

**PENGARUH PENAMBAHAN ZINC, INDIUM, DAN VARIASI  
TEMPERATUR PENUANGAN PADA *VELG* ALUMINIUM  
TERHADAP KARAKTERISTIK PROTEKSI SEBAGAI  
ANODA KORBAN**

**SKRIPSI**

Dibuat untuk memenuhi syarat mendapatkan gelar Sarjana Teknik dari  
Jurusan Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa



Oleh:  
Muhammad Raihan  
3334190014

**JURUSAN TEKNIK METALURGI FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA  
CILEGON - BANTEN**

**2025**

LEMBAR PENGESAHAN

**PENGARUH PENAMBAHAN ZINC, INDIUM, DAN VARIASI  
TEMPERATUR PENUANGAN PADA *VELG* ALUMINIUM  
TERHADAP KARAKTERISTIK PROTEKSI SEBAGAI  
ANODA KORBAN**

**SKRIPSI**

Dibuat untuk memenuhi syarat mendapatkan gelar Sarjana Teknik dari  
Jurusan Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

Disetujui untuk Jurusan Teknik Metalurgi oleh:

Pembimbing I



Suryana, S.T., M.Si.  
NIP. 197402162001122001

Pembimbing II



Bening Nurul H K., S.T., M.T.  
NIP. 199008292020122013

LEMBAR PERSETUJUAN

**PENGARUH PENAMBAHAN ZINC, INDIUM, DAN VARIASI  
TEMPERATUR PENUANGAN PADA VELG ALUMINIUM  
TERHADAP KARAKTERISTIK PROTEKSI SEBAGAI  
ANODA KORBAN**

**SKRIPSI**

Disusun dan diajukan oleh:

Muhammad Raihan

3334190014

Telah disidangkan di depan dewan penguji pada tanggal

Rabu, 08 Januari 2025

Susunan Dewan Penguji

Penguji I

: Suryana, S.T., M.Si.

Penguji II

: Bening Nurul H K, S.T., M.T.

Penguji III

: Anistasia Milandia, S.T., M.T.

Tanda Tangan



Skripsi ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Metalurgi



**Abdul Aziz, ST., MT., Ph.D.**

**NIP. 198003072005011002**

## LEMBAR PERNYATAAN

Dengan ini saya sebagai penulis Skripsi berikut:

Judul : Pengaruh Penambahan Zinc, Indium, dan Variasi Temperatur Penuangan pada *Velg* Aluminium terhadap Karakteristik Proteksi sebagai Anoda Korban

Nama : Muhammad Raihan

NIM : 3334190014

Fakultas : Teknik

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Skripsi tersebut di atas adalah benar-benar hasil karya asli saya dan tidak memuat hasil karya orang lain, kecuali dinyatakan melalui rujukan yang benar dan dapat dipertanggungjawabkan. Apabila di kemudian hari ditemukan hal-hal yang menunjukkan bahwa sebagian atau seluruh karya ini bukan karya saya, maka saya bersedia dituntut melalui hukum yang berlaku. Saya juga bersedia menanggung segala akibat hukum yang timbul dari pernyataan yang secara sadar dan sengaja saya nyatakan melalui lembar ini.

Cilegon, 20 Januari 2025



**Muhammad Raihan**  
**NIM. 3334190014**

## ABSTRAK

Korosi merupakan proses kerusakan spontan logam akibat interaksi kimia dengan lingkungan korosif seperti kelembaban, oksigen, dan klorida. Salah satu metode untuk melindungi logam dari korosi adalah dengan menggunakan proteksi katodik, di mana anoda korban terbuat dari logam seperti aluminium (Al) digunakan untuk memperlambat oksidasi baja. Meskipun aluminium memiliki dapat dijadikan anoda korban Aluminium dalam keadaan murni memiliki kelemahan dalam membentuk lapisan pasif yang dapat mengurangi efektivitasnya sebagai anoda korban. Penambahan unsur paduan seperti seng (Zn) ke dalam aluminium terbukti dapat meningkatkan aktivitas anoda dengan mencegah pembentukan lapisan pasif. Selain itu, penggunaan aluminium bekas seperti *velg* memberikan manfaat ekonomis dan lingkungan, terutama dalam konteks daur ulang logam yang semakin penting di Indonesia. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh penambahan seng (Zn) dan variasi temperatur penuangan terhadap struktur mikro serta karakteristik proteksi anoda korban berbahan dasar *velg* aluminium (Al). Metode penelitian mencakup uji komposisi menggunakan *x-ray fluorescence* (XRF), uji metalografi untuk analisis struktur mikro, uji galvanik untuk mengukur efisiensi anoda, dan uji tafel polarisasi untuk mengetahui nilai *open circuit potential* (OCP) serta mengevaluasi laju korosi. Berdasarkan hasil penelitian, efisiensi anoda semua sampel anoda korban melebihi 68% dengan kapasitas anoda melebihi 2026 Ah/kg, serta dengan anoda 5% Zn memiliki nilai (OCP) terendah yaitu -1,050 V vs SHE. Penambahan seng dalam *velg* aluminium terbukti meningkatkan efisiensi anoda, nilai potensial, dan laju korosi anoda korban. Temperatur penuangan 700°C ditemukan sebagai temperatur terbaik untuk pengecoran anoda korban Al-Zn-In berbahan dasar *velg* aluminium, karena menghasilkan kapasitas arus sebesar 120 mA dan efisiensi anoda tertinggi hingga 85% serta nilai OCP terendah dan laju korosi tertinggi sebesar 0,25 mm/tahun untuk memastikan perlindungan katodik yang optimal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan *velg* aluminium sebagai bahan baku anoda korban memiliki potensi untuk dikembangkan karena karakteristik proteksi anoda mencapai batas minimum standar DNV-RP-B401 yaitu dengan kapasitas minimum 2000 Ah/kg pada suhu 30°C di lingkungan air laut. Struktur mikro dan karakteristik proteksi anoda berbahan *velg* aluminium mendekati karakteristik anoda standar, menjadikannya alternatif yang ekonomis, ramah lingkungan, dan efektif dalam aplikasi proteksi katodik.

