

(Revisi 14) DRAFT SKRIPSI M RAIHAN 3334190014

by Turnitin Cek

Submission date: 14-Apr-2025 01:49PM (UTC+0530)

Submission ID: 2645542513

File name: _Revisi_14_DRAFT_SKRIPSI_M_RAIHAN_3334190014.pdf (10.88M)

Word count: 26714

Character count: 155712

**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

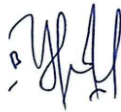
Disetujui untuk Jurusan Teknik Metalurgi oleh:

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

Tanda Tangan

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.



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 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
HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
LEMBAR PERSETUJUAN	iii
LEMBAR PERNYATAAN	iv
ABSTRAK	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
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
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	9
¹ 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
BAB III METODE PENELITIAN	60
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
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	70
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
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	95
5.1. Kesimpulan	95
5.2. Saran	95
DAFTAR PUSTAKA	96
LAMPIRAN A PERHITUNGAN	101
LAMPIRAN B DATA PENELITIAN	106
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
LAMPIRAN C GAMBAR ALAT DAN BAHAN	142

1 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
40 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: (a) Al-Zn-In, (b) Al-Zn-In-Sn, (c) Al-Zn-In-Cd, (d) Al-Zn-In-Si...56	56
Gambar 2.20	Skematik Efek Penambahan <i>Shrinkage Allowance</i> Terhadap Dimensi Pattern Untuk Pengecoran Aluminium	58
Gambar 2.21	Skematik Efek Penambahan <i>Machining Allowance</i> (a) dan <i>Draft Allowance</i> (b) Terhadap Dimensi Pattern Untuk 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 Terhadap Nilai Efisiensi Anoda	73
Gambar 4.2	Grafik Tafel Polarisasi	76
Gambar 4.3	Grafik Perbandingan Kadar Seng (Zn) terhadap OCP (V) vs SHE	78
Gambar 4.4	Grafik Perbandingan Kadar Zn dan Temperatur Penuangan Terhadap Laju Korosi	80
Gambar 4.5	Struktur Mikro Anoda Al-2,6% Zn Temperatur Tuang 650°C (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 (a), 700°C (b), dan 750°C (c) pembesaran 100x.....	82
Gambar 4.7	Struktur Mikro Anoda Al-5% Zn Temperatur Tuang 650°C (a), 700°C (b), dan 750°C (c) pembesaran 100x.....	82
Gambar 4.8	Grafik Perbandingan Kadar Zn dan Temperatur Penuangan 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 ¹⁰ Temperatur Tuang (a) 750°C, (b) 700°C, dan (c) 650°C	124
Gambar B.17 Makrografi Anoda 3,6% Zn ¹⁰ Temperatur Tuang (a) 750°C, (b) 700°C, dan (c) 650°C	124
Gambar B.18 Makrografi Anoda 5% Zn ¹⁰ Temperatur Tuang (a) 750°C, (b) 700°C, dan (c) 650°C	125
Gambar B.19 Parameter Eksperimen <i>Software</i> Corrttest Studio 6	126
Gambar B.20 Pengolahan Data <i>Software</i> Corrttest Studio 6	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 ₃)	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 dan 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) $\leq 0,002$ wt.%, Silikon (Si) $\leq 0,12$ wt.%, Besi (Fe) $\leq 0,09$ 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 sebagai dudukan 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.

45

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.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Definisi Korosi

Korosi sering diidentifikasi oleh orang awam sebagai karat, yang merupakan istilah khusus untuk korosi yang terjadi pada baja. Namun, korosi adalah gejala destruktif yang mempengaruhi hampir semua logam. Besi (Fe) adalah logam yang paling banyak digunakan oleh manusia, sehingga tidak mengherankan jika karat dan korosi dianggap sebagai istilah yang serupa [14].

Kerusakan spontan pada material, khususnya logam dan paduannya, dikenal sebagai korosi. Penyebab kerusakan ini adalah reaksi kimia, biokimia, dan elektrokimia yang terjadi antara logam dan lingkungan korosifnya. Faktor-faktor yang membentuk lingkungan korosif meliputi kelembaban, oksigen, larutan asam organik dan anorganik, tekanan tinggi, suhu, dan keberadaan klorida. Saat korosi terjadi, logam akan mengalami transformasi menjadi bentuk yang lebih stabil secara termodinamika seperti oksida, hidroksida, garam, atau karbonat [1].

Korosi bisa didefinisikan sebagai degradasi logam yang disebabkan oleh interaksi kimia atau elektrokimia dengan lingkungannya. Korosi memiliki dampak besar dalam sektor industri. Secara ekonomi, korosi menimbulkan biaya langsung, seperti penggantian bagian atau struktur yang rusak, serta dampak tidak langsung seperti penurunan efisiensi produksi, kontaminasi produk industri, dan bahkan penghentian proses produksi [15]. Terdapat beberapa komponen utama yang wajib ada agar proses terbentuknya korosi dapat terjadi, komponen-komponen tersebut antara lain [16]:

1. Anoda

Merupakan elektroda logam bermuatan sel negatif. Korosi logam umumnya terjadi pada anoda. Pada anoda, terjadi reaksi oksidasi di mana logam atau zat anoda melepaskan elektron sebagai bagian dari proses reaksi kimia atau elektrokimia yang terjadi.

2. Katoda

Merupakan elektroda logam bermuatan sel positif. Reaksi reduksi terjadi di katoda yang menangkap elektron dari anoda dan material logam tidak akan mengalami korosi karena mengonsumsi elektron dari anoda yang mempertebal permukaan logam.

3. Elektrolit

Merupakan larutan penghantar listrik berada diantara elektroda positif dan negatif. Elektrolit menghantarkan listrik karena adanya ion-ion yang mampu menghantarkan gaya ekuivalen elektron sehingga terjadi reaksi redoks. Selain itu, elektrolit sebagai penghubung kontak listrik antara anoda dan katoda. Apabila kandungan ion dalam elektrolit semakin banyak maka proses penghantaran listrik semakin cepat.

4. Konduktor atau *Metallic Path*

Metallic path merupakan media yang mengalirkan elektron dari anoda ke katoda, sehingga arus dalam sel korosi dapat mengalir. Pada umumnya material yang digunakan sebagai konduktor ialah material yang mampu mengalirkan arus.

2.2. Persamaan Laju Korosi

Laju Korosi adalah kecepatan di mana suatu logam mengalami kerusakan akibat reaksi kimia dengan lingkungannya, seperti oksidasi atau reaksi dengan larutan korosif. Laju ini biasanya diukur dalam satuan ketebalan logam yang terkikis per satuan waktu. Semakin tinggi laju korosi, semakin cepat logam mengalami kerusakan [15]. Satuan yang paling umum digunakan untuk laju korosi yaitu *mils per year* (mpy). Rumus laju korosi dalam mpy dapat dilihat pada persamaan 2.1 [17].

$$CR = \frac{534W}{\rho At} \quad (2.1)$$

dimana:

W: Kehilangan berat logam (mg)

ρ (rho): Densitas material (g/cm³)

A: Luas permukaan logam yang terpapar korosi (in²)

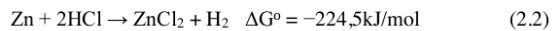
t: Waktu paparan (jam)

Untuk menangani media kimiawi ketika serangan bersifat merata, logam diklasifikasikan ke dalam tiga kelompok berdasarkan laju korosi dan aplikasi yang dimaksud. Klasifikasi ini adalah sebagai berikut [15]:

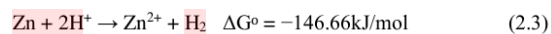
1. Laju korosi < 0,15 mm/tahun (< 0,005 inci/tahun) — Logam dalam kategori ini memiliki ketahanan korosi yang baik sehingga cocok untuk komponen kritis, misalnya dudukan katup, serta poros pompa dan pegas.
2. Laju korosi 0,15 hingga 1,5 mm/tahun (0,005 hingga 0,05 inci/tahun) — Logam dalam kelompok ini memadai jika laju korosi yang lebih tinggi dapat ditoleransi, seperti untuk tangki, pipa, badan katup, dan kepala baut.
3. Laju korosi > 1,5 mm/tahun (> 0,05 inci/tahun) biasanya tidak memadai.

2.3. Aspek Elektrokimia Korosi

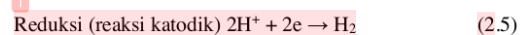
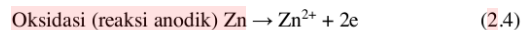
Proses elektrokimia dari korosi dapat diilustrasikan melalui reaksi antara atom seng dan asam klorida. Ketika seng ditempatkan dalam larutan asam klorida yang encer, terjadi reaksi kuat di mana gas hidrogen berevolusi dan seng larut, membentuk larutan seng klorida. Persamaan 2.2 berikut merupakan reaksi yang terjadi.



Kemudian, untuk mencapai bentuk yang lebih sederhana persamaan diatas dapat disederhanakan seperti pada Persamaan (2.3) berikut ini:

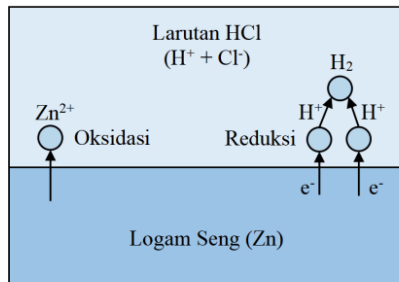


Karenanya, seng bereaksi dengan ion hidrogen dari larutan asam untuk membentuk ion seng dan gas hidrogen. Berdasarkan reaksi tersebut dapat dilihat bahwa selama reaksi berlangsung, seng teroksidasi menjadi ion seng dan ion hidrogen tereduksi menjadi hidrogen. Kemudian pada persamaan tersebut dapat dibagi menjadi dua reaksi, diantaranya oksidasi dari seng dan reduksi ion hidrogen:



Suatu reaksi oksidasi atau anodik ditunjukkan dengan kenaikan valensi atau produksi elektron. Ketika terjadi penurunan valensi atau konsumsi elektron secara signifikan, ini disebut sebagai reaksi reduksi atau katodik. Persamaan (2.4) dan (2.5) merupakan reaksi parsial yang terjadi secara spontan dan memiliki laju yang sama pada permukaan logam. Konsep dasar penting dari korosi adalah bahwa

selama proses korosi, laju reaksi oksidasi sebanding dengan laju reaksi reduksi (dalam konteks produksi dan konsumsi elektron).



Gambar 2.1 Skematik Reaksi Elektrokimia Seng Pada Elektrolit Asam Klorida [17]

Konsep di atas, seperti yang diilustrasikan dalam Gambar 2.1, menunjukkan bahwa atom seng telah mengalami transformasi menjadi ion seng dan dua elektron. Elektron yang tersisa dalam logam kemudian dikonsumsi selama proses reduksi ion hidrogen. Dalam beberapa kasus korosi, reaksi oksidasi terjadi merata di seluruh permukaan, sedangkan dalam kasus lain, dapat terjadi secara terlokalisasi atau pada area tertentu.

Korosi pada seng dalam asam hidroklorik adalah proses elektrokimia di mana setiap reaksi dapat dibagi menjadi dua reaksi parsial, yaitu oksidasi dan reduksi, yang dapat disebut sebagai reaksi elektrokimia. Persamaan setengah reaksi untuk oksidasi dan reduksi memperlihatkan persamaan yang terjadi dapat diklasifikasikan menjadi bentuk yang lebih umum. Persamaan umum untuk reaksi oksidasi atau anodik ditunjukkan dalam Persamaan 2.6.



Persamaan reaksi tersebut, jumlah elektron yang diproduksi sama dengan nilai valensi dari ion logamnya. Pada reaksi katodik atau reduksi terdapat berbagai

macam reaksi yang terjadi pada korosi logam. Beberapa reaksi yang umum terjadi adalah evolusi hidrogen seperti pada Persamaan 2.7, reduksi oksigen pada larutan asam seperti pada Persamaan 2.8, reduksi oksigen pada larutan basa atau netral seperti pada Persamaan 2.9, reduksi ion logam pada Persamaan 2.10, serta reaksi endapan logam pada Persamaan 2.10.



Asam atau media asam sering dijumpai menjadikan evolusi hidrogen merupakan reaksi katodik yang paling umum terjadi. setiap larutan berair yang terpapar udara dapat menjalani reaksi reduksi oksigen sehingga reaksi ini juga sangat umum. proses kimia tertentu menjadikan reaksi reduksi ion logam dan endapan logam lebih jarang ditemukan. Kesamaan pada semua reaksi ini yaitu saling membutuhkan atau menyerap elektron.

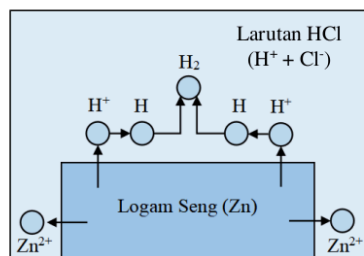
Selama proses terjadinya korosi, dapat terjadi banyak reaksi reduksi dan oksidasi. Ketika suatu paduan terjadi korosi, setiap unsur logam pada paduan akan terkorosi dan terlarut menjadi ion-ionnya masing-masing dalam larutan. Misalnya, pada korosi logam seng pada larutan asam klorida dengan kondisi teraerasi, korosi ini memiliki dua reaksi katodik yang mungkin terjadi, yaitu reduksi oksigen dan evolusi hidrogen. Pada permukaan seng, kedua reaksi yang terjadi menangkap elektron. Sebab laju reduksi sama dengan laju oksidasi, peningkatan laju reduksi akan menyebabkan meningkatnya laju pelarutan seng pada larutan. Hal ini

menunjukkan bahwa larutan asam tanpa oksigen terlarut lebih tidak korosif dibandingkan larutan asam yang mengandung oksigen terlarut.

Reaksi katodik dan anodik pada proses korosi yang saling bergantung satu sama lain dan memiliki laju yang sama menyebabkan laju korosi dapat diperlambat dengan menurunkan laju salah satu reaksi tersebut. Misalnya, untuk mengurangi kandungan oksigen terlarut dalam larutan, dapat dilakukan dengan menghindari kontak larutan dengan udara atau mengurangi jumlah udara yang terlarut. Jika permukaan logam dilapisi dengan cat atau lapisan non-konduktif lainnya, laju reaksi anodik dan katodik akan berkurang, demikian juga laju korosinya. Beberapa faktor yang mempengaruhi aspek elektrokimia meliputi:

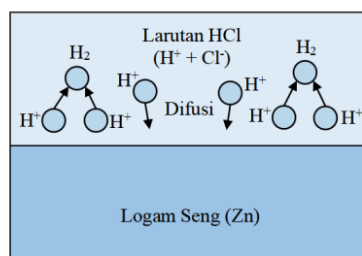
a. Polarisasi

Polarisasi elektrokimia pada korosi merujuk pada perubahan potensial elektrode dari kondisi kesetimbangan karena adanya arus yang mengalir melalui sel elektrokimia. Fontana [17] membagi polarisasi menjadi tiga jenis utama: polarisasi aktivasi, polarisasi konsentrasi, dan polarisasi resistif. Gambar 2.2 menunjukkan urutan terjadinya polarisasi aktivasi, dimulai dengan proses adsorpsi ion hidrogen ke permukaan logam, yang kemudian diikuti oleh transfer elektron.



Gambar 2.2 Reaksi Reduksi Hidrogen pada Proses Polarisasi Aktivasi [17]

Setelah transfer elektron, dua atom hidrogen bergabung membentuk gelembung gas hidrogen (H_2). Fenomena ini menitikberatkan pentingnya pengendalian kondisi lingkungan untuk mengatur laju korosi. Polarisasi konsentrasi mengacu pada reaksi kimia yang dipengaruhi oleh difusi dalam elektrolit. Contoh dari fenomena ini dapat dilihat pada Gambar 2.3, yang menunjukkan kasus evolusi hidrogen. Dalam kasus ini, konsentrasi ion hidrogen dalam larutan relatif rendah, sehingga laju reduksi dikendalikan oleh difusi ion hidrogen menuju permukaan logam.

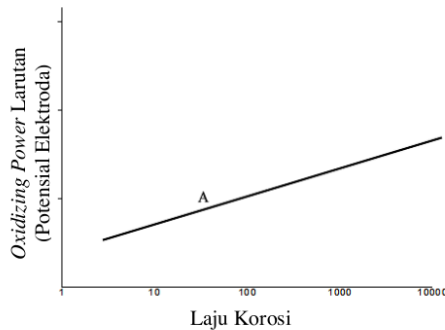


Gambar 2.3 Polarisasi Konsentrasi Pada Evolusi Hidrogen [17]

Polarisasi aktivasi biasanya mengontrol korosi di media dengan konsentrasi tinggi spesies aktif, seperti larutan asam. Di sisi lain, polarisasi konsentrasi dominan pada konsentrasi spesies tereduksi rendah, seperti larutan asam encer dan larutan garam yang teraerasi. Kadang-kadang, polarisasi konsentrasi dalam disolusi logam kecil sehingga diabaikan kecuali dalam reaksi reduksi. Membedakan polarisasi aktivasi dan konsentrasi tidak selalu mudah karena dipengaruhi oleh lingkungan reaksi. Peningkatan difusi mengurangi polarisasi konsentrasi dan meningkatkan laju reaksi, meningkatkan kecepatan agitasi dalam media korosi meningkatkan laju korosi jika dikontrol oleh polarisasi konsentrasi, tidak berpengaruh pada laju korosi dalam reaksi anodik dan katodik [17].

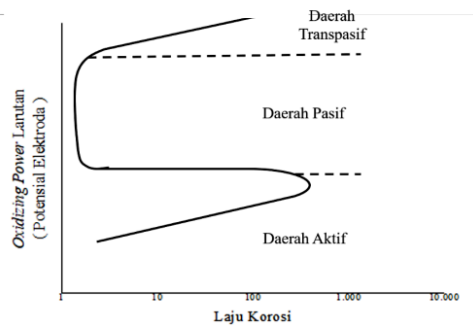
b. Pasivitas

Pasivitas suatu logam adalah fenomena kompleks yang terjadi dalam kondisi spesifik. Secara sederhana, pasivitas mengacu pada hilangnya reaktivitas kimia pada logam atau paduan dalam lingkungan tertentu. Dalam keadaan ini, logam menjadi lebih inert atau mulia, mirip dengan emas dan platina. Logam yang sering menunjukkan fenomena pasivitas meliputi besi, nikel, silikon, krom, dan titanium, serta paduan yang mengandung logam-logam tersebut. Gambar 2.4 menunjukkan fenomena pasivitas pada logam yang tidak memiliki efek pasivitas.



Gambar 2.4 Laju Korosi Suatu Logam Tanpa Efek Pasivitas Terhadap Fungsi Potensial Elektroda [17]

Gambar 2.5 menunjukkan efek pasivitas pada logam atau paduan, yang terbagi menjadi tiga daerah: aktif, pasif, dan transpasif. Di daerah aktif, logam berperilaku seperti logam biasa di mana penambahan sedikit zat pengoksidasi dapat meningkatkan laju korosi dengan cepat. Penambahan lebih banyak zat pengoksidasi menyebabkan penurunan tiba-tiba dalam laju korosi, menandai awal daerah pasif. Namun, pada konsentrasi oksidator yang sangat tinggi atau dengan oksidator yang sangat kuat, laju korosi kembali meningkat sesuai dengan daerah transpasif [17].



Gambar 2.5 Laju Korosi Suatu Logam Dengan Efek Pasivitas Terhadap Fungsi Potensial Elektroda [17]

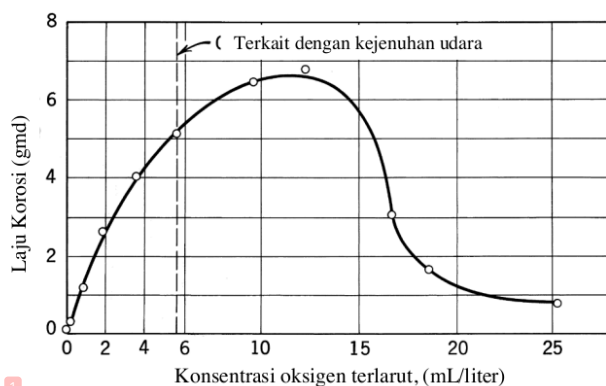
2.4. Aspek Lingkungan Akuatik

Dalam konteks industri, sering kali diinginkan untuk mengontrol beberapa variabel dalam proses. Ada beberapa aspek yang memengaruhi laju korosi. Beberapa faktor lingkungan berikut sering mempengaruhi laju korosi, termasuk:

2.4.1. Pengaruh Oksigen dan Pengoksidasi Terhadap Laju Korosi

Peningkatan konsentrasi oksigen pada awalnya mempercepat korosi besi, namun ditemukan bahwa setelah mencapai konsentrasi kritis, laju korosi kembali menurun ke nilai rendah. Dalam air suling, di atas konsentrasi oksigen kritis laju korosi mulai menurun kembali yaitu sekitar 12 mL O₂/liter terlihat pada Gambar 2.6. Nilai ini meningkat dengan adanya garam terlarut dan dengan suhu, dan menurun dengan peningkatan kecepatan dan pH. Pada pH sekitar 10, konsentrasi oksigen kritis mencapai nilai untuk air yang jenuh oksigen (6 mL O₂/liter) dan masih lebih rendah untuk larutan yang lebih alkalis. Penurunan laju korosi disebabkan oleh pasivasi besi oleh oksigen, seperti yang ditunjukkan oleh potensial besi dalam H₂O jenuh udara yaitu -0.4 hingga -0.5 V terhadap S.H.E. dan 0.1 hingga 0.4 V dalam H₂O jenuh oksigen

(28 mL O₂/liter). Tampaknya, pada tekanan parsial yang lebih tinggi, lebih banyak oksigen mencapai permukaan logam daripada yang dapat direduksi oleh reaksi korosi — kelebihan oksigen ini kemudian tersedia untuk membentuk lapisan pasif; peningkatan laju reaksi katodik akibat peningkatan konsentrasi oksigen meningkatkan polarisasi area anod hingga mencapai kepadatan arus kritis untuk pasivasi [15].



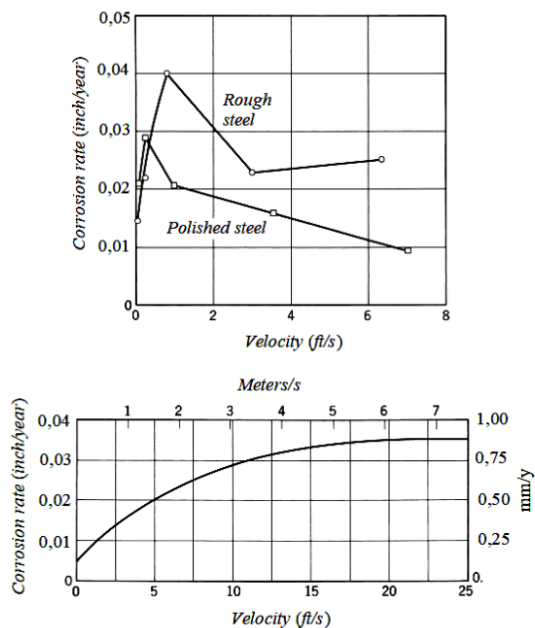
Gambar 2.6 Efek konsentrasi oksigen terhadap laju korosi baja karbon dalam air distilasi yang bergerak perlahan, 48 jam, 25°C [15]

Pasivasi terjadi pada tekanan oksigen yang lebih tinggi, sel pasif-aktif terbentuk jika pasivasi rusak secara lokal (misalnya, pada celah-celah). Kerusakan semacam itu disertai dengan pitting yang parah, terutama pada suhu yang lebih tinggi, di hadapan ion halida, atau pada tekanan oksigen kritis di mana pasivasi berada pada ambang pembentukan atau kerusakan. Perilaku ini membatasi penggunaan praktis tekanan oksigen parsial yang tinggi sebagai cara untuk mengurangi korosi baja. Dalam konsentrasi klorida yang cukup besar, seperti dalam air laut, pasivasi besi sama sekali tidak terbentuk, dan

dalam media semacam itu, peningkatan tekanan oksigen justru menyebabkan peningkatan laju korosi [15].

2.4.2. Pengaruh Agitasi Terhadap Laju Korosi

Dalam air tawar alami, pH biasanya terlalu tinggi sehingga evolusi hidrogen tidak memainkan peran penting, dan gerakan relatif air pada awalnya meningkatkan laju korosi dengan membawa lebih banyak oksigen ke permukaan. Pada kecepatan yang cukup tinggi, oksigen yang cukup dapat mencapai permukaan untuk menyebabkan passivitas sebagian. Jika ini terjadi, laju korosi akan menurun kembali setelah peningkatan awal seperti yang terlihat pada Gambar 2.7 [15].

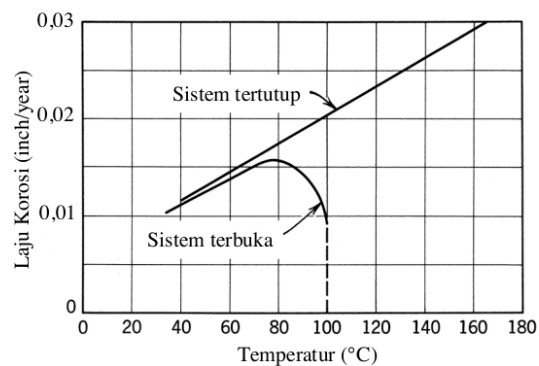


Gambar 2.7 Pengaruh Kecepatan Terhadap Laju Korosi [15]

Jika kecepatan meningkat lebih lanjut, erosi mekanis dari lapisan pasif atau lapisan produk korosi akan kembali meningkatkan laju korosi. Laju korosi maksimum sebelum passivitas terjadi pada kecepatan yang bervariasi tergantung pada kekasaran permukaan logam dan kotoran dalam air. Dalam keberadaan konsentrasi tinggi Cl^- , seperti pada air laut, passivitas tidak terbentuk pada kecepatan manapun, dan laju korosi meningkat tanpa penurunan pada kecepatan menengah apapun. Perilaku yang sama diharapkan terjadi pada suhu tinggi yang menghalangi kemungkinan passivitas oleh oksigen terlarut [15].

2.4.3. Pengaruh Temperatur

Gambar 2.8 menunjukkan pengaruh suhu terhadap korosi besi dalam air yang mengandung oksigen terlarut pada sistem terbuka dan tertutup.



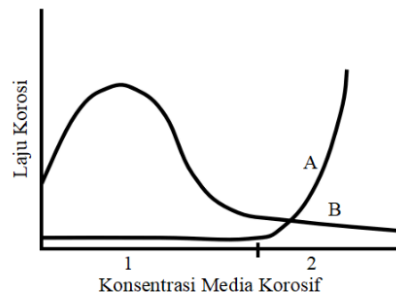
Gambar 2.8 Pengaruh suhu terhadap korosi besi dalam air yang mengandung oksigen terlarut [15]

Ketika korosi dikendalikan oleh difusi oksigen, laju korosi pada konsentrasi oksigen tertentu kira-kira meningkat dua kali lipat untuk setiap

kenaikan suhu 30 °C (55 °F). Gambar 2.8. menunjukkan dalam wadah terbuka, yang memungkinkan oksigen terlarut untuk melarikan diri, laju korosi meningkat dengan suhu hingga sekitar 80 °C (175 °F) dan kemudian turun ke nilai yang sangat rendah pada titik didih. Penurunan laju korosi di atas 80 °C ini berkaitan dengan penurunan yang nyata dari kelarutan oksigen dalam air seiring suhu meningkat, dan efek ini akhirnya mengalahkan efek percepatan suhu itu sendiri. Dalam sistem tertutup, di sisi lain, oksigen tidak dapat melarikan diri, dan laju korosi terus meningkat dengan suhu hingga semua oksigen habis. Ketika korosi disertai dengan evolusi hidrogen, peningkatan laju korosi lebih dari dua kali lipat untuk setiap kenaikan suhu 30 °C. Laju korosi besi dalam asam klorida, misalnya, kira-kira meningkat dua kali lipat untuk setiap kenaikan suhu 10 °C [15].

2.4.4. Pengaruh Konsentrasi

Gambar 2.9 menunjukkan pengaruh konsentrasi media korosif terhadap laju korosi. Kurva A pada daerah 1 menggambarkan bahwa beberapa material, meskipun menunjukkan efek pasivitas, kurang terpengaruh oleh konsentrasi media korosif pada laju korosinya. Namun, pada konsentrasi sangat tinggi (daerah 2), laju korosi meningkat pesat. Contohnya adalah timbal, yang membentuk lapisan protektif timbal sulfat pada asam sulfat berkonsentrasi rendah tetapi terlarut pada asam sulfat berkonsentrasi tinggi. Contoh reaksi pada Gambar 2.9 yaitu (A.1) Ni dalam NaOH, 18Cr-8Ni dalam HNO₃, Hastelloy B dalam HCl, dan Ti dalam HCl; (A.1-2) Monel dalam HCl, dan Pb dalam H₂SO₄; (B) Al dalam asam asetat dan HNO₃, 18Cr-8Ni dalam H₂SO₄, dan Fe dalam H₂SO₄.



Gambar 2.9 Pengaruh Konsentrasi Terhadap Laju Korosi [17]

Perilaku asam terlarut dalam air pada berbagai konsentrasi sering digambarkan oleh kurva B. Peningkatan konsentrasi media korosif awalnya meningkatkan laju korosi karena peningkatan ion hidrogen yang aktif. Namun, pada konsentrasi asam yang sangat tinggi, laju korosi mencapai puncaknya dan kemudian menurun karena asam berkonsentrasi tinggi mengurangi ionisasi, menjadikan beberapa jenis asam seperti sulfat, asetat, dan hidrofluorat inert pada konsentrasi 100% pada suhu sedang [17].

2.4.5. Pengaruh Efek Galvanik

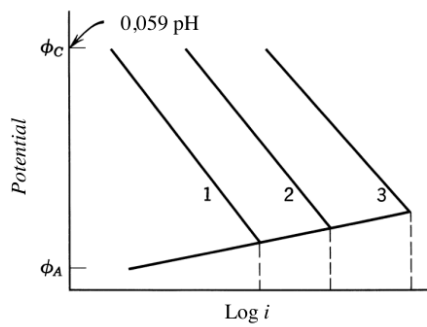
Kehilangan berat besi yang digabungkan dengan tembaga adalah sama seperti jika seluruh permukaan tersebut terdiri dari besi. Eksperimen ini juga menunjukkan bahwa penetrasi besi yang sebenarnya meningkat ketika besi digabungkan dengan logam yang lebih mulia. Hal ini menunjukkan bagaimana penggabungan mempengaruhi laju korosi pada logam yang kurang mulia. Dalam situasi di mana difusi *depolarizer* mengendalikan prosesnya, hubungan umum antara penetrasi (yang sebanding dengan laju korosi) dari logam dengan area A_a , yang digabungkan dengan logam yang lebih mulia dengan area A_c , dijelaskan sebagai berikut [15].

$$P = P_0 \left(1 + \frac{A_c}{A_a} \right) \quad (2.12)$$

di mana P_0 adalah penetrasi normal dari logam yang tidak digabungkan.

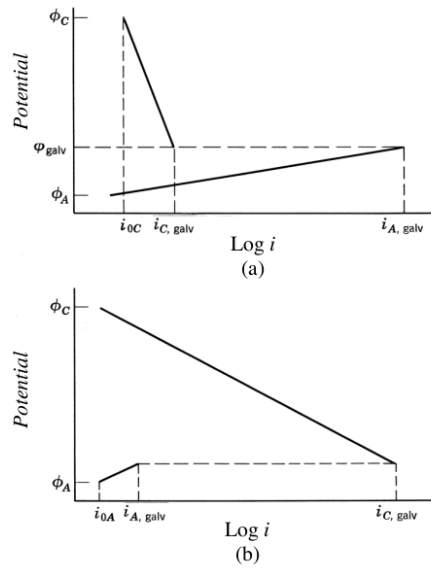
Jika rasio area A_c/A_a besar, peningkatan korosi yang disebabkan oleh penggabungan dapat menjadi sangat signifikan. Konduktivitas elektrolit dan geometri sistem turut memengaruhi masalah ini, karena hanya bagian dari area katoda yang efektif di mana hambatan antara anoda dan katoda bukan merupakan faktor pengendali. Dalam air keran yang lembut, jarak kritis antara tembaga dan besi mungkin sekitar 5 mm; dalam air laut, jarak ini dapat mencapai beberapa desimeter. Jarak kritis menjadi lebih besar jika perbedaan potensial antara anoda dan katoda lebih besar. Semua logam yang lebih mulia mempercepat korosi dengan cara yang sama, kecuali jika ada lapisan permukaan (misalnya, pada timbal) yang bertindak sebagai penghalang difusi oksigen atau jika logam tersebut merupakan katalis yang buruk untuk reduksi oksigen [15].

Dalam kasus logam yang digabungkan dan terpapar larutan yang telah didaerasi, di mana korosi disertai dengan evolusi hidrogen, peningkatan area logam yang lebih mulia juga meningkatkan korosi pada logam yang kurang mulia. Gambar 2.10 menunjukkan kurva polarisasi untuk anoda yang sedikit terpolarisasi dibandingkan dengan katoda tempat hidrogen berevolusi (kontrol katodik).



