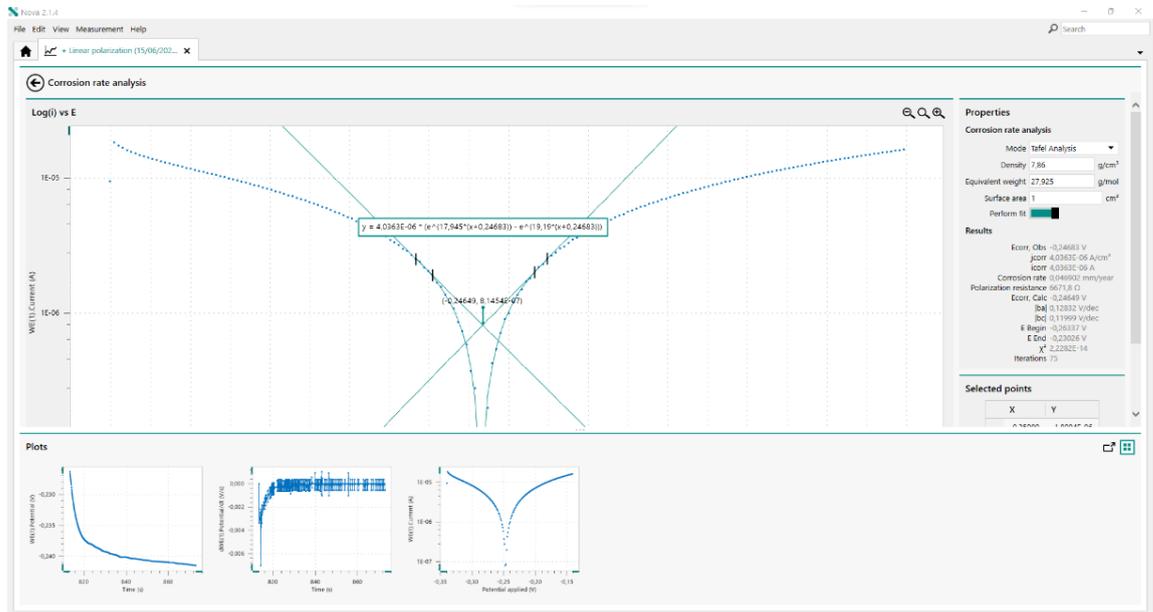
Spesimen Pengelasan 120A elektroda E6013 kedalaman 10m



