



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR – TL184834

**PENGARUH KADAR SENG (Zn) PADA ANODA KORBAN
ALUMINIUM TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN
KARAKTERISTIK PROTEKSI**

**ARIF RAHMAN
NRP. 0251164000021**

**Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA
Tubagus Noor Rohmannudin, S.T., M.Sc.**

**DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020**



TUGAS AKHIR – TL 184834

**PENGARUH KADAR SENG (Zn) PADA ANODA KORBAN
ALUMINIUM TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN
KARAKTERISTIK PROTEKSI**

ARIF RAHMAN
NRP. 02511640000021

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA
Tubagus Noor Rohmannudin, S.T., M.Sc.

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT – TL 184834

**THE EFFECT OF ZINC (Zn) CONTENT ON ALUMINIUM
SACRIFICIAL ANODE ON MICROSTRUCTURE AND
PROTECTION CHARACTERISTICS**

ARIF RAHMAN
NRP. 0251164000021

Supervisors
Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA
Tubagus Noor Rohmannudin, S.T., M.Sc.

MATERIAL AND METALLURGICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology and System Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

(This page is intentionally left blank)

**PENGARUH KADAR SENG (Zn) PADA ANODA KORBAN
ALUMINIUM TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN
KARAKTERISTIK PROTEKSI**

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada

Program Studi S-1 Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

ARIF RAHMAN

NRP 0251164000021

Disetujui Oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA (Pembimbing I)
2. Tubagus Noor Rohmannudin, S. T., M. Sc. (Pembimbing II)



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

ANALISIS PENGARUH KOMPOSISI SENG (Zn) TERHADAP PARAMETER ANODA KORBAN DAN STRUKTUR MIKRO

Nama : Arif Rahman
NRP : 0251164000021
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi
Pembimbing I : Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA
Pembimbing II : Tubagus Noor Rohmannudin, S.T., M.Sc.

Abstrak

Anoda korban yang seing digunakan di air laut adalah anoda korban berbasis aluminium. Oleh karena itu, pada penelitian ini akan dilakukan analisis lebih lanjut terkait dengan penambahan unsur Zn terhadap struktur mikro dan karakteristik proteksi anoda korban. Karakteristik proteksi yang akan diteliti yaitu nilai open circuit potential, kapasitas arus, laju korosi, laju konsumsi, dan efisiensi anoda korban aluminium setelah ditambah unsur Zn dengan variasi penambahan 16.31%, 17.25%, 18.95%, dan 19.8%. Metode yang digunakan yaitu pengecoran. Setelah itu dilakukan pengujian XRF, metalografi, tafel polarisasi, open circuit potential, dan galvanik. Hasil yang didapat yaitu penambahan unsur Zn menyebabkan munculnya Zn pada batas butir dan mempersempit daerah matriks α -Al. Hal tersebut berkaitan dengan turunnya nilai open circuit potential hingga -1,08 V Vs Ag/AgCl, namun terjadi peningkatan pada penambahan 19.8% Zn sebesar -1,04 V Vs Ag/AgCl, serta menurunnya kapasitas arus dan efisiensi seiring penambahan unsur Zn senilai 1715,2 A.h/kg dan 66,7%. Sementara itu, nilai laju konsumsi dan laju korosi meningkat seiring meningkatnya kadar Zn menjadi senilai 5,1 Kg/A.y dan 0,35927 mmpy.

Kata Kunci: *Anoda, Aluminium, Zn, Karakteristik.*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

THE EFFECT OF ZINC (Zn) CONTENT ON ALUMINIUM SACRIFICIAL ANODE ON MICROSTRUCTURE AND PROTECTION CHARACTERISTICS

Student Name : Arif Rahman
NRP : 0251164000021
Department : Materials and Metallurgical Engineering
Supervisor : Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA
Co - Supervisor : Tubagus Noor Rohmannudin, S.T., M.Sc.

Abstract

Sacrificial anodes that are often used in seawater are aluminum based sacrificial anodes. Therefore, in this study further analysis will be carried out related to the addition of Zn element to the microstructure and protection characteristics of the sacrificial anode. Protection characteristics to be investigated are the value of open circuit potential, current capacity, corrosion rate, consumption rate, and the efficiency of the sacrificial anode aluminum after adding Zn elements with variations in the addition of 16.31%, 17.25%, 18.95%, and 19.8%. The method used is casting. After that, XRF, metallographic, polarization, open circuit potential, and galvanic tests are tested. The results obtained are the addition of Zn causes Zn to appear at the grain boundary and narrow the matrix area α -Al. This is related to the decrease in the value of open circuit potential up to -1.08 V Vs Ag / AgCl, but an increase in the addition of 19.8% Zn by -1.04 V Vs Ag / AgCl, as well as a decrease in current capacity and efficiency along with the addition of Zn elements worth 1715.2 Ah / kg and 66.7%. Meanwhile, the value of the consumption rate and corrosion rate increased with increasing Zn levels to be 5.1 Kg / A.y and 0.35927 mmpy.