Gambar 2.10 Pengaruh Potensial Overhidrogen Katoda terhadap Korosi Galvanik dalam Asam Nonoksidatif yang Dideaerasi [15].

Kemiringan 1 menunjukkan polarisasi area logam mulia dengan potensial overhidrogen tinggi. Kemiringan 2 dan 3 mewakili logam dengan potensial overhidrogen lebih rendah. Arus galvanik yang sesuai diperoleh dengan memproyeksikan titik perpotongan kurva polarisasi anoda-katoda ke sumbu log i . Secara umum, setiap logam tempat hidrogen terlepas bertindak sebagai elektroda hidrogen dengan potensial kesetimbangan pada tekanan hidrogen 1 atm sebesar -0,059pH volt. Ketika logam yang mengalami korosi digabungkan dengan logam yang lebih mulia dengan area bervariasi, situasinya ditunjukkan dalam Gambar 2.11, di mana kerapatan arus log dipetakan sebagai pengganti arus total log.



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 [15].

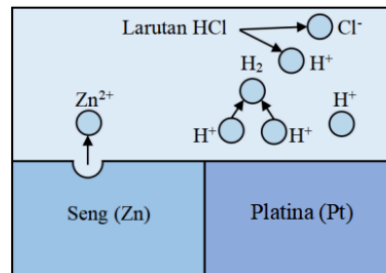
Jika anoda dengan area A_a digabungkan dengan logam yang lebih mulia dengan area A_c , Maka kerapatan arus galvanik pada anoda yang dihasilkan oleh penggabungan dapat ditunjukkan sebagai [15].

$$\log i_{A,galv} = \frac{-\phi_{galv} - 0,059pH}{\beta} + \log \frac{A_c}{A_a} i_0 \quad (2.13)$$

dimana ϕ_{galv} adalah potensial korosi (S.H.E.) dari pasangan galvanik (diukur pada jarak yang jauh dibandingkan dengan dimensi pasangan tersebut), β dan i_0 masing-masing adalah konstanta Tafel dan kerapatan arus pertukaran untuk pelepasan ion hidrogen pada logam mulia, sehingga

$$\frac{I_{\text{galv}}}{A_a} = i_{A,\text{galv}} \quad (2.14)$$

Gambar 2.12 menggambarkan penggunaan seng yang dicelupkan dalam larutan asam klorida dan disambungkan dengan platina yang lebih inert. Platina yang inert dalam media ini menyebabkan evolusi hidrogen lebih cenderung terjadi pada permukaannya dibandingkan dengan seng. Kombinasi ini meningkatkan laju reaksi katodik, yang pada gilirannya meningkatkan laju korosi pada seng.



Gambar 2.12 Skematik Pengaruh Efek Galvanik [17]

2.5. Jenis-Jenis Korosi

Korosi dapat dikelompokkan menjadi beberapa jenis berdasarkan kondisi lingkungan di mana mereka terjadi. Salah satunya adalah korosi basah dan korosi kering. Korosi basah terjadi ketika ada larutan yang bertindak sebagai elektrolit, seperti air dalam korosi baja. Ini adalah jenis korosi paling umum. Sementara itu, korosi kering terjadi ketika logam atau paduannya terpapar pada lingkungan di atas titik embun, di mana tidak ada larutan yang terlibat. Contoh umum korosi kering adalah pada baja yang terpapar pada furnace atau lingkungan dengan suhu tinggi di mana uap air dan gas dapat menyebabkan korosi [17].

Selain itu, ada berbagai bentuk korosi yang dapat diklasifikasikan sebagai berikut [1]:

1. Korosi seragam, yang menyebabkan penipisan merata dari permukaan logam.
2. Korosi galvanik, terjadi ketika dua logam yang berbeda dalam kontak langsung dalam lingkungan elektrolitik.
3. Korosi sumuran, yang menyebabkan pembentukan lubang-lubang kecil atau "pits" pada permukaan logam.
4. Korosi celah, terjadi di area tertutup yang membatasi akses ke lingkungan korosif.
5. Korosi retak tegang, terjadi akibat tegangan mekanis dalam lingkungan korosif, yang dapat menyebabkan retakan pada logam.
6. Korosi batas butir, terjadi di sepanjang batas butir atau batas kristal logam.
7. *Selective leaching*, di mana salah satu komponen logam larut lebih cepat daripada yang lain, meninggalkan logam yang melemah.
8. Korosi erosi, yang terjadi karena gesekan atau abrasi mekanis di lingkungan korosif.
9. Kerusakan hidrogen

2.6. Pengendalian Korosi

Dalam upaya mencegah korosi pada material logam, beberapa pendekatan dapat diambil. Salah satunya adalah melalui proses pelapisan permukaan logam menggunakan cat atau bahan pelindung lainnya. Selain itu, pemilihan jenis material dan desain yang tepat juga dapat menjadi langkah efektif dalam pencegahan korosi. Metode lain meliputi proteksi katoda dengan menggunakan anoda korban atau arus paksa, serta modifikasi lingkungan di sekitar material logam tersebut [16].

Beberapa metode yang digunakan untuk mereduksi laju korosi pada logam antara lain sebagai berikut [18].

1. Pelapisan atau *Coating*

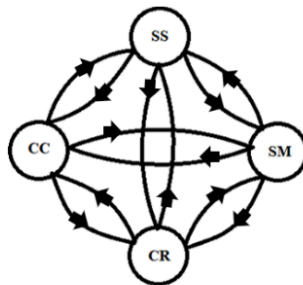
Proses ini dilakukan dengan memberikan lapisan pelindung tambahan pada permukaan logam, lapisan yang digunakan umumnya menggunakan cat sebagai bahan dasarnya. Lapisan tersebut bertujuan untuk mengurangi interaksi antar permukaan logam dengan oksigen atau udara di sekitar permukaan logam yang dapat mempercepat laju korosi. Oleh karena itu, bahan yang digunakan sebagai pelapis harus memiliki beberapa kriteria, diantaranya daya adhesi yang baik, mudah dilapiskan, tahan korosi, tahan air, tahan perubahan temperatur, dan lain sebagainya. Menurut Bardal [19], *coating* merupakan salah satu metode untuk mencegah korosi melalui tiga mekanisme utama atau kombinasi dari dua di antaranya. Pertama, *coating* berfungsi sebagai penghalang yang mencegah kontak antara media korosif dengan material logam. Kedua, *coating* dapat memberikan proteksi katodik, di mana material *coating* bekerja seperti anoda korban. Ketiga, *coating* bertindak sebagai inhibitor yang memperlambat atau menghentikan reaksi korosi.

2. Desain dan Seleksi Material

Fenomena korosi pada material logam dapat dihambat lajunya dengan melakukan pemilihan desain dan material yang sesuai dengan kebutuhan serta kondisi lingkungan di sekitar material logam tersebut berada. Pemilihan desain dapat dilakukan dengan memperhatikan bentuk, serta kemiringan dan sudut dari material logam yang digunakan. Sedangkan seleksi material umumnya dilakukan dengan memperhatikan kandungan atau komposisi paduan material

logam yang terkandung di dalamnya seperti kandungan unsur C, Cr, Ni, dan sebagainya.

Gambar 2.13 menampilkan skema seleksi material. Dalam konteks pemilihan material, ada beberapa faktor yang harus dipertimbangkan. Ini termasuk kekuatan spesifik, yang berkaitan dengan kebutuhan kekuatan material dalam aplikasi (MPa); kekuatan modulus, yang berkaitan dengan kekakuan material dalam aplikasi (GPa); ketahanan terhadap korosi, yang mencerminkan kemampuan material untuk melawan serangan korosi; dan kategori harga, yang mempertimbangkan biaya untuk memperoleh material dengan karakteristik yang dibutuhkan, sehingga pengeluaran menjadi lebih efektif dan efisien [20].



Gambar 2.13 Skema Alur untuk Pemilihan Material, Ss : *Specific Strength*, Sm : *Specific Modulus*, Cr : *Corrosion Rate*, Cc : *Cost Category* [20]

3. Alterasi Lingkungan

Korosi umumnya terjadi karena adanya interaksi antara logam dengan lingkungan di sekitarnya. Salah satu cara yang dapat dilakukan untuk mengendalikan laju korosinya adalah dengan mengubah media atau kondisi

lingkungan di sekitar material logam berada. Hal tersebut dapat dilakukan dengan menambahkan inhibitor korosi ke lingkungan di sekitar material logam.

Secara umum, inhibitor adalah suatu zat kimia yang dapat menghambat atau memperlambat suatu reaksi kimia. Sedangkan inhibitor korosi adalah suatu zat kimia yang apabila ditambahkan ke dalam suatu lingkungan, dapat menurunkan laju korosi terhadap suatu logam.

4. Inhibitor Korosi

Inhibitor merupakan suatu zat yang apabila ditambahkan dalam jumlah yang sesuai ke dalam lingkungan korosif dapat menurunkan serangan korosi lingkungan terhadap logam [21]. Inhibitor hingga saat ini masih menjadi solusi terbaik untuk melindungi korosi internal pada logam. Inhibitor dapat dijadikan sebagai pertahanan utama pada industri proses dan ekstraksi minyak. Inhibitor menjadi metoda perlindungan yang cukup fleksibel karena mampu memberikan perlindungan dari lingkungan yang tidak terlalu korosif sampai pada lingkungan yang tingkat korosifitasnya sangat tinggi. Selain itu, inhibitor mudah diaplikasikan dan tingkat keefektifan biayanya paling tinggi karena lapisan yang terbentuk sangat tipis sehingga dalam jumlah kecil mampu memberikan perlindungan yang luas [22].

5. Proteksi Anodik

Proteksi anodik bertujuan untuk mencapai pasivasi permukaan yang terpapar lingkungan korosif. Tujuan ini sama dengan aplikasi pelapis pelindung, penambahan inhibitor, atau pemberian tegangan tekan melalui metode mekanis. Pasivasi logam dalam larutan elektrolit terjadi karena pembentukan antarmuka pelindung yang mencegah kontak langsung antara logam dan elektrolit.

Proses ini memungkinkan logam tetap stabil dalam lingkungan agresif dengan menciptakan lapisan pasif yang melindungi permukaan dari serangan korosi. Pendekatan ini sering digunakan dalam industri berat, seperti penyimpanan kimia, pembuatan kapal, dan aplikasi industri lainnya yang melibatkan lingkungan yang sangat korosif [23].

6. Proteksi Katodik

Proteksi katodik merupakan salah satu perlindungan korosi dengan cara menghubungkan logam yang memiliki nilai potensial lebih tinggi dengan logam yang memiliki nilai potensial lebih rendah sehingga terbentuk suatu sel elektrokimia. Proteksi katodik dapat dilakukan dengan beberapa metode, seperti anoda korban dan arus paksa (*impressed current*) [18].

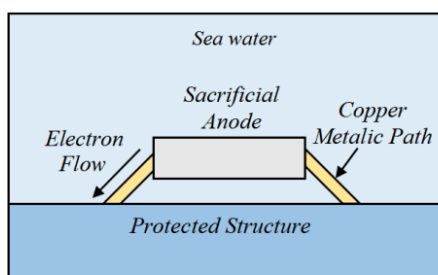
2.7. Prinsip dan Jenis-Jenis Proteksi Katodik

Proteksi katodik bekerja berdasarkan prinsip elektrokimia yang memanfaatkan perbedaan potensial antara dua logam dalam sel elektrokimia untuk mencegah korosi. Dalam sistem ini, logam yang akan dilindungi dibuat menjadi katoda, sementara logam lain yang lebih mudah terkorosi (anoda korban) digunakan sebagai anoda. Ketika dua logam ini dihubungkan dalam lingkungan yang mengandung elektrolit, seperti air laut atau tanah lembab, arus listrik akan mengalir dari anoda ke katoda. Proses ini menyebabkan anoda mengalami korosi dan terkonsumsi, sementara katoda, yaitu logam yang dilindungi, tetap utuh dan bebas dari korosi. Dalam aplikasi lain, seperti Proteksi Katodik dengan Arus Paksa (ICCP), sumber arus eksternal digunakan untuk mengalirkan arus ke struktur yang dilindungi, membuat seluruh permukaan logam menjadi katoda. Arus eksternal ini diatur sedemikian rupa untuk memastikan seluruh area logam

terlindungi dari korosi. Prinsip dasar proteksi katodik adalah untuk mengubah kondisi korosi yang secara alami akan terjadi pada logam yang dilindungi menjadi kondisi yang lebih aman dengan memanfaatkan arus listrik dan perbedaan potensial antar logam [24]. Secara umum, proteksi katodik dapat dibagi menjadi dua tipe, antara lain *Sacrificial Anode Cathodic Protection (SACP)* dan *Impressed Current Protection (ICCP)*.

2.3.1. *Sacrificial Anode Cathodic Protection (SACP)*

Proteksi katodik dengan sistem anoda korban menciptakan sel elektrokimia di mana dua logam terhubung dalam elektrolit. Logam dengan potensial lebih positif bertindak sebagai katoda yang dilindungi, sementara logam dengan potensial lebih negatif bertindak sebagai anoda yang terkorosi. Sistem ini berguna dalam kondisi tanpa sumber listrik, untuk perlindungan struktur yang tidak luas atau tanpa lapisan pelindung, serta sebagai tambahan pada sistem proteksi arus tanding [24]. Gambar 2.14 menunjukkan penerapan proteksi katodik dengan sistem anoda korban dalam lingkungan air laut.



Gambar 2.14 Skema Sistem Proteksi Katodik Anoda Korban [24]

Anoda yang mengalami konsumsi atau terkorosi dalam sistem proteksi katodik direpresentasikan oleh laju korosi, yang dihitung dengan

mengalikan konstanta laju korosi dengan kehilangan berat anoda dalam milligram, kemudian dibagi dengan luas permukaan anoda yang tercelup dalam elektrolit (dalam cm^2), durasi tercelupan elektrolit (dalam jam), dan densitas anoda (dalam gr/cm^3). Persamaan ini dapat ditulis sebagai Persamaan 2.15. [25].

$$\text{Laju korosi} = \frac{K \times W}{D \times A \times T} \quad (2.15)$$

Proteksi katodik menggunakan sistem anoda korban memiliki beberapa kelebihan dan kekurangan. Kelebihannya termasuk tidak memerlukan sumber arus eksternal, instalasi yang sederhana, perawatan yang mudah, dan biaya instalasi yang lebih rendah dibandingkan dengan sistem arus paksa. Namun, kekurangannya adalah voltase penggerak yang lebih rendah dibandingkan dengan sistem arus paksa, sehingga mungkin tidak cukup efektif untuk melindungi struktur yang relatif besar [26].

Dalam sistem proteksi katodik, penggunaan anoda korban sering kali melibatkan pemasangan lebih dari satu anoda, dengan jenis yang disesuaikan dengan kondisi lingkungan untuk memastikan perlindungan yang menyeluruh pada katoda. Berikut adalah kelebihan dan kekurangan penggunaan anoda korban [27]:

1. Kelebihan:

- a. Tidak Memerlukan Sumber Arus Eksternal: Anoda korban tidak membutuhkan sumber arus dari luar, sehingga menghemat energi.
- b. Instalasi Sederhana: Proses pemasangan anoda korban relatif mudah dan cepat.

c. Perawatan Mudah: Anoda korban memerlukan sedikit perawatan dibandingkan sistem arus paksa.

d. Biaya Instalasi Rendah: Anoda korban memiliki biaya instalasi yang lebih rendah dibandingkan dengan sistem arus paksa.

e. Distribusi Perlindungan Merata: Penggunaan multiple anoda korban memungkinkan perlindungan yang merata terhadap seluruh permukaan katoda.

f. Adaptabilitas Lingkungan: Jenis anoda dapat dipilih sesuai dengan kondisi lingkungan korosif yang spesifik, seperti anoda aluminium untuk air laut dan anoda magnesium untuk air tawar.

g. Keandalan Tinggi: Sistem tetap beroperasi efektif meskipun ada anoda yang mengalami kerusakan atau gangguan.

2. Kekurangan:

a. Voltase Penggerak Rendah: Voltase penggerak anoda korban lebih rendah dibandingkan dengan sistem arus paksa, sehingga kurang efektif untuk melindungi struktur yang sangat besar.

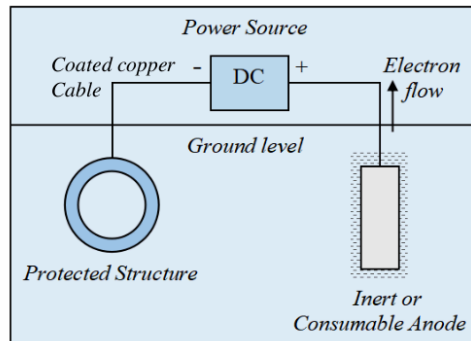
b. Variasi Laju Konsumsi Anoda: Laju konsumsi anoda korban dapat bervariasi tergantung pada kondisi lingkungan, yang mempengaruhi efisiensi proteksi dalam jangka panjang.

c. Tidak Efektif untuk Struktur Besar: Karena voltase penggerak yang rendah, anoda korban mungkin tidak cukup untuk melindungi struktur yang luas atau kompleks.

Meskipun terdapat beberapa keterbatasan, anoda korban tetap menjadi pilihan yang ekonomis dan praktis untuk proteksi korosi pada banyak aplikasi industri.

2.3.2. *Impressed Current Cathodic Protection (ICCP)*

Sistem proteksi katodik arus terpasang (*Impressed Current Cathodic Protection* atau ICCP) adalah metode untuk mengendalikan korosi pada logam dengan menggunakan sumber arus eksternal. Dalam ICCP, arus listrik searah dikirimkan ke struktur logam yang dilindungi, menjadikannya sebagai katoda dalam sel elektrokimia. Anoda yang digunakan dalam sistem ini tidak harus memiliki potensial yang lebih rendah daripada logam yang dilindungi, karena arus dikendalikan oleh sumber eksternal seperti rectifier. ICCP memungkinkan pengaturan arus dan potensial dengan presisi, sehingga memberikan perlindungan korosi yang efektif dan efisien untuk berbagai jenis lingkungan dan struktur, seperti pipa bawah tanah dan kapal laut [1]. Rangkaian sistem proteksi katodik arus paksa dapat dilihat pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Rangkaian sistem proteksi katodik arus paksa (ICCP) dalam media tanah [24]

Anoda yang digunakan tidak perlu memiliki potensial lebih rendah daripada struktur yang dilindungi. Tujuan utamanya adalah untuk mengurangi laju konsumsi anoda, sehingga efisiensi penggunaannya meningkat. Laju konsumsi anoda dalam sistem ini ditentukan oleh jumlah arus yang digunakan dan kondisi lingkungan (jenis elektrolit) tempat sistem ini diterapkan. Sebagai contoh, anoda *platinized titanium* akan mengalami laju konsumsi yang lebih rendah saat digunakan untuk melindungi struktur di bawah tanah dibandingkan di lingkungan laut. Hal ini karena air laut mengandung kontaminan yang dapat memicu reaksi korosi pada anoda, meningkatkan laju konsumsinya. Dengan demikian, penting untuk mempertimbangkan lingkungan operasi saat memilih anoda untuk memastikan perlindungan yang efisien dan efektif [27].

2.8. Potensial Standar Berbagai Logam

Salah satu syarat korosi adalah perbedaan potensial antara dua logam yang berinteraksi. Potensial elektrokimia digunakan untuk memprediksi kemungkinan korosi pada suatu logam. Untuk menentukan potensial elektrokimia dari berbagai logam, digunakan sel elektrokimia di mana reaksi anodik (oksidasi) terjadi di anoda dan reaksi katodik (reduksi) terjadi di katoda. Reaksi ini secara langsung mempengaruhi potensial sel (Esel). Pada Tabel 2.1 ini merupakan beberapa nilai potensial standar dari beberapa logam:

Tabel 2.1 Potensial Standar Dari Beberapa Logam [17]

Reaksi	Potensial (V)
$\text{Au}^{3+} + 3\text{e}^- = \text{Au}$	+1,498
$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- = 2\text{H}_2\text{O}$	+1,229
$\text{Pt}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Pt}$	+1,20
$\text{Pd}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Pd}$	+0,987
$\text{Ag}^+ + \text{e}^- = \text{Ag}$	+0,800

Tabel 2.1 (lanjutan)

Reaksi	Potensial (V)
$\text{Hg}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Hg}$	+0,854
$\text{Hg}_2^{2+} + 2\text{e}^- = 2\text{Hg}$	+0,789
$\text{Fe}^{3+} + \text{e}^- = \text{Fe}^{2+}$	+0,771
$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- = 4\text{OH}^-$	+0,401
$\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Cu}$	+0,337
$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{H}_2$	0,000 (Referensi)
$\text{Pb}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Pb}$	-0,126
$\text{Sn}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Sn}$	-0,136
$\text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Ni}$	-0,250
$\text{Co}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Co}$	-0,277
$\text{Tl}^+ + \text{e}^- = \text{Tl}$	-0,336
$\text{In}^{3+} + 3\text{e}^- = \text{In}$	-0,342
$\text{Cd}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Cd}$	-0,403
$\text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Fe}$	-0,440
$\text{Cr}^{3+} + 3\text{e}^- = \text{Cr}$	-0,744
$\text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Zn}$	-0,763
$\text{Al}^{3+} + 3\text{e}^- = \text{Al}$	-1,662
$\text{Mg}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Mg}$	-2,363
$\text{Na}^+ + \text{e}^- = \text{Na}$	-2,714

Pada sel elektrokimia, setidaknya dibutuhkan dua logam berbeda, di mana satu logam berperan sebagai anoda dan yang lain sebagai katoda. Saat elektroda-elektroda ini dihubungkan, reaksi oksidasi dan reduksi akan mengubah potensial sel menjadi lebih positif. Persamaan potensial sel dijelaskan dalam Persamaan 2.15 dimana E_c adalah potensial katoda dan E_a adalah potensial anoda [17].

$$E_{\text{sel}} = E_c - E_a \quad (2.15)$$

2.9. Potensial Proteksi Pada Proteksi Katodik

Potensial proteksi merupakan nilai potensial elektrokimia yang harus dicapai dan dipertahankan pada permukaan logam agar korosi dapat dicegah atau diminimalkan secara efektif. Potensial proteksi ini biasanya ditentukan berdasarkan eksperimen dan pengalaman, di mana logam dilindungi dengan menjadikannya sebagai katoda dalam suatu sel elektrokimia. Ketika potensial logam mencapai nilai proteksi, laju korosi akan berkurang secara signifikan,

bahkan bisa mendekati nol. Konsep ini sangat penting dalam aplikasi proteksi katodik, di mana sumber arus eksternal atau anoda korban digunakan untuk mencapai dan mempertahankan potensial ini [14].

Menurut standar DNV GL RP B401 [7], potensial proteksi untuk berbagai logam dan lingkungan spesifik telah ditentukan untuk memastikan perlindungan yang efektif terhadap korosi. Standar ini memberikan panduan terperinci mengenai nilai potensial proteksi yang dibutuhkan untuk berbagai jenis logam dan kondisi operasi. *Open Circuit Potential* (OCP) adalah potensi yang ada dalam suatu rangkaian terbuka, yaitu ketika terminal-terminal dari rangkaian tersebut tidak terhubung dan tidak ada beban eksternal. Dalam konteks elektroda yang terendam dalam elektrolit, OCP menggambarkan kemampuan elektroda untuk teroksidasi atau tereduksi. Ini sangat penting dalam industri korosi karena membantu memprediksi bagaimana material logam akan berpartisipasi dalam reaksi korosi elektrokimia di lingkungan tertentu. Sebagai contoh, untuk perlindungan struktur baja di air laut, potensial proteksi yang direkomendasikan biasanya sekitar -0,80 V hingga -1,10 V relatif terhadap elektroda referensi Ag/AgCl. Nilai ini memastikan bahwa logam berada dalam kondisi katodik, sehingga korosi bisa dikendalikan dengan efektif. Standar ini juga mempertimbangkan faktor-faktor seperti suhu, salinitas, dan adanya *biofouling* dalam menentukan potensial proteksi yang optimal untuk berbagai aplikasi industri [7].

Tabel 2.2 menunjukkan potensial proteksi dan kapasitas elektrokimia pada material anoda dalam lingkungan yang berbeda.

Tabel 2.2 Kapasitas Elektrokimia dan Potensial Sirkuit Tertutup untuk Anoda di Suhu Air Laut [7]

Anode material	Anode surface temperature (°C)	Seawater exposure		Sediment exposure	
		Closed circuit potential (V)	Electrochemical Capacity (Ah/kg)	Closed Circuit Potential (V)	Electrochemical capacity (Ah/kg)
Al-Zn-In	<30	-1,050	2000	-1,000	1,500
	60	-1,050	1500	-1,000	680
	80	-1,000	720	-1,000	320
Zn	<30	-1,030	780	-0,980	750
	> 30 to 50			-0,980	580

Overproteksi pada sistem perlindungan katodik dengan anoda korban berbasis aluminium-zink (Al-Zn) terjadi ketika potensial struktur yang dilindungi menjadi terlalu negatif, sehingga menyebabkan efek merugikan, seperti pelepasan gas hidrogen (*hydrogen embrittlement*) pada logam tertentu atau peningkatan korosi lokal pada lapisan pelindung. Potensial perlindungan efektif: **-0.80 V** hingga **-1.05 V** (vs Ag/AgCl). Sehingga overproteksi lebih negatif dari -1.10 V (vs Ag/AgCl). Pada potensial ini, reaksi evolusi gas hidrogen meningkat, yang dapat menyebabkan *hydrogen embrittlement* pada baja berkekuatan tinggi. Terlalu negatifnya potensial dapat merusak lapisan pelindung oksida aluminium, mempercepat serangan korosi lokal [7].

2.10.Efisiensi Anoda Korban

Efisiensi anoda korban menurut standar Det Norske Veritas DNV-RP-B401 adalah ukuran seberapa baik anoda tersebut dapat melindungi struktur logam dari korosi melalui proteksi katodik. Standar ini memberikan pedoman untuk merancang dan menguji anoda korban, termasuk bahan seperti aluminium dan *zinc*. Efisiensi anoda korban Al-Zn di lingkungan air laut umumnya berkisar antara 67%

hingga 90%, tergantung pada komposisi paduan, kondisi lingkungan, dan desain sistem. Untuk mencapai efisiensi optimal, penting untuk mempertimbangkan faktor-faktor tersebut dalam pemilihan dan penerapan anoda korban.

Potensial elektrokimia keadaan $\leq -1,07$ V dan efisiensi elektrokimia minimum sebesar 2.250 Ah/kg dianggap memadai untuk memverifikasi kinerja material berbasis aluminium (Al) yang telah diuji serta untuk membenarkan penggunaan nilai default dalam Tabel 2.2. Sangat disarankan untuk memanfaatkan konservatisme yang ada dalam penggunaan nilai default pada Tabel 2.2 dalam desain anoda korban, meskipun produsen anoda mengklaim bahwa produk mereka dapat mencapai kinerja yang lebih tinggi. Data mengenai efisiensi elektrokimia anoda yang diperoleh dari uji laboratorium jangka pendek pada material anoda galvanik biasanya menghasilkan nilai yang mendekati batas teoretis (misalnya ≥ 2.500 Ah/kg untuk material Al-Zn-In). Hal ini disebabkan oleh penggunaan kerapatan arus anodik yang cukup tinggi selama pengujian. Data tersebut sebaiknya tidak digunakan untuk menggantikan nilai desain yang direkomendasikan untuk kapasitas elektrokimia [7].

2.11. Laju Korosi Anoda Korban

Laju korosi anoda korban berbahan aluminium-zinc (Al-Zn) merupakan parameter penting dalam evaluasi efektivitas proteksi katodik terhadap struktur logam yang terendam dalam lingkungan korosif. Anoda korban ini dirancang untuk melindungi logam lain dengan cara mengorbankan dirinya sendiri melalui reaksi elektrokimia. Laju korosi adalah kecepatan di mana material kehilangan massa akibat reaksi korosi, biasanya dinyatakan dalam satuan mm/tahun. Untuk

anoda korban Al-Zn, laju korosi dipengaruhi oleh komposisi material, kondisi lingkungan, dan desain anoda itu sendiri.

Nilai batas bawah laju korosi yang baik untuk anoda korban Al-Zn biasanya diharapkan tidak lebih dari 0,1 mm/tahun. Nilai ini menunjukkan bahwa anoda masih efektif dalam memberikan perlindungan katodik tanpa cepat habis. Batas atas laju korosi yang dapat diterima untuk anoda korban Al-Zn umumnya tidak boleh melebihi 0,3 mm/tahun. Jika laju korosi melebihi nilai ini, maka efektivitas perlindungan akan menurun dan risiko kerusakan pada struktur yang dilindungi meningkat [12].

2.12. Komposisi Anoda Korban

Sacrificial Anode (juga dikenal sebagai Anoda Korban) adalah metode perlindungan terhadap korosi pada logam. Prinsipnya melibatkan penggunaan dua jenis logam yang terhubung dalam elektrolit, seperti magnesium, zinc, dan aluminium. Logam ini dicampur agar lebih efektif. *Sacrificial Anode* berfungsi dengan menghasilkan arus proteksi berdasarkan prinsip korosi galvanis. Arus ini diproduksi berdasarkan perbedaan potensial antara kedua jenis logam yang terhubung dalam elektrolit. Nilai potensial *sacrificial anode* harus lebih negatif daripada struktur yang dilindungi. Perbedaan potensial ini disebut *driving voltage* atau *driving potential*. Arus yang dihasilkan oleh *sacrificial anode* adalah fungsi dari *driving voltage* dan tahanan sirkuit berdasarkan hukum Ohm. Saat pertama kali diinstalasi, nilai arus *sacrificial anode* akan mengatur sendiri dan cenderung menurun seiring dengan penurunan nilai potensial struktur. Zinc dan aluminium, misalnya, menunjukkan nilai arus yang lebih besar daripada nilai desain awal saat masa polarisasi. *Sacrificial Anode* umumnya digunakan pada struktur pipa dengan

lingkungan air tawar, rawa, atau lingkungan dengan resistivitas tanah rendah. Juga, *Sacrificial Anode* cocok untuk proteksi katodik sementara pada pipa baru atau pipa yang belum memiliki isolasi. Tabel 2.3 menampilkan komposisi anoda korban berbasis Al dan anoda korban berbasis Zn pada standar DNV-GL-RP-B401.

Tabel 2.3 Limit Komposisi Rekomendasi untuk Material Anoda Berbasis Al dan Zn [7]

Alloying/impurity element	Zn-base	Al-base
Zn	rem.	2,5-5,75
Al	0,10-0,50	rem.
In	na	0,015-0,040
Cd	0,025-0,07	≤ 0,002
Si	na	≤ 0,12
Fe	≤ 0,005	≤ 0,09
Cu	≤ 0,005	≤ 0,003
Pb	≤ 0,006	na

2.12.1. Anoda Korban Berbasis Aluminium

Aluminium adalah salah satu logam yang sering digunakan sebagai anoda korban karena memiliki potensial elektrokimia yang lebih negatif dibandingkan banyak logam struktural seperti baja. Aluminium mengalami oksidasi dan melepaskan elektron, yang kemudian diambil oleh logam yang dilindungi (katoda). Reaksi yang terjadi pada anoda korban berbasis aluminium terlihat pada Persamaan 2.16 berikut.



Elektron yang dilepaskan oleh aluminium akan bergerak melalui elektrolit menuju katoda, di mana mereka mengurangi ion oksigen atau ion hidrogen, menghambat proses korosi pada katoda. Anoda korban berbasis aluminium banyak digunakan dalam berbagai aplikasi maritim seperti kapal, platform minyak lepas pantai, pipa bawah laut, dan struktur pelabuhan [28].

2.12.2. Anoda Korban Berbasis Seng

Anoda seng merupakan salah satu metode yang umum digunakan dalam proteksi katodik untuk melindungi logam dari korosi. Metode ini didasarkan pada prinsip penggunaan seng yang lebih reaktif sebagai anoda, sehingga seng secara selektif terkorosi sebagai pengganti logam yang dilindungi. Ketika anoda seng terkorosi, ia melepaskan elektron ke dalam elektrolit (seperti air laut atau tanah), yang kemudian ditangkap oleh logam yang dilindungi (katoda), mencegahnya dari terkena korosi. Keuntungan penggunaan anoda seng adalah sifatnya yang efektif sebagai anoda korban dan ketersediaannya yang relatif mudah, membuatnya menjadi pilihan yang populer untuk berbagai aplikasi, termasuk kapal, tangki penyimpanan bawah tanah, pipa bawah tanah, dan struktur laut. Selain itu, anoda seng juga memiliki umur pakai yang cukup lama dan biaya perawatan yang rendah, menjadikannya solusi yang ekonomis dalam upaya melindungi logam dari kerusakan akibat korosi [28].

2.13. Pengaruh Unsur Paduan Terhadap Anoda Korban

Penambahan unsur paduan ke dalam anoda korban tidak hanya dimaksudkan untuk meningkatkan sifat mekanik dan kekuatan material, tetapi juga untuk mempengaruhi laju korosi dan kestabilan elektrokimia dari anoda tersebut. Unsur-unsur paduan seperti seng, tembaga, besi, dan silikon dapat mengubah cara anoda berinteraksi dengan lingkungan korosif, baik itu di air laut, tanah lembab, atau lingkungan industri yang korosif. Penyesuaian komposisi anoda korban memungkinkan pengendalian yang lebih tepat terhadap proses korosi, memastikan bahwa anoda dapat memberikan perlindungan yang maksimal terhadap struktur

yang dilindungi, sambil meminimalkan konsumsi anoda itu sendiri. Berikut pengaruh unsur-unsur paduan yang terdapat dalam anoda korban.