Kata Kunci: Anoda Korban, *Velg* Aluminium, Seng, Karakteristik Proteksi, Struktur Mikro

## KATA PENGANTAR

Alhamdulillah dengan rahmat Allah SWT atas segala limpahan kebaikan dan kemurahan-Nya yang memungkinkan penulis menyelesaikan skripsi dengan judul “Pengaruh Penambahan Zn, In, dan Temperatur Penuangan pada *Velg* Aluminium terhadap Struktur Mikro dan Karakteristik Proteksi sebagai Anoda Korban”. Skripsi ini disusun untuk memenuhi syarat mendapatkan gelar Sarjana Teknik dari Jurusan Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Abdul Aziz, S.T., M.T., Ph.D. selaku ketua jurusan Teknik Metalurgi.
2. Ibu Andinnie Juniarsih, S.T., M.T. selaku Koordinator Skripsi.
3. Bapak Suryana, S.T., M.Si. selaku pembimbing pertama yang telah membimbing penulis dalam penulisan laporan skripsi ini.
4. Ibu Bening Nurul H K., ST., MT. Selaku pembimbing kedua yang juga telah membimbing penulis dalam penulisan laporan skripsi ini.
5. Seluruh staf serta semua pihak instansi terkait dengan penelitian ini.
6. Ibu Prihatiningsih dan Bapak Ahmad Sofian selaku Orang Tua penulis.
7. Ilham Firdaus dan Ahmad Zikri Imani selaku adik-adik penulis.
8. Siti Rohmatun, S.Sos. yang selalu memberikan dukungan dan doa yang tulus.
9. Sahabat, dan Teman-teman atas doa dan dukungannya.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih memiliki kekurangan, oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun dari berbagai pihak sangat diharapkan. Penulis berharap agar skripsi ini dapat bermanfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan dan memberikan kontribusi yang positif bagi pembaca.

Cilegon, Januari 2025

Muhammad Raihan

## DAFTAR ISI

|                                                                  | halaman    |
|------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>HALAMAN JUDUL .....</b>                                       | <b>i</b>   |
| <b>LEMBAR PENGESAHAN .....</b>                                   | <b>ii</b>  |
| <b>LEMBAR PERSETUJUAN .....</b>                                  | <b>iii</b> |
| <b>LEMBAR PERNYATAAN .....</b>                                   | <b>iv</b>  |
| <b>ABSTRAK .....</b>                                             | <b>v</b>   |
| <b>KATA PENGANTAR.....</b>                                       | <b>vi</b>  |
| <b>DAFTAR ISI.....</b>                                           | <b>vii</b> |
| <b>DAFTAR TABEL .....</b>                                        | <b>xi</b>  |
| <b>DAFTAR GAMBAR.....</b>                                        | <b>xii</b> |
| <b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>                                    | <b>1</b>   |
| 1.1. Latar Belakang .....                                        | 1          |
| 1.2. Rumusan Masalah .....                                       | 5          |
| 1.3. Tujuan Penelitian .....                                     | 6          |
| 1.4. Batasan Masalah.....                                        | 6          |
| 1.5. Sistematika Penulisan .....                                 | 7          |
| <b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....</b>                              | <b>9</b>   |
| 2.1. Definisi Korosi .....                                       | 9          |
| 2.2. Persamaan Laju Korosi .....                                 | 11         |
| 2.3. Aspek Elektrokimia Korosi.....                              | 12         |
| 2.4. Aspek Lingkungan Akuatik .....                              | 18         |
| 2.4.1. Pengaruh Oksigen dan Pengoksidasi Terhadap Laju Korosi .. | 18         |

|                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------|----|
| 2.4.2. Pengaruh Agitasi Terhadap Laju Korosi.....                | 20 |
| 2.4.3. Pengaruh Temperatur Terhadap Laju Korosi.....             | 21 |
| 2.4.4. Pengaruh Konsentrasi Terhadap Laju Korosi .....           | 22 |
| 2.4.5. Pengaruh Efek Galvanik Terhadap Laju Korosi .....         | 23 |
| 2.5. Jenis-Jenis Korosi .....                                    | 27 |
| 2.6. Pengendalian Korosi .....                                   | 28 |
| 2.7. Prinsip dan Jenis-Jenis Proteksi Katodik .....              | 32 |
| 2.3.1. <i>Sacrificial Anode Cathodic Protection (SACP)</i> ..... | 33 |
| 2.3.2. <i>Impressed Current Cathodic Protection (ICCP)</i> ..... | 36 |
| 2.8. Potensial Standar Berbagai Logam .....                      | 37 |
| 2.9. Potensial Proteksi Pada Proteksi Katodik .....              | 38 |
| 2.10. Efisiensi Anoda Korban .....                               | 40 |
| 2.11. Laju Korosi Anoda Korban.....                              | 41 |
| 2.12. Komposisi Anoda Korban.....                                | 42 |
| 2.10.1. Anoda Korban Berbasis Aluminium.....                     | 43 |
| 2.10.2. Anoda Korban Berbasis Seng .....                         | 44 |
| 2.13. Pengaruh Unsur Paduan Terhadap Anoda Korban .....          | 44 |
| 2.11.1. Pengaruh Unsur Zn .....                                  | 45 |
| 2.11.2. Pengaruh Unsur In.....                                   | 45 |
| 2.11.3. Pengaruh Unsur Si.....                                   | 46 |
| 2.11.4. Pengaruh Unsur Mg .....                                  | 46 |
| 2.11.5. Pengaruh Unsur Cu .....                                  | 47 |
| 2.11.6. Pengaruh Unsur Fe.....                                   | 47 |
| 2.11.7. Pengaruh Unsur Cr.....                                   | 48 |

|                                                             |           |
|-------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.14. Korosi pada Air Laut.....                             | 48        |
| 2.15. Komposisi Kimia dan Salinitas Air Laut .....          | 49        |
| 2.16. Diagram Pourbaix Fe .....                             | 50        |
| 2.17. Diagram Fasa Al-Zn.....                               | 52        |
| 2.18. Struktur Mikro Al-Zn.....                             | 54        |
| 2.19. Pengecoran .....                                      | 56        |
| 2.17.1. Pola.....                                           | 57        |
| 2.17.2. Cetakan.....                                        | 58        |
| <b>BAB III METODE PENELITIAN .....</b>                      | <b>60</b> |
| 3.1. Diagram Alir Penelitian .....                          | 60        |
| 3.2. Bahan dan Alat.....                                    | 61        |
| 3.2.1. Alat yang Digunakan.....                             | 61        |
| 3.2.2. Bahan yang Digunakan .....                           | 62        |
| 3.3. Prosedur Penelitian.....                               | 62        |
| 3.3.1. Perancangan Dimensi Pengecoran .....                 | 62        |
| 3.3.2. Prosedur Persiapan Sampel Anoda Korban .....         | 63        |
| 3.3.3. Prosedur Pengujian <i>X-Ray Fluorence</i> (XRF)..... | 64        |
| 3.3.4. Prosedur Pengujian Galvanik.....                     | 65        |
| 3.3.5. Prosedur Pengujian Tafel Polarisasi .....            | 66        |
| 3.3.6. Prosedur Pengujian Metalografi.....                  | 67        |
| <b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>                    | <b>70</b> |
| 4.1. Hasil Pengujian Komposisi Anoda Korban .....           | 70        |
| 4.2. Hasil Pengujian Galvanik.....                          | 71        |
| 4.3. Hasil Pengujian Tafel Polarisasi Anoda Korban.....     | 75        |