Keywords: Anodes, Aluminium, Zn, Characteristics.

(This page is intentionally left blank)

KATA PENGANTAR

Dengan mengucapkan puji dan syukur kehadirat Allah SWT, karena atas ridho dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul ***“Pengaruh Kadar Seng (Zn) pada Anoda Korban Aluminium Terhadap Struktur Mikro dan Karakteristik Proteksi”*** Tugas Akhir ini disusun untuk melengkapi sebagian syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di departemen Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS. Terima Kasih penulis ucapkan kepada pihak-pihak yang telah memberikan bantuan dalam penyusunan Tugas Akhir ini:

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA dan Bapak Tubagus Noor Rohmannudin, S.T., M.Sc. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir yang telah membimbing, membantu, dan memberika banyak ilmu kepada penulis selama proses pengerjaan Laporan Tugas Akhir.
2. Bapak Dr. Sigit Tri Wicaksono, S.Si, M.Si selaku Kepala Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS ITS.
3. Bapak Ir. Moh. Farid, DEA selaku dosen wali yang telah membimbing dan memberi nasihat selama perkuliahan.
4. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS ITS.

Akhir kata besar harapan penulis laporan ini bisa memberikan manfaat bagi kita semua.

Surabaya, 23 Januari 2019
Penulis

Arif Rahman

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT.....	ix
KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
DAFTAR TABEL.....	xxi
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Korosi	5
2.1.1 Aspek Penijauan Korosi	5
2.1.2 Jenis- jenis Korosi	22
2.1.3 Mekanisme Terjadinya Korosi.....	23
2.2 Pengendalian Korosi	25
2.3 Proteksi Katodik.....	27
2.3.1 <i>Sacrificial Anode Cathodic Protection</i> (SACP).....	28
2.3.2 <i>Impressed Current Cathodic Protection</i>	30
2.4 Potensial Elektrokimia	32
2.5 Potensial Proteksi.....	33
2.6 Anoda Korban.....	34
2.6.1 Anoda Korban Aluminium	35
2.6.2 Anoda Korban Seng	36
2.7 Pengaruh Unsur Paduan	36
2.7.1 Pengaruh Unsur Zn.....	37
2.7.2 Pengaruh Unsur In.....	38
2.7.3 Pengaruh Unsur Fe	39

2.7.4	Pengaruh Unsur Cu.....	39
2.7.5	Pengaruh Unsur Si.....	40
2.7.6	Pengaruh Unsur Sn.....	41
2.8	Korosi pada Air Laut.....	43
2.8.1	Komposisi Kimia dan Salinitas Air Laut	43
2.8.2	Kandungan Oksigen dalam Air Laut	46
2.8.3	Temperatur	46
2.8.4	pH.....	46
2.9	Diagram Pourbaix	47
2.10	Diagram Fasa Al-Zn.....	50
2.11	Struktur Mikro Al-Zn.....	51
2.12	Pengecoran.....	53
2.13	<i>Pattern</i>	54
2.14	Cetakan	55
2.15	Penelitian Sebelumnya.....	56

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1	Diagram Alir	61
3.2	Standar yang Digunakan	63
3.3	Alat dan Bahan.....	63
3.3.1	Alat.....	63
3.3.2	Bahan.....	65
3.3.3	Spesifikasi Bahan	66
3.4	Prosedur Penelitian	67
3.4.1	Perancangan Dimensi Pengecoran	67
3.4.2	Preparasi Spesimen Uji Korosi	67
3.4.3	Preparasi Spesimen Uji Metalografi	68
3.5	Pengujian	69
3.5.1	Pengujian Komposisi Kimia	69
3.5.2	Pengujian Metalografi	70
3.5.3	Pengujian Korosi Galvanik.....	71
3.5.4	Pengujian <i>Open Circuit Potential</i> (OCP).....	71
3.5.5	Pengujian Tafel Polarisasi	72
3.6	Rancangan Penelitian	73