2.13.1. Pengaruh Unsur Zn

Penambahan unsur seng (Zn) sebagai paduan pada anoda korban aluminium memberikan beberapa keuntungan. Zn memiliki sifat yang lebih reaktif secara elektrokimia daripada aluminium (Al), sehingga ketika anoda terkorosi, unsur Zn akan dilepaskan ke dalam lingkungan korosif. Hal ini mengakibatkan logam aluminium yang dilindungi tidak mengalami korosi karena proses korosi terjadi pada anoda seng. Penggunaan paduan Zn-Al dalam anoda korban dapat meningkatkan efisiensi proteksi katodik dan memperpanjang umur anoda, karena sifat reaktif Zn yang mempercepat proses korosi dan meningkatkan daya proteksi pada logam aluminium. Efisiensi elektrokimia yang dihitung untuk sampel anoda Al hasil pengecoran adalah 68%, yang sekitar setara dengan 2026 Ah/kg yaitu efisiensi terendah yang dicapai dalam paduan yang diteliti [12].

2.13.2. Pengaruh Unsur In

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. Kapasitas arus dari paduan Al-Zn-In menurun dengan meningkatnya kandungan indium. Misalnya, paduan dengan 0,02% In menunjukkan kapasitas sekitar 2500 Ah/kg, sedangkan paduan dengan 0,2% In menunjukkan penurunan sekitar 30%, menjadi sekitar

1750 Ah/kg. Ini menunjukkan bahwa konsentrasi indium yang lebih tinggi menyebabkan peningkatan konsumsi bahan anoda dan umur yang lebih pendek [13].

2.13.3. Pengaruh Unsur Si

Penambahan unsur silikon (Si) sebagai paduan pada anoda korban aluminium juga memberikan beberapa keuntungan. Ketika Si ditambahkan ke dalam paduan aluminium, ini dapat meningkatkan kekuatan dan ketahanan terhadap korosi dari aluminium itu sendiri. Namun, pengaruh Si terhadap sifat anoda korban mungkin lebih terbatas dibandingkan dengan unsur lain seperti zinc (Zn). Namun demikian, Si dapat mempengaruhi beberapa sifat fisik dan kimia paduan aluminium, termasuk resistensi terhadap korosi [29].

2.13.4. Pengaruh Unsur Mg

Penambahan unsur magnesium (Mg) sebagai paduan pada anoda korban aluminium dapat memberikan beberapa keuntungan. Mg merupakan logam yang lebih reaktif secara elektrokimia daripada aluminium (Al), sehingga ketika terjadi korosi, Mg akan terkorosi terlebih dahulu sebagai anoda korban. Proses ini mengarah pada perlindungan katodik untuk logam aluminium yang dilindungi, mengurangi kemungkinan korosi pada logam yang lebih berharga. Selain itu, penambahan Mg dapat meningkatkan kekuatan dan ketahanan terhadap korosi dari paduan aluminium itu sendiri [30].

2.13.5. Pengaruh Unsur Cu

Pengaruh tembaga (Cu) pada anoda korban aluminium dijelaskan secara mendalam. Penambahan Cu pada anoda korban aluminium memiliki dampak signifikan terhadap kinerjanya. Tembaga cenderung memperbaiki sifat mekanik anoda korban, meningkatkan kekerasan dan kekuatan. Namun, penambahan Cu juga memiliki dampak negatif pada ketahanan korosi anoda korban.

Cu dapat meningkatkan laju korosi lokal (pitting corrosion) karena perbedaan potensial antara tembaga dan aluminium, yang menyebabkan area kecil dengan konsentrasi tembaga bertindak sebagai situs katodik dan meningkatkan laju korosi anodik di sekitarnya. Selain itu, tembaga juga dapat mengurangi efisiensi elektrokimia anoda korban, karena fasa intermetalik yang terbentuk dapat mengganggu distribusi seragam dari korosi dan mengurangi jumlah aluminium aktif yang terkorosi.

Secara keseluruhan, meskipun penambahan Cu dapat meningkatkan sifat mekanik anoda korban aluminium, hal ini juga dapat mengurangi ketahanan korosinya dan efisiensi proteksi katodik, membuatnya kurang ideal untuk aplikasi di lingkungan yang sangat korosif. Oleh karena itu, komposisi anoda korban harus dioptimalkan untuk mencapai keseimbangan antara sifat mekanik dan ketahanan korosi yang diinginkan [31].

2.13.6. Pengaruh Unsur Fe

Penambahan besi (Fe) dalam anoda korban aluminium dapat mempengaruhi karakteristik anoda tersebut. Penelitian ini menemukan bahwa kehadiran Fe dalam anoda korban aluminium dapat mempengaruhi struktur

mikro dan sifat elektrokimia anoda. Fe cenderung membentuk fasa intermetalik yang dapat meningkatkan kekerasan dan kekuatan mekanik anoda, namun pada saat yang sama dapat mengurangi efisiensi elektrokimia anoda tersebut. Fasa intermetalik yang terbentuk dapat bertindak sebagai situs katodik lokal, yang meningkatkan laju korosi galvanik dan mengurangi umur pakai anoda. Selain itu, distribusi dan ukuran partikel intermetalik yang terbentuk oleh Fe juga berperan penting dalam menentukan performa anoda korban. Penelitian ini memberikan wawasan penting mengenai optimasi komposisi anoda korban aluminium untuk meningkatkan performa dan umur pakainya dalam aplikasi perlindungan katodik [32].

2.13.7. Pengaruh Unsur Cr

Penambahan unsur kromium (Cr) sebagai paduan pada anoda korban aluminium memiliki dampak signifikan terhadap sifat korosif dan mekanis anoda tersebut. Kromium dikenal karena kemampuannya membentuk lapisan oksida kromium (Cr_2O_3) yang stabil dan tahan terhadap korosi. Ketika Cr ditambahkan ke dalam paduan aluminium, lapisan oksida ini memberikan perlindungan tambahan terhadap lingkungan korosif, meningkatkan ketahanan anoda korban terhadap korosi. Selain itu, penambahan Cr juga dapat meningkatkan kekuatan dan kekerasan paduan aluminium, membantu menjaga stabilitas dimensi anoda korban dan mengurangi risiko deformasi atau kerusakan struktural [30].

2.14. Korosi pada Air Laut

Korosi pada air laut adalah masalah serius yang mempengaruhi berbagai struktur dan perangkat yang beroperasi dalam lingkungan laut, seperti kapal,

platform minyak, dan pipa bawah laut. Air laut adalah lingkungan yang sangat korosif karena mengandung berbagai garam, terutama natrium klorida (NaCl), yang mempercepat proses korosi [17].

⁴³ Faktor-faktor yang Mempengaruhi Korosi pada Air Laut [27]:

1. **Kandungan Garam:** Air laut mengandung sekitar 3,5% garam (terutama NaCl). Ion klorida (Cl^-) dalam garam sangat agresif terhadap logam, terutama besi dan baja, karena ion ini dapat menembus lapisan oksida pelindung pada logam dan mempercepat korosi.
2. **Oksigen Terlarut:** Oksigen yang terlarut dalam air laut juga mempengaruhi laju korosi. Oksigen terlibat dalam reaksi katodik, yang mempercepat proses korosi. Oksigen terlarut dapat bervariasi tergantung pada suhu dan agitasi air.
3. **Suhu:** Peningkatan suhu air laut umumnya meningkatkan laju korosi ⁶⁸ karena reaksi kimia terjadi lebih cepat pada suhu yang lebih tinggi. Namun, pada suhu sangat tinggi, kelarutan oksigen menurun, yang dapat mengurangi laju korosi.
4. **Agitasi dan Aliran Air:** Agitasi dan aliran air laut dapat meningkatkan laju korosi dengan mempercepat transportasi ion-ion pengoksidasi ke permukaan logam dan menghilangkan produk korosi dari permukaan logam.
5. **Mikroorganisme:** Kehadiran mikroorganisme seperti bakteri yang menghasilkan sulfat (sulfate-reducing bacteria) dapat menyebabkan korosi mikrobiologis yang dapat mempercepat kerusakan logam.

¹ 2.15. Komposisi Kimia dan Salinitas Air Laut

Komposisi kimia air laut sangat bervariasi, tetapi secara umum mengandung sekitar 3,5% garam terlarut. Garam utama dalam air laut adalah natrium klorida

(NaCl), yang menyumbang sebagian besar salinitas. Selain itu, air laut juga mengandung berbagai senyawa mineral lainnya seperti magnesium sulfat (MgSO_4), kalsium sulfat (CaSO_4), kalium sulfat (K_2SO_4), dan trace elements seperti magnesium, kalsium, dan kalium. Komposisi kimia air laut dapat dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti kedalaman, lokasi geografis, dan aktivitas manusia seperti polusi [33].

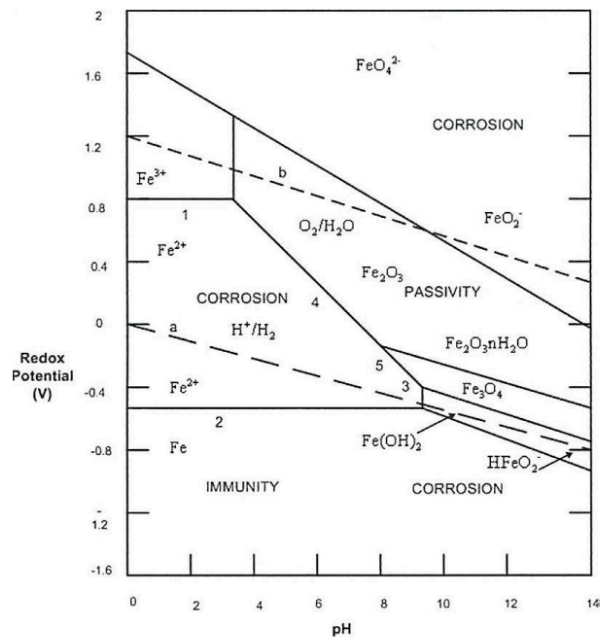
Salinitas air laut, yang merupakan pengukuran konsentrasi garam dalam air, biasanya dinyatakan dalam unit per mil atau ppt (parts per thousand). Rata-rata salinitas air laut global adalah sekitar 35 ppt, tetapi ini dapat bervariasi di berbagai lokasi dan kedalaman. Faktor-faktor seperti penguapan, presipitasi, aliran sungai, dan pembekuan es dapat mempengaruhi salinitas air laut secara lokal [34].

Komposisi kimia dan salinitas air laut memiliki dampak signifikan terhadap proses korosi logam dalam lingkungan laut. Kandungan garam, terutama natrium klorida (NaCl), dalam air laut mempercepat laju korosi dengan memperburuk kondisi elektrolitik. Ion-ion klorida dapat menembus lapisan oksida pelindung pada logam dan meningkatkan laju reaksi korosi. Selain itu, salinitas yang tinggi juga dapat meningkatkan keasaman air laut, yang dapat meningkatkan reaksi korosif. Komposisi kimia air laut yang bervariasi, termasuk konsentrasi ion-ion mineral dan trace elements, juga dapat memengaruhi sifat korosif air laut.

2.16. Diagram Pourbaix Fe

Diagram Pourbaix adalah representasi grafis yang menunjukkan stabilitas logam yang dipengaruhi oleh hubungan antara potensial dan pH. Diagram ini berguna untuk mengetahui kestabilan logam terhadap perubahan nilai potensial dan pH. Dalam diagram Pourbaix, nilai potensial logam direpresentasikan dalam sumbu

vertikal sementara sumbu horizontal menunjukkan perubahan pH. Diagram ini dibuat berdasarkan persamaan Nernst dan data kelarutan logam dan spesiesnya, seperti Fe, Fe_2O_3 , $\text{Fe}(\text{OH})_2$, dan Fe_3O_4 , dalam kondisi kesetimbangan pada suhu 25°C . Konsentrasi ion logam diasumsikan sama, yaitu 10^{-6} mol per liter larutan, yang merupakan batas di mana korosi dapat terjadi; pada konsentrasi lebih rendah, korosi tidak terjadi. Diagram Pourbaix menunjukkan bahwa terdapat daerah immunitas pada Fe. Daerah imunitas tersebut perlu dicapai pada proteksi katodik menggunakan anoda korban. Diagram Pourbaix logam Fe dalam air dapat dilihat pada Gambar 2.16.

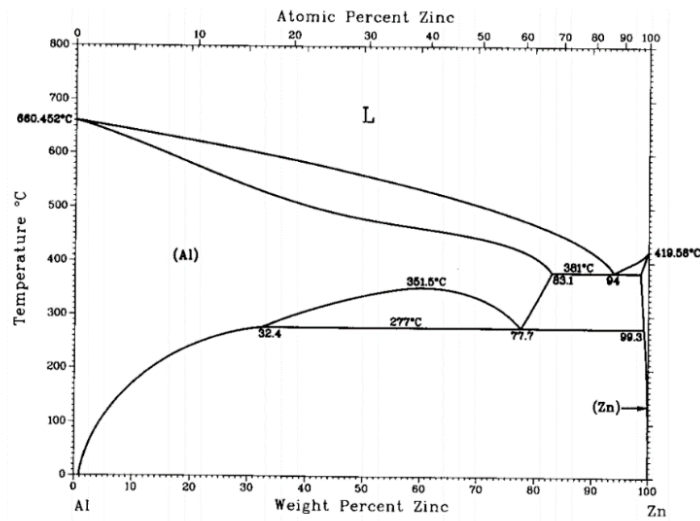


Gambar 2.16 Diagram Pourbaix Fe Dalam Air [31]

Diagram tersebut menunjukkan tiga daerah yang memiliki implikasi yang berbeda: daerah imun, korosi, dan pasifasi. Daerah imun menandakan bahwa kondisi di sana tidak memungkinkan terjadinya korosi, sehingga logam aman dari ancaman kerusakan. Namun, di daerah korosi, logam berpotensi mengalami proses korosi yang merusak, karena lingkungan di sekitarnya mendukung reaksi yang menghasilkan kerusakan. Di daerah pasifasi, terbentuknya lapisan oksida pada permukaan logam menciptakan perlindungan tambahan. Lapisan oksida ini, terutama Fe_2O_3 dan Fe_3O_4 , dapat bertindak sebagai perisai yang efektif melawan korosi jika memenuhi syarat-syarat tertentu, seperti adhesi yang baik dengan logam dasar dan ketahanan terhadap lingkungan korosif. Dengan demikian, pemahaman tentang berbagai daerah dalam diagram Pourbaix memainkan peran penting dalam menentukan kecenderungan korosi logam dan strategi perlindungannya [31].

2.17. Diagram Fasa Al-Zn

Gambar 2.17 merupakan diagram fasa dari paduan aluminium dengan seng (Al-Zn).

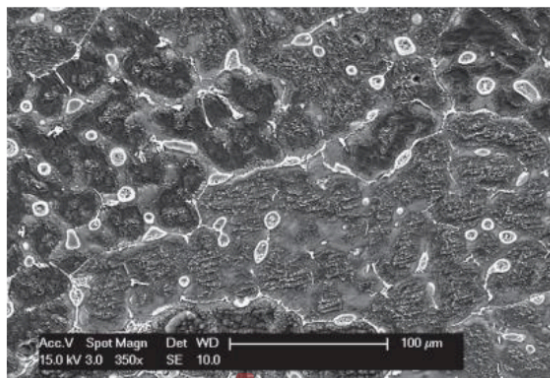


Gambar 2.17 Diagram fasa paduan Al-Zn [35]

Berdasarkan informasi yang terdapat dalam diagram fasa Al-Zn menunjukkan bahwa seng (Zn) memiliki batas kelarutan yang cukup tinggi dalam aluminium pada temperatur tinggi. Bahkan pada temperatur ruang, Zn masih memiliki kelarutan yang signifikan, sekitar 5%. Hal ini menunjukkan bahwa kandungan seng (Zn) di bawah batas kelarutan tersebut masih dapat terlarut dalam aluminium menurut diagram fasa biner Al-Zn. Namun, ketika kandungan Zn melebihi batas kelarutan tersebut, ada kemungkinan terjadinya presipitasi Zn dalam batas butir aluminium. Hal ini mengindikasikan bahwa pemahaman akan batas kelarutan antara aluminium dan seng sangat penting dalam merancang dan memahami sifat-sifat paduan Al-Zn [35].

2.18. Struktur Mikro Al-Zn

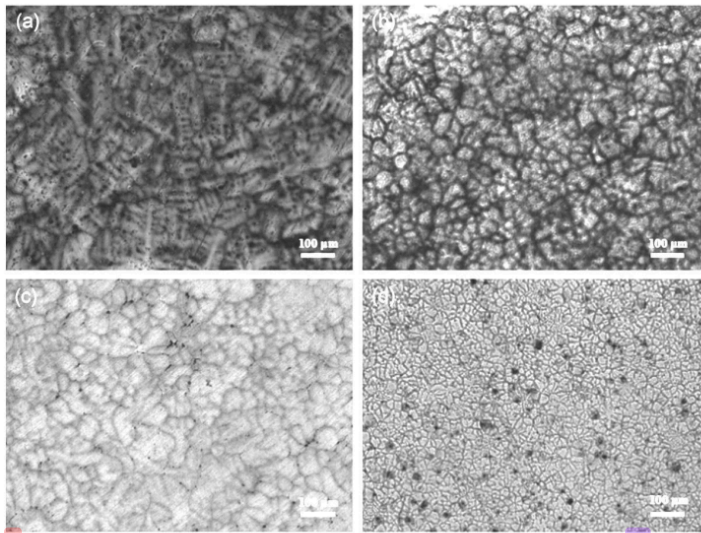
Paduan Al-10 wt.% Zn terletak dalam zona konsentrasi di mana, dalam kondisi keseimbangan, larutan padat stabil FCC pada suhu tinggi terurai menjadi larutan padat FCC yang miskin Zn dan larutan padat HCP yang terdiri hampir sepenuhnya dari Zn murni. Namun, paduan tersebut terletak tepat sebelum celah kelarutan dalam keadaan padat dari sistem Al-Zn. Gambar 1 menunjukkan variasi ukuran butir terhadap kandungan Zn untuk serangkaian paduan Al-Zn yang telah kami buat melalui peleburan induksi frekuensi tinggi dan diamati pada tingkat mikrostruktural. Khususnya, untuk 10 wt.% Zn, ukuran butir rata-ratanya sekitar 45 μm . Mikrograf SEM yang ditunjukkan oleh Gambar 2.16 mengungkapkan morfologi dendritik butir yang diamati pada paduan dengan 10 wt.% Zn. Partikel yang muncul dalam paduan Al-10 wt.% Zn (Gambar 2.18) memiliki bentuk hampir bulat [36].



Gambar 2.18 Mikrostruktur Hasil SEM Paduan Al-10 wt.% Zn [36]

Gambar 2.19 menunjukkan struktur mikro dari empat anoda paduan aluminium yang berbeda. Paduan Al-Zn-In menunjukkan struktur kristal dendritik

yang tidak teratur (Gambar 2.19a). Unsur paduan dan kotoran yang memiliki titik leleh rendah terletak di wilayah dendrit dan batas butiran yang lebar disebabkan oleh segregasi Zn dan In dalam bentuk unsur atau senyawa selama proses pendinginan paduan aluminium. Ketika Sn, Cd, dan Si ditambahkan secara berurutan ke dalam matriks Al-Zn-In, struktur paduan aluminium tersebut memiliki ukuran butir yang lebih kecil didominasi oleh butir-butir equiaxed dan jumlah dendrit yang sedikit. Secara khusus, ukuran butir paduan Al-Zn-In-Sn lebih seragam, dan paduan Al-Zn-In-Si dengan batas butir yang dihaluskan memiliki ukuran butir yang paling kecil. Menurut teori solidifikasi logam, difusi dan kristalisasi unsur paduan sering tidak sejalan dalam proses solidifikasi di bawah kondisi ketidakseimbangan, dan yang pertama relatif lambat. Aluminium, dengan titik leleh yang lebih tinggi, mengkristal menjadi kerangka dendritik terlebih dahulu dan unsur dengan titik leleh yang lebih rendah diperkaya dalam cairan di depan antarmuka padat-cair selama proses solidifikasi, membentuk segregasi di batas butir. Ketika Sn, Cd, dan Si ditambahkan secara berturut-turut ke dalam Al-Zn-In, kristalisasi pendinginan Al-Zn-In akan terpengaruh, menghasilkan struktur mikro dan morfologi yang berbeda [5].



Gambar 2.19 Struktur mikro dari serangkaian paduan anoda Al-Zn-In: (a) Al-Zn-In, (b) Al-Zn-In-Sn, (c) Al-Zn-In-Cd, (d) Al-Zn-In-Si [5]

2.19. Pengecoran

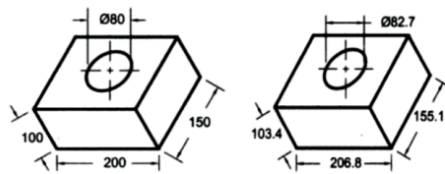
Pengecoran logam adalah salah satu metode pembentukan logam yang unik yang melibatkan pembuatan cetakan dan pencairan logam untuk membentuk komponen dengan berbagai geometri, mulai dari yang kecil hingga sangat besar. Diperkirakan bahwa sekitar 90% dari proses manufaktur produk logam di dunia industri menggunakan metode pengecoran. Metode ini mencakup berbagai teknik, termasuk pengecoran pasir, pengecoran dengan cetakan permanen, pengecoran vakum, investment casting, pengecoran dengan cetakan yang menguap, dan pengecoran sentrifugal.

Proses manufaktur menggunakan metode pengecoran memiliki beberapa kelebihan. Pertama, metodenya relatif mudah diterapkan. Kedua, bentuk akhir produk dapat mencerminkan dengan baik bentuk produk utama karena tidak

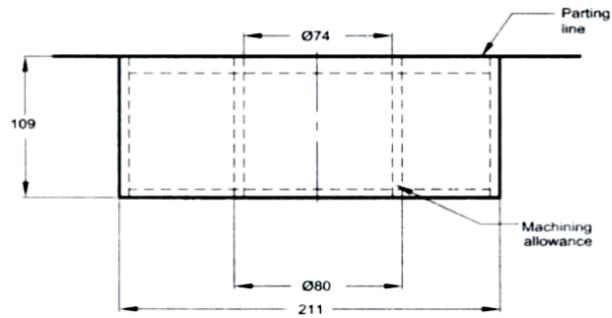
memerlukan banyak sambungan. Ketiga, penampilannya optimal karena tidak ada sambungan yang terlihat. Keempat, mudah untuk menyesuaikan bentuk dengan fungsi produk. Dan kelima, metode ini mampu membentuk produk dengan geometri yang rumit [37].

2.19.1. Pola

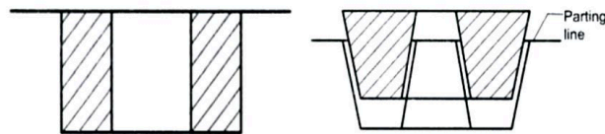
Pola (*pattern*) dalam pengecoran logam dijelaskan sebagai alat penting yang digunakan untuk membentuk rongga dalam cetakan pasir. Pola adalah replika dari objek yang akan dicetak dan dibuat dengan mempertimbangkan faktor-faktor seperti penyusutan logam selama pendinginan, penyelesaian permukaan, dan kemudahan pembuatan cetakan. Material yang digunakan untuk pola dapat berupa kayu, logam, atau plastik, tergantung pada skala produksi dan kompleksitas bentuknya. Jenis pola meliputi pola satu bagian untuk bentuk sederhana, pola terpisah untuk bentuk kompleks, dan pola busa yang hilang yang menguap saat logam cair dituangkan. Pola harus dirancang lebih besar dari ukuran akhir benda cor untuk mengimbangi penyusutan logam, dan permukaannya harus halus untuk menghasilkan cetakan berkualitas tinggi. Selain itu, pola sering kali dilengkapi dengan rongga inti untuk membentuk bagian dalam benda cor. Pola yang dirancang dengan baik adalah langkah awal yang krusial dalam proses pengecoran, memastikan efisiensi dan kualitas produk akhir. Pada material logam dan plastik untuk dimensi hingga 20 mm, sudut eksternal yang digunakan adalah $1,5^\circ$ dan internalnya 3° [38]. Gambar 2.20 menunjukkan penambahan *shrinkage allowance*, dan Gambar 2.21 menunjukkan *machining* dan *draft allowance*



Gambar 2.20 Skematik Efek Penambahan *Shrinkage Allowance* Terhadap Dimensi Pattern Untuk Pengecoran Aluminium [38]



a



b

Gambar 2.21 Skematik Efek Penambahan *Machining Allowance* (a) dan *Draft Allowance* (b) Terhadap Dimensi Pattern Untuk Pengecoran Aluminium [38]

2.19.2. Cetakan

Cetakan adalah suatu alat atau wadah yang digunakan dalam proses pengecoran untuk membentuk logam cair menjadi bentuk yang diinginkan. Cetakan ini memiliki bentuk yang sesuai dengan produk akhir yang akan dihasilkan. Ada berbagai jenis cetakan yang digunakan dalam industri

pengecoran, termasuk cetakan pasir, cetakan logam, cetakan cetak injeksi, cetakan keramik, dan lainnya.

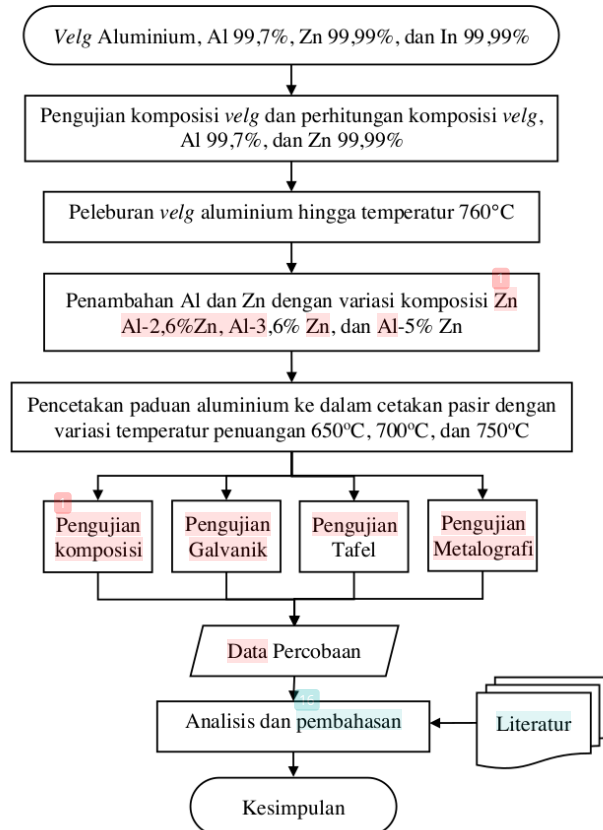
¹ Cetakan pasir adalah jenis cetakan yang paling umum digunakan dalam proses pengecoran logam. Cetakan pasir terbuat dari campuran pasir silika yang dicampur dengan agen pengikat (biasanya bentonit) dan air. Campuran ini dicetak sesuai dengan bentuk yang diinginkan, kemudian logam cair dituangkan ke dalam cetakan pasir. Setelah logam mendingin dan mengeras, cetakan pasir dibongkar untuk mengeluarkan produk pengecoran.

Proses pengecoran dengan cetakan pasir sering dipilih karena relatif murah, fleksibel, dan cocok untuk produksi dalam jumlah sedang hingga besar. Selain itu, cetakan pasir juga dapat dengan mudah diubah untuk membuat produk dengan bentuk yang berbeda. Meskipun demikian, cetakan pasir memiliki kekurangan, termasuk ketidakakuratan dimensi akhir produk dan kebutuhan akan pemeliharaan yang intensif pada cetakan itu sendiri [37].

METODE PENELITIAN

3.1. Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini dilakukan melalui pembuatan anoda korban kemudian dilakukan pengujian dengan urutan pengerjaan seperti pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2. Bahan dan Alat

3.3.1. Alat yang Digunakan

Alat-alat yang digunakan pada penelitian ini antara lain:

1. Alat Pelindung Diri
2. Batang Pengaduk
3. *Counter Electrode*
4. *Crocodile Clip*
5. *Crucible*
6. *Gelas Beaker*
7. Gerinda Duduk
8. *Hair Dryer*
9. *Kain Polishing*
10. Kertas Ampelas *grade* 400 sampai 2000
11. Katoda *Low Carbon Steel*
12. Mesin Bor Tangan
13. Mesin *Grinding* dan *Polishing*
14. Mikroskop Optik
15. Multimeter
16. Pencapit *Crucible*
17. Potensiostat Corrtest Instrument
18. *Reference Electrode Ag/AgCl*
19. *Thermogun*
20. Timbangan Digital
21. Tungku Gas

3.3.2. Bahan yang Digunakan

Bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini antara lain:

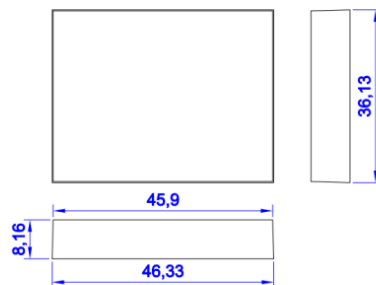
1. Akuades
2. Aluminium *Ingot* Inalum G1
3. Asam Klorida (HCl)
4. Asam Florida (HF)
5. Asam Nitrat (HNO₃)
6. Garam (NaCl)
7. Indium (In)
8. *Velg* Aluminium
9. *Zinc Ingot* Nyzstar AZ-Z1

3.3. Prosedur Penelitian

Berikut ini merupakan prosedur penelitian dimulai dari proses pengecoran anoda korban aluminium hingga proses pengujian korosi maupun metalografinya.

3.3.1. Perancangan Dimensi Pengecoran

Pola cetakan dibuat untuk dimensi 45 x 35 x 8 mm, setelah perhitungan kemiringan 1,5° dan *allowance* 1%. Dimensi pengecoran dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Dimensi Pola Sampel

3.3.2. Prosedur Persiapan Sampel Anoda Korban

Pada proses persiapan sampel anoda korban, bahan yang digunakan yaitu: *velg* aluminium, aluminium (Al) 99,7%, dan Seng (Zn) 99,99%. Berikut merupakan prosedur persiapan sampel dengan metode peleburan dan pepaduan.

1. *Velg* aluminium dipotong menggunakan gerinda.
2. *Velg* aluminium dilakukan pengujian XRF.
3. Komposisi masing-masing sampel dihitung dengan variasi penambahan paduan Al-2,6%Zn, Al-3,6% Zn, dan Al-5% Zn.
4. Berdasarkan perhitungan untuk mencapai komposisi tersebut, maka ditambahkan paduan dengan variasi pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Perhitungan Berat Bahan Baku Variasi Paduan

Unsur	Komposisi Bahan Baku				Sampel I 2,6% Zn	Sampel II 3,6% Zn	Sampel III 5% Zn	Anoda standar DNVGL- RPB401 (%)
	Velg Al (%)	Al G1 Inalum (%)	In Ingot (%)	Zn A-Z Z1 Zyzstar (%)	Paduan (gr/100gr Velg)	Paduan (gr/100gr Velg)	Paduan (gr/100gr Velg)	
Al	92,312	99,702		0,0002	382	376	370	rem.
Zn	0,012	0,001	0,001	99,996	15	20	25	2,75-5,75
Mg	0,275	0,001						
Mn	0,002	0,002						
In	0,002	0,002	99,995		0,19	0,19	0,19	0,015- 0,04
Si	7,200	0,054						≤ 0,12
Cd	0,001	0,001	0,0005	0,0003				≤ 0,002
Cu	0,003	0,003	0,0002	0,0001				≤ 0,003
Fe	0,122	0,177	0,0005	0,0003				≤ 0,09
Cr	0,001	0,001						
Ni	0,002	0,002						
Sn	0,005	0,005		0,0004				
V	0,025	0,005						
Ga	0,016	0,009						
Sb	0,016	0,030						
Pb			0,0005	0,0029				
total	100	100		100	395,19	396,19		100

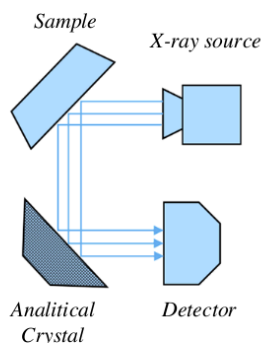
5. *Velg* aluminium, aluminium, dan Seng dipotong menggunakan gerinda dan ditimbang menggunakan timbangan digital.
6. Pola cetakan dibuat berdasarkan dimensi pengecoran.
7. Cetakan pasir dibuat menggunakan pasir cetak.
8. Peleburan *velg* aluminium dilakukan di dalam tungku gas dengan menggunakan *crusible* grafit.
9. Pemaduan variasi pertama Al-5%Zn dilakukan dengan memasukkan bahan ke dalam tungku.
10. Logam cair diaduk menggunakan batang pengaduk.
11. Aluminium cair dituang ke dalam cetakan pasir dengan variasi temperatur penuangan 650°C, 700°C, dan 750°C.
12. Menunggu beberapa saat hingga proses solidifikasi selesai.
13. Cetakan pasir dibongkar.
14. Prosedur 7-10 dilakukan kembali dengan semua variasi.