|                                                                                            |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.3.1. Analisis Pengaruh Kadar Zn dan Temperatur Penuangan terhadap OCP .....              | 77         |
| 4.3.2. Analisis Pengaruh Kadar Zn dan Temperatur Penuangan terhadap nilai Laju Korosi..... | 79         |
| 4.4. Hasil Pengujian Metalografi Anoda Korban.....                                         | 81         |
| 4.4.1. Analisis Struktur Mikro Pengaruh Temperatur Penuangan ....                          | 84         |
| 4.4.2. Analisis Struktur Mikro Pengaruh Kadar Zn .....                                     | 87         |
| 4.5. Analisis Pengaruh Struktur Mikro Terhadap Karakteristik Proteksi.....                 | 90         |
| <b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>                                                    | <b>95</b>  |
| 5.1. Kesimpulan .....                                                                      | 95         |
| 5.2. Saran.....                                                                            | 95         |
| <b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>                                                                 | <b>96</b>  |
| <b>LAMPIRAN A PERHITUNGAN.....</b>                                                         | <b>101</b> |
| <b>LAMPIRAN B DATA PENELITIAN.....</b>                                                     | <b>106</b> |
| Lampiran B. 1 Data Komposisi Inalum <i>Primary Aluminium Ingot</i> .....                   | 107        |
| Lampiran B. 2 Data Komposisi Nyrstar <i>Zinc Ingot</i> .....                               | 108        |
| Lampiran B. 3 Data Hasil Uji OES Velg Aluminium dan <i>Primary Aluminium Ingot</i> .....   | 109        |
| Lampiran B. 4 Data Hasil Uji XRF Sampel Anoda.....                                         | 111        |
| Lampiran B. 5 Pengolahan dan Data Hasil Pengujian Galvanik .....                           | 123        |
| Lampiran B. 6 Pengolahan dan Data Hasil Uji Tafel Polarisasi Sampel Anoda .....            | 126        |
| Lampiran B. 7 Pengolahan dan Data Hasil Uji Metalografi Sampel Anoda .....                 | 137        |
| <b>LAMPIRAN C GAMBAR ALAT DAN BAHAN .....</b>                                              | <b>142</b> |

## DAFTAR TABEL

|                                                                                                    | halaman |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| Tabel 2.1 Potensial Standar Dari Beberapa Logam .....                                              | 37      |
| Tabel 2.2 Kapasitas Elektrokimia dan Potensial Sirkuit Tertutup untuk Anoda di Suhu Air Laut ..... | 39      |
| Tabel 2.3 Limit Komposisi Rekomendasi untuk Material Anoda Berbasis Al dan Zn .....                | 43      |
| Tabel 3.1 Perhitungan Berat Bahan Baku Variasi Paduan.....                                         | 63      |
| Tabel 4.1 Komposisi Kimia Sampel Anoda Korban.....                                                 | 70      |
| Tabel 4.2 Data Hasil Pengujian Galvanik .....                                                      | 72      |
| Tabel 4.3 Data Hasil Pengujian Tafel Polarisasi.....                                               | 77      |
| Tabel 4.4 Data Hasil Pengujian Metalografi.....                                                    | 83      |
| Tabel B.1 Hasil Perhitungan Rata-rata Komposisi Uji XRF IA .....                                   | 111     |
| Tabel B.2 Hasil Perhitungan Rata-rata Komposisi Uji XRF IIA.....                                   | 112     |
| Tabel B.3 Hasil Perhitungan Rata-rata Komposisi Uji XRF IIIA .....                                 | 113     |
| Tabel B.4 Data Hasil Pengukuran Pengujian Galvanik .....                                           | 124     |

## DAFTAR GAMBAR

|                                                                                                                                                                                                                              | halaman |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| Gambar 2.1 Skematik Reaksi Elektrokimia Seng Pada Elektrolit Asam Klorida.....                                                                                                                                               | 13      |
| Gambar 2.2 Reaksi Reduksi Hidrogen pada Proses Polarisasi Aktivasi .....                                                                                                                                                     | 15      |
| Gambar 2.3 Polarisasi Konsentrasi Pada Evolusi Hidrogen .....                                                                                                                                                                | 16      |
| Gambar 2.4 Laju Korosi Suatu Logam Tanpa Efek Pasivitas Terhadap Fungsi Potensial Elektroda .....                                                                                                                            | 17      |
| Gambar 2.5 Laju Korosi Suatu Logam Dengan Efek Pasivitas Terhadap Fungsi Potensial Elektroda .....                                                                                                                           | 18      |
| Gambar 2.6 Efek konsentrasi oksigen terhadap laju korosi baja karbon dalam air distilasi yang bergerak perlahan, 48 jam, 25°C .....                                                                                          | 19      |
| Gambar 2.7 Pengaruh Kecepatan Terhadap Laju Korosi .....                                                                                                                                                                     | 20      |
| Gambar 2.8 Pengaruh suhu terhadap korosi besi dalam air yang mengandung oksigen terlarut .....                                                                                                                               | 21      |
| Gambar 2.9 Pengaruh Konsentrasi Terhadap Laju Korosi .....                                                                                                                                                                   | 23      |
| Gambar 2.10 Pengaruh Potensial Overhidrogen Katoda terhadap Korosi Galvanik dalam Asam Nonoksidatif yang Dideaerasi .....                                                                                                    | 25      |
| Gambar 2.11 Pengaruh Rasio Area Anoda – Katoda pada Korosi Pasangan Galvanik dalam Asam Nonoksidatif yang Dideaerasi. (a) Katoda besar digabungkan dengan anoda kecil. (b) Anoda besar digabungkan dengan katoda kecil ..... | 26      |
| Gambar 2.12 Skematik Pengaruh Efek Galvanik .....                                                                                                                                                                            | 27      |
| Gambar 2.13 Skema Alur untuk Pemilihan Material, Ss : <i>Specific Strength</i> , Sm : <i>Specific Modulus</i> , Cr : <i>Corrosion Rate</i> , Cc : <i>Cost Category</i> ..                                                    | 30      |
| Gambar 2.14 Skema Sistem Proteksi Katodik Anoda Korban .....                                                                                                                                                                 | 33      |
| Gambar 2.15 Rangkaian sistem proteksi katodik arus paksa .....                                                                                                                                                               | 36      |
| Gambar 2.16 Diagram Pourbaix Fe Dalam Air .....                                                                                                                                                                              | 51      |