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Perancangan Pengecoran Anoda Korban Aluminium.....	75
4.1.1 Data Pengecoran.....	75
4.1.2 Hasil Coran Anoda Korban Aluminium	82
4.1.3 Hasil Coran Anoda Korban Aluminium Setelah Proses <i>Machining</i>	83
4.2 Komposisi Kimia Anoda Korban	84
4.3 Uji Metalografi	86
4.4 Uji Tafel Polarisasi	89
4.5 Uji <i>Open Circuit Potential</i> (OCP).....	92
4.6 Uji Galvanik.....	94
4.6.1 Kapasitas Arus.....	94
4.6.2 Laju Konsumsi	96
4.6.2 Efisiensi Anoda	97

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan	101
5.2 Saran	102

DAFTAR PUSTAKA	103
LAMPIRAN.....	107
UCAPAN TERIMA KASIH.....	113
BIODATA PENULIS.....	115

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Reaksi elektrokimia pada proses korosi seng dan larutan asam klorida.....	7
Gambar 2.2	Reaksi reduksi hidrogen selama polarisasi aktivasi.....	10
Gambar 2.3	Polarisasi konsentrasi pada evolusi hidrogen.....	10
Gambar 2.4	Laju korosi suatu logam tanpa efek pasivitas terhadap fungsi potensial elektroda.....	12
Gambar 2.5	Laju korosi suatu logam dengan efek pasivitas terhadap fungsi potensial elektroda.....	13
Gambar 2.6	Pengaruh penambahan pengoksidasi terhadap laju korosi.....	14
Gambar 2.7	Pengaruh kecepatan terhadap laju korosi.....	16
Gambar 2.8	Pengaruh temperatur terhadap laju korosi.....	19
Gambar 2.9	Pengaruh konsentrasi terhadap laju korosi.....	21
Gambar 2.10	Ilustrasi pengaruh efek galvanik.....	22
Gambar 2.11	Skema proteksi katodik menggunakan anoda Mg di dalam tanah.....	28
Gambar 2.12	Rangkaian sistem proteksi katodik arus paksa (ICCP) dalam media tanah.....	31
Gambar 2.13	Pengaruh penambahan unsur Zn terhadap nilai <i>open circuit potential</i> terhadap waktu.....	38
Gambar 2.14	Pengaruh penambahan unsur indium terhadap nilai potensial anoda korban aluminium.....	39
Gambar 2.15	Kondisi struktur mikro pada Al-Zn-Cu sebelum imersi (a) dan setelah imersi selama lima hari (b).....	40
Gambar 2.16	Struktur mikro hasil pengamatan SEM pada hasil coran (a) Al-Zn-In-Mg-Ti dan (b) Al-Zn-In-Mg-Ti dengan penambahan Si sebesar 0.1%.....	41
Gambar 2.17	Struktur mikro hasil pengamatan SEM pada paduan anoda Al-Mg-Sn-Ga dengan variasi pengaruh perlakuan panas (a) <i>as-rolled</i> , (b)	

	400°C, (c) 450°C,(d)500°C, (e) 550°C, (f) 600°C	42
Gambar 2.18	Konsentrasi oksigen terlarut, salinitas, temperatur, dan pH terhadap fungsi kedalaman.....	47
Gambar 2.19	Diagram pourbaix Fe dalam air.....	48
Gambar 2.20	Diagram fasa paduan Al-Zn.....	50
Gambar 2.21	Struktur mikro hasil SEM pada paduan Al – 40 wt% Zn	51
Gambar 2.22	Struktur mikro hasil SEM pada paduan Al – 5% Zn	52
Gambar 2.23	Struktur mikro Al-Zn-In dengan penambahan 5%Zn	53
Gambar 2.24	Variasi efisiensi anoda menggunakan perbedaan komposisi %Zn.....	56
Gambar 2.25	Struktur mikro paduan Al-Zn-In dengan penambahan Zn 5% dan In 0.02%	58
Gambar 2.26	(a) Struktur mikro aluminium tanpa penambahan Zn; (b) Struktur mikro aluminium dengan penambahan 5% Zn	59
Gambar 2.27	Grafik perbandingan nilai OCP aluminium dan Al-5%Zn pada lingkungan 3% NaCl.....	59
Gambar 2.28	Nilai OCP paduan Al-Cu-Li dengan penambahan unsur Zn dengan variasi 0%, 0.3%, dan 0.7% terhadap waktu <i>ageing</i> pada temperatur 175°C di media 3.5% NaCl.	60
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian	62
Gambar 3.2	<i>Muffle furnace</i>	64
Gambar 3.3	<i>Crucible</i> grafit.....	64
Gambar 3.4	Rancangan dimensi spesimen untuk pengecoran anoda korban aluminium	67
Gambar 3.5	Skema pengujian XRF	70
Gambar 3.6	Skema pengujian korosi galvanik	71
Gambar 3.7	Skema pengujian <i>open circuit potential</i>	72
Gambar 3.8	Skema pengujian tafel polarisasi.....	73