Sampel yang dibutuhkan yaitu 9 sampel dengan masing-masing variasi komposisi dilakukan variasi temperatur penuangan.

3.3.3. Prosedur Pengujian *X-Ray Fluorence* (XRF)

Pengujian komposisi kimia pada logam dilakukan untuk mengidentifikasi unsur-unsur di dalamnya. Metode yang digunakan adalah *X-Ray Fluorescence* (XRF), di mana elektron ditembakkan ke permukaan datar spesimen, menghasilkan pantulan gelombang cahaya. Gelombang cahaya ini kemudian ditangkap oleh penerima dan sensor. Data yang diperoleh dari gelombang cahaya tersebut diproses dan dibandingkan dengan database yang tersedia. Spesimen untuk pengujian ini memiliki ukuran 2 x 2 x 0,5 cm dengan

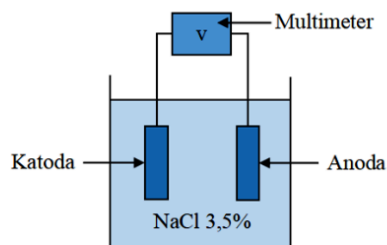
variasi komposisi yang berbeda-beda. Skematik pengujian XRF dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Skematik Pengujian XRF [39]

3.3.4. Prosedur Pengujian Galvanik

Prosedur pengujian galvanik berdasarkan standar ASTM G71-81 dilakukan untuk mengevaluasi efek penambahan Zn dan variasi temperatur tuang pada kapasitas arus anoda korban aluminium (Al-Zn) dalam sel galvanik. Pengujian ini menggunakan elektrolit NaCl 3,5% untuk mensimulasikan kondisi lingkungan korosif. Sampel yang diuji terdiri dari anoda korban aluminium dan katoda baja karbon. Uji dilakukan selama 10 hari untuk setiap spesimen. Gambar 3.4 menunjukkan skematik pengujian galvanik.



Gambar 3.4 Skematik Pengujian Korosi Galvanik [40]

Prosedurnya dimulai dengan persiapan sampel anoda korban velg aluminium yang telah ditambahkan Zn dan disesuaikan dengan variasi temperatur tuang yang berbeda. Katoda baja karbon rendah juga dipersiapkan. Kedua sampel kemudian ditempatkan dalam larutan NaCl 3,5% dan dihubungkan untuk membentuk sel galvanik. Selama 10 hari, arus yang dihasilkan oleh anoda korban, dan *weigh loss* anoda korban diukur untuk menentukan kapasitas arusnya [40]. Kapasitas arus anoda korban dihitung menggunakan persamaan 3.1 [41].

$$Current\ Capacity(CC) = \frac{Current(A) \times time(h)}{Weight\ loss(kg)} \quad (3.1)$$

Data yang diperoleh dari pengukuran ini kemudian dianalisis untuk mengetahui pengaruh penambahan Zn dan variasi temperatur tuang terhadap kapasitas arus dan efisiensi anoda korban Al-Zn. Efisiensi anoda korban dapat dihitung menggunakan persamaan 3.2. [41].

$$Efisiensi(\varepsilon) = \frac{CC_A}{CC_T} \times 100 \quad (3.2)$$

Dimana CC_A dan CC_T secara berturut-turut adalah kapasitas arus aktual dan kapasitas arus teoritis. Kapasitas teoritis anoda korban dihitung terlebih dahulu menggunakan persamaan 3.3 dan 3.4 [41].

$$CC_{T\ Unsur}(Ah/kg) = \frac{F(Ah/mol)}{M(g/mol)} \times n \times 1000(g/kg) \quad (3.3)$$

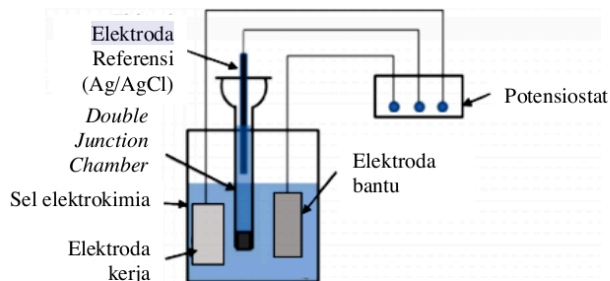
$$CC_{T\ Paduan} = \sum (\%wt_{Unsur} \times CC_{T\ Unsur}) \quad (3.4)$$

3.3.5. Prosedur Pengujian Tafel Polarisasi

Prosedur pengujian dimulai dengan menyiapkan spesimen uji sebagai elektroda kerja, Ag/AgCl sebagai elektroda referensi, dan platina sebagai

elektroda bantu. Ketiganya dirangkai menjadi sel elektrokimia dan direndam dalam media korosi dengan jarak yang berdekatan. Setelah itu, kurva tafel ditentukan dengan mempolarisasikan potensial anodik dan katodik dalam rentang ± 450 mV relatif terhadap *Open Circuit Potential* (OCP vs RE) dan dengan scan rate 5 mV/s [42].

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui laju korosi anoda korban. Grafik Tafel Polarisasi, yang terdiri dari kurva katodik dan kurva anodik. Kurva katodik merepresentasikan reaksi reduksi, sedangkan kurva anodik merepresentasikan reaksi oksidasi. Interseksi kedua kurva ini menentukan potensial korosi (E_{corr}) dan densitas arus korosi (i_{corr}). Nilai densitas arus korosi (i_{corr}) yang diperoleh dari fitting kurva Tafel selanjutnya digunakan untuk menghitung laju korosi menggunakan perangkat lunak Corrttest Studio 6. Rangkaian sel elektrokimia dalam pengujian tafel polarisasi ini dapat dilihat pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Skematik Pengujian Tafel Polarisasi [42]

3.3.6. Prosedur Pengujian Metalografi

Pengujian metalografi menggunakan standar ASTM E407-07 melibatkan beberapa langkah utama untuk menyiapkan sampel logam

sehingga strukturnya dapat diamati di bawah mikroskop. Prosedur dimulai dengan pemotongan sampel logam yang akan diuji. Selanjutnya, sampel tersebut diampelas secara bertahap mulai dari kertas ampelas dengan grit kasar hingga mencapai grit 2000, untuk memastikan permukaan sampel halus dan bebas dari goresan yang dapat mengganggu pengamatan. Setelah diampelas, sampel dipoles menggunakan pasta alumina (Al_2O_3) untuk mendapatkan permukaan yang sangat halus dan reflektif. Tahap terakhir adalah etsa menggunakan keller's *reagen* yang memiliki komposisi 2 mL HF, 3 mL HCl, 5 mL HNO_3 , dan 190 mL akuades. Proses etsa ini mengungkap struktur mikro logam dengan menyerang batas butir dan fitur lain pada sampel, sehingga dapat diamati dengan jelas di bawah mikroskop. Hasil akhir dari prosedur ini memungkinkan analisis detail mengenai struktur mikro anoda korban. Analisis ukuran butir dan fraksi fasa dilakukan menggunakan perangkat lunak ImageJ [43].

Analisis Struktur mikro dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak ImageJ. Analisis yang dilakukan yaitu analisis fraksi fasa Zn dan a-Al serta analisis distribusi ukuran butir. Pengambilan data fraksi fasa dilakukan dengan menggunakan alat pada perangkat lunak ImageJ yaitu *Threshold* dan *Analyze Particle*. Cara menggunakan alat *Threshold* dapat dilihat pada Gambar B.30 dan C.31 yaitu dengan menekan *Image > Adjust > Threshold > Adjust > Apply*. Cara menggunakan alat *Analyze Particle* dapat dilihat pada Gambar B.32 dan C.33 yaitu dengan menekan *Analyze > Analyze Particle > OK*.

Pengambilan data distribusi ukuran butir dilakukan juga menggunakan ImageJ. Alat yang digunakan pada perangkat lunak ImageJ yaitu *Measure* dilakukan dengan cara menekan *Analyze > Measure >* Tarik garis ukuran butir menggunakan *Cursor > Enter >* Ulangi untuk setiap lebar dan panjang butir serta setiap butir.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Pengujian Komposisi Anoda Korban

Penelitian ini menggunakan bahan *Velg* Aluminium, Aluminium Ingot 99,72%, Seng (Zn), dan Indium sebagai bahan utama pembuatan anoda korban. Proses peleburan menggunakan tungku gas dan pengecoran menggunakan metode sand casting. Pengujian komposisi anoda korban dilakukan untuk selanjutnya dilakukan analisis pengaruhnya terhadap karakteristik proteksi anoda korban. Tabel 4.1 menunjukkan komposisi rancangan serta aktual hasil pengujian komposisi kimia menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF) pada anoda korban.

Tabel 4.1 Komposisi Kimia Sampel Anoda Korban

Sampel	Elemen (%)							
	Al	Zn	In	Si	Fe	Cu	Cd	Ti
Rancangan	I rem.	3,000	0,040	0,120	0,090	0,003	0,002	-
	II rem.	4,000	0,040	0,120	0,090	0,003	0,002	-
	III rem.	5,000	0,040	0,120	0,090	0,003	0,002	-
Aktual	I 94,972	2,696	0,033	1,031	1,126	0,024	-	0,024
	II 94,404	3,692	0,008	1,024	0,805	0,004	-	0,023
	III 92,785	5,099	0,040	1,086	0,902	0,000	-	0,022

Dapat dilihat pada Tabel 4.1 menunjukkan tiga variasi komposisi Zn pada sampel I, II, dan III. Komposisi aktual anoda korban memiliki beberapa perbedaan dengan komposisi rancangannya. Perbedaan komposisi ini dapat disebabkan oleh proses peleburan dimana didalamnya terdapat proses pengadukan menggunakan batang pengaduk dan mesin bor yang kurang merata sehingga paduan tidak mengalami keseragaman komposisi. Perbedaan komposisi rancangan dan aktual

juga dapat disebabkan oleh proses pengadukan yang cepat sehingga paduan aluminium mengalami reaksi oksidasi dengan udara yang menyebabkan oksida tersebut terpisah sebagai lapisan diatas aluminium sehingga berkurang konsentrasinya ketika proses pengecoran.

Komposisi aktual Zn pada sampel I yaitu 5,099% Zn mencapai komposisi rancangan Zn pada sampel tersebut, sedangkan komposisi aktual Zn pada sampel II yaitu 3,692% Zn dan III yaitu 2,696% Zn tidak mencapai komposisi rancangan Zn sampel tersebut. Akan tetapi, komposisi aktual Zn sampel II dan III masih memenuhi standar DNV-RP-B401 maka kedua sampel tersebut diterima dan tetap dilakukan pengujian galvanik dan tafel polarisasi untuk mengetahui karakteristik proteksi anoda korban.

Hasil komposisi aktual In pada sampel I yaitu 0,04% In dan sampel III yaitu 0,033% In memenuhi standar DNV-RP-B401 yaitu 0,015-0,04% In, namun pada sampel II tidak memenuhi standar yaitu 0,008% In. Ketidaksesuaian komposisi aktual ini dapat disebabkan kesalahan pada saat proses pengadukan manual atau penuangan yang dapat menyebabkan paduan tidak homogen. Namun perbedaan ini dapat diterima, karena fokus penelitian ini adalah pengaruh kadar Zn. Perbedaan komposisi aktual In ini pun dapat diteliti pengaruhnya terhadap nilai efisiensi, *open circuit potential* dan laju korosi.

4.2. Hasil Pengujian Galvanik

Tabel 4.2 menampilkan data hasil pengujian galvanik anoda korban. Tabel 4.2 menunjukkan data berupa arus sel galvanik antara anoda korban dan katoda baja karbon rendah serta massa hilang terkorosi anoda dari data massa awal dan

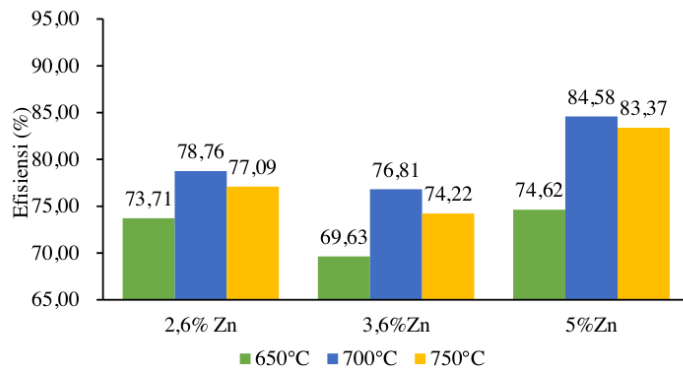
massa akhir anoda setelah dilakukan pengujian selama 240 jam. perhitungan dilakukan untuk menemukan nilai kapasitas arus teoritis menggunakan persamaan 3.3 dan 3.4 serta kapasitas arus aktual ⁸⁷ dihitung menggunakan persamaan 3.1. Persamaan 3.2 digunakan untuk menghitung efisiensi.

Tabel 4.2 Data Hasil Pengujian Galvanik

Sampel	Arus (mA)	Massa hilang (g)	Waktu (hour)	Kapasitas (Ah/kg)	Kapasitas	Efisiensi (%)
					teoritis paduan (Ah/kg)	
2,6% Zn 650°C	0,73	0,083	240	2102,40	2852,25	73,71%
2,6% Zn 700°C	0,78	0,083	240	2246,40	2852,25	78,76%
2,6% Zn 750°C	1,13	0,123	240	2198,92	2852,25	77,09%
3,6% Zn 650°C	1,43	0,173	240	1980,00	2843,49	69,63%
3,6% Zn 700°C	0,91	0,100	240	2184,00	2843,49	76,81%
3,6% Zn 750°C	0,85	0,097	240	2110,34	2843,49	74,22%
5% Zn 650°C	1,60	0,183	240	2094,55	2806,78	74,62%
5% Zn 700°C	1,22	0,123	240	2374,05	2806,78	84,58%
5% Zn 750°C	1,30	0,133	240	2340,00	2806,78	83,37%

Kapasitas arus anoda meningkat seiring bertambahnya kandungan Zn pada anoda. Hal ini sesuai dengan penelitian bahwa kadar 5% Zn merupakan kadar dengan nilai kapasitas arus tertinggi sebelum menurun pada kadar 6% Zn. Kadar In dalam anoda juga mempengaruhi nilai kapasitas arus yang akan mempengaruhi nilai efisiensi anoda korban. Kadar In dengan nilai kapasitas arus tertinggi yaitu 0,04% In [44].

Grafik perbandingan antara sampel anoda dan nilai efisiensi ⁸⁸ dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Grafik Perbandingan Kadar Zn dan Temperatur Penuangan Terhadap Nilai Efisiensi Anoda

Gambar 4.1 menampilkan grafik perbandingan antara kadar Zn dan nilai efisiensi anoda korban. Nilai efisiensi tertinggi sampai terendah secara berurutan yaitu pada anoda dengan kadar 5% Zn, 2,6% Zn, dan 3,6% Zn. Urutan nilai efisiensi ini juga tetap pada variasi temperatur tuang lainnya. Anoda korban dengan kadar 5% Zn merupakan anoda terbaik karena memiliki nilai efisiensi tertinggi. Nilai efisiensi anoda korban akan sangat dipengaruhi oleh kadar Zn, semakin besar kadar Zn terlarut dalam anoda, maka Efisiensi anoda korban akan meningkat. Kadar In juga memiliki peranan besar dalam peningkatan efisiensi, semakin tinggi kadar In maka efisiensi akan meningkat [44]. Pengaruh In dapat terlihat pada Gambar 4.1 pada nilai efisiensi anoda Al-3,6% Zn-0.008% In yang merupakan anoda dengan kadar In paling rendah dan efisiensi paling rendah, maka perlu dilakukan upaya peningkatan kadar In mencapai standar DNV-RP-B401 yaitu 0,015-0,04% In.

Penurunan efisiensi anoda korban seiring dengan menurunnya kadar Zn dapat disebabkan oleh terjadinya pasivasi aluminium pada permukaan anoda.

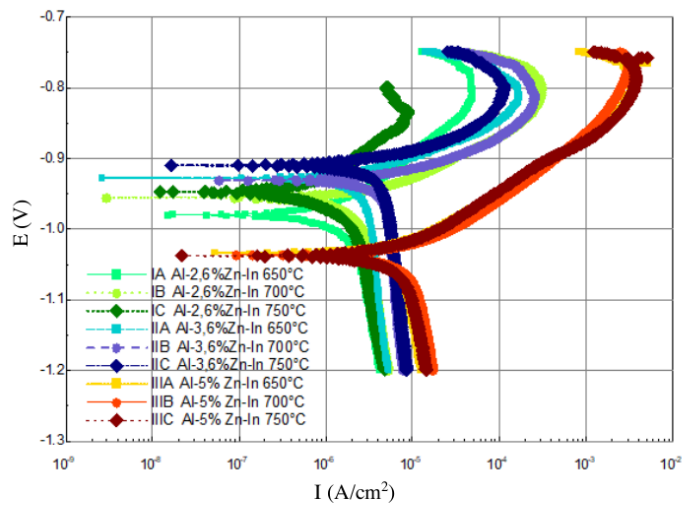
Pasivasi ini terjadi karena pembentukan lapisan oksida yang stabil, seperti aluminium oksida (Al_2O_3), pada permukaan anoda ketika terekspos lingkungan air laut. Lapisan pasif ini dapat menghambat transfer elektron dan mengurangi aktivitas elektrokimia anoda, sehingga kapasitas arusnya menurun. Akibatnya, anoda menjadi kurang efektif dalam memberikan perlindungan terhadap katoda. Fenomena ini juga dipengaruhi oleh komposisi kimia dan mikrostruktur anoda. Zinc (Zn) berfungsi sebagai elemen alloy yang dapat meningkatkan aktivitas elektrokimia dengan cara menghambat pembentukan lapisan pasif. Penurunan kadar Zn dalam paduan aluminium mengurangi efek ini, sehingga pasivasi lebih mudah terjadi [41].

Gambar 4.1 juga menampilkan perbandingan temperatur penuangan terhadap nilai efisiensi anoda korban. Nilai efisiensi tertinggi sampai terendah secara berurutan yaitu pada anoda dengan temperatur penuangan 700°C , 750°C , dan 650°C . Temperatur penuangan 700°C merupakan temperatur terbaik karena memiliki nilai efisiensi tertinggi. Efisiensi cenderung meningkat terhadap peningkatan temperatur penuangan.

Pada suhu pengecoran yang ideal, diperoleh ¹potensial yang lebih stabil dan efisiensi arus yang lebih baik. Kombinasi suhu pengecoran dan cetakan yang tepat dapat menghasilkan struktur ekuaksial, yang mendukung terjadinya korosi seragam pada anoda. Selain itu, kondisi pengecoran yang mampu mendistribusikan elemen paduan secara merata di zona kaya elemen juga akan meningkatkan efisiensi anoda [45].

4.3. Hasil Pengujian Tafel Polarisasi Anoda Korban

Data yang diperoleh dari pengujian tafel polarisasi menggunakan alat potentiostat dan perangkat lunak Corrtest Studio 6 yaitu nilai grafik tafel polarisasi, *open circuit potential* (OCP) (V), b_a (mV), b_c (mV), i_0 (A/cm²), E_0 (V), *Corrosion rate* (mm/a). Parameter yang digunakan yaitu dengan rentang ± 450 mV relatif terhadap *Open Circuit Potential* (OCP vs RE) dan dengan scan rate 5 mV/s. Data yang diperoleh berupa grafik polarisasi rapat arus (I) (A/cm²) terhadap potensial (E) (V) dan OCP (V) dari eksperimen menggunakan alat *potentiodynamic* (Tafel, LRP) dengan cara menekan alat *Experiments > Corrosion test > Potentiodynamic* (Tafel, LPR) > atur parameter > *Run*. Cara tersebut dapat dilihat pada Gambar B.19. Data Laju korosi diketahui dengan pengolahan data menggunakan alat *auto tafel* dengan cara menekan alat *Data fitting > Tafel > Fit Auto Tafel > Fit*. Cara tersebut dapat dilihat pada Gambar B.20. Gambar 4.2 merupakan grafik tafel polarisasi yang dihasilkan dari pengujian.



Gambar 4.2 Grafik Tafel Polarisasi

Grafik pada Gambar 4.2 menunjukkan kurva anodik dimana terjadi proses oksidasi (kehilangan elektron) yaitu Material (logam) terlarut ke dalam larutan sebagai ion. Kurva anodik bernilai eksponensial naik seiring dengan peningkatan potensial. Grafik tersebut juga memiliki kurva katodik dimana terjadi proses reduksi (penangkapan elektron) yaitu elektron dari anoda korban mengalir ke baja melalui *metallic path*, dan digunakan untuk mendukung reaksi reduksi pada katoda. Kurva katodik bernilai eksponensial turun seiring penurunan potensial. Elektron yang dilepaskan oleh aluminium (anoda) mengalir ke baja (katoda) melalui koneksi konduktor. Elektron ini digunakan dalam reaksi reduksi, sehingga permukaan baja menjadi terpasivasi (tidak mengalami oksidasi).

Data OCP (V) vs SHE didapat dan grafik tafel polarisasi kemudian dianalisa menggunakan perangkat lunak Corrttest Studio 6 sehingga didapatkan nilai

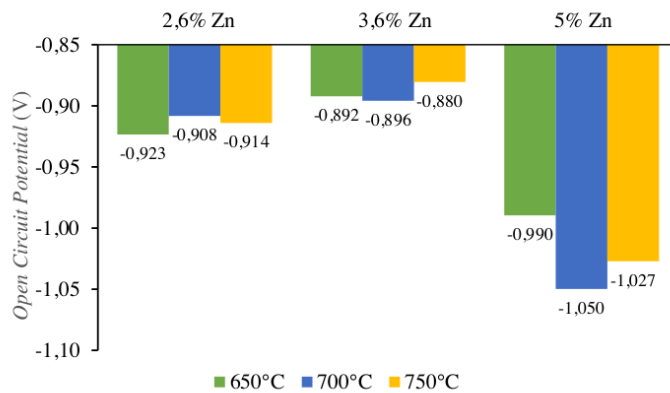
potensial korosi (E_{corr}) dan densitas arus korosi (i_{corr}). Dari data tersebut dihasilkan nilai laju korosi yang dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Data Hasil Pengujian Tafel Polarisasi

Sampel	<i>Open Circuit Potential</i> (V) vs SHE	<i>Corrosion Rate</i> (mm/year)
2,6% Zn 650°C	-0,9235	0,0496
2,6% Zn 700°C	-0,9082	0,0819
2,6% Zn 750°C	-0,9140	0,0538
3,6% Zn 650°C	-0,8922	0,0783
3,6% Zn 700°C	-0,8959	0,1527
3,6% Zn 750°C	-0,8804	0,1369
5% Zn 650°C	-0,9896	0,1602
5% Zn 700°C	-1,0498	0,2495
5% Zn 750°C	-1,0271	0,2370

4.3.1. Analisis Pengaruh Kadar Zn dan Temperatur Penuangan terhadap OCP

Analisis pengaruh kadar Zn dan temperatur penuangan terhadap *open circuit potential* (OCP) pada anoda korban aluminium sangat penting untuk memahami karakteristik proteksi yang dihasilkan. OCP mencerminkan kemampuan anoda untuk melepaskan elektron selama proses proteksi katodik. Semakin negatif nilai OCP, semakin baik kemampuan anoda untuk melindungi logam yang dilindungi. Gambar 4.2 menampilkan grafik pengaruh kadar Zn terhadap OCP (V) vs SHE pada berbagai suhu penuangan.



Gambar 4.3 Grafik Perbandingan Kadar Seng (Zn) terhadap OCP (V) vs SHE

Dari grafik di Gambar 4.3 terlihat perbandingan antara kadar Zn terhadap nilai OCP anoda. Nilai OCP yang paling negatif, yaitu berkisar antara -1,050 hingga -1,027 V, ditemukan pada kadar Zn yang tinggi (5% Zn). Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan kadar Zn menggeser potensial anoda menjadi lebih aktif. Kondisi ini menjadikan anoda lebih efektif dalam memberikan perlindungan pada logam yang terhubung.

Penambahan Zn ke dalam aluminium memberikan dampak signifikan terhadap perilaku elektrokimia anoda. Seng yang terdistribusi secara homogen di matriks aluminium, atau yang membentuk fase intermetalik tertentu, mampu mencegah terbentuknya lapisan pasif yang biasanya terjadi pada aluminium murni. Lapisan pasif ini, yang terdiri dari oksida aluminium (Al_2O_3), cenderung menghambat reaksi korosi. Dengan adanya seng, aktivitas anodik meningkat karena lapisan pasif tidak terbentuk secara efektif.

Kadar Zn yang tinggi tidak hanya meningkatkan aktivitas anodik tetapi juga mempercepat reaksi korosi seragam. Hal ini dapat memberikan

perlindungan lebih konsisten terhadap korosi galvanik pada logam yang dilindungi. Penemuan ini didukung oleh berbagai studi, termasuk jurnal yang membahas perilaku anodik dari sistem Al-Zn-In pada anoda korban dengan berbagai konsentrasi Zn dan Indium [44]. Studi tersebut menunjukkan bahwa penambahan Zn pada konsentrasi yang tepat dapat menghasilkan anoda korban dengan efisiensi yang lebih tinggi.

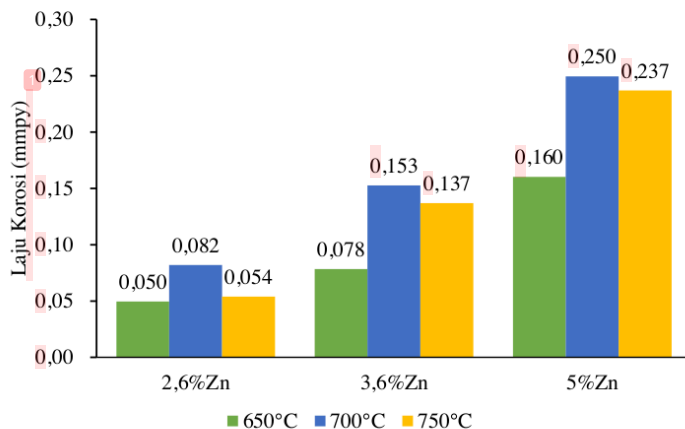
Namun, perlu dicatat bahwa kadar Zn yang terlalu tinggi juga dapat memiliki dampak negatif, seperti mempercepat laju konsumsi anoda. Oleh karena itu, pemilihan kadar Zn yang optimal sangat penting untuk mendapatkan keseimbangan antara aktivitas proteksi dan durabilitas anoda. Di sisi lain, suhu penuangan juga turut memengaruhi distribusi Zn dan fase yang terbentuk, yang akan dibahas lebih lanjut dalam analisis berikut.

4.3.2. Analisis Pengaruh Kadar Zn dan Temperatur Penuangan terhadap nilai Laju Korosi

Kadar Zn dan temperatur penuangan mempengaruhi pembentukan mikrostruktur material. Mikrostruktur yang terbentuk, seperti ukuran butir dan distribusi fasa, menentukan sifat elektrokimia dan ketahanan korosi material. Gambar 4.4 merupakan grafik perbandingan Kadar Zn dan temperatur penuangan terhadap nilai laju korosi.

Gambar 4.4 menunjukkan bahwa dengan peningkatan kadar Zn, laju korosi semakin meningkat. Anoda dengan kadar 5%Zn memiliki nilai laju korosi tertinggi yaitu 0,160 sampai 0,250 mmpy, anoda dengan kadar 3,6% Zn memiliki nilai laju korosi 0,078 sampai 0,153 mmpy, dan anoda dengan kadar 2,6% Zn memiliki nilai laju korosi 0,050 sampai 0,082 mmpy. Peningkatan

laju korosi seiring dengan peningkatan kadar Zn ini nilainya konstan pada setiap variasi temperatur penuangan. Pada variasi temperatur penuangan lainnya juga terjadi peningkatan laju korosi.



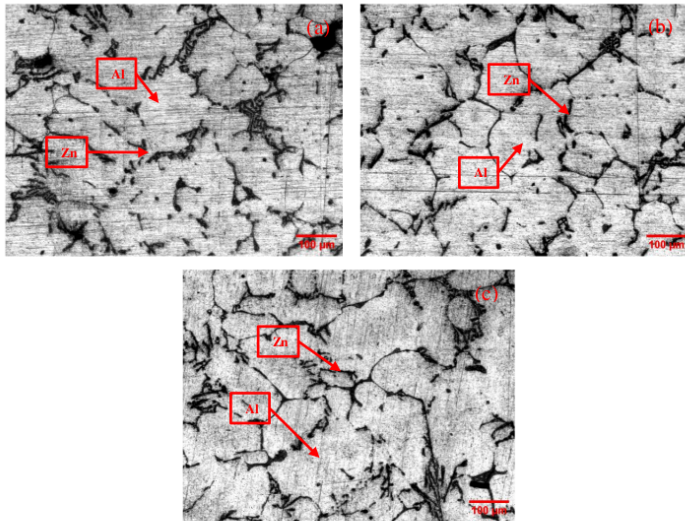
Gambar 4.4 Grafik Perbandingan Kadar Zn dan Temperatur Penuangan terhadap Laju Korosi

Peningkatan laju korosi yang seiring dengan penambahan kadar Zn dapat dijelaskan melalui mekanisme mikrogalvanik yang terjadi di dalam material anoda. Zn memiliki potensial elektrokimia yang lebih rendah dibandingkan Al, sehingga kehadiran Zn dalam matriks Al menciptakan pasangan galvanik mikro antara kedua unsur ini. Dalam pasangan galvanik mikro, Zn bertindak sebagai anoda lokal yang lebih aktif dibandingkan Al, sehingga meningkatkan laju pelepasan ion logam ke larutan. Fenomena ini disebut sebagai mikrogalvanik, yaitu interaksi elektrokimia skala mikro yang terjadi antara fasa-fasa atau unsur-unsur dalam material.

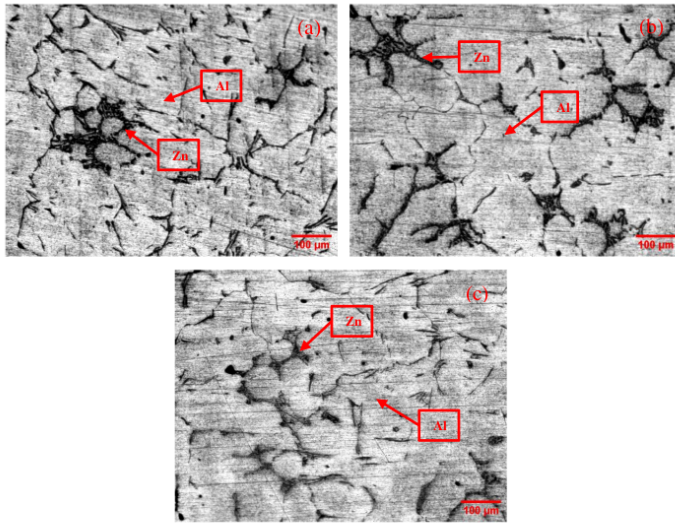
4.4. Hasil Pengujian Metalografi Anoda Korban

Pengujian metalografi dilakukan untuk menganalisis struktur mikro anoda korban, yang merupakan salah satu parameter utama dalam menentukan performa elektrokimia anoda. Struktur mikro memengaruhi sifat-sifat penting seperti homogenitas distribusi unsur, ukuran butir, serta keberadaan dan distribusi fasa-fasa intermetalik. Faktor-faktor ini secara langsung memengaruhi kemampuan anoda dalam melepas elektron, resistensi terhadap pasivasi, dan efisiensi proteksi korosi.

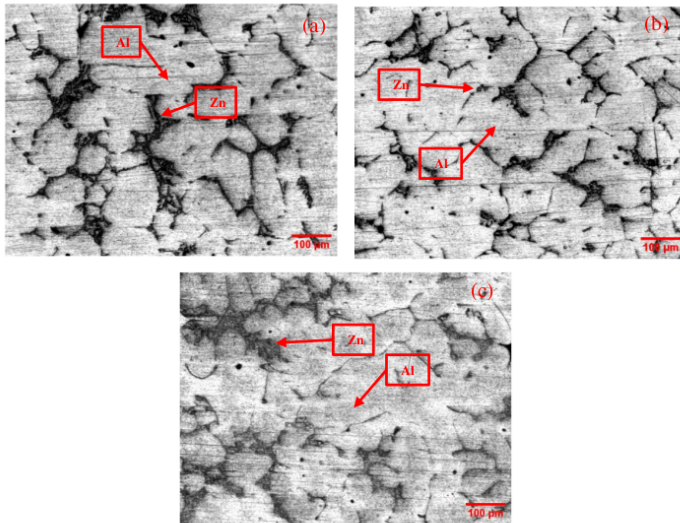
Pengujian ini dilakukan untuk mengevaluasi bagaimana variasi kadar seng (Zn), Indium (In) dan variasi temperatur penuangan memengaruhi struktur mikro. Gambar 4.5, Gambar 4.6, dan Gambar 4.7 merupakan gambar mikrostruktur hasil pengujian metalografi.