Spesimen Pengelasan 120A elektroda E7018 kedalaman 3m



## Spesimen Pengelasan 120A elektroda E7018 kedalaman 10m

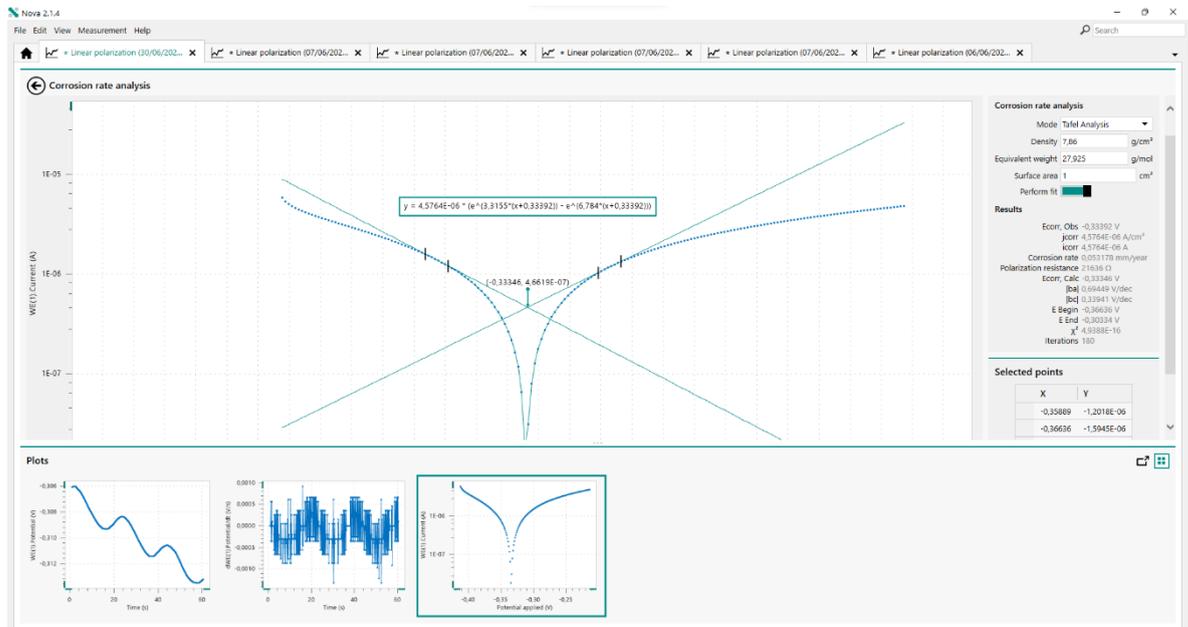


***HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKA***

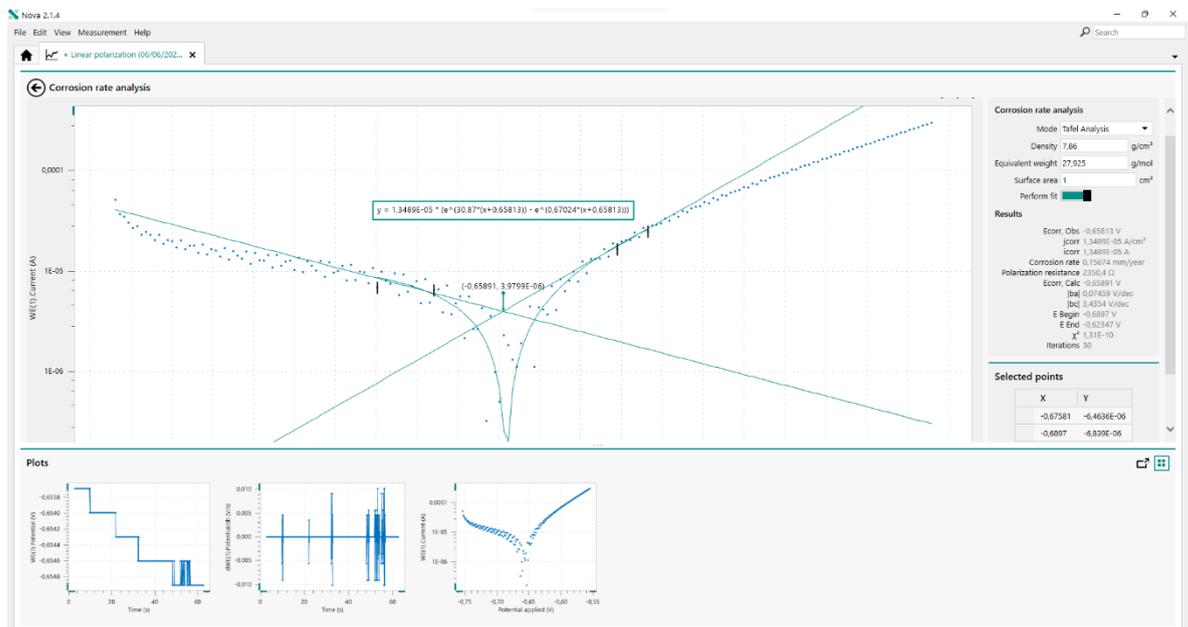
# LAMPIRAN B

## HASIL PENGUJIAN POLARISASI LINEAR PADA PIPA A106

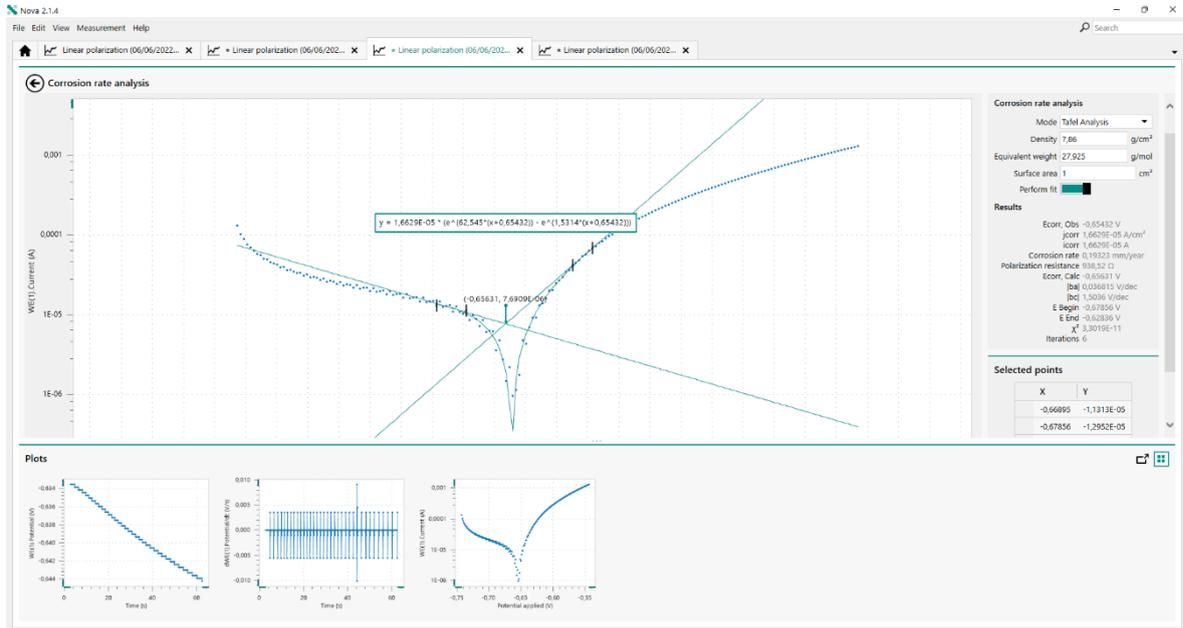