|             |                                                                                                                                                        |    |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 2.17 | Diagram fasa paduan Al-Zn .....                                                                                                                        | 53 |
| Gambar 2.18 | Mikrostruktur Hasil SEM Paduan Al-10 wt.% Zn .....                                                                                                     | 54 |
| Gambar 2.19 | Struktur mikro dari serangkaian paduan anoda Al-Zn-In:<br>(a) Al-Zn-In, (b) Al-Zn-In-Sn, (c) Al-Zn-In-Cd, (d) Al-Zn-In-Si...                           | 56 |
| Gambar 2.20 | Skematik Efek Penambahan <i>Shrinkage Allowance</i> Terhadap<br>Dimensi Pattern Untuk Pengecoran Aluminium .....                                       | 58 |
| Gambar 2.21 | Skematik Efek Penambahan <i>Machining Allowance</i> (a) dan<br><i>Draft Allowance</i> (b) Terhadap Dimensi Pattern Untuk<br>Pengecoran Aluminium ..... | 58 |
| Gambar 3.1  | Diagram Alir Penelitian .....                                                                                                                          | 60 |
| Gambar 3.2  | Dimensi Pola Sampel .....                                                                                                                              | 62 |
| Gambar 3.3  | Skematik Pengujian XRF .....                                                                                                                           | 65 |
| Gambar 3.4  | Skematik Pengujian Korosi Galvanik .....                                                                                                               | 65 |
| Gambar 3.5  | Skematik Pengujian Tafel Polarisasi .....                                                                                                              | 67 |
| Gambar 4.1  | Grafik Perbandingan Kadar Zn dan Temperatur Penuangan<br>Terhadap Nilai Efisiensi Anoda.....                                                           | 73 |
| Gambar 4.2  | Grafik Tafel Polarisasi .....                                                                                                                          | 76 |
| Gambar 4.3  | Grafik Perbandingan Kadar Seng (Zn) terhadap OCP (V) vs<br>SHE .....                                                                                   | 78 |
| Gambar 4.4  | Grafik Perbandingan Kadar Zn dan Temperatur Penuangan<br>Terhadap Laju Korosi .....                                                                    | 80 |
| Gambar 4.5  | Struktur Mikro Anoda Al-2,6% Zn Temperatur Tuang 650°C<br>(a), 700°C (b), dan 750°C (c) pembesaran 100x.....                                           | 81 |
| Gambar 4.6  | Struktur Mikro Anoda Al-3,6% Zn Temperatur Tuang 650°C<br>(a), 700°C (b), dan 750°C (c) pembesaran 100x.....                                           | 82 |
| Gambar 4.7  | Struktur Mikro Anoda Al-5% Zn Temperatur Tuang 650°C<br>(a), 700°C (b), dan 750°C (c) pembesaran 100x.....                                             | 82 |
| Gambar 4.8  | Grafik Perbandingan Kadar Zn dan Temperatur Penuangan<br>terhadap Ukuran Butir Rata-Rata.....                                                          | 84 |
| Gambar 4.9  | Grafik Ukuran Butir Rata-Rata Terhadap Laju Korosi.....                                                                                                | 90 |

|             |                                                                                       |     |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Gambar 4.10 | Grafik Ukuran Butir Rata-Rata Terhadap Nilai OCP .....                                | 90  |
| Gambar 4.11 | Grafik Ukuran Butir Rata-Rata Terhadap Efisiensi Anoda .....                          | 91  |
| Gambar B.1  | Data Komposisi Inalum <i>Primary Aluminium Ingot Grade G1</i> .....                   | 107 |
| Gambar B.2  | Komposisi <i>Zinc Ingot</i> Nyrstar A-Z Z1 .....                                      | 108 |
| Gambar B.3  | Data Hasil Uji OES Velg Aluminium .....                                               | 109 |
| Gambar B.4  | Data Hasil Uji OES <i>Aluminium Ingot</i> .....                                       | 110 |
| Gambar B.5  | Data Hasil Uji XRF Anoda IA 1 .....                                                   | 114 |
| Gambar B.6  | Data Hasil Uji XRF Anoda IA 2 .....                                                   | 115 |
| Gambar B.7  | Data Hasil Uji XRF Anoda IA 3 .....                                                   | 116 |
| Gambar B.8  | Data Hasil Uji XRF Anoda IIA 1 .....                                                  | 117 |
| Gambar B.9  | Data Hasil Uji XRF Anoda IIA 2 .....                                                  | 118 |
| Gambar B.10 | Data Hasil Uji XRF Anoda IIA 3 .....                                                  | 119 |
| Gambar B.11 | Data Hasil Uji XRF Anoda IIIA 1.....                                                  | 120 |
| Gambar B.12 | Data Hasil Uji XRF Anoda IIIA 2.....                                                  | 121 |
| Gambar B.13 | Data Hasil Uji XRF Anoda IIIA 3.....                                                  | 122 |
| Gambar B.14 | Sel Galvanik Pengujian .....                                                          | 123 |
| Gambar B.15 | Pengukuran Arus .....                                                                 | 123 |
| Gambar B.16 | Makrografi Anoda 2,6% Zn Temperatur Tuang (a) 750°C,<br>(b) 700°C, dan (c) 650°C..... | 124 |
| Gambar B.17 | Makrografi Anoda 3,6% Zn Temperatur Tuang (a) 750°C,<br>(b) 700°C, dan (c) 650°C..... | 124 |
| Gambar B.18 | Makrografi Anoda 5% Zn Temperatur Tuang (a) 750°C,<br>(b) 700°C, dan (c) 650°C.....   | 125 |
| Gambar B.19 | Parameter Eksperimen <i>Software Corrtest Studio 6</i> .....                          | 126 |
| Gambar B.20 | Pengolahan Data <i>Software Corrtest Studio 6</i> .....                               | 126 |
| Gambar B.21 | Data Hasil Uji Tafel Polarisasi Anoda IA 2,6% Zn 650°C .....                          | 128 |

|             |                                                                      |     |
|-------------|----------------------------------------------------------------------|-----|
| Gambar B.22 | Data Hasil Uji Tafel Polarisasi Anoda IB 2,6% Zn 700°C.....          | 129 |
| Gambar B.23 | Data Hasil Uji Tafel Polarisasi Anoda IC 2,6% Zn 750°C.....          | 130 |
| Gambar B.24 | Data Hasil Uji Tafel Polarisasi Anoda IIA 3,6% Zn 650°C .....        | 131 |
| Gambar B.25 | Data Hasil Uji Tafel Polarisasi Anoda IIB 3,6% Zn 700°C .....        | 132 |
| Gambar B.26 | Data Hasil Uji Tafel Polarisasi Anoda IIC 3,6% Zn 750°C .....        | 133 |
| Gambar B.27 | Data Hasil Uji Tafel Polarisasi Anoda IIIA 5% Zn 650°C.....          | 134 |
| Gambar B.28 | Data Hasil Uji Tafel Polarisasi Anoda IIIB 5% Zn 700°C .....         | 135 |
| Gambar B.29 | Data Hasil Uji Tafel Polarisasi Anoda IIIC 5% Zn 750°C.....          | 136 |
| Gambar B.30 | Pengolahan Data Distribusi Fasa Zn <i>Software ImageJ</i> .....      | 137 |
| Gambar B.31 | Pengolahan Data Distribusi Fasa a-Al <i>Software ImageJ</i> .....    | 137 |
| Gambar B.32 | Pengambilan Data Distribusi Fasa <i>Software ImageJ</i> .....        | 138 |
| Gambar B.33 | Pengolahan Data Distribusi Ukuran Butir <i>Software ImageJ</i> ..... | 138 |
| Gambar B.34 | Data Hasil Uji Metalografi IIIC Pembesaran 100x .....                | 139 |
| Gambar B.35 | Data Hasil Uji Metalografi IIIB Pembesaran 100x .....                | 139 |
| Gambar B.36 | Data Hasil Uji Metalografi IIIA Pembesaran 100x .....                | 139 |
| Gambar B.37 | Data Hasil Uji Metalografi IIC Pembesaran 100x.....                  | 140 |
| Gambar B.38 | Data Hasil Uji Metalografi IIB Pembesaran 100x.....                  | 140 |
| Gambar B.39 | Data Hasil Uji Metalografi IIA Pembesaran 100x .....                 | 140 |
| Gambar B.40 | Data Hasil Uji Metalografi IC Pembesaran 100x.....                   | 141 |
| Gambar B.41 | Data Hasil Uji Metalografi IB Pembesaran 100x.....                   | 141 |
| Gambar B.42 | Data Hasil Uji Metalografi IA Pembesaran 100x.....                   | 141 |
| Gambar C.1  | Akuades .....                                                        | 143 |
| Gambar C.2  | Alat Pelindung Diri.....                                             | 143 |
| Gambar C.3  | <i>Aluminium Ingot</i> .....                                         | 143 |