Gambar 4.5 Struktur Mikro Anoda Al-2,6% Zn Temperatur Tuang 650°C (a), 700°C (b), dan 750°C (c) pembesaran 100x



Gambar 4.6 Struktur Mikro Anoda Al-3,6% Zn Temperatur Tuang 650°C (a), 700°C (b), dan 750°C (c) pembesaran 100x



Gambar 4.7 Struktur Mikro Anoda Al-5% Zn Temperatur Tuang 650°C (a), 700°C (b), dan 750°C (c) pembesaran 100x

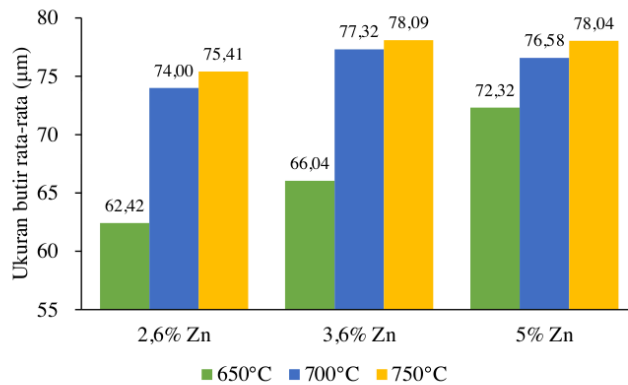
Fasa kaya Al ditunjukkan pada Gambar 4.5, 4.6, dan 4.7 yaitu berwarna putih sedangkan kaya Zn (η) berada di batas butir fasa kaya Al (α) membentuk fasa intermetalik pada gambar berwarna hitam [46].

Gambar struktur mikro tersebut kemudian diproses menggunakan perangkat lunak ImageJ sehingga menghasilkan data berupa distribusi ukuran. Data distribusi ukuran kemudian dilakukan perhitungan rata-rata sehingga didapatkan nilai ukuran butir rata-rata dari fasa Al. Selain ukuran butir rata-rata, dilakukan juga proses pengolahan data untuk mendapatkan nilai fraksi fasa kaya Al dan fasa kaya Zn. Data tersebut dapat dilihat pada tabel 4.4.

Tabel 4.4 Data Hasil Pengujian Metalografi

Sampel	Ukuran butir rata-rata (μm)	Fraksi Fasa Al (%)	Fraksi Fasa Zn (%)
2,6% Zn 650°C	62,424	89,29	7,21
2,6% Zn 700°C	73,999	92,27	7,51
2,6% Zn 750°C	75,407	88,84	8,91
3,6% Zn 650°C	66,039	90,44	8,5
3,6% Zn 700°C	77,316	90,42	8,56
3,6% Zn 750°C	78,095	94,78	5,1
5% Zn 650°C	72,319	89,77	9,8
5% Zn 700°C	76,579	92,71	6,6
5% Zn 750°C	78,045	87,81	12,49

Data dari Tabel 4.4 kemudian dapat dibandingkan menggunakan grafik pengaruh kadar Zn dan Temperatur penuangan terhadap ukuran butir rata-rata yang dapat dilihat pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8 Grafik Perbandingan Kadar Zn dan Temperatur Penuangan terhadap Ukuran Butir Rata-Rata

4.2.1. Analisis Struktur Mikro Pengaruh Temperatur Penuangan

Pengaruh temperatur penuangan terhadap struktur mikro dianalisa untuk mengetahui pengaruhnya terhadap proses solidifikasi, homogenisasi melalui fraksi fasa-fasa yang terbentuk, serta ukuran butir rata-rata yang terbentuk pada setiap temperatur penuangan. ¹ Gambar 4.5, Gambar 4.6, dan Gambar 4.7 merupakan struktur mikro anoda hasil pengujian metalografi.

Gambar 4.5 merupakan hasil pengujian metalografi dari anoda 2,6% Zn dengan perbedaan temperatur penuangan. Data hasil pada Tabel 4.4 memperlihatkan bahwa persentase fasa kaya Zn (η) berkurang seiring dengan penurunan temperatur tuang. Penurunan fasa η pada temperatur tuang yang lebih rendah dapat dijelaskan oleh mekanisme solidifikasi. ¹⁸ Pada temperatur yang lebih tinggi, cairan logam memiliki waktu solidifikasi yang lebih lama, memungkinkan segregasi Zn yang lebih besar dan pembentukan fasa η dalam jumlah lebih banyak. Sebaliknya, pada temperatur tuang yang lebih rendah, proses solidifikasi berlangsung lebih cepat, menghambat migrasi Zn ke daerah

segregasi, sehingga menghasilkan distribusi yang lebih merata dan jumlah fasa η yang lebih rendah.

Ukuran butir rata-rata juga menunjukkan penurunan dengan menurunnya temperatur tuang. Penurunan ukuran butir ini disebabkan oleh laju pendinginan yang lebih tinggi pada temperatur tuang yang lebih rendah. Laju pendinginan yang cepat membatasi pertumbuhan butir selama solidifikasi, menghasilkan struktur mikro dengan butir yang lebih kecil. Struktur mikro dengan ukuran butir lebih kecil cenderung lebih homogen, yang dapat meningkatkan sifat mekanik material seperti kekuatan dan ketahanan terhadap korosi.

Perbandingan perbedaan temperatur pada sampel anoda dengan kadar 3,6% Zn terlihat pada Gambar 4.6. dan grafik pada Gambar 4.8 yang menunjukkan variasi komposisi fasa kaya Zn (η) dan fasa kaya Al (α) pada temperatur tuang berbeda. Pada temperatur tuang 750°C, jumlah fasa η lebih rendah yaitu 5,1% dibandingkan temperatur 700°C dan 650°C secara berurutan yaitu 8,56% dan 8,5%. Fenomena ini mungkin disebabkan oleh difusi Zn yang lebih dominan ke matriks Al pada temperatur tinggi, sehingga Zn terlarut secara lebih merata dan menghasilkan fasa η yang lebih sedikit. Sebaliknya, pada temperatur tuang 700°C dan 650°C, solidifikasi lebih cepat, sehingga segregasi Zn terjadi lebih signifikan, menghasilkan lebih banyak fasa Zn.

Temperatur tuang yang lebih rendah (650°C) menghasilkan ukuran butir yang lebih kecil. Penurunan ukuran butir ini disebabkan oleh laju pendinginan yang lebih cepat pada temperatur rendah, yang membatasi

pertumbuhan butir selama proses solidifikasi. Sebaliknya, pada temperatur tinggi seperti 750°C dan 700°C, solidifikasi yang lebih lambat memungkinkan pertumbuhan butir yang lebih besar.

Pada temperatur tuang 750°C, meskipun ukuran butir cukup besar, fasa Zn yang lebih sedikit mengindikasikan distribusi Zn yang lebih terlarut dalam matriks Al, sehingga struktur mikro cenderung lebih homogen. Namun, pada temperatur tuang 700°C dan 650°C, lebih banyak fasa η yang terbentuk, dengan ukuran butir yang lebih kecil pada 650°C, menunjukkan distribusi Zn yang lebih terlokalisasi di area segregasi.

Pengaruh Temperatur penuangan dapat terlihat pada Gambar 4.7 dan grafik pada Gambar 4.8. Pada temperatur tuang 750°C, fasa η tercatat paling tinggi (12,49%), yang menunjukkan bahwa pada temperatur ini, proses solidifikasi berlangsung lebih lambat dan lebih banyak Zn yang terpisah membentuk fasa η yang lebih banyak. Pada temperatur 700°C, jumlah fasa η sedikit berkurang (6,60%) dan distribusinya menjadi lebih homogen, dengan lebih banyak fasa α yang terbentuk. Proses solidifikasi yang lebih cepat pada temperatur ini membatasi segregasi Zn, sehingga lebih banyak fasa α yang terbentuk. Pada 650°C, fasa η mencapai 9,80%, sedikit lebih banyak dibandingkan pada temperatur 700°C, tetapi tetap lebih sedikit dibandingkan pada 750°C. Di sini, solidifikasi yang lebih cepat mempengaruhi distribusi fasa Zn dan menghasilkan struktur mikro yang lebih seragam, dengan sedikit peningkatan dalam pembentukan fasa Zn.

Terlihat bahwa ukuran butir terbesar terjadi pada temperatur 650°C (80,57 μm) yang menunjukkan bahwa pada temperatur lebih rendah, proses

pendinginan yang lebih cepat tidak cukup untuk menghambat pertumbuhan butir secara signifikan. Meskipun solidifikasi lebih cepat pada temperatur ini, tetapi ukuran butir lebih besar akibat waktu pendinginan lebih pendek sehingga tidak cukup untuk memperkecil butir. Sebaliknya, pada temperatur 750°C, ukuran butir relatif lebih kecil (74,30 μm), dengan waktu pendinginan yang lebih lama memungkinkan pembentukan butir lebih terkontrol, walaupun distribusi fasa Zn lebih tinggi.

4.2.2. Analisis Struktur Mikro Pengaruh Kadar Zn

Analisis perbedaan struktur mikro pada anoda korban dengan variasi kadar Zn berbahan baku velg aluminium dilakukan untuk memahami bagaimana elemen paduan Zn berinteraksi dengan matriks aluminium, baik dalam larutan padat maupun dalam bentuk fasa intermetalik seperti Al-Zn. Analisis ini juga bertujuan untuk memeriksa bagaimana kadar Zn yang berbeda dapat mempengaruhi homogenisasi, distribusi, serta segregasi fasa dalam struktur mikro.

¹ Gambar 4.5a, 4.6a, dan 4.7a menunjukkan struktur mikro anoda korban dengan kadar Zn yang berbeda yaitu 2,6% Zn, 3,6% Zn, dan 5% Zn pada temperatur penuangan 750°C. Pada Tabel 4.4 terlihat bahwa fasa kaya Al (α) ditunjukkan dengan warna putih, sedangkan fasa Zn tampak sebagai struktur yang lebih gelap, terutama di batas butir, di mana fasa kaya Zn (η) dapat membentuk fasa intermetalik dengan matriks aluminium [46].

Pada sampel dengan kadar Zn 5%, tampak bahwa fraksi fasa Zn lebih besar dari komposisi kimia Zn yang terukur pada anoda korban. Hal ini disebabkan oleh proses solidifikasi yang memperlambat pencampuran elemen

dan mengarah pada segregasi Zn yang lebih tinggi di batas butir dan daerah interdendritik. Proses ini menyebabkan adanya konsentrasi Zn lokal yang lebih tinggi dibandingkan dengan rata-rata komposisi Zn yang terukur menggunakan teknik uji komposisi seperti XRF (*X-Ray Fluorescence*). Fasa intermetalik Zn yang terbentuk di area batas butir memiliki karakteristik elektrokimia yang berbeda dengan matriks Al, sehingga dapat menciptakan pasangan mikrogalvanik antara Zn dan Al. Pasangan ini mengarah pada peningkatan laju korosi karena Zn bertindak sebagai katoda dan matriks aluminium sebagai anoda, yang mempercepat reaksi korosi di area tersebut. Distribusi fasa intermetalik Zn yang lebih homogen dapat membantu meningkatkan efisiensi anoda korban, karena memaksimalkan pelepasan ion Zn yang mendukung proses elektrokimia pada anoda.

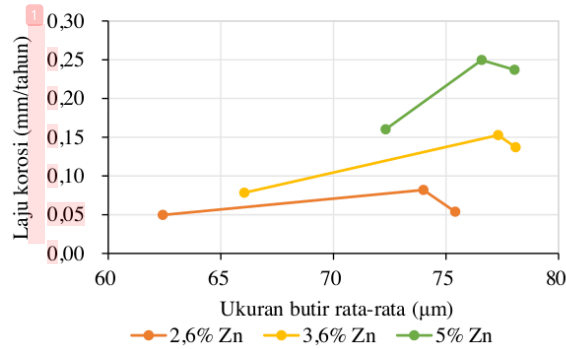
Pada Gambar 4.5b, 4.6b, dan 4.7b, yang menunjukkan struktur mikro pada temperatur penuangan 700°C, terlihat bahwa dengan meningkatnya kadar Zn, fraksi fasa Zn juga meningkat. Namun, pada struktur mikro sampel dengan kadar Zn yang lebih tinggi, seperti pada sampel 5% Zn, terlihat adanya kumpulan fasa intermetalik Zn yang lebih terkonsentrasi pada titik-titik tertentu, yang menyebabkan struktur mikro menjadi tidak sepenuhnya homogen. Keberadaan segregasi fasa Zn ini dapat mempengaruhi kestabilan elektroda, mengakibatkan peningkatan nilai potensial anoda serta peningkatan laju korosi, yang juga terbukti dalam hasil pengujian tafel polarisasi yang menunjukkan kecenderungan korosi yang lebih tinggi pada sampel dengan kadar Zn lebih banyak.

Pada Gambar 4.5c, 4.6c, dan 4.7c, yang menunjukkan struktur mikro pada temperatur penuangan 650°C, terlihat perbedaan yang cukup signifikan. Struktur mikro pada temperatur ini lebih homogen, meskipun konsentrasi fasa intermetalik Zn tetap tinggi pada area batas butir. Pada temperatur yang lebih rendah ini, laju pendinginan lebih cepat, yang mendorong solidifikasi lebih cepat dan lebih seragam, sehingga menghasilkan struktur mikro yang lebih seragam. Hal ini, pada gilirannya, dapat menurunkan laju korosi, karena distribusi fasa Zn yang lebih merata mengurangi kemungkinan terjadinya mikrogalvanik yang lebih ekstrem. Dengan kata lain, fasa Zn yang terdistribusi lebih merata pada temperatur penuangan rendah mengurangi segregasi dan menyebabkan reaksi korosi yang lebih terkontrol dan tidak terlalu agresif.

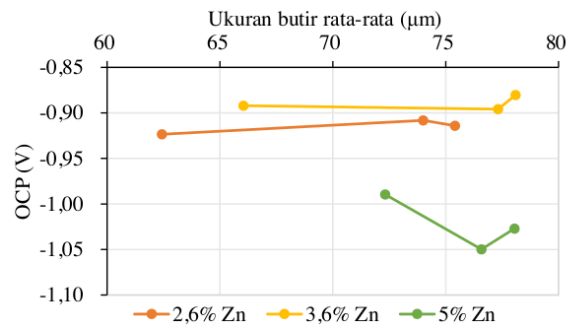
Perbedaan temperatur penuangan serta variasi kadar Zn pada anoda korban memiliki pengaruh yang signifikan terhadap distribusi dan segregasi fasa Zn dalam struktur mikro. Temperatur penuangan tinggi (750°C) cenderung menghasilkan struktur mikro yang lebih tidak homogen dengan segregasi fasa Zn yang lebih tinggi di batas butir, yang dapat meningkatkan laju korosi. Temperatur penuangan rendah (650°C) cenderung menghasilkan struktur yang lebih homogen, dengan distribusi fasa Zn yang lebih merata, sehingga dapat menurunkan laju korosi. Secara keseluruhan, kadar Zn yang lebih tinggi cenderung meningkatkan segregasi Zn, yang memperburuk distribusi fasa intermetalik dan meningkatkan potensi korosi, sementara kadar Zn yang lebih rendah dengan temperatur penuangan rendah menghasilkan struktur mikro yang lebih stabil dan tahan terhadap korosi.

4.5. Analisis Pengaruh Struktur Mikro Terhadap Karakteristik Proteksi

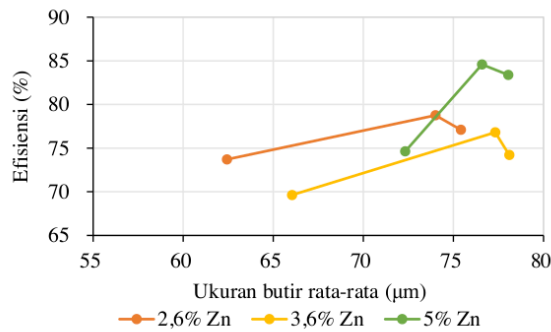
Analisis struktur mikro membantu menjelaskan hubungan antara parameter bahan baku, proses dan karakteristik anoda korban. Analisis ini membandingkan antara ukuran butir rata-rata pada struktur mikro anoda korban dengan karakteristik proteksi anoda korban. ⁷² Gambar 4.9, Gambar 4.10, dan Gambar 4.11 secara berurutan menunjukkan grafik perbandingan antara ukuran butir rata-rata terhadap nilai laju korosi, nilai OCP, dan nilai efisiensi anoda korban.



Gambar 4.9 Grafik Ukuran Butir Rata-Rata Terhadap Laju Korosi



Gambar 4.10 Grafik Ukuran Butir Rata-Rata Terhadap Nilai OCP



Gambar 4.11 Grafik Ukuran Butir Rata-Rata Terhadap Efisiensi Anoda

Gambar 4.9 menunjukkan hubungan antara ukuran butir rata-rata dengan laju korosi menunjukkan bahwa ukuran butir yang lebih besar cenderung berasosiasi dengan peningkatan laju korosi. Sebagai contoh, pada sampel dengan kadar seng 5%, laju korosi meningkat dari 0,160 mm/tahun pada 650°C (dengan ukuran butir 72,319 μm) menjadi 0,250 mm/tahun pada 700°C (dengan ukuran butir 76,579 μm), yang bertentangan dengan teori yang menyatakan bahwa ukuran butir yang lebih besar harusnya mengurangi laju korosi [47]. Hal ini dapat dijelaskan dengan faktor homogenitas dalam distribusi mikrostruktur material.

Pada ukuran butir yang lebih besar, ketidakseragaman dalam struktur mikro dapat terjadi, baik dalam distribusi fasa maupun komposisi material. Ketidakseragaman ini menyebabkan peningkatan variasi dalam sifat elektrokimia antara berbagai area pada material. Sebagai contoh, pada ukuran butir besar, distribusi fasa yang tidak merata dapat menciptakan konsentrasi elemen tertentu, yang kemudian dapat membentuk sel mikrogalvanik antara batas butir dan interior butir. Ini mengarah pada peningkatan korosi lokal, yang tercermin dalam

peningkatan laju korosi yang tidak sesuai dengan teori yang menyarankan penurunan laju korosi dengan bertambahnya ukuran butir.

Selain itu, pada ukuran butir yang lebih besar, batas butir yang lebih sedikit berfungsi sebagai area yang lebih reaktif secara elektrokimia. Jika batas butir tidak cukup homogen dalam hal distribusi elemen paduan atau tegangan internal, maka area dengan tegangan lebih tinggi atau perbedaan komposisi bisa menjadi lebih rentan terhadap korosi, sehingga meningkatkan laju korosi.

Terlihat pada Gambar 4.10 analisis hubungan antara ukuran butir rata-rata dan nilai OCP pada sampel Al-Zn menunjukkan beberapa tren menarik. Pada sampel dengan kadar Zn 2,6%, peningkatan ukuran butir dari 62,424 μm pada 650°C ke 75,407 μm pada 750°C menghasilkan sedikit fluktuasi dalam nilai OCP, dengan perubahan dari -0,923 V menjadi -0,914 V. Ini menunjukkan bahwa pada kadar Zn ini, perubahan ukuran butir tidak terlalu signifikan memengaruhi OCP. Namun, pada sampel dengan kadar Zn 3,6%, peningkatan ukuran butir dari 66,039 μm pada 650°C ke 78,095 μm pada 750°C menunjukkan sedikit penurunan nilai OCP dari -0,892 V ke -0,880 V, yang mencerminkan kecenderungan material untuk sedikit lebih tahan terhadap korosi.

Sebaliknya, pada sampel dengan kadar Zn 5%, peningkatan ukuran butir dari 72,319 μm pada 650°C ke 78,045 μm pada 750°C disertai dengan penurunan yang lebih jelas pada nilai OCP dari -0,990 V ke -1,027 V. Ini menunjukkan bahwa ukuran butir yang lebih besar meningkatkan kecenderungan material untuk mengalami korosi. Tren ini konsisten dengan teori bahwa batas butir, yang berfungsi sebagai area anodik, berkurang pada ukuran butir yang lebih besar, meningkatkan aktivitas mikrogalvanik dan menurunkan nilai OCP [48]. Namun,

fluktuasi nilai OCP pada berbagai ukuran butir dan kadar Zn menunjukkan bahwa faktor lain, seperti homogenitas material dan distribusi elemen dalam butir, mungkin juga memainkan peran penting dalam menentukan sifat elektrokimia material.

Gambar 4.11 memperlihatkan efisiensi anoda juga dipengaruhi oleh homogenitas struktur material. Analisis hubungan antara ukuran butir rata-rata dan efisiensi anoda pada sampel Al-Zn menunjukkan beberapa hasil yang tidak sesuai dengan teori yang ada. Secara teori, penyempurnaan ukuran butir pada paduan Al-Zn diharapkan dapat meningkatkan sifat elektrokimia mereka. Butir-butir yang lebih kecil meningkatkan kepadatan batas butir, yang dapat mendorong nukleasi dan pertumbuhan deposit seng yang lebih seragam selama proses anodic. Hal ini seharusnya meningkatkan efisiensi anoda dengan distribusi arus yang lebih baik [49].

Namun, data yang diperoleh menunjukkan bahwa peningkatan ukuran butir justru disertai dengan peningkatan efisiensi anoda pada beberapa sampel. Misalnya, pada sampel dengan kadar Zn 5%, efisiensi anoda meningkat dari 74,62% pada ukuran butir 72,319 μm (650°C) menjadi 84,58% pada ukuran butir 76,579 μm (700°C), meskipun ukuran butir menjadi lebih besar.

Kesesuaian ini dapat dijelaskan dengan faktor homogenitas material. Ukuran butir yang lebih besar mungkin mengindikasikan homogenitas yang lebih baik dalam distribusi seng di dalam butir, yang dapat meningkatkan kinerja elektrokimia keseluruhan. Homogenitas yang lebih baik bisa mengurangi area dengan konsentrasi seng yang rendah atau tinggi, sehingga memungkinkan pelepasan ion logam yang lebih konsisten dan mengurangi fluktuasi arus lokal,

yang pada akhirnya meningkatkan efisiensi anoda meskipun ukuran butir lebih besar. Dengan demikian, meskipun teori menyatakan bahwa butir yang lebih kecil dapat meningkatkan efisiensi anoda, hasil yang tidak sesuai ini menunjukkan bahwa faktor lain, seperti homogenitas material, juga memainkan peran penting dalam menentukan efisiensi anoda dalam paduan Al-Zn.

Secara keseluruhan, meskipun ukuran butir yang lebih besar diharapkan dapat mengurangi laju korosi berdasarkan teori, faktor homogenitas dalam distribusi mikrostruktur material dapat mempengaruhi hasil ini. Ketidakteraturan dalam distribusi fasa dan batas butir yang lebih sedikit mungkin memperburuk potensi korosi, yang tercermin dalam laju korosi yang lebih tinggi pada ukuran butir yang lebih besar.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan pengujian, hasil dan analisa dari penelitian ini, dapat disimpulkan menjadi:

1. Efisiensi semua sampel anoda korban melebihi 68%, dengan anoda 5%Zn memiliki nilai OCP terendah yaitu -1,050 V vs SHE serta kapasitas arus mencapai 2374,05 Ah/kg.
2. Struktur mikro yang dihasilkan yaitu butir fasa α -Al dan fasa Zn yang berada di batas butir fasa α -Al.
3. Temperatur penuangan 700°C merupakan temperatur optimal untuk proses pengecoran anoda korban Al-Zn berbahan dasar *velg* aluminium karena temperatur ini menunjukkan efisiensi tertinggi 84,58% serta memiliki nilai OCP terendah 1,050 V serta laju korosi tertinggi 0,250 mmpy.
4. Semakin besar ukuran butir pada struktur mikro anoda semakin tinggi Laju korosi dan nilai efisiensinya serta semakin rendah nilai OCP.

5.2. Saran

Saran yang bisa diberikan untuk penelitian selanjutnya antara lain:

1. Melakukan upaya mengurangi unsur-unsur pengotor yang berada dalam *velg* aluminium seperti Si, Fe, dan Cu yang dalam penelitian ini komposisinya melebihi standar DNV-RP-B401.
2. Melakukan peningkatan upaya untuk mencapai *mass balance* pada proses pengecoran supaya tidak terjadi perbedaan komposisi rencana dan aktual.

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. Mancia, 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
- [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.

LAMPIRAN A
PERHITUNGAN

1. Perhitungan komposisi % wt Zn

$$\% \text{ wt Zn} = \frac{\text{massa Zn}}{\sum \text{massa Velg Al} + \text{massa Al} + \text{massa Zn} + \text{massa In}} \times 100\%$$

A. Sampel IA, IB dan IC 2,6 % wt Zn

$$\% \text{ wt Zn} = \frac{13\text{g}}{\sum (100\text{g} + 382\text{g} + 13\text{g} + 0,19\text{g})} \times 100\% = 2,625\%$$

B. Sampel IIA, IIB dan IIC 3,6 % wt Zn

$$\% \text{ wt Zn} = \frac{18\text{g}}{\sum (100\text{g} + 377\text{g} + 18\text{g} + 0,19\text{g})} \times 100\% = 3,635\%$$

C. Sampel IIIA, IIIB dan IIIC 5 % wt Zn

$$\% \text{ wt Zn} = \frac{25\text{g}}{\sum (100\text{g} + 370\text{g} + 25\text{g} + 0,19\text{g})} \times 100\% = 5,049\%$$

2. Perhitungan komposisi % wt In

$$\% \text{ wt In} = \frac{\text{massa In}}{\sum \text{massa Velg Al} + \text{massa Al} + \text{massa Zn} + \text{massa In}} \times 100\%$$

A. Sampel IA, IB dan IC 2,6 % wt Zn

$$\% \text{ wt In} = \frac{0,19\text{g}}{\sum (100\text{g} + 382\text{g} + 13\text{g} + 0,19\text{g})} \times 100\% = 0,04\%$$

B. Sampel IIA, IIB dan IIC 3,6 % wt Zn

$$\% \text{ wt In} = \frac{0,19\text{g}}{\sum (100\text{g} + 377\text{g} + 18\text{g} + 0,19\text{g})} \times 100\% = 0,04\%$$

C. Sampel IIIA, IIIB dan IIIC 5 % wt Zn

$$\% \text{ wt In} = \frac{0,19\text{g}}{\sum (100\text{g} + 370\text{g} + 25\text{g} + 0,19\text{g})} \times 100\% = 0,04\%$$

3. Perhitungan *Current Capacity* Aktual (Ah/kg)

$$\text{Current Capacity (CC)} = \frac{\text{Current (A)} \times \text{time (h)}}{\text{Weight loss (kg)}}$$

A. Sampel IA 2,6%Zn 650°C

$$\text{CC} = \frac{0,00073 \text{ A} \times 240 \text{ h}}{0,000833 \text{ kg}} = 2102,40 \text{ Ah/kg}$$

B. Sampel IB 2,6%Zn 700°C

$$\text{CC} = \frac{0,00078 \text{ A} \times 240 \text{ h}}{0,000833 \text{ kg}} = 2246,40 \text{ Ah/kg}$$

C. Sampel IC 2,6%Zn 750°C

$$\text{CC} = \frac{0,00113 \text{ A} \times 240 \text{ h}}{0,001233 \text{ kg}} = 2198,92 \text{ Ah/kg}$$

D. Sampel IIA 3,6%Zn 650°C

$$\text{CC} = \frac{0,00143 \text{ A} \times 240 \text{ h}}{0,001733 \text{ kg}} = 1980,00 \text{ Ah/kg}$$

E. Sampel IIB 3,6%Zn 700°C

$$\text{CC} = \frac{0,00091 \text{ A} \times 240 \text{ h}}{0,0001 \text{ kg}} = 2184,00 \text{ Ah/kg}$$

F. Sampel IIC 3,6%Zn 750°C

$$\text{CC} = \frac{0,00085 \text{ A} \times 240 \text{ h}}{0,000967 \text{ kg}} = 2110,34 \text{ Ah/kg}$$

G. Sampel IIIA 5%Zn 650°C

$$\text{CC} = \frac{0,00160 \text{ A} \times 240 \text{ h}}{0,001833 \text{ kg}} = 2394,55 \text{ Ah/kg}$$

H. Sampel IIIB 5% Zn 700°C

$$\text{CC} = \frac{0,00122 \text{ A} \times 240 \text{ h}}{0,001233 \text{ kg}} = 2374,05 \text{ Ah/kg}$$

I. Sampel IIIC 5% Zn 750°C

$$\text{CC} = \frac{0,00130 \text{ A} \times 240 \text{ h}}{0,001333 \text{ kg}} = 2340,00 \text{ Ah/kg}$$

4. Perhitungan *Current Capacity* Teoritis (Ah/kg)

$$CC_{T\text{Paduan}} = \sum (\% \text{ wt}_{\text{Unsur}} \cdot CC_{T\text{Unsur}})$$

A. Paduan I 2,6% Zn

$$\begin{aligned} CC_T &= (94,97\% \text{ Al} \cdot 2979,99 \text{ Ah/kg}) + (2,696\% \text{ Zn} \cdot 819,82 \text{ Ah/kg}) \\ &= 2852,25 \text{ Ah/kg} \end{aligned}$$

B. Paduan II 3,6% Zn

$$\begin{aligned} CC_T &= (94,40\% \text{ Al} \cdot 2979,99 \text{ Ah/kg}) + (3,692\% \text{ Zn} \cdot 819,82 \text{ Ah/kg}) \\ &= 2843,49 \text{ Ah/kg} \end{aligned}$$

C. Paduan III 5% Zn

$$\begin{aligned} CC_T &= (92,79\% \text{ Al} \cdot 2979,99 \text{ Ah/kg}) + (5,099\% \text{ Zn} \cdot 819,82 \text{ Ah/kg}) \\ &= 2806,78 \text{ Ah/kg} \end{aligned}$$

5. Perhitungan Nilai Efisiensi (%)

$$\text{Efisiensi} = \frac{\text{Kapasitas Aktual}}{\text{Kapasitas Teoritis}} \times 100\%$$

A. Sampel IA 2,6%Zn 650°C

$$\text{Efisiensi} = \frac{2102,40 \text{ Ah/kg}}{2852,25 \text{ Ah/kg}} \times 100\% = 73,71\%$$

B. Sampel IB 2,6%Zn 700°C

$$\text{Efisiensi} = \frac{2246,40 \text{ Ah/kg}}{2852,25 \text{ Ah/kg}} \times 100\% = 78,76\%$$

C. Sampel IC 2,6%Zn 750°C

$$\text{Efisiensi} = \frac{2198,92 \text{ Ah/kg}}{2852,25 \text{ Ah/kg}} \times 100\% = 77,09\%$$

D. Sampel IIA 3,6%Zn 650°C

$$\text{Efisiensi} = \frac{1980,00 \text{ Ah/kg}}{2843,49 \text{ Ah/kg}} \times 100\% = 69,63\%$$

E. Sampel IIB 3,6%Zn 700°C

$$\text{Efisiensi} = \frac{2184,00 \text{ Ah/kg}}{2843,49 \text{ Ah/kg}} \times 100\% = 76,81\%$$

F. Sampel IIC 3,6%Zn 750°C

$$\text{Efisiensi} = \frac{2110,34 \text{ Ah/kg}}{2843,49 \text{ Ah/kg}} \times 100\% = 74,22\%$$

G. Sampel IIIA 5%Zn 650°C

$$\text{Efisiensi} = \frac{2094,55 \text{ Ah/kg}}{2806,78 \text{ Ah/kg}} \times 100\% = 74,62\%$$

H. Sampel IIIB 5% Zn 700°C

$$\text{Efisiensi} = \frac{2374,05 \text{ Ah/kg}}{2806,78 \text{ Ah/kg}} \times 100\% = 84,58\%$$

I. Sampel IIIC 5% Zn 750°C

$$\text{Efisiensi} = \frac{2340,00 \text{ Ah/kg}}{2806,78 \text{ Ah/kg}} \times 100\% = 83,37\%$$

88
LAMPIRAN B
DATA PENELITIAN

Lampiran B.1 Data Komposisi Inalum *Primary Aluminium Ingot*

QA-FR27-044



PT. INDONESIA ASAHAN ALUMINIUM

Strelling Road
Po Box 1 Kuala Tanjung 21657, Kab. Batu Bara, Sumatera Utara - Indonesia. Phone (0627) 31311, Fax (0627) 31001

Id :CoA/0715/2023

CERTIFICATE OF ANALYSIS

Page : 1/1

CUSTOMER : PT. PERINTIS PROTEKSI SI JAHFERA			
COMMODITY : PRIMARY ALUMINIUM INGOT	BRAND : INAL (LME REG. 1907)	DATE OF ISSUANCE : 31.08.2023	
GRADE : ALUMINIUM INGOT 99.70% (G1)	NAME OF VESSEL : Trailer	ORDER NO : 6011777	

LOT NO	Date of Analysis	CHEMICAL COMPOSITION (%)											
		Al*	Si	Fe	Cu	Ti	Mn	V	Ga	Mg	Zn	Na	Pb
0000276028	18/08/2023	99.78	0.05	0.17	0.00	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.00	0.00	0.00
0000276029	18/08/2023	99.84	0.03	0.13	0.00	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.00	0.00	0.00

1% Al is calculated in accordance with JIS H2192
THE ANALYSIS GRADE WERE PERFORMED IN ACCORDANCE WITH JIS H1305
THE VALUE IN THE CERTIFICATE IS RELATED ONLY TO THE SPECIMENTS TESTED
THE VALUE DESCRIPTION IS ACCORDING TO QA DESCRIPTION OF LME EXPORT
REQUIREMENT