Gambar 4.1	Material anoda korban aluminium	75
Gambar 4.2	Dimensi hasil benda cor.....	76
Gambar 4.3	Dimensi <i>pattern</i> dan benda hasil cor dengan	78
Gambar 4.4	Dimensi <i>pattern</i> dan benda hasil cor dengan	79
Gambar 4.5	Perhitungan <i>draft allowance</i>	79
Gambar 4.6	Dimensi <i>pattern</i> dan benda hasil cor dengan	80
Gambar 4.7	Batu tahan api sebagai cetakan pengecoran anoda korban aluminium	81
Gambar 4.8	Skema pengecoran anoda korban aluminium.....	82
Gambar 4.9	Hasil coran anoda korban aluminium sebelum dilakukan proses <i>machining</i> dengan penambahan unsur (a) 16.31%Zn, (b) 17.25% Zn, (c) 18.95%Zn, (d) 19.8%Zn.....	83
Gambar 4.10	Hasil coran anoda korban aluminium dengan penambahan (a) 16.31%z , (b) 0.7%Zn (c) 2.6% Zn, dan (c) 3.5% Zn.....	84
Gambar 4.11	Struktur mikro anoda korban aluminium tanpa penambahan unsur paduan (Al) perbesaran 10x.....	86
Gambar 4.12	Struktur mikro anoda korban aluminium dengan penambahan unsur paduan 0.7%Zn (Al-0.7%Zn) perbesaran 10x	87
Gambar 4.13	Struktur mikro anoda korban aluminium dengan penambahan unsur paduan 2.6%Zn (Al-2.6%Zn) perbesaran 10x	87
Gambar 4.14	Struktur mikro anoda korban aluminium dengan penambahan unsur paduan 3.4%Zn (Al-3.4%Zn) perbesaran 10x	88
Gambar 4.15	Grafik hasil uji tafel polarisasi	90
Gambar 4.16	Grafik nilai <i>Open Circuit Potential</i> pada anoda korban aluminium dengan variasi penambahan Zn.....	93
Gambar 4.17	Grafik nilai kapasitas arus pada anoda korban aluminium dengan variasi penambahan Zn.....	95

- Gambar 4.18** Grafik nilai laju konsumsi pada anoda korban aluminium dengan variasi penambahan Zn.....96
- Gambar 4.19** Grafik nilai efisiensi pada anoda korban aluminium dengan variasi penambahan Zn.....98

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Potensial standar dari beberapa logam	33
Tabel 2.2	Komposisi kimia air laut	45
Tabel 2.3	Efisiensi proteksi dari paduan anoda korban Al-Zn.....	57
Tabel 3.1	Komposisi anoda korban berbasis aluminium	66
Tabel 3.2	Rancangan penelitian	73
Tabel 4.1	Komposisi anoda korban aluminium tanpa penambahan unsur paduan	85
Tabel 4.2	Komposisi anoda korban aluminium dengan penambahan unsur paduan 0.7% Zn (Al + 0.7% Zn)	85
Tabel 4.3	Komposisi anoda korban aluminium dengan penambahan unsur paduan 2.6% Zn (Al + 2.6% Zn)	85
Tabel 4.4	Komposisi anoda korban aluminium dengan penambahan unsur paduan 3.5% Zn (Al + 3.5% Zn)	86
Tabel 4.5	Nilai E^{corr} , I^{corr} , dan laju korosi anoda korban aluminium dengan penambahan unsur Zn.....	92