Base Metal Pipa A106



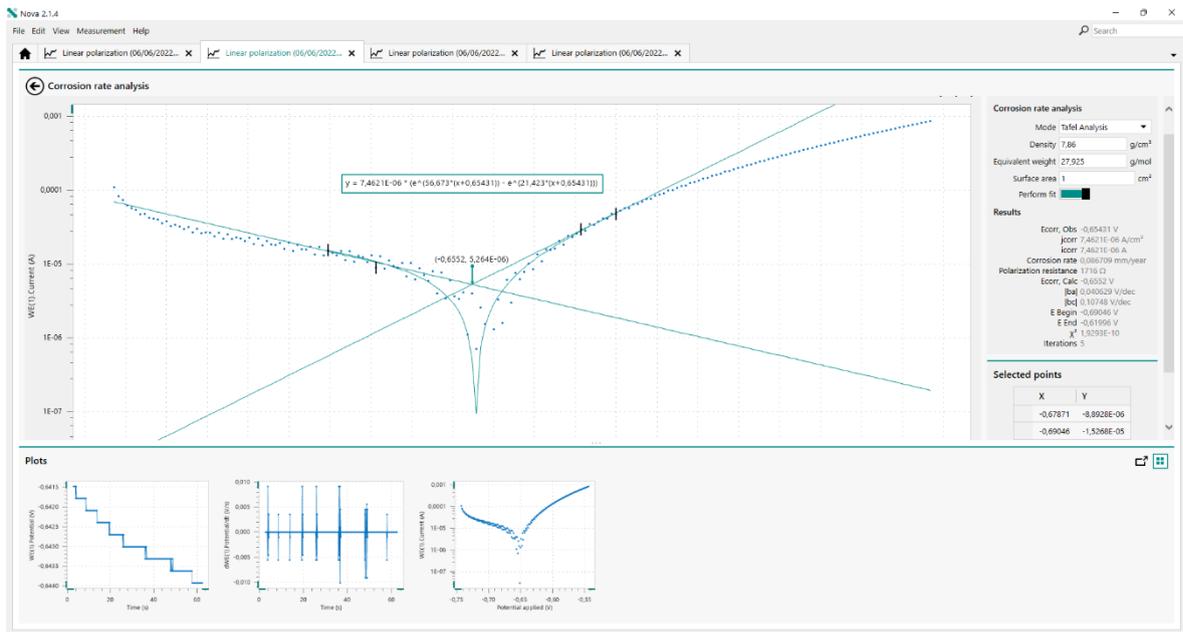
Spesimen Pengelasan 90A elektroda E6013 kedalaman 3m



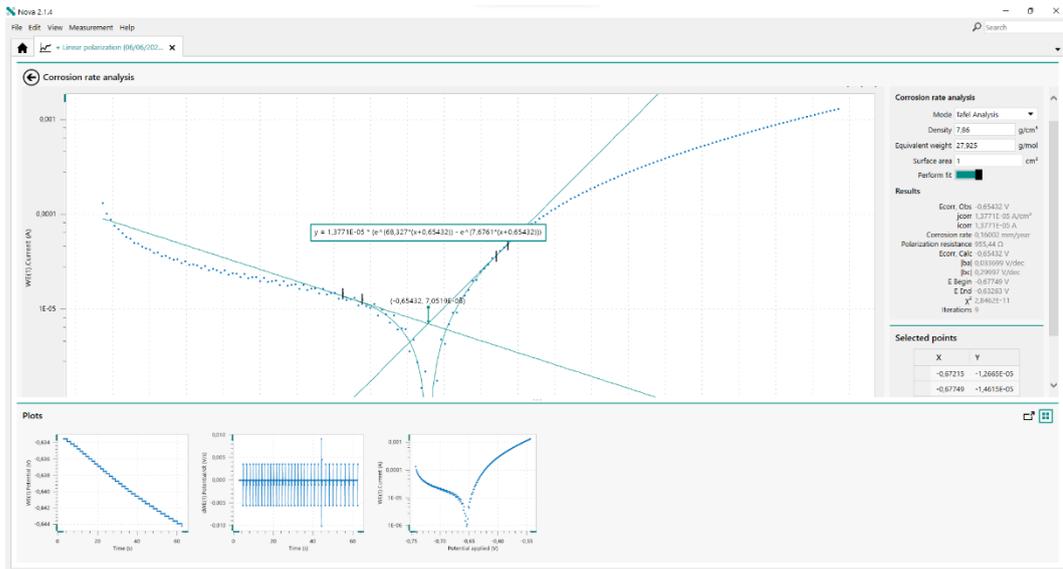
Spesimen Pengelasan 90A elektroda E6013 kedalaman 10m



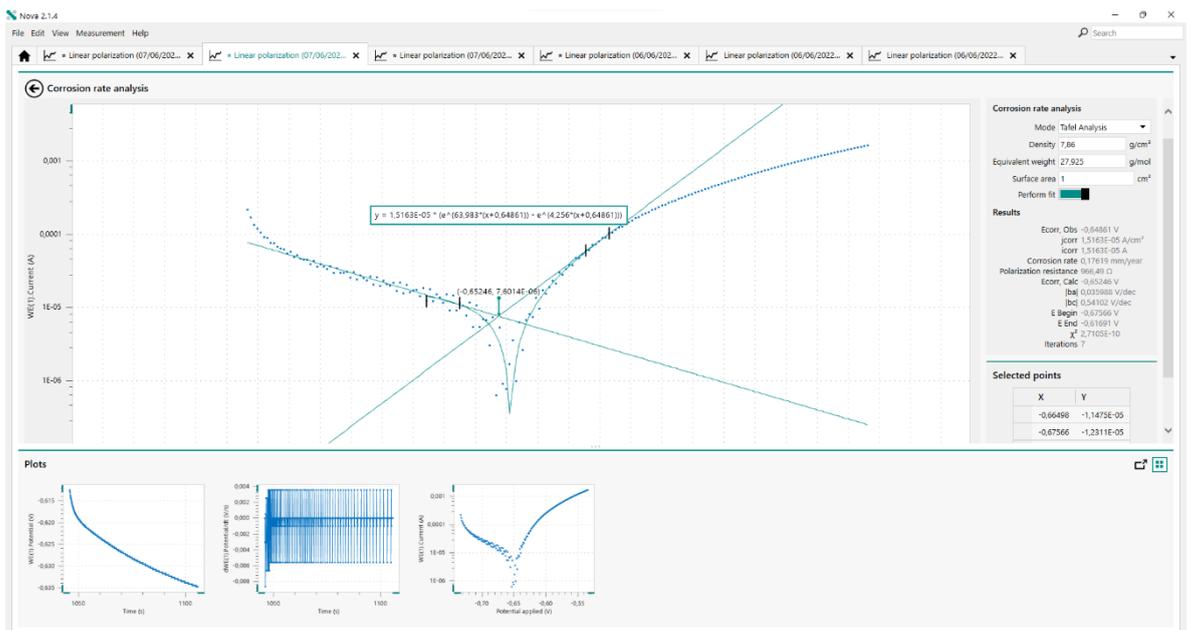
Spesimen Pengelasan 90A elektroda E7018 kedalaman 3m