PT INDONESIA ASAHAN ALUMINIUM (Persero)


Manager Quality Assurance Section

Gambar B.1 Data Komposisi Inalum *Primary Aluminium Ingot Grade G1*

Certificate of Analysis "3.1" conform EN 10204			Page no. 14 of 16		
Date : 21.07.2021					
Delivery note number : 921312230952389					
Order number : UNKNOWN AUSTRALIA					
Customer : VENETIA /V2025N					
Vessel/Voyage : 199.446 TO					
Net weight : 4					
Product Code : Nyrstar A-Z Z1					
Product Description : Produced under ISO 9001 according to ISO752 ZN1 and EN 1179 Z1					
G.I. Date : 26 kg slabs strapped in bundles of 1040 kgs					
Seal number : ;					
Container number : ;					
Zinc by difference using named impurities.					
99.995% ZINC MINIMUM					
100% DELIVERABLE QUALITY					
Assay No.			000421031416/Lot no : SHZE		
Bundle from			2360242		
Bundle to			2360247		
Total weight			5.329		
Prod. release date			11.07.2021		
Zinc			99.99%		
Aluminium % (4d)			0.0002		
Tin % (4d)			0.0004		
Lead % (4d)			0.0021		
Iron % (4d)			0.0003		
Copper % (4d)			0.0001		
Cadmium % (4d)			0.0004		
Total Impurities (4d)			0.004		

Lampiran B. 3 Data Hasil Uji OES Velg Aluminium dan *Primary Aluminium Ingot*

HITACHI PMI-MASTER OPTICAL EMISSION SPECTROSCOPY							
FMS	SNr.	71X0292	Optik Nr.	71X0365			
Sample	:AL Alloy						
Alloy	: Al_400	Mode	: PA 8/9/2024 5:38:20 PM				
	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn
1	92.29	7.23	0.116	< 0.0030	0.0019	0.279	0.0124
2	92.31	7.21	0.129	< 0.0030	0.0020	0.274	0.0116
3	92.38	7.15	0.121	< 0.0030	0.0020	0.272	0.0129
Average	92.33	7.20	0.122	< 0.0030	0.0019	0.275	0.0123
	Cr	Ni	Ti	Be	Ca	Li	Pb
1	< 0.0010	< 0.0020	< 0.0010	< 0.0001	0.0004	< 0.0002	0.0010
2	< 0.0010	< 0.0020	< 0.0010	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0002	< 0.0010
3	< 0.0010	< 0.0020	< 0.0010	< 0.0001	0.0003	< 0.0002	< 0.0010
Average	< 0.0010	< 0.0020	< 0.0010	< 0.0001	0.0002	< 0.0002	< 0.0010
	Sn	Sr	V	Na	Bi	Zr	B
1	< 0.0050	0.0007	0.0256	0.0006	< 0.0050	< 0.0010	< 0.0005
2	< 0.0050	0.0006	0.0250	< 0.0002	< 0.0050	< 0.0010	< 0.0005
3	< 0.0050	0.0007	0.0249	< 0.0002	< 0.0050	< 0.0010	< 0.0005
Average	< 0.0050	0.0007	0.0252	0.0002	< 0.0050	< 0.0010	< 0.0005
	Ga	Cd	Co	Ag	Hg	In	Sb
1	0.0165	< 0.0010	< 0.0020	< 0.0010	< 0.0050	< 0.0020	0.0180
2	0.0166	< 0.0010	< 0.0020	< 0.0010	< 0.0050	< 0.0020	0.0143
3	0.0162	< 0.0010	< 0.0020	< 0.0010	< 0.0050	< 0.0020	0.0159
Average	0.0164	< 0.0010	< 0.0020	< 0.0010	< 0.0050	< 0.0020	0.0161
	Ce	La	Mo	Sc			
1	< 0.0010	< 0.0005	< 0.0010	0.0015			
2	< 0.0010	< 0.0005	< 0.0010	0.0016			
3	< 0.0010	< 0.0005	< 0.0010	0.0016			
Average	< 0.0010	< 0.0005	< 0.0010	0.0015			



Gambar B.3 Data Hasil Uji OES Velg Aluminium

HITACHI PMI-MASTER OPTICAL EMISSION SPECTROSCOPY							
FMS	SNr. 71X0292		Optik Nr. 71X0365				
Sample	:AL Ingot						
Alloy	: Al_100	Mode	: PA 8/9/2024 5:32:52 PM				
	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn
1	99.70	0.0568	0.182	< 0.0030	0.0021	0.0020	< 0.0010
2	99.70	0.0529	0.177	< 0.0030	0.0017	0.0010	< 0.0010
3	99.71	0.0526	0.173	< 0.0030	0.0016	< 0.0010	< 0.0010
Average	99.71	0.0541	0.177	< 0.0030	0.0018	0.0013	< 0.0010
	Cr	Ni	Ti	Be	Ca	Li	Pb
1	< 0.0010	< 0.0020	< 0.0010	< 0.0001	0.0020	< 0.0002	< 0.0010
2	< 0.0010	0.0021	< 0.0010	< 0.0001	0.0010	< 0.0002	< 0.0010
3	< 0.0010	< 0.0020	< 0.0010	< 0.0001	0.0008	< 0.0002	< 0.0010
Average	< 0.0010	< 0.0020	< 0.0010	< 0.0001	0.0013	< 0.0002	< 0.0010
	Sn	Sr	V	Na	Bi	Zr	B
1	< 0.0050	< 0.0001	0.0052	0.0004	< 0.0050	< 0.0010	< 0.0005
2	< 0.0050	0.0001	0.0056	0.0003	< 0.0050	< 0.0010	< 0.0005
3	< 0.0050	< 0.0001	0.0056	0.0002	< 0.0050	< 0.0010	< 0.0005
Average	< 0.0050	< 0.0001	0.0055	0.0003	< 0.0050	< 0.0010	< 0.0005
	Ga	Cd	Co	Ag	Hg	In	Sb
1	0.0086	< 0.0010	< 0.0020	< 0.0010	< 0.0050	< 0.0020	0.0270
2	0.0086	< 0.0010	< 0.0020	< 0.0010	< 0.0050	< 0.0020	0.0344
3	0.0084	< 0.0010	< 0.0020	< 0.0010	< 0.0050	< 0.0020	0.0294
Average	0.0085	< 0.0010	< 0.0020	< 0.0010	< 0.0050	< 0.0020	0.0303
	Ce	La	Mo	Sc			
1	< 0.0010	0.0005	< 0.0010	0.0005			
2	< 0.0010	0.0005	< 0.0010	0.0007			
3	< 0.0010	< 0.0005	< 0.0010	0.0007			
Average	< 0.0010	0.0005	< 0.0010	0.0006			



Gambar B.4 Data Hasil Uji OES Aluminium Ingot

Lampiran B. 4 Data Hasil Uji XRF Sampel Anoda

Tabel B.1 Hasil Perhitungan Rata-rata Komposisi Uji XRF IA

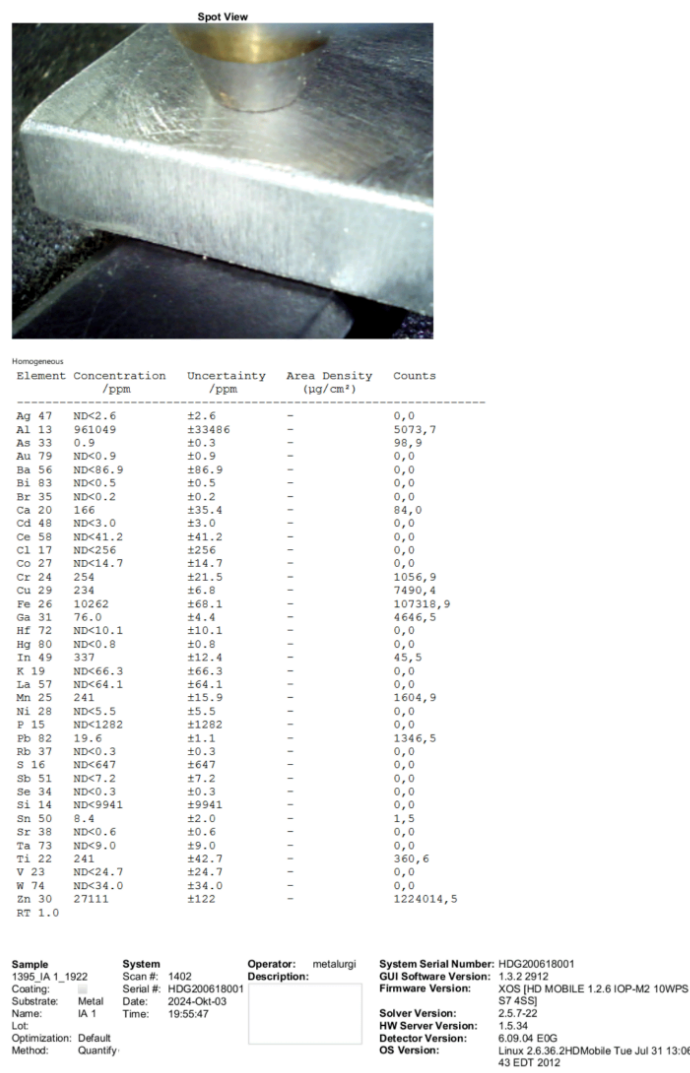
Element	Concentration /ppm			Average Concentration / ppm	Average Concentration (%)
	Test No. 1	Test No. 2	Test No. 3		
Ag 47	ND <2.6	ND <2.5	ND <2.6		
Al 13	961049	960329	957860	959746,0	94,972%
As 33	0,9	1,2	1,4	1,2	0,000%
Au 79	ND <0.9	ND <0.9	ND <0.9		
Ba 56	ND <86.9	ND <87.1	ND <85.4		
Bi 83	ND <0.5	ND <0.5	ND <0.5		
Br 35	ND <0.2	ND <0.2	ND <0.2		
Ca 20	166	191	ND <67.8	178,5	0,018%
Cd 48	ND <3.0	ND <1.6	ND <2.7		
Ce 58	ND <41.2	ND <41.3	ND <40.5		
Cl 17	ND <256	ND <268	ND <190		
Co 27	ND <14.7	ND <15.2	ND <15.7		
Cr 24	254	268	280	267,3	0,026%
Cu 29	234	256	232	240,7	0,024%
Fe 26	10262	11191	12698	11383,7	1,126%
Ga 31	76	92,5	75,7	81,4	0,008%
Hf 72	ND <10.1	ND <9.8	ND <9.8		
Hg 80	ND <0.8	ND <0.8	ND <0.8		
In 49	337	352	314	334,3	0,033%
K 19	ND <66.3	ND <108	ND <82.9		
La 57	ND <64.1	ND <66.9	ND <62.5		
Mn 25	241	254	278	257,7	0,025%
Ni 28	ND <5.5	ND <5.5	ND <5.3		
P 15	ND <1282	ND <1471	ND <1187		
Pb 82	19,6	20,1	18,6	19,4	0,002%
Rb 37	ND <0.3	ND <0.3	ND <0.3		
S 16	ND <647	ND <586	ND <539		
Sb 51	ND <7.2	17,6	13,8	15,7	0,002%
Se 34	ND <0.3	ND <0.3	ND <0.3		
Si 14	ND <9941	ND <10809	ND <10492	10414,0	1,031%
Sn 50	8,4	ND <7.0	9,5		0,001%
Sr 38	ND <0.6	ND <0.6	ND <0.6		
Ta 73	ND <9.0	ND <8.4	ND <9.1		
Ti 22	241	283	216	246,7	0,024%
V 23	ND <24.7	ND <25.3	ND <21.3		
W 74	ND <34.0	ND <33.1	108	108,0	0,011%
Zn 30	27111	26734	27895	27246,7	2,696%
	1000000	999989	1000000	1010541	100,000%

Tabel B.2 Hasil Perhitungan Rata-rata Komposisi Uji XRF IIA

Element	Concentration /ppm			Average Concentration / ppm	Average Concentration (%)
	Test No. 1	Test No. 2	Test No. 3		
Ag 47	ND <2.3	ND <2.3	ND <1.3		
Al 13	953837	953053	954532	953807,3	94,404%
As 33	ND <0.2	1,4	ND <0.2		0,000%
Au 79	ND <0.9	ND <0.9	ND <1.0		
Ba 56	ND <86.0	ND <83.8	ND <86.3		
Bi 83	ND <0.5	ND <0.5	ND <0.5		
Br 35	ND <0.2	ND <0.3	ND <0.3		
Ca 20	ND <68.6	ND <48.8	ND <51.6		
Cd 48	ND <2.8	ND <2.6	ND <2.7		
Ce 58	ND <40.8	ND <39.7	ND <40.9		
Cl 17	ND <222	ND <260	ND <294		
Co 27	ND <14.0	ND <14.2	ND <14.0		
Cr 24	85	99,6	89,7	91,4	0,009%
Cu 29	39,7	41,3	50,7	43,9	0,004%
Fe 26	7997	8408	7986	8130,3	0,805%
Ga 31	70,1	72,5	76	72,9	0,007%
Hf 72	ND <7.5	ND <7.4	ND <7.6		
Hg 80	ND <0.9	ND <0.9	ND <0.9		
In 49	72	74,1	83,4	76,5	0,008%
K 19	ND <83.9	ND <78.8	ND <61.8		
La 57	ND <64.0	ND <63.9	ND <64.3		
Mn 25	98,4	107	87,8	97,7	0,010%
Ni 28	ND <5.4	ND <5.4	ND <5.5		
P 15	ND <1752	ND <1319	ND <1379		
Pb 82	11,7	9,1	12,2	11,0	0,001%
Rb 37	ND <0.3	ND <0.3	ND <0.3		
S 16	ND <592	ND <503	ND <608		
Sb 51	17,7	17,4	16,2	17,1	0,002%
Se 34	ND <0.3	ND <0.3	ND <0.3		
Si 14	ND <10703	ND <9895	ND <10439	10345,7	1,024%
Sn 50	ND <6.8	10,2	ND <6.8	10,2	0,001%
Sr 38	ND <0.6	ND <0.6	ND <0.6		
Ta 73	ND <8.6	ND <8.6	ND <8.7		
Ti 22	239	195	248	227,3	0,023%
V 23	ND <22.7	ND <23.2	ND <23.6		
W 74	106	113	114	111,0	0,011%
Zn 30	37419	37799	36702	37306,7	3,692%
	999993	1000001	999998	1010349	100,000%

Tabel B.3 Hasil Perhitungan Rata-rata Komposisi Uji XRF IIIA

Element	Concentration /ppm			Average Concentration / ppm	Average Concentration (%)
	Test No. 1	Test No. 2	Test No. 3		
Ag 47	ND <3.0	ND <2.5	ND <2.9		
Al 13	939722,0	935232,0	939486,0	938146,7	92,785%
As 33	ND <0.1	2,5	1,7	2,1	0,000%
Au 79	ND <1.0	ND <1.0	ND <1.0		
Ba 56	ND <96.1	ND <93.3	ND <94.7		
Bi 83	ND <0.6	ND <0.6	ND <0.6		
Br 35	ND <0.3	ND <0.3	ND <0.3		
Ca 20	502,0	199,0	ND <83.5	350,5	0,035%
Cd 48	ND <3.2	ND <3.1	ND <3.3		
Ce 58	ND <45.5	ND <44.2	ND <44.8		
Cl 17	ND <433	ND <288	ND <404		
Co 27	ND <10.5	ND <16.1	ND <15.6		
Cr 24	46,1	42,0	37,1	41,7	0,004%
Cu 29	ND <3.3	ND <3.2	ND <4.3		
Fe 26	8386,0	10406,0	8555,0	9115,7	0,902%
Ga 31	96,3	106,0	98,0	100,1	0,010%
Hf 72	ND <7.3	ND <7.3	ND <7.1		
Hg 80	ND <1.1	ND <1.1	ND <1.0		
In 49	405,0	408,0	409,0	407,3	0,040%
K 19	ND <143	ND <114	ND <121		
La 57	ND <69.2	ND <66.8	ND <68.6		
Mn 25	35,9	36,9	36,9	36,6	0,004%
Ni 28	ND <6.1	ND <6.0	ND <6.1		
P 15	ND <1634	ND <1444	ND <1670		
Pb 82	11,4	7,4	5,0	7,9	0,001%
Rb 37	ND <0.3	ND <0.3	ND <0.3		
S 16	ND <799	ND <723	ND <637		
Sb 51	16,7	24,0	17,2	19,3	0,002%
Se 34	ND <0.3	ND <0.3	ND <0.3		
Si 14	ND <10456	ND <11701	ND <10782	10979,7	1,086%
Sn 50	ND <7.6	ND <7.1	ND <7.5		
Sr 38	ND <0.6	ND <0.6	ND <0.6		
Ta 73	ND <6.2	ND <6.1	ND <6.0		
Ti 22	214,0	198,0	244,0	218,7	0,022%
V 23	ND <22.4	ND <20.6	ND <22.7		
W 74	119,0	120,0	105,0	114,7	0,011%
Zn 30	50446,0	53218,0	51005,0	51556,3	5,099%
	1000000	1000000	1000000	1011097	100,000%



Gambar B.5 Data Hasil Uji XRF Anoda IA 1

Spot View



Homogeneous

Element	Concentration /ppm	Uncertainty /ppm	Area Density (µg/cm²)	Counts
Ag 47	ND<2.5	±2.5	-	0,0
Al 13	960329	±33391	-	5105,6
As 33	1.2	±0.5	-	135,4
Au 79	ND<0.9	±0.9	-	0,0
Ba 56	ND<87.1	±87.1	-	0,0
Bi 83	ND<0.5	±0.5	-	0,0
Br 35	ND<0.2	±0.2	-	0,0
Ca 20	191	±39.6	-	98,4
Cd 48	ND<1.6	±1.6	-	0,0
Ce 58	ND<41.3	±41.3	-	0,0
Cl 17	ND<268	±268	-	0,0
Co 27	ND<15.2	±15.2	-	0,0
Cr 24	268	±21.9	-	1138,4
Cu 29	256	±6.7	-	8312,5
Fe 26	11191	±70.4	-	119345,6
Ga 31	92.5	±4.3	-	5739,1
Hf 72	ND<9.8	±9.8	-	0,0
Hg 80	ND<0.8	±0.8	-	0,0
In 49	352	±12.6	-	48,4
K 19	ND<108	±108	-	0,0
La 57	ND<66.9	±66.9	-	0,0
Mn 25	254	±16.1	-	1726,1
Ni 28	ND<5.5	±5.5	-	0,0
P 15	ND<1471	±1471	-	0,0
Pb 82	20.1	±1.3	-	1402,8
Rb 37	ND<0.3	±0.3	-	0,0
S 16	ND<586	±586	-	0,0
Sb 51	17.6	±6.0	-	4,7
Se 34	ND<0.3	±0.3	-	0,0
Si 14	ND<10809	±10809	-	0,0
Sn 50	ND<7.0	±7.0	-	1,2
Str 38	ND<0.6	±0.6	-	0,0
Ta 73	ND<8.4	±8.4	-	0,0
Ti 22	283	±45.6	-	432,3
Tl 81	4.5	±1.7	-	222,8
V 23	ND<25.3	±25.3	-	0,0
W 74	ND<33.1	±33.1	-	0,0
Zn 30	26734	±120	-	1225281,9
RT 1.0				

Sample

1397_IA 2_1928

Coating:

Metal

Name:

IA 2

Lot:

Optimization: Default

Method: Quantify

System

Scan #: 1403

Serial #: HDG200618001

Date: 2024-04-03

Time: 20:00:40

Operator: metalurgi

Description:



System Serial Number: HDG200618001

GUI Software Version: 1.3.2.2912

Firmware Version: XOS [HD MOBILE 1.2.6 IOP-M2 10WPS

S7 4SS]

Solver Version: 2.5.7-22

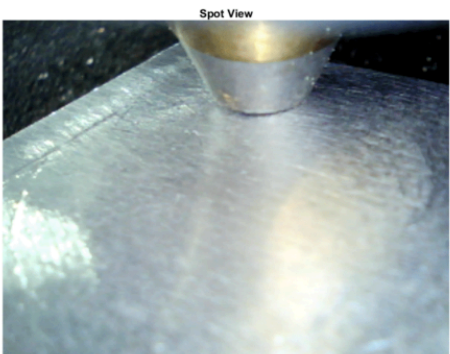
HW Server Version: 1.5.34

Detector Version: 6.09.04 E0G

OS Version: Linux 2.6.36.2HDMobile Tue Jul 31 13:06:

43 EDT 2012

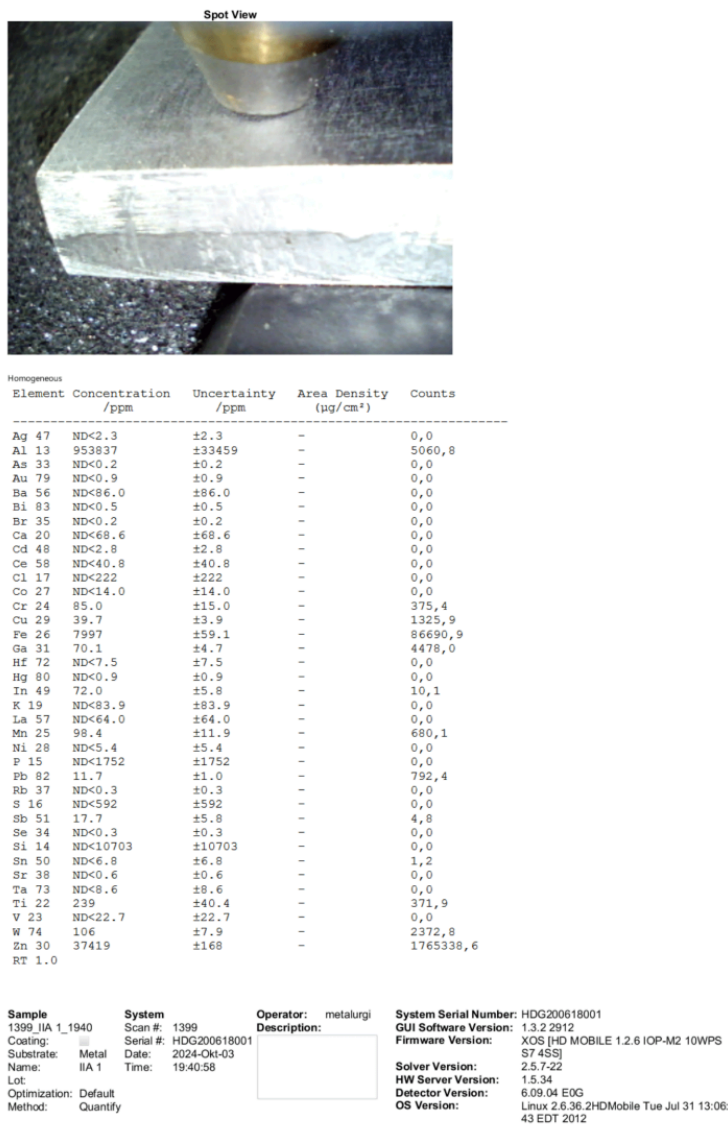
Gambar B.6 Data Hasil Uji XRF Anoda IA 2



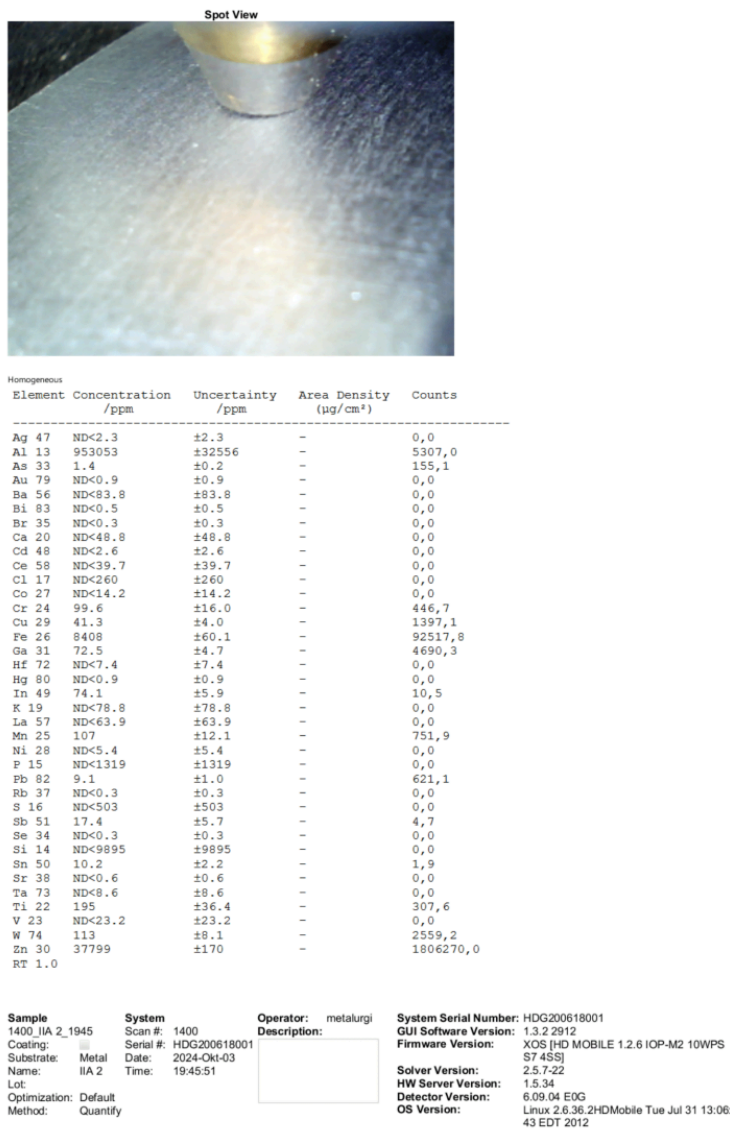
Homogeneous				
Element	Concentration	Uncertainty	Area Density	Counts
	/ppm	/ppm	(µg/cm²)	
Ag 47	ND<2.6	±2.6	-	0,0
Al 13	957860	±1367	-	5692,7
As 33	1.4	±0.3	-	169,7
Au 79	ND<0.9	±0.9	-	0,0
Ba 56	ND<85.4	±85.4	-	0,0
Bi 83	ND<0.5	±0.5	-	0,0
Br 35	ND<0.2	±0.2	-	0,0
Ca 20	ND<67.8	±67.8	-	0,0
Cd 48	ND<2.7	±2.7	-	0,0
Ce 58	ND<40.5	±40.5	-	0,0
Cl 17	ND<190	±190	-	0,0
Co 27	ND<15.7	±15.7	-	0,0
Cr 24	280	±21.8	-	1248,2
Cu 29	232	±6.6	-	7824,1
Fe 26	12698	±73.2	-	141866,1
Ga 31	75.7	±4.3	-	4879,7
Hf 72	ND<9.8	±9.8	-	0,0
Hg 80	ND<0.8	±0.8	-	0,0
In 49	314	±11.7	-	45,3
K 19	ND<82.9	±82.9	-	0,0
La 57	ND<62.5	±62.5	-	0,0
Mn 25	278	±16.3	-	1982,0
Ni 28	ND<5.3	±5.3	-	0,0
P 15	ND<1187	±1187	-	0,0
Pb 82	19.6	±1.1	-	1342,6
Rb 37	ND<0.3	±0.3	-	0,0
S 16	ND<539	±539	-	0,0
Sb 51	13.8	±5.6	-	3,8
Se 34	ND<0.3	±0.3	-	0,0
Si 14	ND<10492	±10492	-	0,0
Sn 50	9.5	±2.1	-	1,8
Str 38	ND<0.6	±0.6	-	0,0
Ta 73	ND<9.1	±9.1	-	0,0
Ti 22	216	±38.6	-	346,0
V 23	ND<21.3	±21.3	-	0,0
W 74	108	±7.7	-	2429,3
Zn 30	27895	±125	-	1328735,8
RT 1.0				

Sample 1398_IA 3_1935 Coating: Substrate: Metal Name: IA 3 Lot: Optimization: Default Method: Quantify	System Scan #: 1404 Serial #: HDG200618001 Date: 2024-01-03 Time: 20:05:26	Operator: metalurgi Description:	System Serial Number: HDG200618001 GUI Software Version: 1.3.2.2912 Firmware Version: XOS [HD MOBILE 1.2.6 IOP-M2 10WPS S7 4SS] Solver Version: 2.5.7-22 HW Server Version: 1.5.34 Detector Version: 6.09.04 EOG OS Version: Linux 2.6.36.2HDMobile Tue Jul 31 13:06:43 EDT 2012
--	---	---	---

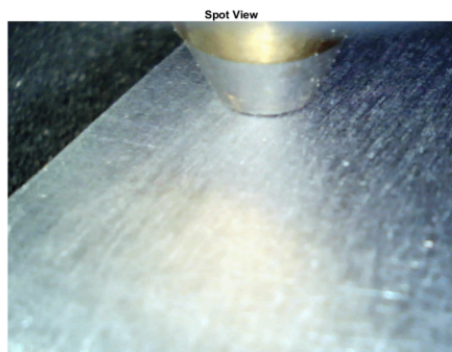
Gambar B.7 Data Hasil Uji XRF Anoda IA 3



Gambar B.8 Data Hasil Uji XRF Anoda IIA 1



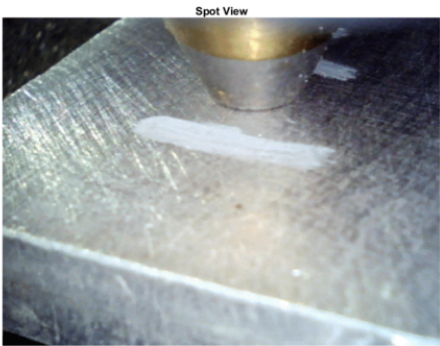
Gambar B.9 Data Hasil Uji XRF Anoda IIA 2



Homogeneous				
Element	Concentration /ppm	Uncertainty /ppm	Area Density (µg/cm²)	Counts
Ag 47	ND<1.3	±1.3	-	0,0
Al 13	954532	±32966	-	5181,4
As 33	ND<0.2	±0.2	-	0,0
Au 79	ND<1.0	±1.0	-	0,0
Ba 56	ND<86.3	±86.3	-	0,0
Bi 83	ND<0.5	±0.5	-	0,0
Br 35	ND<0.3	±0.3	-	0,0
Ca 20	ND<51.6	±51.6	-	0,0
Cd 48	ND<2.7	±2.7	-	0,0
Ce 58	ND<40.9	±40.9	-	0,0
Cl 17	ND<294	±294	-	0,0
Co 27	ND<14.0	±14.0	-	0,0
Cs 24	89.7	±15.6	-	388,0
Cu 29	50.7	±4.2	-	1660,0
Fe 26	7986	±59.7	-	84729,0
Ga 31	76.0	±4.7	-	4752,7
Hf 72	ND<7.6	±7.6	-	0,0
Hg 80	ND<0.9	±0.9	-	0,0
In 49	83.4	±6.3	-	11,4
K 19	ND<61.8	±61.8	-	0,0
La 57	ND<64.3	±64.3	-	0,0
Mn 25	87.8	±11.7	-	593,9
Ni 28	ND<5.5	±5.5	-	0,0
P 15	ND<1379	±1379	-	0,0
Pb 82	12.2	±1.0	-	812,1
Rb 37	ND<0.3	±0.3	-	0,0
S 16	ND<608	±608	-	0,0
Sb 51	16.2	±6.0	-	4,3
Se 34	ND<0.3	±0.3	-	0,0
Si 14	ND<10439	±10439	-	0,0
Sn 50	ND<6.8	±6.8	-	0,3
Sr 38	ND<0.6	±0.6	-	0,0
Ta 73	ND<8.7	±8.7	-	0,0
Ti 22	248	±41.9	-	376,9
V 23	ND<23.6	±23.6	-	0,0
W 74	114	±8.3	-	2492,2
Zn 30	36702	±165	-	1695289,8
RT 1.0				

Sample 1401_IIA_3_1950 Coating: ☐ Substrate: Metal Name: IIA 3 Lot: Optimization: Default Method: Quantify	System Scan #: 1401 Serial #: HDG200618001 Date: 2024-Okt-03 Time: 19:50:47	Operator: metalurgi Description:	System Serial Number: HDG200618001 GUI Software Version: 1.3.2.2912 Firmware Version: XOS [HD MOBILE 1.2.6 IOP-M2 10WPS 57 455] Solver Version: 2.5.7-22 HW Server Version: 1.5.34 Detector Version: 6.09.04 EOG OS Version: Linux 2.6.36.2HDMobile Tue Jul 31 13:06:43 EDT 2012
---	--	---	---