|             |                                                  |     |
|-------------|--------------------------------------------------|-----|
| Gambar C.4  | Asam Clorida (HCl) .....                         | 143 |
| Gambar C.5  | Asam Florida (HF) .....                          | 143 |
| Gambar C.6  | Asam Nitrat (HNO <sub>3</sub> ).....             | 143 |
| Gambar C.7  | Batang Pengaduk .....                            | 143 |
| Gambar C.8  | <i>Counter Electrode</i> .....                   | 143 |
| Gambar C.9  | <i>Crocodile Clip</i> .....                      | 144 |
| Gambar C.10 | <i>Crucible</i> .....                            | 144 |
| Gambar C.11 | Garam (NaCl) .....                               | 144 |
| Gambar C.12 | Gelas Beaker.....                                | 144 |
| Gambar C.13 | Gerinda Duduk .....                              | 144 |
| Gambar C.14 | <i>Hair Dryer</i> .....                          | 144 |
| Gambar C.15 | Indium (In).....                                 | 144 |
| Gambar C.16 | Kain <i>Polishing</i> .....                      | 144 |
| Gambar C.17 | Kertas Ampelas.....                              | 145 |
| Gambar C.18 | Katoda <i>Low Carbon Steel</i> .....             | 145 |
| Gambar C.19 | Mesin Bor Tangan .....                           | 145 |
| Gambar C.20 | <i>Mesin Grinding</i> dan <i>Polishing</i> ..... | 145 |
| Gambar C.21 | Mikroskop Optik .....                            | 145 |
| Gambar C.22 | Multimeter .....                                 | 145 |
| Gambar C.23 | Pencapit <i>Crucible</i> .....                   | 145 |
| Gambar C.24 | Potensiostat .....                               | 145 |
| Gambar C.25 | Elektroda Referensi Ag/AgCl.....                 | 146 |
| Gambar C.26 | <i>Thermogun</i> .....                           | 146 |
| Gambar C.27 | Timbangan Digital .....                          | 146 |

|                                                   |     |
|---------------------------------------------------|-----|
| Gambar C.28 Tungku Gas.....                       | 146 |
| Gambar C.29 <i>Velg</i> Aluminium .....           | 146 |
| Gambar C.30 <i>Zinc Ingot</i> Nyzstar AZ-Z1 ..... | 146 |

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1. Latar Belakang**

Korosi adalah suatu kerusakan spontan yang dialami oleh logam dan paduan yang disebabkan oleh reaksi kimia, biokimia, dan elektrokimia antara logam dan paduan dengan lingkungan. Lingkungan yang bersifat korosif termasuk kelembaban, oksigen, asam-anorganik dan organik, tekanan tinggi, suhu tinggi, dan klorida. Selama korosi, logam cenderung mengalami konversi menjadi senyawa yang lebih stabil secara termodinamika seperti oksida, hidroksida, garam, atau karbonat. Korosi mengembalikan senyawa asli (mineral dan bijih) dari logam melalui korosi spontan sebagai hasil dari penurunan energi bebas [1].

Pencegahan korosi diperlukan untuk mencegah kerusakan pada logam. Proteksi katodik merupakan salah satu metode perlindungan logam dari korosi sehingga logam dapat digunakan dalam jangka waktu yang lama. Metode proteksi katodik melakukan perlindungan korosi dengan cara menurunkan potensial logam yang dilindungi. Ketika proteksi katodik diterapkan, permukaan baja diubah menjadi katoda dengan potensial rendah, yang secara signifikan memperlambat oksidasi logam pada permukaan katoda. Namun, anoda galvanik atau anoda korban secara bertahap larut, yang menyebabkan pelepasan logam ke lingkungan tanah atau air laut [2].

Paduan aluminium menjadi pilihan utama sebagai bahan anoda korban untuk perlindungan katoda objek baja di perairan laut karena efisiensi arus yang tinggi, kerapatan rendah, dan biaya yang murah. Namun, aluminium murni membentuk lapisan pasif pada permukaannya ketika terkena lingkungan, yang menyebabkan

penurunan efisiensi anoda [3]. Untuk mengatasi kekurangan ini, langkah yang diperlukan adalah menghilangkan lapisan oksida pada permukaan dengan memadukan logam aluminium dengan unsur lainnya yang dapat mencegah pembentukan lapisan pasif oksida aluminium. Hal ini akan mendorong anoda aluminium untuk menghasilkan arus secara konsisten dan stabil, serta meningkatkan aktivitas dan efisiensi arus anoda aluminium agar memenuhi kebutuhan dasar anoda korban, seperti potensial negatif yang stabil, polarisasi anodik yang rendah, kapasitas anoda yang tinggi, laju korosi diri yang rendah, serta aktivasi dan pelarutan yang merata [4]. Menambahkan unsur tertentu, seperti 6% wt Zn, 0,03% wt In, 0,03% wt Sn, 0,13% wt Si, dan 0,01% wt Cd ke dalam aluminium untuk membentuk paduan aluminium telah terbukti menjadi paduan anoda korban yang memiliki nilai efisiensi anoda 70,7-88,8% [5].

Data yang diberikan oleh Kementerian Perindustrian tahun 2015 menunjukkan kebutuhan aluminium di Indonesia mencapai 1,2 juta ton per tahun, sedangkan kapasitas produksi nasional hanya mencapai 0,6 juta ton per tahun. Perlu ada solusi untuk masalah ketergantungan pada impor logam dan mengurangi jumlah limbah yang terus meningkat, salah satu solusinya adalah proses daur ulang logam. Daur ulang meliputi proses peleburan limbah dan pencetakan ulang. Pada dasarnya, hasil yang diperoleh dari proses peleburan tidak mengurangi kualitas logam berharga. Aluminium adalah salah satu jenis logam yang mudah didaur ulang, sehingga membutuhkan pengelolaan limbah yang mampu mendukung pengembangan industri nasional [6].