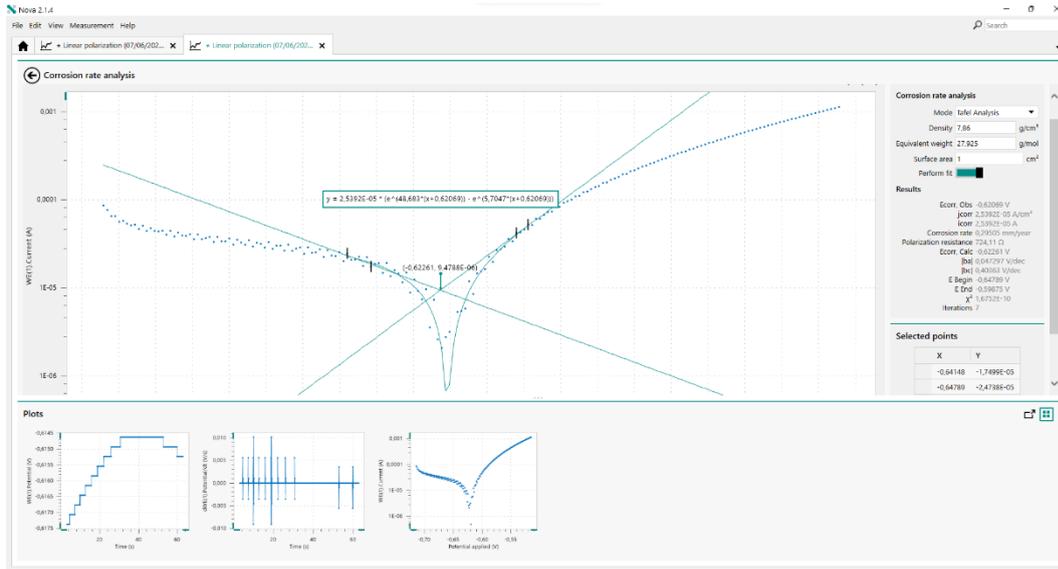
Spesimen Pengelasan 90A elektroda E7018 kedalaman 10m



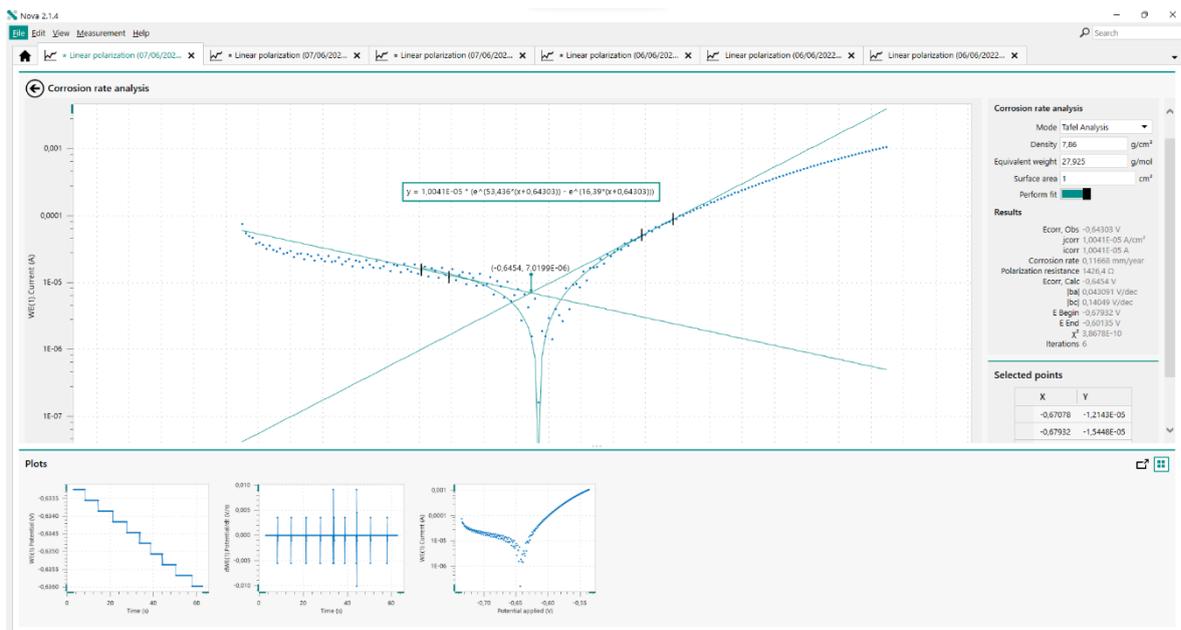
Spesimen Pengelasan 120A elektroda E6013 kedalaman 3m