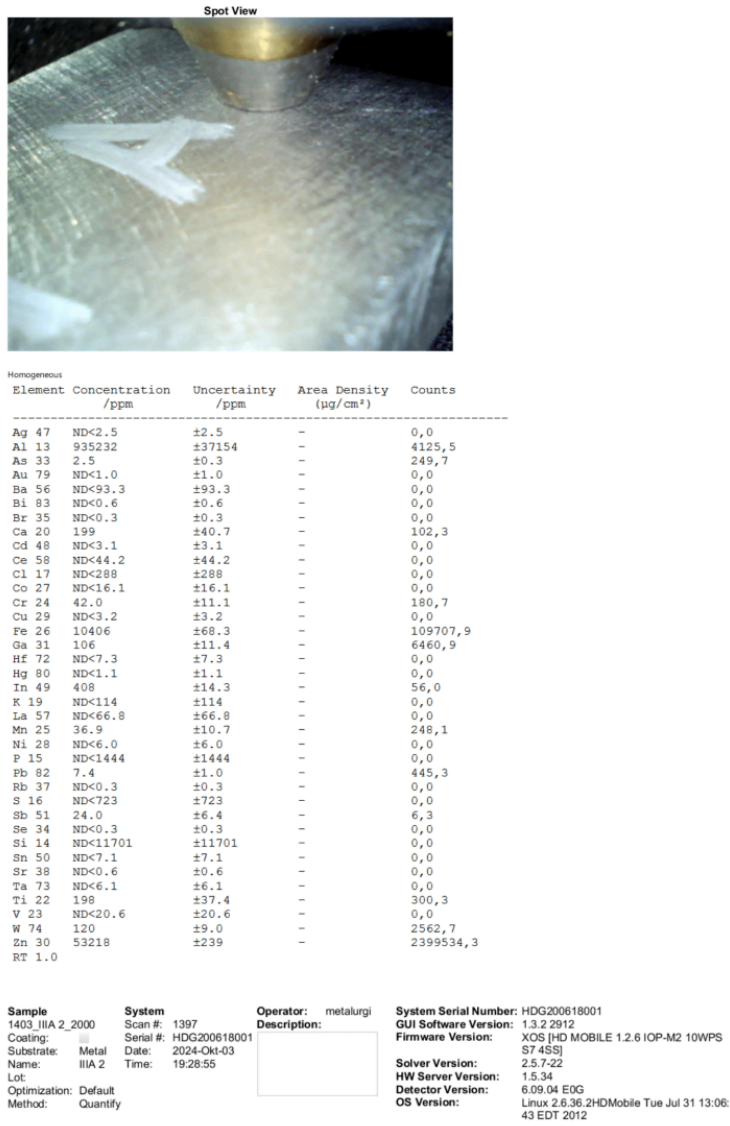
Gambar B.10 Data Hasil Uji XRF Anoda IIA 3



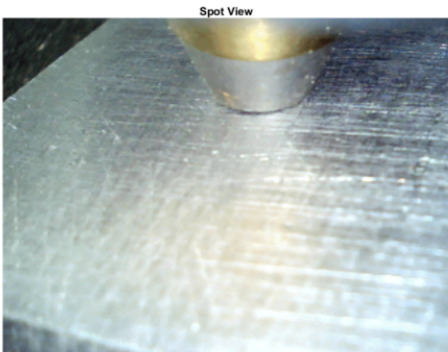
Homogeneous				
Element	Concentration /ppm	Uncertainty /ppm	Area Density (µg/cm²)	Counts
Ag 47	ND<3.0	±3.0	-	0,0
Al 13	939722	±39023	-	3786,2
As 33	ND<0.0	±0.0	-	0,0
Au 79	ND<1.0	±1.0	-	0,0
Ba 56	ND<96.1	±96.1	-	0,0
Bi 83	ND<0.6	±0.6	-	0,0
Br 35	ND<0.3	±0.3	-	0,0
Cs 20	502	±81.0	-	240,8
Cd 48	ND<3.2	±3.2	-	0,0
Ce 58	ND<45.5	±45.5	-	0,0
Cl 17	ND<433	±433	-	0,0
Co 27	ND<10.5	±10.5	-	0,0
Cr 24	46.1	±11.7	-	185,6
Cu 29	ND<3.3	±3.3	-	0,0
Fe 26	8386	±63.5	-	82614,3
Ga 31	96.3	±11.3	-	5545,4
Hf 72	ND<7.3	±7.3	-	0,0
Hg 80	ND<1.1	±1.1	-	0,0
In 49	405	±14.7	-	51,8
K 19	ND<143	±143	-	0,0
La 57	ND<69.2	±69.2	-	0,0
Mn 25	35.9	±10.8	-	225,7
Ni 28	ND<6.1	±6.1	-	0,0
P 15	ND<1634	±1634	-	0,0
Pb 82	11.4	±1.1	-	652,0
Rb 37	ND<0.3	±0.3	-	0,0
S 16	ND<799	±799	-	0,0
Sb 51	16.7	±6.7	-	4,1
Se 34	ND<0.3	±0.3	-	0,0
Si 14	ND<10456	±10456	-	0,0
Sn 50	ND<7.6	±7.6	-	0,0
Sr 38	ND<0.6	±0.6	-	0,0
Ta 73	ND<6.2	±6.2	-	0,0
Ti 22	214	±39.4	-	303,0
V 23	ND<22.4	±22.4	-	0,0
W 74	119	±9.1	-	2394,2
Zn 30	50446	±226	-	2148557,5
RT 1.0				

Sample	System	Operator:	metalurgi	System Serial Number:	HDG200618001
1402_IIIA 1_1955	ican #: 1395	Description:		GUI Software Version:	1.3.2 2912
Coating:	erial #: HDG200618001			Firmware Version:	XOS [HD MOBILE 1.2.6 IOP-M2 10WPS S7 4SS]
Substrate: Metal	ate: 2024-04-03			Solver Version:	2.5.7-22
Name: IIIA 1	ime: 19:22:35			HW Server Version:	1.5.34
Lot:				Detector Version:	6.09.04 EOG
Optimization: Default				OS Version:	Linux 2.6.36.2HDMobile Tue Jul 31 13:06:43 EDT 2012
Method: Quantify					

Gambar B.11 Data Hasil Uji XRF Anoda IIIA 1



Gambar B.12 Data Hasil Uji XRF Anoda IIIA 2



Homogeneous				
Element	Concentration	Uncertainty	Area Density	Counts
	/ppm	/ppm	(µg/cm²)	
Ag 47	ND<2.9	±2.9	-	0,0
Al 13	939486	±37728	-	4012,4
As 33	1.7	±0.2	-	162,1
Au 79	ND<1.0	±1.0	-	0,0
Ba 56	ND<94.7	±94.7	-	0,0
Bi 83	ND<0.6	±0.6	-	0,0
Br 35	ND<0.3	±0.3	-	0,0
Ca 20	ND<83.5	±83.5	-	0,0
Cd 48	ND<3.3	±3.3	-	0,0
Ce 58	ND<44.8	±44.8	-	0,0
Cl 17	ND<404	±404	-	0,0
Co 27	ND<15.6	±15.6	-	0,0
Cr 24	37.1	±10.9	-	151,3
Cu 29	ND<4.3	±4.3	-	0,0
Fe 26	8555	±63.6	-	85550,5
Ga 31	98.0	±11.3	-	5724,1
Hf 72	ND<7.1	±7.1	-	0,0
Hg 80	ND<1.0	±1.0	-	0,0
In 49	409	±14.7	-	53,0
K 19	ND<121	±121	-	0,0
La 57	ND<68.6	±68.6	-	0,0
Mn 25	36.9	±10.8	-	235,5
Ni 28	ND<6.1	±6.1	-	0,0
P 15	ND<1670	±1670	-	0,0
Pb 82	5.0	±1.0	-	287,1
Rb 37	ND<0.3	±0.3	-	0,0
S 16	ND<637	±637	-	0,0
Sb 51	17.2	±6.6	-	4,3
Se 34	ND<0.3	±0.3	-	0,0
Si 14	ND<10782	±10782	-	0,0
Sn 50	ND<7.5	±7.5	-	0,0
Sr 38	ND<0.6	±0.6	-	0,0
Ta 73	ND<6.0	±6.0	-	0,0
Ti 22	244	±42.4	-	351,3
V 23	ND<22.7	±22.7	-	0,0
W 74	105	±8.5	-	2149,5
Zn 30	51005	±229	-	2203114,5
RT 1.0				

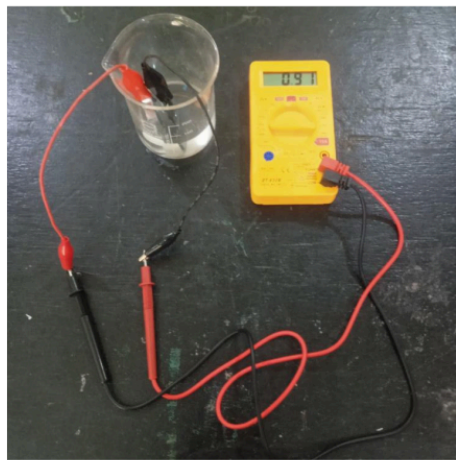
Sample	System	Operator:	System Serial Number:
1404_IIIA_3_2005	Scan #: 1398	metalurgi	HDG200618001
Coating:	Serial #: HDG200618001	Description:	GUI Software Version: 1.3.2.2912
Substrate: Metal	Date: 2024-Oct-03		Firmware Version: XOS [HD MOBILE 1.2.6 IOP-M2 10WPS S7 4SS]
Name: IIIA 3	Time: 19:35:47		Solver Version: 2.5.7-22
Lot:			HW Server Version: 1.5.34
Optimization: Default			Detector Version: 6.09.04 EOG
Method: Quantify			OS Version: Linux 2.6.36.2HDMobile Tue Jul 31 13:06:43 EDT 2012

Gambar B.13
Data Hasil Uji XRF Anoda IIIA 3

Lampiran B. 5 Pengolahan dan Data Hasil Pengujian Galvanik



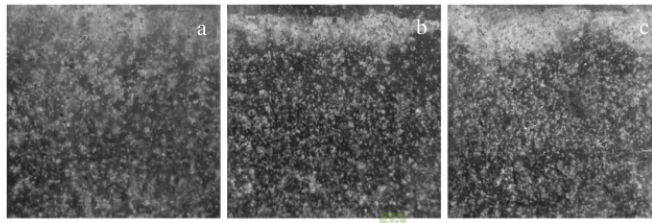
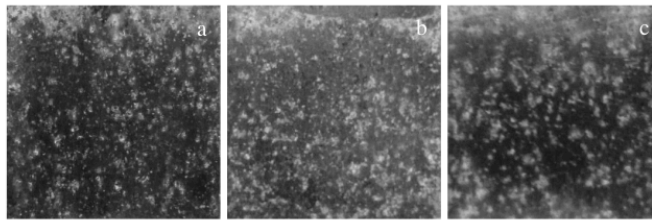
Gambar B.14 Sel Galvanik Pengujian

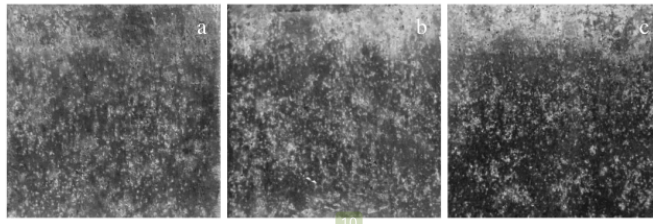


Gambar B.15 Pengukuran Arus

Tabel B.4 Data Hasil Pengukuran Pengujian Galvanik

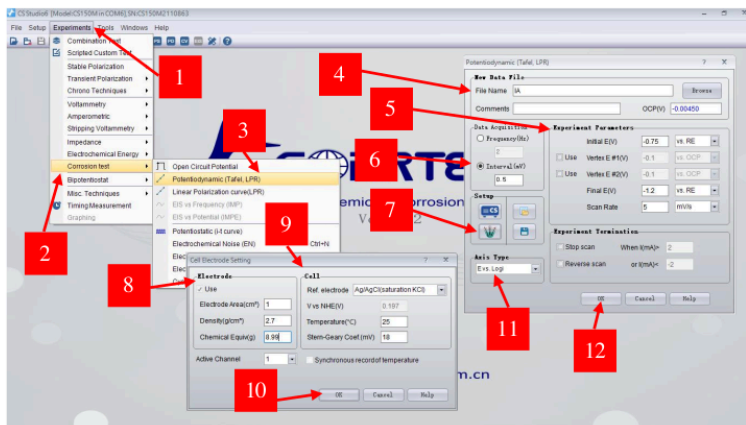
Sampel	Massa Awal (gr)	Massa Akhir (gr)	Arus (mA)	Waktu (hour)	Kapasitas Aktual (Ah/kg)	Kapasitas teoritis paduan (Ah/kg)	Efisiensi (%)
2,6% Zn 750°C	33,673	33,550	1,13	240	2198,92	2852,25	77,09%
2,6% Zn 700°C	32,393	32,310	0,78	240	2246,40	2852,25	78,76%
2,6% Zn 650°C	33,513	33,430	0,73	240	2102,40	2852,25	73,71%
3,6% Zn 750°C	34,697	34,600	0,85	240	2110,34	2843,49	74,22%
3,6% Zn 700°C	31,740	31,640	0,91	240	2184,00	2843,49	76,81%
3,6% Zn 650°C	31,953	31,780	1,43	240	1980,00	2843,49	69,63%
5% Zn 750°C	35,393	35,260	1,30	240	2340,00	2806,78	83,37%
5% Zn 700°C	33,263	33,140	1,22	240	2374,05	2806,78	84,58%
5% Zn 650°C	33,273	33,090	1,60	240	2094,55	2806,78	74,62%

**Gambar B.16** Makrografi Anoda 2,6% Zn Temperatur Tuang (a) 750°C, (b) 700°C, dan (c) 650°C**Gambar B.17** Makrografi Anoda 3,6% Zn Temperatur Tuang (a) 750°C, (b) 700°C, dan (c) 650°C

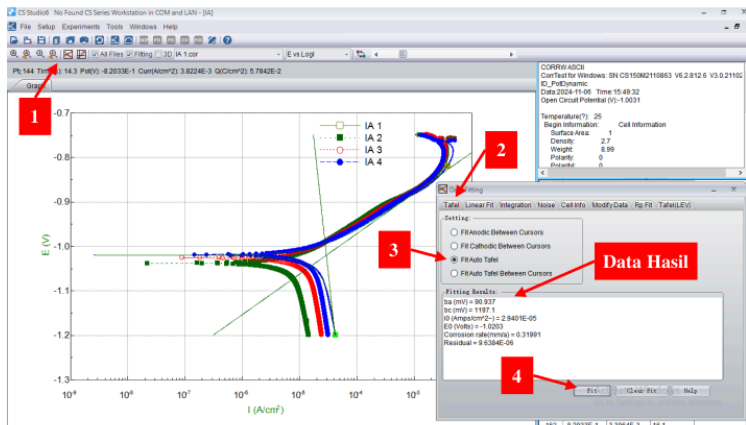


Gambar B.18 Makrografi Anoda 5% Zn Temperatur Tuang (a) 750°C, (b) 700°C, dan (c) 650°C

Lampiran B.6 Pengolahan dan Data Hasil Uji Tafel Polarisasi Sampel Anoda



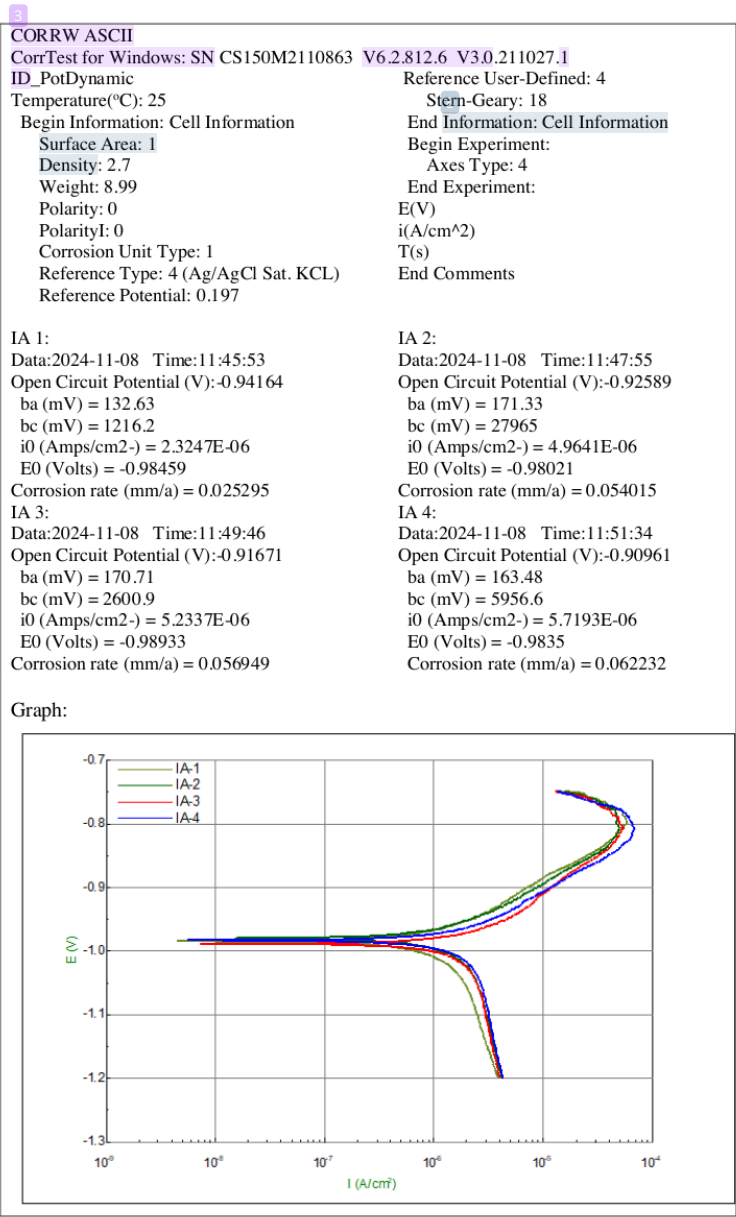
Gambar B.19 Parameter Eksperimen *Software* Corrttest Studio 6



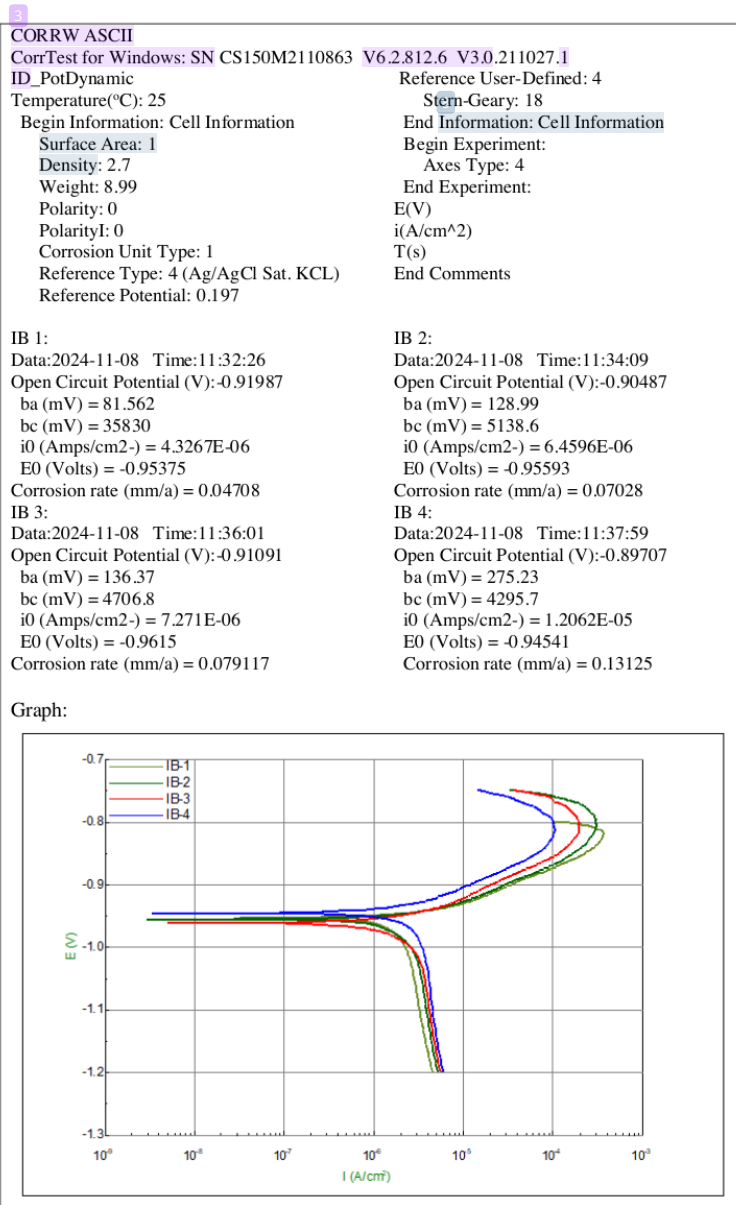
Gambar B.20 Pengolahan Data *Software* Corrttest Studio 6

Tabel B.4 Data Hasil Perhitungan Rata-Rata Pengujian Tafel Polarisasi

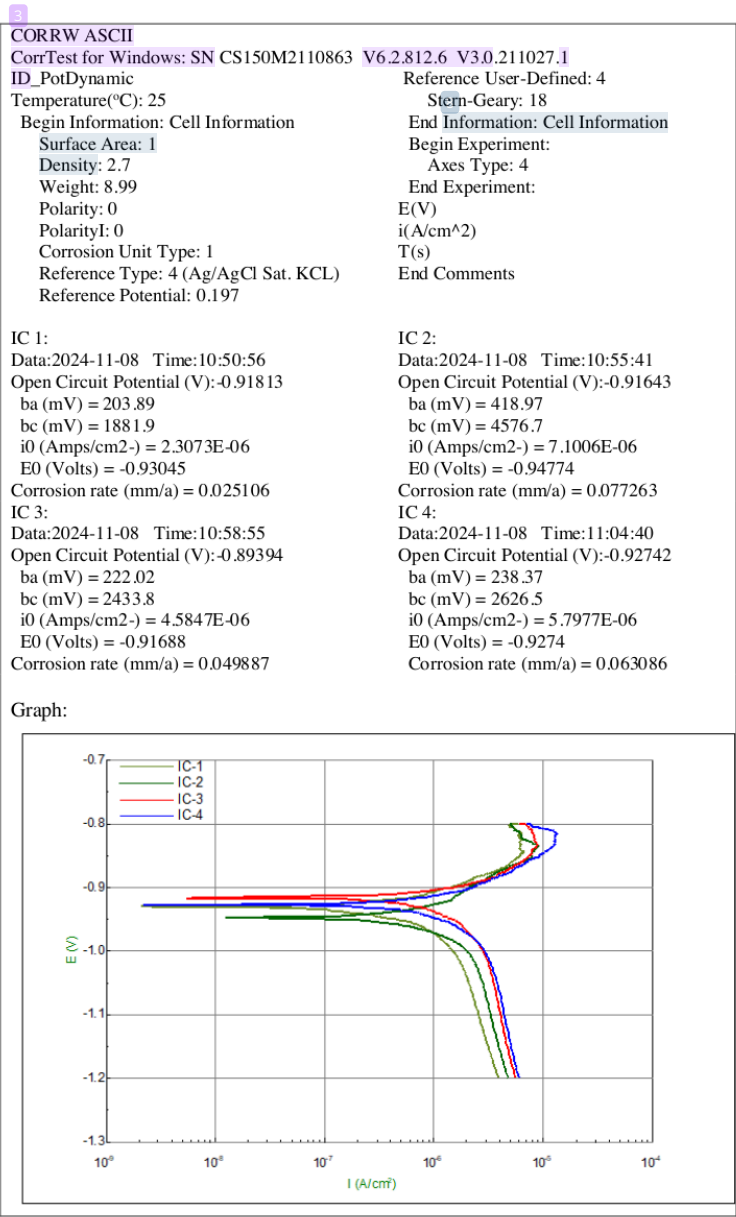
Sampel	Uji ke-	OCP (V)	Laju korosi (mm/tahun)	OCP rata-rata (V)	Laju korosi rata-rata (mm/year)
2,6 % Zn 650°C	1	-0,94164	0,025295	-0,9234625	0,04962275
	2	-0,92589	0,054015		
	3	-0,91671	0,056949		
	4	-0,90961	0,062232		
2,6 % Zn 700°C	1	-0,91987	0,04708	-0,90818	0,08193175
	2	-0,90487	0,07028		
	3	-0,91091	0,079117		
	4	-0,89707	0,13125		
2,6 % Zn 750°C	1	-0,91813	0,025106	-0,91398	0,0538355
	2	-0,91643	0,077263		
	3	-0,89394	0,049887		
	4	-0,92742	0,063086		
3,6 % Zn 650°C	1	-0,88188	0,067411	-0,89215	0,07829425
	2	-0,89016	0,074517		
	3	-0,89397	0,081201		
	4	-0,90259	0,090048		
3,6 % Zn 700°C	1	-0,89711	0,14562	-0,8958825	0,15265
	2	-0,89603	0,15087		
	3	-0,89759	0,14507		
	4	-0,8928	0,16904		
3,6 % Zn 750°C	1	-0,87611	0,17921	-0,8804125	0,136924
	2	-0,87932	0,14728		
	3	-0,88193	0,12275		
	4	-0,88429	0,098456		
5 % Zn 650°C	1	-0,90474	0,031896	-0,9896	0,160184
	2	-0,99996	0,11806		
	3	-1,0262	0,11806		
	4	-1,0275	0,37272		
5 % Zn 700°C	1	-1,0493	0,15185	-1,0498	0,24952
	2	-1,0537	0,22639		
	3	-1,0481	0,29133		
	4	-1,0481	0,32851		
5 % Zn 750°C	1	-1,0031	0,31991	-1,0271	0,23701
	2	-1,04	0,11402		
	3	-1,0439	0,21185		
	4	-1,0214	0,30226		



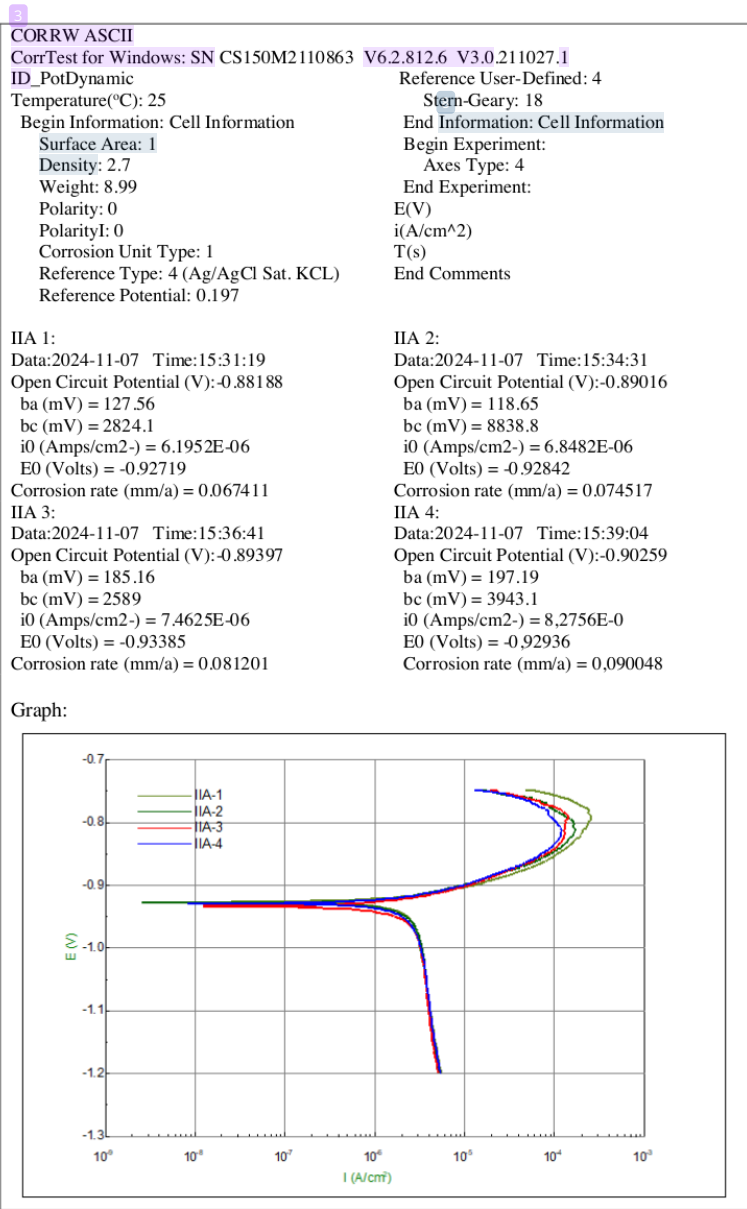
Gambar B.21 Data Hasil Uji Tafel Polarisasi Anoda IA 2,6% Zn 650°C



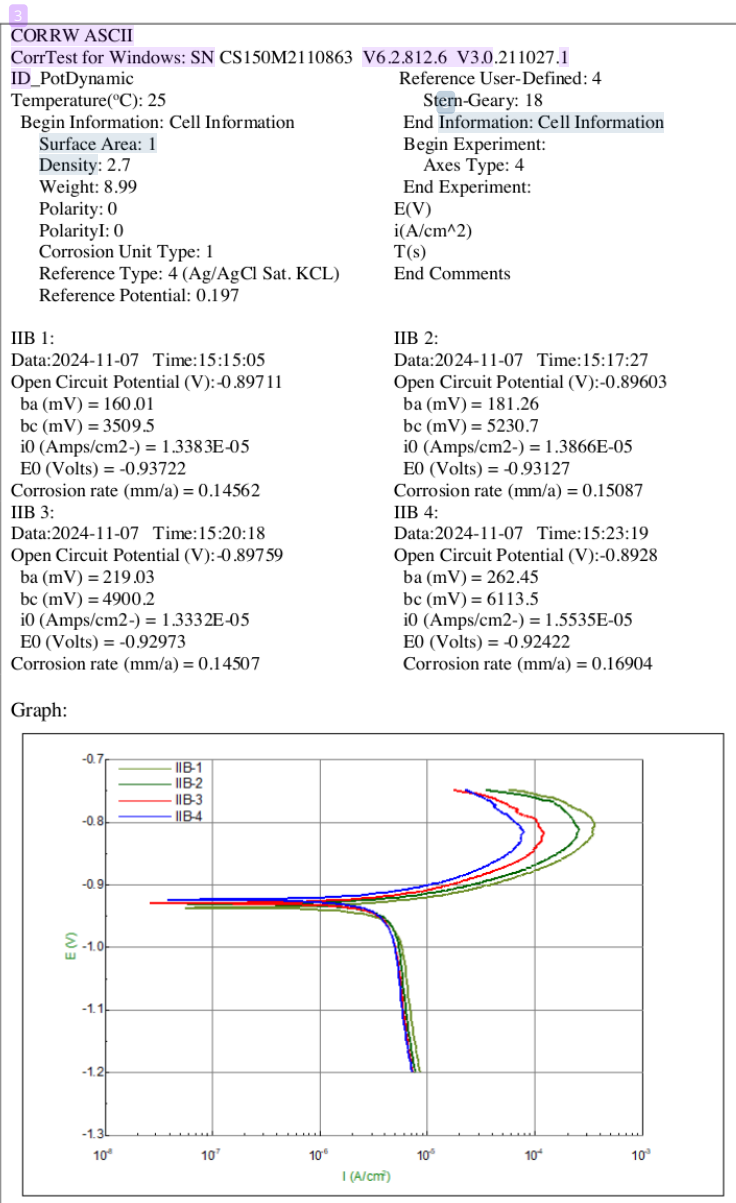
Gambar B.22 Data Hasil Uji Tafel Polarisasi Anoda IB 2,6% Zn 700°C



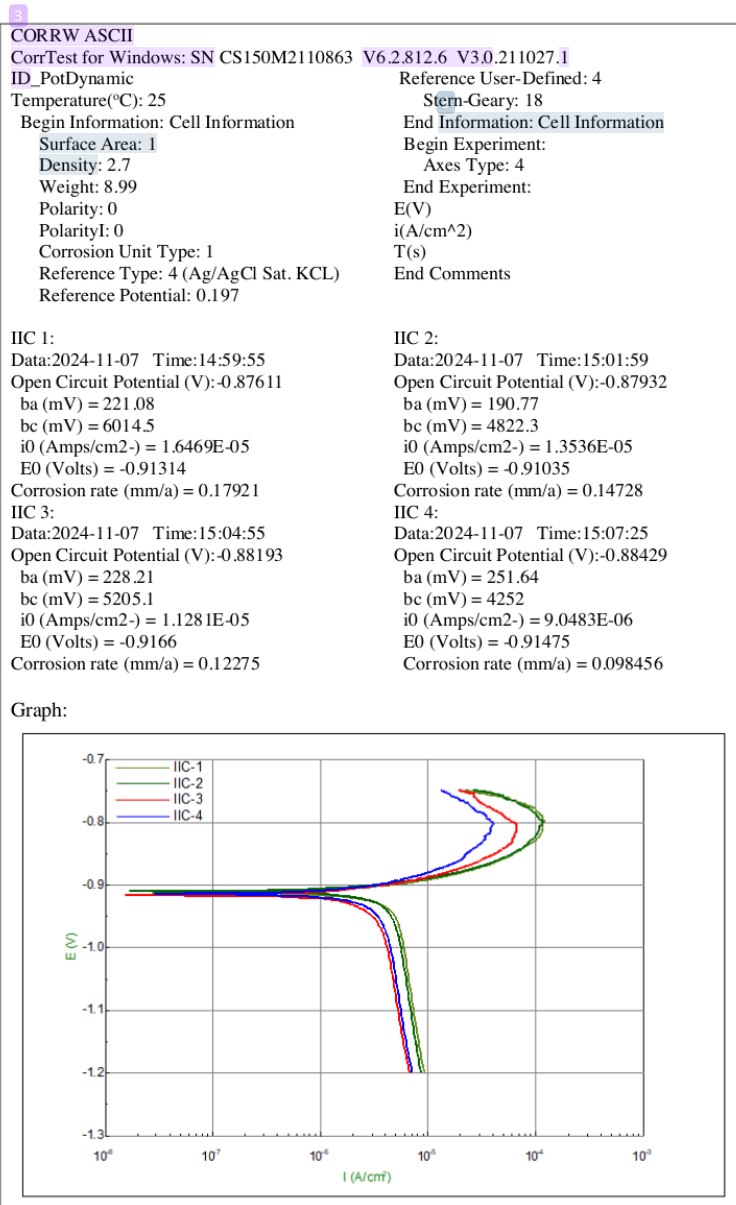
Gambar B.23 Data Hasil Uji Tafel Polarisasi Anoda IC 2,6% Zn 750°C