Penggunaan *scrap* aluminium dalam pembuatan anoda memberikan keuntungan ekonomis dan lingkungan, namun, tantangan muncul terkait kehadiran

pengotor seperti silikon (Si), tembaga (Cu), besi (Fe) dapat memengaruhi kualitas dan kinerja anoda. Penelitian tentang pengembangan anoda korban terus berlanjut untuk meningkatkan efisiensi dengan menemukan komposisi unsur paduan yang optimal. Standar desain proteksi katodik DNV-RP-B401, yang diterbitkan oleh Det Norske Veritas (DNV), digunakan untuk memastikan desain dan kinerja anoda korban yang optimal dalam aplikasi kelautan dan energi, seperti perlindungan struktur bawah laut dari korosi. Standar ini menegaskan pentingnya mematuhi batasan komposisi unsur pada anoda korban yang berbasis aluminium. Standar tersebut menetapkan komposisi anoda korban dengan kandungan 2,5-5,75wt.% Seng (Zn), 0,015-0,040wt.% Indium (In), Cadmium (Cd)  $\leq 0,002\text{wt.}\%$ , Silikon (Si)  $\leq 0,12\text{wt.}\%$ , Besi (Fe)  $\leq 0,09\text{wt.}\%$ , dan Tembaga (Cu) 0,003wt.% [7]. Diperlukan strategi untuk meningkatkan komposisi aluminium, meningkatkan komposisi Seng (Zn), menekan pengotor, dan menekan kandungan Silikon (Si) dalam paduan dan memaksimalkan sifat elektrokimianya. Salah satu pendekatan yang efektif adalah dengan menambahkan aluminium (Al), seng (Zn), dan Indium (In) ke dalam paduan aluminium.

Shamsudin dkk telah melaporkan penghematan energi dari penggunaan aluminium dari limbah. Energi yang dibutuhkan untuk memproses aluminium dari sumber sekunder adalah 10-15% dari energi yang dibutuhkan untuk produksi aluminium dari sumber utama atau bijih aluminium [8]. Aluminium bekas hanya memakan biaya sekitar 30% dari total biaya produksi aluminium [9]. Oleh karena itu, menggunakan *velg* aluminium sebagai bahan baku anoda korban tidak hanya menghemat energi, tetapi juga mengurangi biaya produksi secara signifikan, membuatnya menjadi pilihan yang efisien dan ekonomis.

*Velg* adalah komponen pada kendaraan yang berfungsi sebagaiudukan ban dan penghubung roda dengan poros kendaraan. *Velg* biasanya terbuat dari material seperti aluminium, baja, atau *alloy* (paduan logam). Data dari BPS tahun 2023 menunjukkan kendaraan bermotor mencapai jumlah 157 juta unit kendaraan dengan estimasi limbah *velg* aluminium dengan masa pakai 10 tahun adalah 196 ribu ton [10]. Penggunaan *velg* aluminium sebagai sumber *scrap* sangat relevan, terutama karena *velg* aluminium umumnya terbuat dari paduan aluminium 606 yang memiliki komposisi kimia mendekati persyaratan standar tersebut. *Aluminum Association* menegaskan paduan aluminium 6061 terdiri dari 0,8-1,2wt.% Magnesium (Mg), 0,4-0,8wt.% Silikon (Si), dan sejumlah kecil unsur lain seperti 0,15-0,4wt.% tembaga (Cu), 0,7wt.% besi (Fe), dan 0,04-0,35wt.% kromium (Cr), yang semuanya berada dalam batasan yang dapat dikelola untuk digunakan dalam anoda korban [11]. Keunggulan komposisi ini adalah kemudahan dalam pengelolaan kandungan pengotor dan penyesuaian kadar Zn dan Al agar memenuhi spesifikasi proteksi katodik. Penambahan seng (Zn) pada anoda korban aluminium meningkatkan efisiensi proteksi katodik. Zn lebih reaktif secara elektrokimia dibandingkan aluminium, sehingga saat anoda terkorosi, Zn akan dilepaskan dan melindungi logam aluminium dari korosi. Penggunaan paduan Zn-Al memperpanjang umur anoda karena sifat reaktif Zn yang mempercepat korosi dan meningkatkan proteksi [12]. Meningkatkan kandungan indium dari 0,02% menjadi 0,05% mengakibatkan penurunan potensial sirkuit terbuka sekitar 50 mV, mencapai sekitar -1100 mV terhadap elektroda Ag/AgCl. Pergeseran ke potensial yang lebih negatif ini bermanfaat untuk anoda korban, karena meningkatkan gaya pendorong mereka untuk perlindungan korosi [13]. Temperatur penuangan juga dapat

memengaruhi struktur mikro dan sifat elektrokimia dari anoda korban, yang dapat mempengaruhi efektivitas perlindungan katodik dalam mengurangi laju korosi. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efek penambahan seng (Zn), Indium (In) dan variasi temperatur penuangan pengecoran anoda korban dengan bahan *velg* aluminium terhadap struktur mikro dan karakteristik proteksi sebagai anoda korban.

## **1.2. Rumusan Masalah**

Penelitian yang akan dilakukan memiliki beberapa rumusan masalah. Rumusan masalah tersebut meliputi:

1. Bagaimana pengaruh penambahan seng (Zn) dan Indium (In) pada *velg* aluminium terhadap struktur mikro anoda korban?
2. Bagaimana pengaruh penambahan seng (Zn) dan Indium (In) pada *velg* aluminium terhadap potensial, efisiensi, dan laju korosi anoda korban?
3. Bagaimana pengaruh temperatur penuangan pengecoran anoda korban dengan bahan *velg* aluminium terhadap struktur mikro anoda korban?
4. Bagaimana pengaruh temperatur penuangan pengecoran anoda korban dengan bahan *velg* aluminium terhadap potensial, efisiensi, laju konsumsi, dan laju korosi anoda korban?
5. Bagaimana pengaruh struktur mikro terhadap potensial, efisiensi, laju konsumsi, dan laju korosi anoda korban?

### 1.3. Tujuan Penelitian

Penelitian yang akan dilakukan ini memiliki beberapa tujuan. Tujuan-tujuan tersebut antara lain:

1. Mengidentifikasi pengaruh penambahan seng (Zn) dan Indium (In) pada *velg* aluminium terhadap struktur mikro anoda korban.
2. Mengidentifikasi pengaruh penambahan seng (Zn) pada *velg* aluminium terhadap karakteristik proteksi sebagai anoda korban, yaitu potensial, efisiensi, laju konsumsi, dan laju korosi anoda korban.
3. Mengidentifikasi pengaruh temperatur penuangan pengecoran anoda korban dengan bahan *velg* aluminium terhadap struktur mikro anoda korban.
4. Mengidentifikasi pengaruh temperatur penuangan pengecoran anoda korban dengan bahan *velg* aluminium terhadap karakteristik proteksi sebagai anoda korban, yaitu potensial, efisiensi, laju konsumsi, dan laju korosi anoda korban.