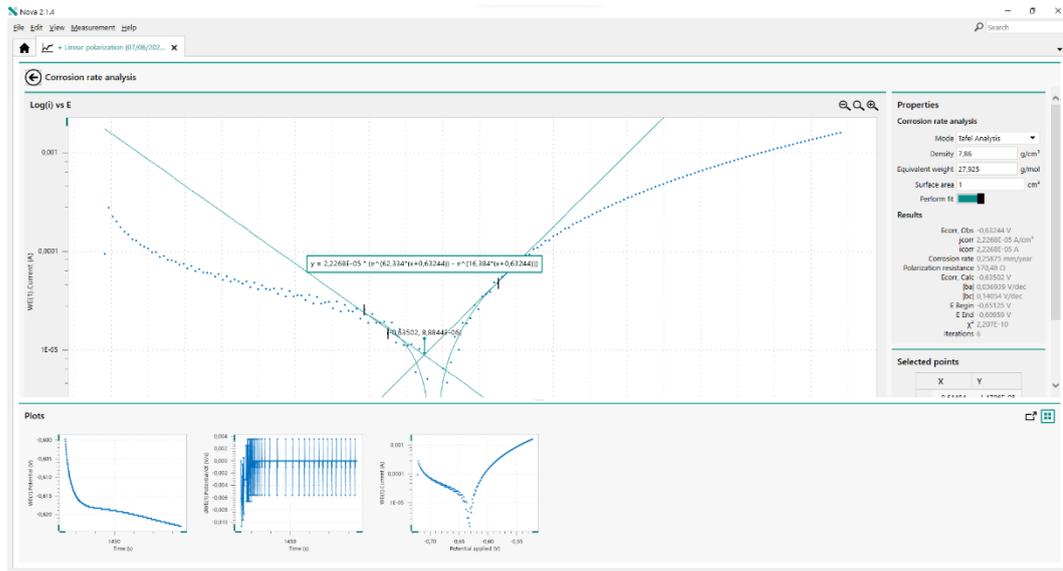
Spesimen Pengelasan 120A elektroda E6013 kedalaman 10m



Spesimen Pengelasan 120A elektroda E7018 kedalaman 3m



## Spesimen Pengelasan 120A elektroda E7018 kedalaman 10m



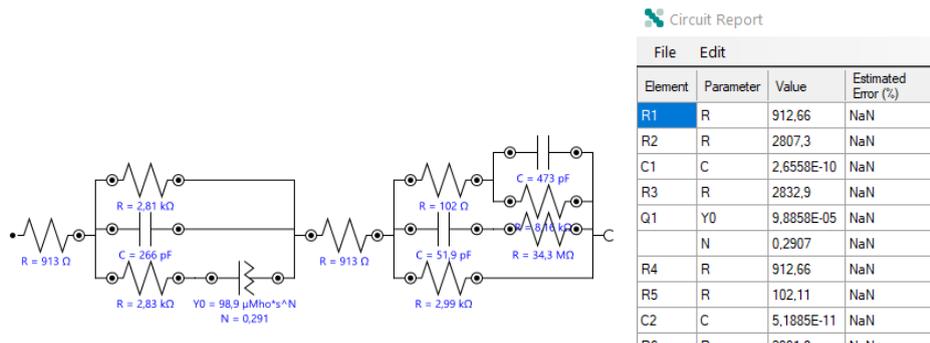
*HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN*

# LAMPIRAN C

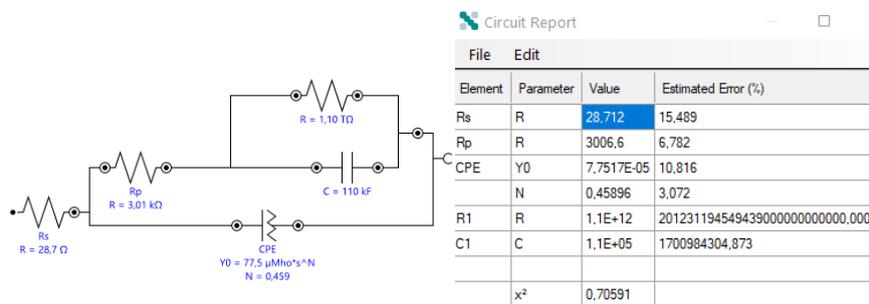
## SIRKUIT FITTING UNTUK PENGUJIAN EIS PADA PLAT A36

### A36

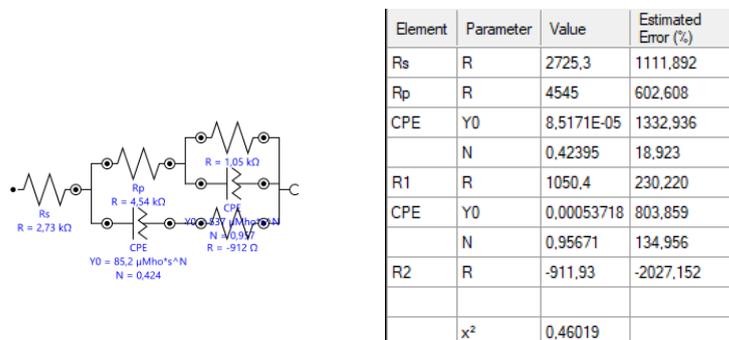
#### 1. Sirkuit dan sirkuit report untuk fitting base metal Plat A36