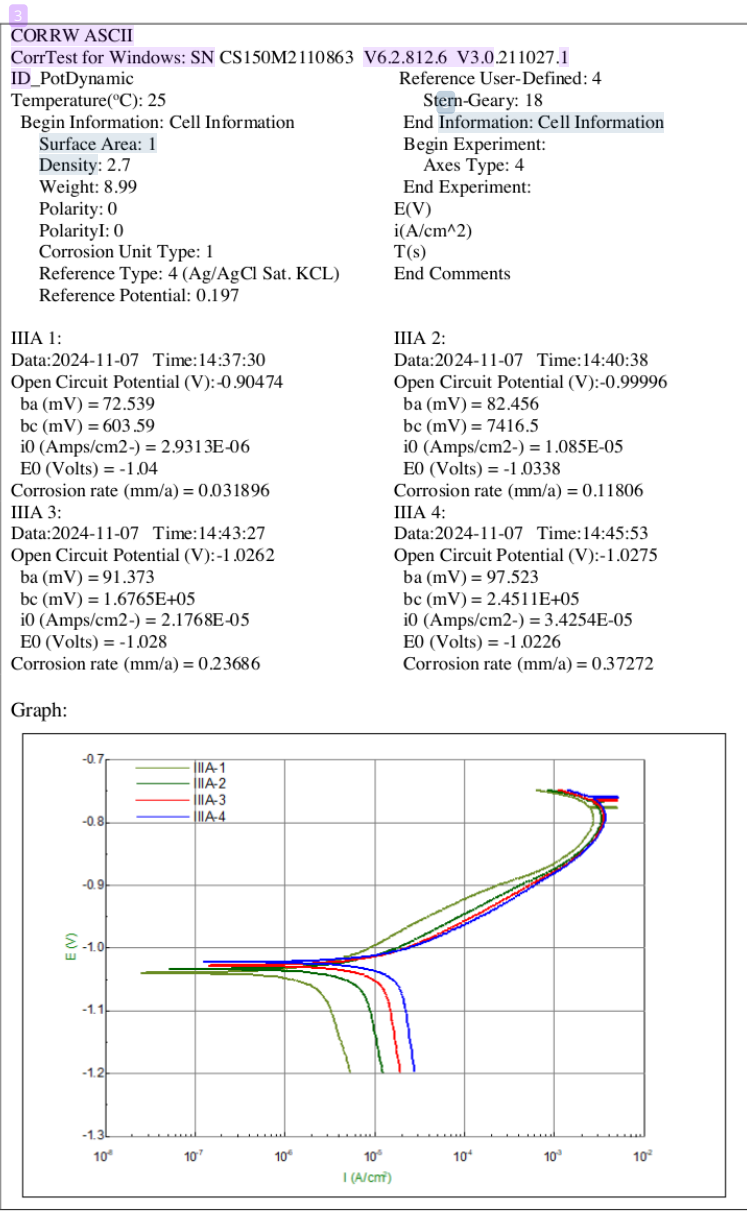
Gambar B.24 Data Hasil Uji Tafel Polarisasi Anoda IIA 3,6% Zn 650°C



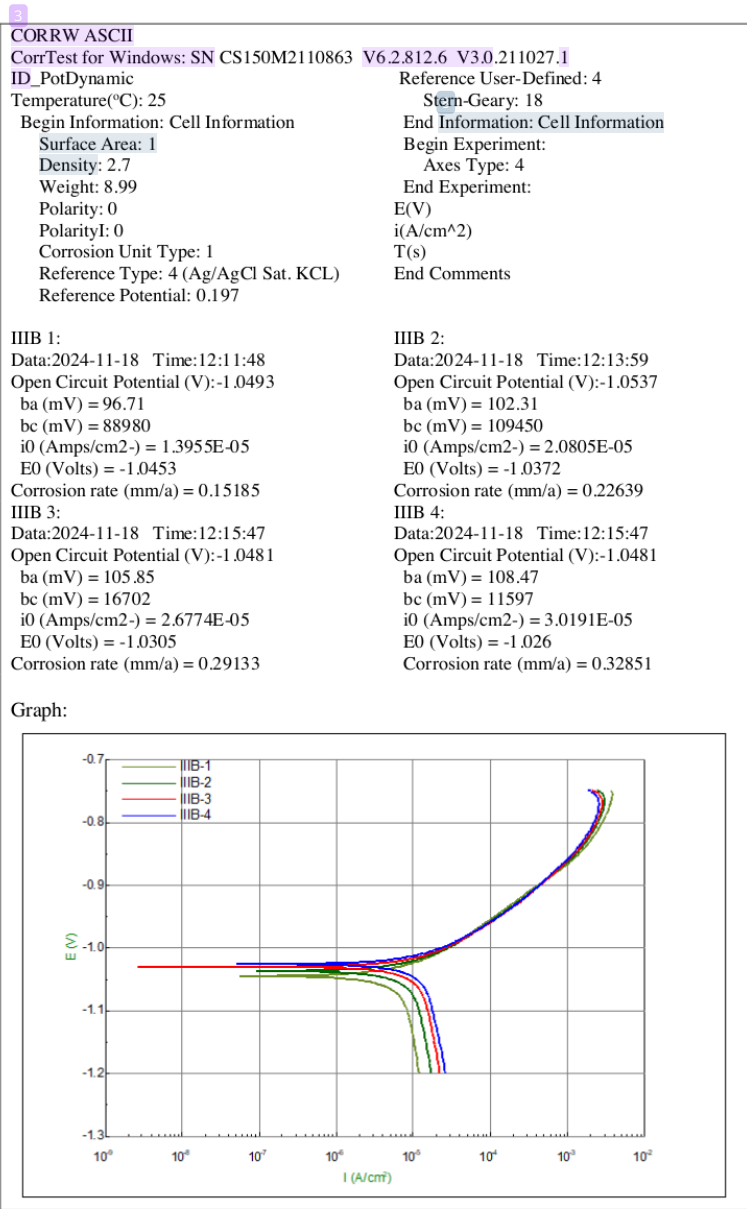
Gambar B.25 Data Hasil Uji Tafel Polarisasi Anoda IIB 3,6% Zn 700°C



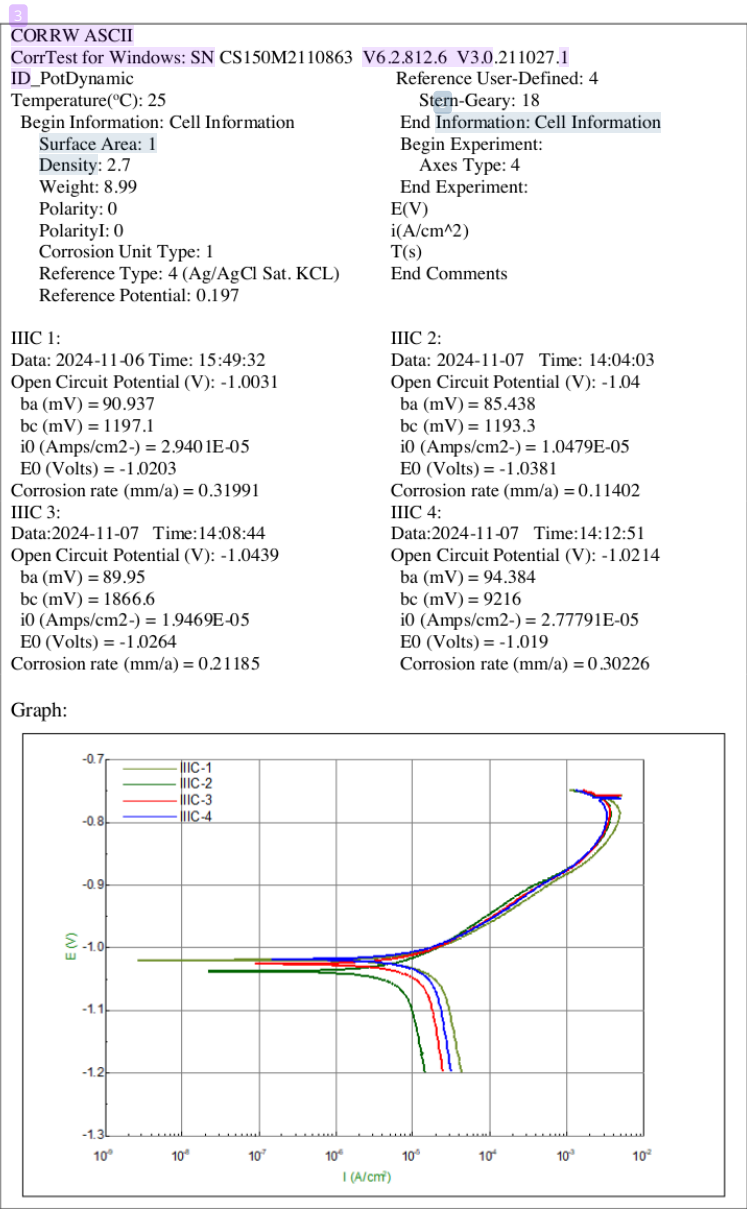
Gambar B.26 Data Hasil Uji Tafel Polarisasi Anoda IIC 3,6% Zn 750°C



Gambar B.27 Data Hasil Uji Tafel Polarisasi Anoda IIIA 5% Zn 650°C

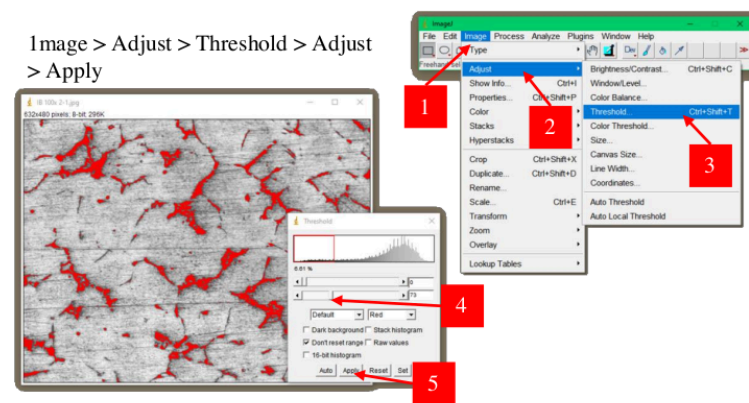


Gambar B.28 Data Hasil Uji Tafel Polarisasi Anoda IIIB 5% Zn 700°C

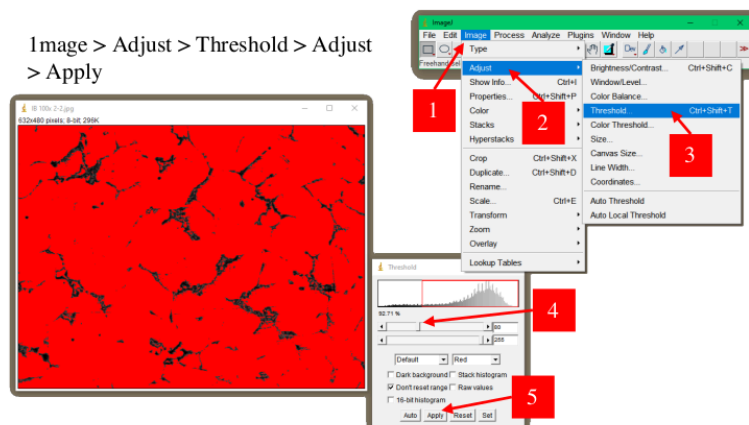


Gambar B.29 Data Hasil Uji Tafel Polarisasi Anoda IIIC 5% Zn 750°C

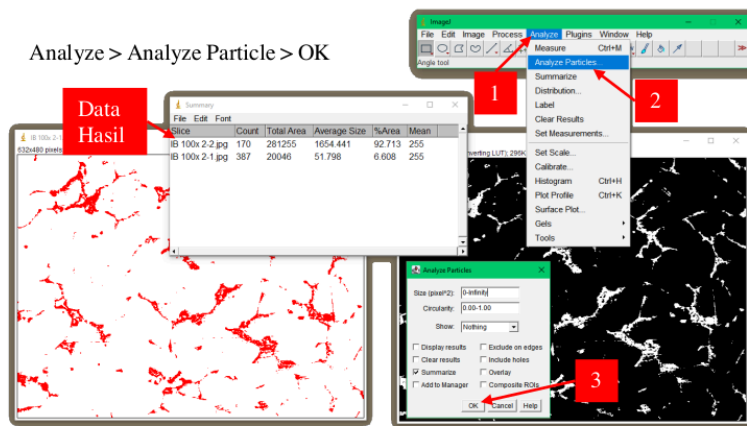
Lampiran B. 7 Pengolahan dan Data Hasil Uji Metalografi Sampel Anoda



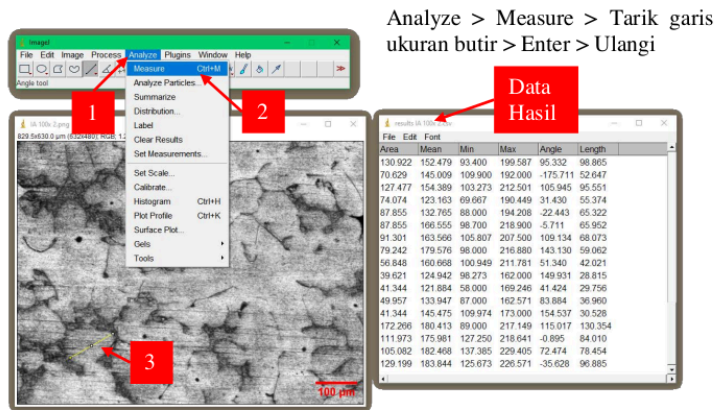
Gambar B.30 Pengolahan Data Distribusi Fasa Zn Software ImageJ



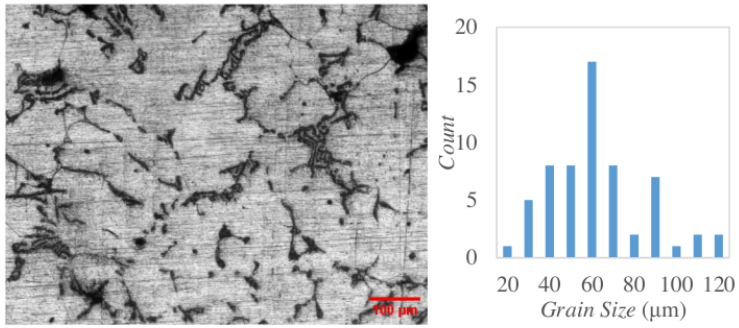
Gambar B.31 Pengolahan Data Distribusi Fasa a-Al Software ImageJ



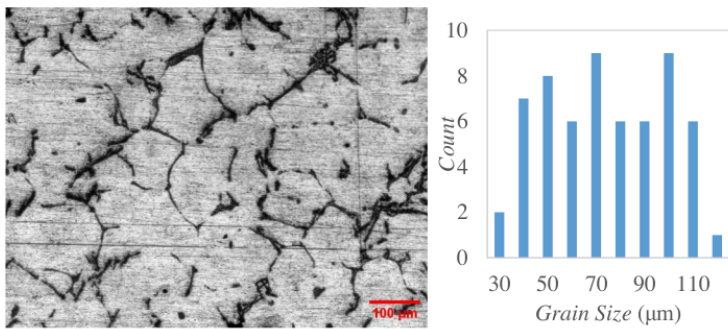
Gambar B.32 Pengambilan Data Distribusi Fasa *Software ImageJ*



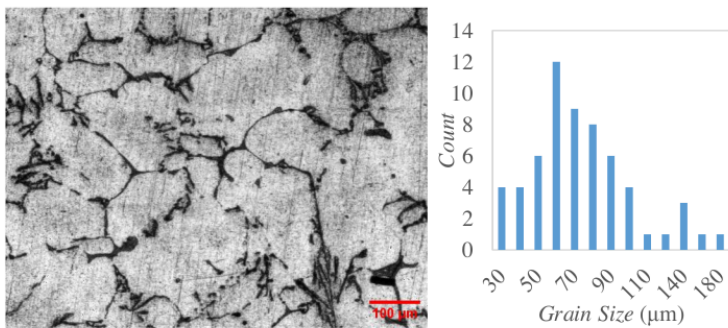
Gambar B.33 Pengolahan Data Distribusi Ukuran Butir *Software ImageJ*



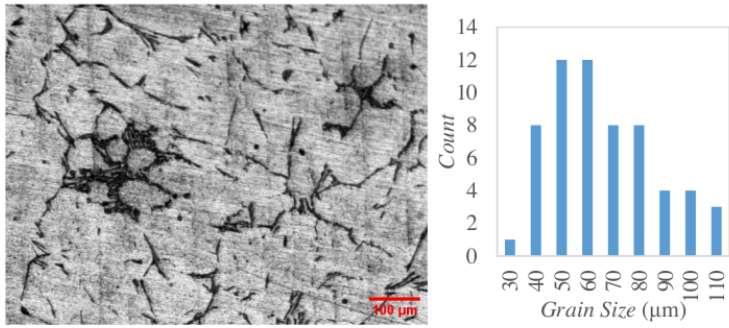
Gambar B.34 Data Hasil Uji Metalografi IA Pembesaran 100x



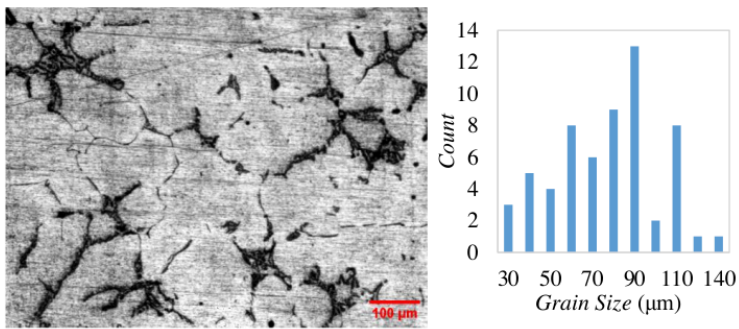
Gambar B.35 Data Hasil Uji Metalografi IB Pembesaran 100x



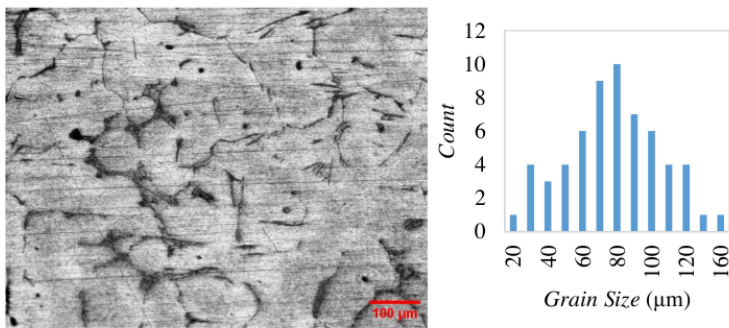
Gambar B.36 Data Hasil Uji Metalografi IC Pembesaran 100x



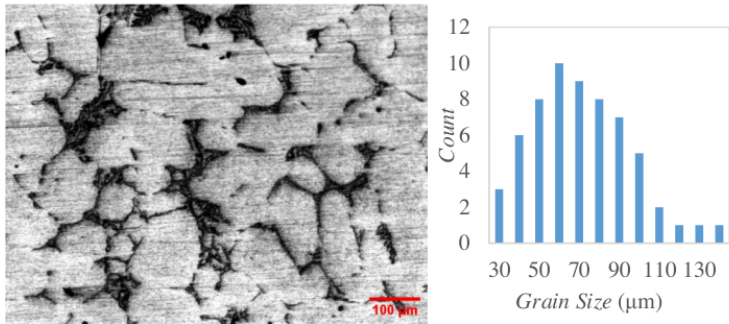
Gambar B.37 Data Hasil Uji Metalografi IIA Pembesaran 100x



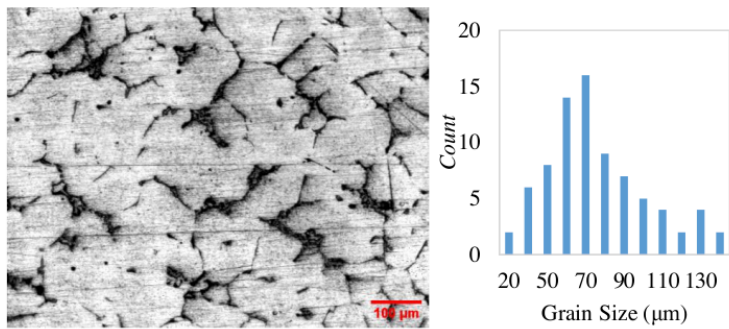
Gambar B.38 Data Hasil Uji Metalografi IIB Pembesaran 100x



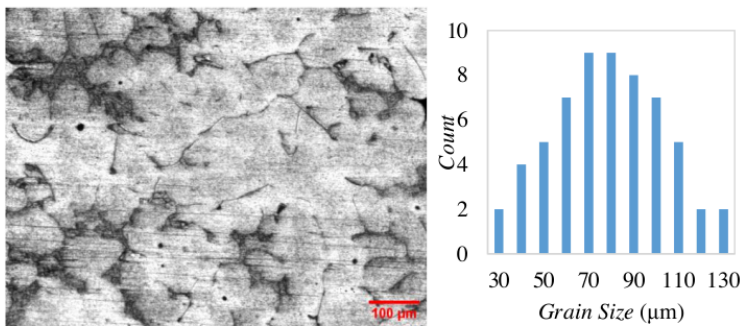
Gambar B.39 Data Hasil Uji Metalografi IIC Pembesaran 100x



Gambar B.40 Data Hasil Uji Metalografi IIIA Pembesaran 100x



Gambar B.41 Data Hasil Uji Metalografi IIIB Pembesaran 100x



Gambar B.42 Data Hasil Uji Metalografi IIIC Pembesaran 100x

11

LAMPIRAN C

GAMBAR ALAT DAN BAHAN



Gambar C.1 Akuades



Gambar C.2 Alat Pelindung Diri



Gambar C.3 Aluminium Ingot



Gambar C.4 Asam Clorida (HCl)



Gambar C.5 Asam Florida (HF)



Gambar C.6 Asam Nitrat (HNO_3)



Gambar C.7 Batang Pengaduk



Gambar C.8 Counter Electrode



Gambar C.9 *Crocodile Clip*



Gambar C.10 *Crucible*



Gambar C.11 *Garam (NaCl)*



Gambar C.12 *Gelas Beaker*



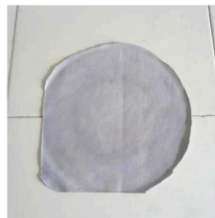
Gambar C.13 *Gerinda Duduk*



Gambar C.14 *Hair Dryer*



Gambar C.15 *Indium (In)*



Gambar C.16 *Kain Polishing*



Gambar C.17 Kertas Ampelas



Gambar C.18 Katoda *Low Carbon Steel*



Gambar C.19 Mesin Bor Tangan



Gambar C.20 Mesin Grinding dan Polishing



Gambar C.21 Mikroskop Optik



Gambar C.22 Multimeter



Gambar C.23 Pencapit *Crucible*



Gambar C.24 Potensiostat



Gambar C.25 Elektroda Referensi
Ag/AgCl



Gambar C.26 Thermogun



Gambar C.27 Timbangan Digital



Gambar C.28 Tungku Gas



Gambar C.29 Velg Aluminium



Gambar C.30 Zinc Ingot Nyzstar AZ-
Z1

ORIGINALITY REPORT

18%

SIMILARITY INDEX

17%

INTERNET SOURCES

5%

PUBLICATIONS

5%

STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1	repository.its.ac.id Internet Source	9%
2	eprints.untirta.ac.id Internet Source	1%
3	Submitted to College of Professional and Continuing Education (CPCE), Polytechnic University Student Paper	<1%
4	Submitted to University of the Philippines Diliman Student Paper	<1%
5	docplayer.info Internet Source	<1%
6	eprints.polsri.ac.id Internet Source	<1%
7	apotikkatodik.com Internet Source	<1%
8	Deckwart, Jens Markus(Wiemhöfer, Hans-Dieter). "Impedanzspektroskopie bei schneller	<1%

Korngrenzdiffusion am Beispiel des
Silbertellurids", Münster University, Germany,
Document Server, 2007.

Publication

9	repository.ub.ac.id Internet Source	<1 %
---	--	------

10	jurnal.umk.ac.id Internet Source	<1 %
----	--	------

11	pdfcoffee.com Internet Source	<1 %
----	--	------

12	vdoc.pub Internet Source	<1 %
----	--	------

13	www.dec.ny.gov Internet Source	<1 %
----	--	------

14	www.zerowasteottawa.com Internet Source	<1 %
----	--	------

15	Zijie Xia, Wenfeng Zhang, Xiaowei Yang, Tao Chen, Yunfeng Zhu, Huaxiong Ma, Liquan Li. "Influence of Sn, Cd, and Si addition on the electrochemical performance of Al-Zn-In sacrificial anodes", Materials and Corrosion, 2019 Publication	<1 %
----	--	------

16	Submitted to Universitas Sultan Ageng Tirtayasa Student Paper	<1 %
----	--	------

17	repository.upi.edu Internet Source	<1 %
18	eprints.undip.ac.id Internet Source	<1 %
19	text-id.123dok.com Internet Source	<1 %
20	www.rem.sfu.ca Internet Source	<1 %
21	semspub.epa.gov Internet Source	<1 %
22	www.ncor.ntu.edu.tw Internet Source	<1 %
23	elsa.brin.go.id Internet Source	<1 %
24	archive.epa.gov Internet Source	<1 %
25	m10mechanicalengineering.blogspot.com Internet Source	<1 %
26	Submitted to Universitas Pertamina Student Paper	<1 %
27	www.lockheedmartin.com Internet Source	<1 %
28	www.koreascience.or.kr Internet Source	<1 %

29	Sundjono Sundjono, Saefudin Saefudin. "PENGARUH TEMPERATUR DAN pH AIR SADAH KALSIUM SULFAT TERHADAP KOROSI PADA BAJA KARBON", Metalurgi, 2018 Publication	<1 %
30	media.neliti.com Internet Source	<1 %
31	Submitted to Padjadjaran University Student Paper	<1 %
32	pt.scribd.com Internet Source	<1 %
33	repository.usd.ac.id Internet Source	<1 %
34	wttech.upatras.gr Internet Source	<1 %
35	fitrahandayani27.wordpress.com Internet Source	<1 %
36	repository.ustjogja.ac.id Internet Source	<1 %
37	www.inspeksi.co.id Internet Source	<1 %
38	docobook.com Internet Source	<1 %
39	www.waterworks.metro.tokyo.lg.jp Internet Source	<1 %

<1 %

40

Submitted to Universitas Pendidikan
Indonesia

Student Paper

<1 %

41

eprints.ums.ac.id

Internet Source

<1 %

42

repository.unhas.ac.id

Internet Source

<1 %

43

Ahmad Royani. "PENGARUH SUHU TERHADAP
LAJU KOROSI BAJA KARBON RENDAH DALAM
MEDIA AIR LAUT", JURNAL SIMETRIK, 2021

Publication

<1 %

44

documents.dnrec.delaware.gov

Internet Source

<1 %

45

Submitted to University of Northumbria at
Newcastle

Student Paper

<1 %

46

alifiatyagitap.blogspot.com

Internet Source

<1 %

47

vsip.info

Internet Source

<1 %

48

www.sweetstudy.com

Internet Source

<1 %

Submitted to Universitas Diponegoro

49

Student Paper

<1 %

50

eprints.umm.ac.id

Internet Source

<1 %

51

repository.umsida.ac.id

Internet Source

<1 %

52

Dalei Zhang, Enze Wei, He Jing, Yantao Li, Liuyang Yang, Yao Qian, Jinzeng Liu, Youhai Jin. "Facile construction of superhydrophobic polydopamine-based film and its impressive anti-corrosion performance on zinc surface", Materials Chemistry and Physics, 2022

Publication

<1 %

53

Pei Wei, Zhen Chen, Shuzhe Zhang, Xuwei Fang, Bingheng Lu, Lijuan Zhang, Zhengying Wei. "Effect of T6 heat treatment on the surface tribological and corrosion properties of AlSi10Mg samples produced by selective laser melting", Materials Characterization, 2020

Publication

<1 %

54

Submitted to Universitas Negeri Surabaya The State University of Surabaya

Student Paper

<1 %

55

repo.iain-tulungagung.ac.id

Internet Source

<1 %

56	Gao, Dawei. "Neural Network-Based Mc X-Ray for Quantitative Analysis of Elements", McGill University (Canada), 2024 Publication	<1 %
57	Lail, Setiawan Misbachul. "Program Intrakurikuler Keagamaan Dalam Membentuk Karakter Disiplin di Smk Muhammadiyah 1 Penajam Paser Utara", Universitas Islam Sultan Agung (Indonesia), 2024 Publication	<1 %
58	R. Winston Revie, Herbert H. Uhlig. "Corrosion and Corrosion Control", Wiley, 2008 Publication	<1 %
59	Submitted to Universitas Islam Indonesia Student Paper	<1 %
60	etheses.uin-malang.ac.id Internet Source	<1 %
61	repository.uinjkt.ac.id Internet Source	<1 %
62	www.bantenevent.com Internet Source	<1 %
63	dtsc-topock.com Internet Source	<1 %
64	home.army.mil Internet Source	<1 %

65	issuu.com Internet Source	<1 %
66	www.is.mines.edu Internet Source	<1 %
67	G.F. Sperandio, C.M.L. Santos, A.G.S. Galdino. "Influence of silicon on the corrosion behavior of Al-Zn-In sacrificial anode", Journal of Materials Research and Technology, 2021 Publication	<1 %
68	Submitted to Institut Agama Islam Al-Zaytun Indonesia Student Paper	<1 %
69	adoc.pub Internet Source	<1 %
70	beeothers.wordpress.com Internet Source	<1 %
71	digilib.uns.ac.id Internet Source	<1 %
72	fr.scribd.com Internet Source	<1 %
73	idoc.tips Internet Source	<1 %
74	summer-absolutely.icu Internet Source	<1 %

75	www.boem.gov Internet Source	<1 %
76	www.kajianpustaka.com Internet Source	<1 %
77	core.ac.uk Internet Source	<1 %
78	digilib.unila.ac.id Internet Source	<1 %
79	journal.unhas.ac.id Internet Source	<1 %
80	repositori.usu.ac.id Internet Source	<1 %
81	www.dytc.ac.kr Internet Source	<1 %
82	www.studymode.com Internet Source	<1 %
83	123dok.com Internet Source	<1 %
84	a1odcinekc-kamiensk-radomsko.pl Internet Source	<1 %
85	doras.dcu.ie Internet Source	<1 %
86	download.garuda.ristekdikti.go.id Internet Source	<1 %

87	dspace.uui.ac.id Internet Source	<1 %
88	eprints.umk.ac.id Internet Source	<1 %
89	id.123dok.com Internet Source	<1 %
90	idoc.pub Internet Source	<1 %
91	jurnal.ugm.ac.id Internet Source	<1 %
92	lib.unnes.ac.id Internet Source	<1 %
93	newtowncreek.info Internet Source	<1 %
94	repository.ipb.ac.id:8080 Internet Source	<1 %
95	upriadi.blogspot.com Internet Source	<1 %
96	wigadwi26.blogspot.com Internet Source	<1 %
97	www.mitindia.edu Internet Source	<1 %
98	www.scribd.com Internet Source	<1 %

99

Doty Dewi Risanti. "ANALISIS MATEMATIS
PENGELASAN GREY CAST IRON
MENGUNAKAN PROSES GTAW DENGAN
DAN TANPA PREHEAT", Jurnal Technopreneur
(JTech), 2021

Publication

<1 %

100

ideaexchange.uakron.edu

Internet Source

<1 %

101

Kiguchi, O.. "Polychlorinated dibenzo-p-
dioxins and dibenzofurans in paddy soils and
river sediments in Akita, Japan",
Chemosphere, 200703

Publication

<1 %

102

P. M. Eguvbe, C. M. A. Iwegbue, S. H. O. Egboh,
J. E. Ogala. "Aliphatic Hydrocarbons
Distribution in Sediment Cores of Select
Creeks in Delta State, Nigeria", Environmental
Forensics, 2015

Publication

<1 %

Exclude quotes

Off

Exclude matches

Off

Exclude bibliography

On