### 1.4. Batasan Masalah

Penelitian ini memiliki batasan masalah jika ditinjau dari identifikasi masalah agar dalam pengkajian yang dilakukan menjadi lebih terfokus kepada masalah yang ingin diselesaikan. Batasan masalah dari penelitian yaitu sebagai berikut:

1. Penelitian ini hanya berfokus pada pengaruh unsur seng (Zn) dan Indium (In) pada *velg* aluminium terhadap struktur mikro anoda korban serta karakteristik proteksi sebagai anoda korban, yaitu potensial, efisiensi, laju konsumsi, dan laju korosi anoda korban.
2. Menggunakan material *velg* aluminium, aluminium (Zn) 99,72%, seng (Zn) 99,99%, dan Indium (In) 99,99%.

3. Variabel variasi Zn yaitu 2,6%, 3,6%, dan 5% berdasarkan standar DNV-RP-B401.
4. Variabel variasi In yaitu 0,008%, 0,033%, dan 0,04% berdasarkan standar DNV-RP-B401.
5. Variabel variasi temperatur penuangan adalah 650°C, 700°C, dan 750°C.
6. Menggunakan metode pengecoran cetakan pasir terbuka.
7. Melakukan pendinginan dengan temperatur ruang.
8. Melakukan pengujian komposisi menggunakan metode XRF
9. Melakukan pengujian tafel polarisasi untuk mengetahui nilai *open circuit potential* OCP dan laju korosi anoda korban.
10. Melakukan pengujian galvanik untuk mengetahui kapasitas arus dan efisiensi anoda korban.
11. Melakukan pengujian metalografi untuk mengetahui struktur mikro anoda korban.

### **1.5. Sistematika Penulisan**

Pada penelitian kali ini terdapat sistematika penulisan yang terdiri dari lima Bab. Bab I membahas mengenai latar belakang mengapa dilakukan penambahan Zn dan In pada *velg* aluminium dan dilakukan variasi temperatur penuangan, identifikasi masalah yang dijadikan dasar penelitian, tujuan penambahan Zn dan In pada *velg* aluminium dan dilakukan variasi temperatur penuangan pada penelitian, lalu batasan masalah, serta sistematika penulisan. Bab II membahas mengenai teori terkait definisi korosi, jenis-jenis proteksi korosi, parameter anoda korban yang baik serta teori lainnya yang mendukung penelitian. Bab III berisi metodologi

penelitian yang membahas mengenai diagram alir penelitian, alat dan bahan yang digunakan serta prosedur pengujian komposisi, tafel polarisasi, galvanik, dan metalografi. Bab IV menjelaskan mengenai hasil yang didapat dari pengujian komposisi, tafel polarisasi, galvanik, dan metalografi serta juga membahas analisis perbandingannya. Bab V menjelaskan tentang kesimpulan dan saran terkait penelitian. Kemudian pada akhir skripsi berisi mengenai daftar pustaka literatur dan juga lampiran yang mendukung penelitian ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. N. Popov, "Evaluation of Corrosion," in *Corrosion Engineering*, Elsevier, 2015, p. 2. doi: 10.1016/B978-0-444-62722-3.00001-X.
- [2] J. Deborde et al., "Impact of Galvanic Anode Dissolution on Metal Trace Element Concentrations in Marine Waters," *Water, Air, & Soil Pollution*, vol. 226, no. 12, p. 423, Dec. 2015, doi: 10.1007/s11270-015-2694-x.
- [3] C. Gonzalez, J. Genesca, O. Alvarez, and J. A. Juarez-Islas, "Solidification of chill-cast Al-Zn-Mg alloys to be used as sacrificial anodes," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 34, no. 12, pp. 2991–2997, Dec. 2003, doi: 10.1007/s11661-003-0198-6.
- [4] X. Xie, L. Liu, R. Chen, G. Liu, Y. Li, and F. Wang, "Design of New Al Photoanode Composite for Cathodic Protection Based on Photocatalytic Material and Sacrificial Anode," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 166, no. 5, p. H3215, Feb. 2019, doi: 10.1149/2.0321905jes.
- [5] Z. Xia et al., "Influence of Sn, Cd, and Si addition on the electrochemical performance of Al–Zn–In sacrificial anodes," *Materials and Corrosion*, vol. 71, no. 4, pp. 585–592, Apr. 2019, doi: 10.1002/maco.201911336.
- [6] P. K. Perindustrian, "Rencana Induk Pembangunan Industri Nasional 2015–2035," Pusat Komunikasi Publik, Kementerian Perindustrian Republik Indonesia, 2015.
- [7] Det Norske Veritas, "DNV Recommended Practice Cathodic protection design" Bærum, Norway: DNV AS, May. 2021.
- [8] S. Shamsudin, M. Lajis, and Z. W. Zhong, "Evolutionary in Solid State Recycling Techniques of Aluminium: A review," *Procedia CIRP*, vol. 40, pp. 256–261, 2016, doi: 10.1016/j.procir.2016.01.117.

- [9] M. el Mehtedi, A. Forcellese, T. Mancina, M. Simoncini, and S. Spigarelli, “A new sustainable direct solid state recycling of AA1090 aluminum alloy chips by means of friction stir back extrusion process,” *Procedia CIRP*, vol. 79, pp. 638–643, 2019, doi: 10.1016/j.procir.2019.02.062.
- [10] Badan Pusat Statistik, *statistik-indonesia-2024*, vol. 52. Badan Pusat Statistik, 2024.
- [11] Aluminium Association, “International Alloy Designations and Chemical Composition Limits for Wrought Aluminum and Wrought Aluminum Alloys Use of the Information,” 2018, [Online]. Available: [www.aluminum.org](http://www.aluminum.org)
- [12] W. Luo et al., “Effect of Zn Content on Electrochemical Properties of Al-Zn-In-Mg Sacrificial Anode Alloy,” *Journal of the Chinese Society of Corrosion and Protection*, vol. 43, no. 5, pp. 1071–1078, Oct. 2023, doi: 10.11902/1005.4537.2022.356.
- [13] X. Liu et al., “Effects of alloying elements on the corrosion behavior and discharge performance of Al-Zn-Mg-In-Ti-Sn sacrificial anode,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 1010, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.jallcom.2024.177554.
- [14] C. John and R. K. Trethewey, *Korosi untuk mahasiswa sains dan rekayasa*. Gramedia Pustaka Utama, 1991.
- [15] R. W. Revie and H. H. Uhlig, *Corrosion and Corrosion Control. An Introduction to Corrosion Science and Engineering*, 4th ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2008.
- [16] M. F. Sidiq, “Analisa Korosi Dan Pengendaliannya,” *Jurnal Foundry*, vol. III(1), pp. 25–30, 2013.
- [17] Fontana, *Corrosion Engineering*. Ohio: Department of Metallurgical Engineering Ohio University, 1987.
- [18] R. M. H. H. J. A. M. Ahmad, “Korosi Yang Dipengaruhi Mikrobiologi dan Teknologi Pencegahannya di Industri Minyak dan Gas,” *Metalurgi Majalah Ilmu dan Teknologi*, vol. 37(3), pp. 135–150, 2021.