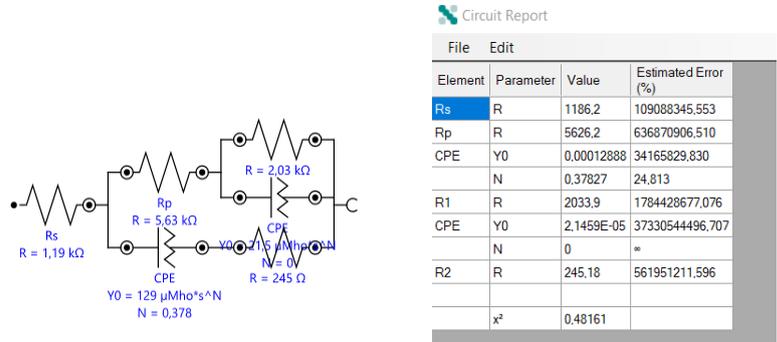
#### 2. Sirkuit dan sirkuit report untuk fitting parameter pengelasan 90 A E6013 kedalaman 3m



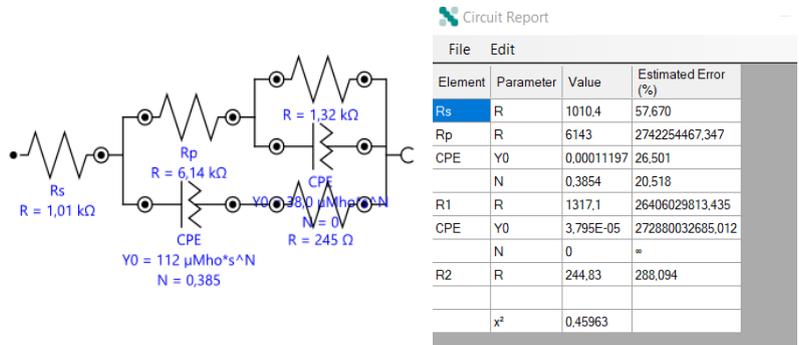
#### 3. Sirkuit dan sirkuit report untuk fitting parameter pengelasan 90 A E6013 kedalaman 10m



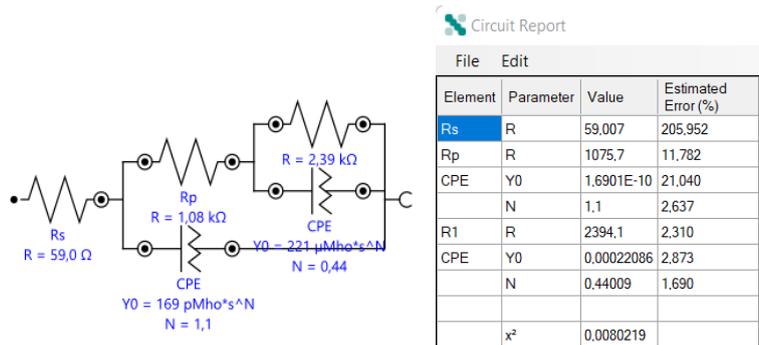
4. Sirkuit dan sirkuit report untuk fitting parameter pengelasan 90 A E7018 kedalaman 3m



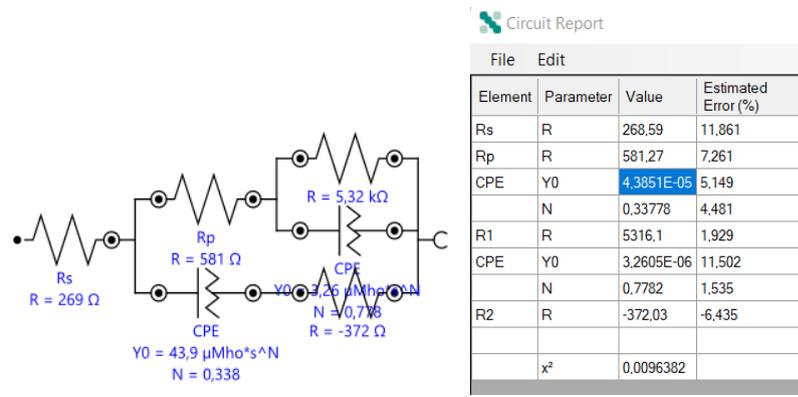
5. Sirkuit dan sirkuit report untuk fitting parameter pengelasan 90 A E7018 kedalaman 10m



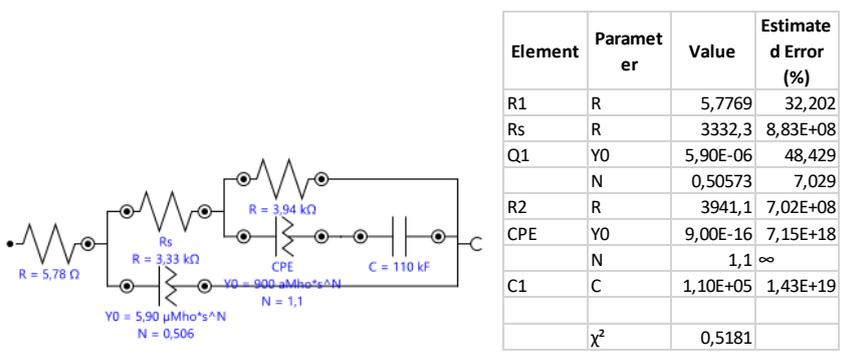
6. Sirkuit dan sirkuit report untuk fitting parameter pengelasan 120 A E6013 kedalaman 3m



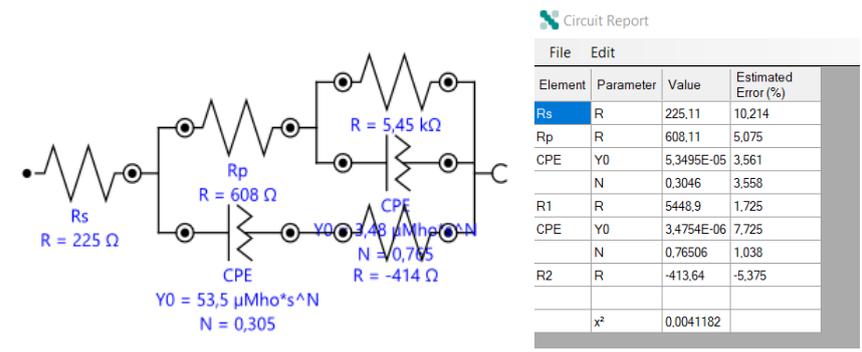
7. Sirkuit dan sirkuit report untuk fitting parameter pengelasan 129 A E6013 kedalaman 10m



8. Sirkuit dan sirkuit report untuk fitting parameter pengelasan 120 A E7018 kedalaman 3m



9. Sirkuit dan sirkuit report untuk fitting parameter pengelasan 120 A E7018 kedalaman 10m

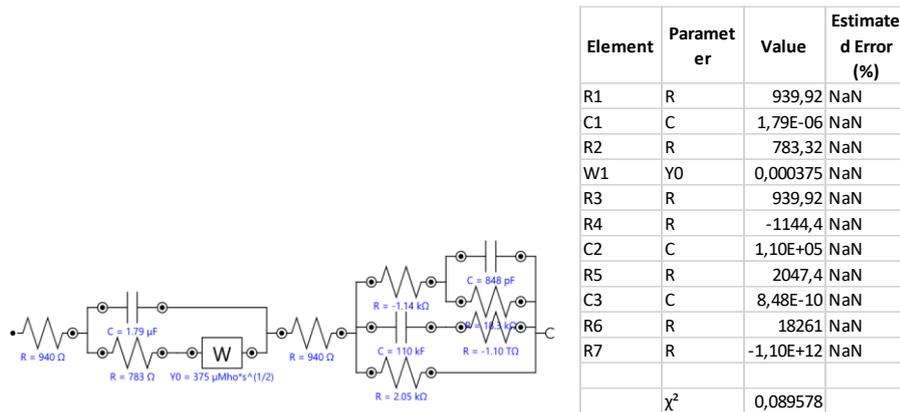


*HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN*

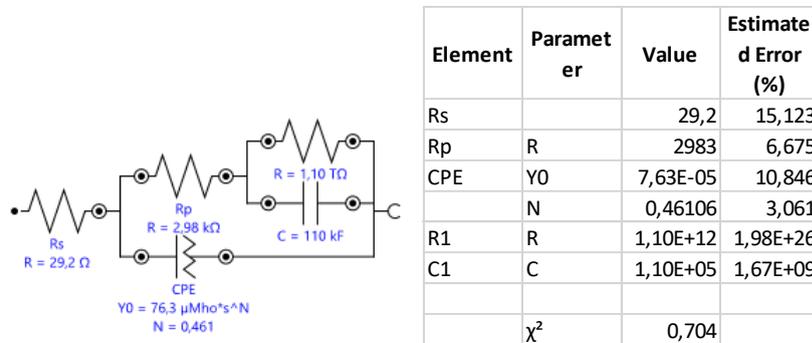
## LAMPIRAN D

### SIRKUIT FITTING UNTUK PENGUJIAN EIS PADA PIPA A106

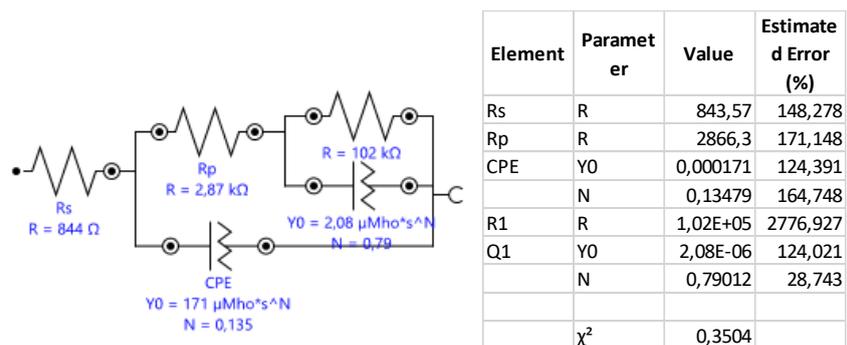
#### 1. Sirkuit dan sirkuit report untuk fitting base metal Plat A36



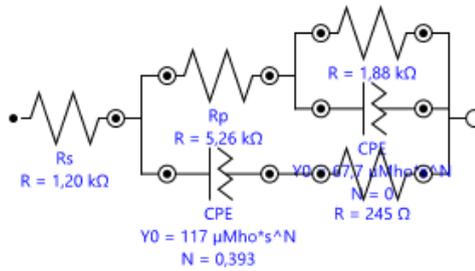
#### 2. Sirkuit dan sirkuit report untuk fitting parameter pengelasan 90 A E6013 kedalaman 3m