- [19]E. Bardal, Corrosion and Protection. Trondheim: The Norwegian University of Science and Technology, 2003.
- [20]M. Athawale and Chakraborty, “Material Selection using Multi-Criteria Decision-Making Methods: A Comparative Study,” *Journal of Materials: Design and Applications*, pp. 266–285, 2012.
- [21]K. Vasanth, Vapor Phase Corrosion Inhibitors, Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection. United States: ASM Handbook, ASM International, 2003.
- [22]B. P. H. Mahardika and H. I, “Studi Eksperimen Pengaruh Variasi Inhibitor dan Konsentrasi Inhibitor terhadap Laju Korosi dan Penentuan Efisiensi Inhibisi pada Baja Tulangan Beton ST 42 di Kondisi Lingkungan Laut,” *Jurnal Teknik ITS*, vol. Vol 5, No 2, 2016.
- [23]O. L. Riggs, C. E. Locke, and N. E. Hamner, Anodic Protection. Boston, MA: Springer US, 1981. doi: 10.1007/978-1-4684-3872-7.
- [24]A. Bahadori, “Principle of Electrochemical Corrosion and Cathodic Protection,” *Cathodic Corrosion Protection Systems*, pp. 1–34, 2014.
- [25]J. Anggono, “Studi Perbandingan Kinerja Anoda Korban Paduan Aluminium dengan Paduan Seng dalam Lingkungan Air Laut,” *Jurnal Teknik Mesin*, pp. 89–99, 2000.
- [26]A. Peabody, Control of Pipeline Corrosion, 2nd ed. Texas: NACE International, 2001.
- [27]P. R. Roberge, Handbook of Corrosion Engineering. New York: McGraw-Hill, 2000.
- [28]D. A. Jones, Principles and Prevention of Corrosion. Prentice Hall, 1996.
- [29]J. Wen, J. He, and X. Lu, “Influence of silicon on the corrosion behaviour of Al–Zn–In–Mg–Ti sacrificial anode,” *Corrosion Science*, vol. 53, no. 11, pp. 3861–3865, Nov. 2011, doi: 10.1016/j.corsci.2011.07.039.

- [30]R. Orozco, J. Genesca, and J. Juarez-Islas, "Effect of Mg Content on the Performance of Al-Zn-Mg Sacrificial Anodes," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 16, no. 2, pp. 229–235, Apr. 2007, doi: 10.1007/s11665-007-9037-z.
- [31]Z. Ahmad, Basic Concepts In Corrosion. Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control. 2006.
- [32]S. sen Wang, C. H. Liang, and N. B. Huang, "Influence of Si Content on the Characteristics of Al-Zn-In-Mg-Ti Sacrificial Anode," *Advanced Materials Research*, vol. 936, pp. 1963–1968, Jun. 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.936.1963.
- [33]F. J. Millero, Chemical Oceanography. CRC Press, 2016. doi: 10.1201/b14753.
- [34]J. H. Carpenter, "The Chesapeake Bay Institute Technique For The Winkler Dissolved Oxygen Method," *Limnology and Oceanography*, vol. 10, no. 1, pp. 141–143, Apr. 1965, doi: 10.4319/lo.1965.10.1.0141.
- [35]D. C. and B. S. C. Jr. Stephen, Ed., Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection, vol. 13A. ASM Internasional, 2003.
- [36]D. Lamrous, M. Y. Debili, and E. Boehm-Courjault, "Microstructure and Phase Composition of Al–Zn Alloys," *Journal of Advanced Microscopy Research*, vol. 8, no. 4, pp. 266–269, Dec. 2013, doi: 10.1166/jamr.2013.1168.
- [37]ASM Handbook, vol. 15: Casting. Ohio: ASM International, 1988.
- [38]P. N. Rao, Manufacturing Technology, vol. 1. Tata: McGraw-Hill Education, 2009.
- [39]S. Nasrazadani and S. Hassani, "Modern analytical techniques in failure analysis of aerospace, chemical, and oil and gas industries," in *Handbook of Materials Failure Analysis with Case Studies from the Oil and Gas Industry*, Elsevier, 2016, pp. 39–54. doi: 10.1016/B978-0-08-100117-2.00010-8.
- [40]ASTM G71-81 Standard Guide for Conducting and Evaluating Galvanic Corrosion Tests in Electrolytes. ASTM International, 2003.

- [41] M. Andrei, F. di Gabriele, P. L. Bonora, and D. Scantlebury, "Corrosion behaviour of magnesium sacrificial anodes in tap water," *Materials and Corrosion*, vol. 54, no. 1, pp. 5–11, Jan. 2003, doi: 10.1002/maco.200390010.
- [42] Z. Y. Liu et al., "Transmission Electron Microscopy Observation of Corrosion Behaviors of Platinized Carbon Blacks under Thermal and Electrochemical Conditions," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 157, no. 6, p. B906, 2010, doi: 10.1149/1.3391737.
- [43] ASTM E407-07 Standard Practice for Microetching Metals and Alloys. ASTM International, 2012.
- [44] A. Keyvani, M. Saremi, and M. R. Saeri, "Anodic behavior of Al–Zn–In sacrificial anodes at different concentration of zinc and indium," *International Journal of Materials Research*, vol. 103, no. 12, pp. 1533–1538, Dec. 2012, doi: 10.3139/146.110817.
- [45] J. Iran and Chem, "Influence of Casting Temperature on Electrochemical Behavior of Al-Zn-In Sacrificial Anodes," 2005.
- [46] S. S. Shin, K. M. Lim, and I. M. Park, "Characteristics and microstructure of newly designed Al-Zn-based alloys for the die-casting process," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 671, pp. 517–526, Jun. 2016.
- [47] S. Khireche, D. Boughrara, A. Kadri, L. Hamadou, and N. Benbrahim, "Corrosion mechanism of Al, Al-Zn and Al-Zn-Sn alloys in 3wt.% NaCl solution," *Corrosion Science*, vol. 87, pp. 504–516, 2014, doi: 10.1016/j.corsci.2014.07.018.
- [48] Y. Han et al., "Electrochemical Performance of Aluminum Anodes with Different Grain Sizes for Al-Air Batteries," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 167, no. 4, p. 040514, Feb. 2020.
- [49] W. Zhang et al., "Electrochemical Performance of Al-1Zn-0.1In-0.1Sn-0.5Mg-xMn (x = 0, 0.1, 0.2, 0.3) Alloys Used as the Anode of an Al-Air Battery," *Processes*, vol. 10, no. 2, Feb. 2022.