#### 3. Sirkuit dan sirkuit report untuk fitting parameter pengelasan 90 A E6013 kedalaman 10m

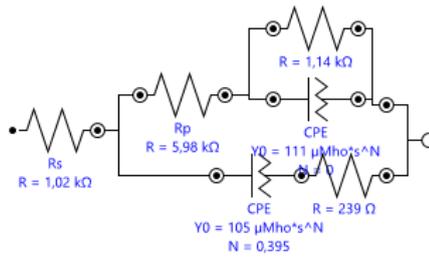


4. Sirkuit dan sirkuit report untuk fitting parameter pengelasan 90 A E7018 kedalaman 3m



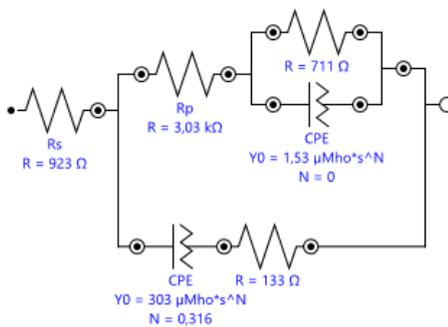
Element	Parameter	Value	Estimated Error (%)
Rs	R	1199,1	1,28E+08
Rp	R	5260,5	3,42E+08
CPE	Y0	0,000117	44706333
	N	0,39277	22,488
R1	R	1877,1	96701734
CPE	Y0	6,77E-05	1,41E+10
	N	0	∞
R2	R	245,43	6,75E+08
	$\chi^2$	0,46956	

5. Sirkuit dan sirkuit report untuk fitting parameter pengelasan 90 A E7018 kedalaman 10m



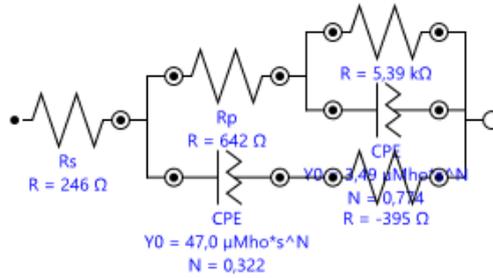
Element	Parameter	Value	Estimated Error (%)
Rs	R	1024,8	67,372
Rp	R	5983,5	4,25E+08
CPE	Y0	0,000105	94,137
	N	0,39531	19,237
R1	R	1136,1	4,6E+09
CPE	Y0	0,000111	2,57E+10
	N	0	∞
R2	R	238,89	354,8
	$\chi^2$	0,453	

6. Sirkuit dan sirkuit report untuk fitting parameter pengelasan 120 A E6013 kedalaman 3m



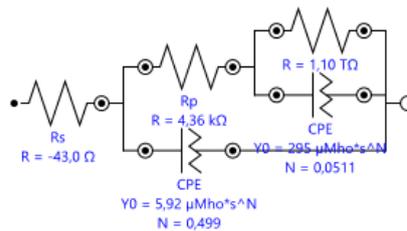
Element	Parameter	Value	Estimated Error (%)
Rs	R	923,08	15,308
CPE	Y0	0,000303	157,397
	N	0,31626	48,388
Rp	R	3027,7	7,77E+08
R1	R	133,12	190,198
R2	R	710,82	6,28E+09
CPE	Y0	1,53E-06	1,09E+13
	N	0	∞
	$\chi^2$	0,48001	

7. Sirkuit dan sirkuit report untuk fitting parameter pengelasan 129 A E6013 kedalaman 10m



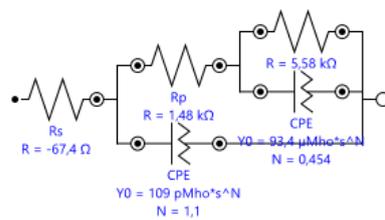
Element	Parameter	Value	Estimated Error (%)
Rs	R	245,77	10,197
Rp	R	641,67	5,345
CPE	Y0	4,70E-05	3,725
	N	0,32236	3,395
R1	R	5386,8	1,53
CPE	Y0	3,49E-06	7,916
	N	0,77378	1,088
R2	R	-395,32	-4,655
	$\chi^2$	0,004721	

8. Sirkuit dan sirkuit report untuk fitting parameter pengelasan 120 A E7018 kedalaman 3m



Element	Parameter	Value	Estimated Error (%)
Rs	R	-43,036	-92,442
Rp	R	4356,2	8895,453
CPE	Y0	5,92E-06	116,991
	N	0,49855	18,075
R1	R	1,10E+12	3,92E+12
CPE	Y0	0,000295	1265,992
	N	0,051143	23307,41
	$\chi^2$	0,3723	

9. Sirkuit dan sirkuit report untuk fitting parameter pengelasan 120 A E7018 kedalaman 10m



Element	Parameter	Value	Estimated Error (%)
Rs	R	-67,428	-351,42
Rp	R	1475,4	15,721
CPE	Y0	1,09E-10	24,371
	N	1,1	3,244
R1	R	5581,2	1,909
CPE	Y0	9,34E-05	2,376
	N	0,45362	1,268
	$\chi^2$	0,010962	

***HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN***

## BIODATA PENULIS



Rizky Haura Nindya Safitri lahir pada tanggal 10 September 1997 di Sidoarjo. Anak pertama dari 2 besaudara dari pasangan Arief Kristanto dan Kusri Umi Kasih. Penulis telah menempuh Pendidikan formal di SD Islam Kyai Ibrahim, SMP Negeri 22 Surabaya, SMA Negeri 15 Surabaya dan bergelar Sarjana Teknik (S.T.), berkat pendidikannya pada jenjang Diploma 3 di Departemen Teknik Mesin Industri FV ITS lalu melanjutkan lintas jalur ke jenjang Sarjana di Teknik Mesin ITATS. Penulis kini melanjutkan studi program magister di Departemen Teknik Mesin FTIRS ITS. Penulis kini bercita cita untuk menjadi Engineer seperti ayahanda. Untuk informasi beserta kritik dan saran mengenai laporan thesis ini dapat menghubungi penulis. Penulis sangat terbuka untuk berdiskusi dalam segala hal terkait penelitian ini maupun yang lainnya. Penulis dapat dihubungi melalui email : [nindyahaura@gmail.com](mailto:nindyahaura@gmail.com)