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Korosi merupakan suatu kerusakan yang terjadi secara spontan dan dialami oleh material khususnya logam dan paduannya. Korosi dapat disebabkan karena adanya reaksi meliputi reaksi kimia, biokimia, dan elektrokimia antara logam dan paduannya dengan lingkungan-lingkungan yang korosif. Lingkungan korosif meliputi kelembaban, oksigen, larutan asam organik maupun anorganik, tekanan tinggi, temperatur, dan klorida (Popov, 2015). Korosi dapat menimbulkan dampak yang serius terutama pada suatu industri sehingga menjadikannya hal yang sangat penting untuk diperhitungkan. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh US *Federal Highway Administration (FHWA)* pada tahun 2002, estimasi total biaya langsung akibat peristiwa korosi di Amerika Serikat adalah 276 miliar dolar, atau setara dengan 3.1% dari total US *Gross Domestic Product (GDP)*. Biaya langsung akibat korosi meliputi penggantian struktur yang rusak akibat korosi dan pengadaan tenaga kerja. Selain biaya tersebut, terdapat pula biaya lain termasuk pematian sistem, penurunan produksi, penurunan efisiensi, dan kemungkinan produk yang dihasilkan oleh suatu industri terkontaminasi oleh korosi. Atas beberapa kasus akibat korosi yang merugikan tersebut, perlu adanya tindakan berupa pengendalian korosi baik dalam dunia industri maupun kehidupan sehari-hari (Ahmad, 2006).

Pengendalian korosi pada suatu logam dapat menggunakan beberapa cara antara lain dengan menggunakan inhibitor, sistem proteksi katodik, insulasi, dan *cladding*. Sistem proteksi katodik merupakan metode yang umumnya digunakan pada lingkungan lepas pantai untuk melindungi struktur ataupun pipa. Sistem proteksi katodik terbagi menjadi dua yaitu *Sacrificial Anode Cathodic Protection (SACP)* dan *Impressed Current Cathodic Protection*. Pada sistem proteksi ICCP memanfaatkan arus paksa, dimana kebutuhan arus elektronnya disuplai dari luar sistem yaitu

dari anoda yang dihubungkan dengan sumber arus DC. Pada sistem ICCP keluaran arus proteksinya dapat diatur namun memerlukan biaya yang mahal. Sementara untuk sistem proteksi SACP memanfaatkan prinsip sel galvanik yaitu dengan memanfaatkan beda potensial antara anoda dan katoda secara alami, dimana katoda adalah struktur yang ingin dilindungi dan anoda adalah logam yang memiliki nilai potensial yang lebih rendah. Pada sistem SACP ini memerlukan biaya yang lebih sedikit dibandingkan dengan ICCP, namun keluaran arus proteksinya tidak dapat diatur seperti pada ICCP.

Jenis anoda korban yang sering digunakan pada lingkungan air laut yaitu zinc dan aluminium. Namun anoda jenis aluminium lebih banyak digunakan karena memiliki efisiensi dan kapasitas arus yang lebih tinggi dibandingkan dengan zinc. Aluminium tidak dapat digunakan sebagai anoda korban ketika dalam kondisi murni. Hal ini disebabkan karena adanya pembentukan lapisan pasif pada anoda aluminium yang menjadikan aluminium memiliki sifat yang lebih mulia dibandingkan dengan struktur baja yang ada di air laut. Beberapa penelitian telah dilakukan untuk meningkatkan efisiensi dari penggunaan anoda korban aluminium, salah satunya adalah dengan menambahkan elemen paduan aktif pada anoda aluminium. Elemen-elemen paduan yang ditambahkan antara lain adalah Zn, Cu, Si, dan Ge (Ferdian, 2017).

Penelitian dan pengembangan anoda aluminium masih terus dilanjutkan untuk memperoleh komposisi elemen paduan yang sesuai sehingga didapatkan adanya peningkatan efisiensi pada anoda korban aluminium. Namun pada penelitian sebelumnya dilakukan rekayasa penambahan elemen paduan pada kondisi aluminium murni, bukan dengan merekayasa anoda aluminium yang telah ada dan menambahkannya dengan elemen paduan tersebut. Penambahan salah satu unsur paduan tersebut dipercaya dapat mempengaruhi sifat-sifat dari anoda korban yang akan dihasilkan antara lain keluaran potensial proteksi, kekerasan, dan juga struktur mikronya. Berdasarkan latar belakang tersebut, penulis ingin melakukan penelitian terhadap pengaruh

penambahan unsur paduan Zn terhadap karakteristik anoda korban konvensional berbasis aluminium dengan kadar masing-masing penambahan unsur paduan Zn tersebut adalah 16.31%, 17.25%, 18.95%, dan 19.8%. Kemudian akan dilakukan perbandingan efisiensi anoda korban aluminium dan juga setelah diberikan penambahan unsur Zn dengan variasi kadar tersebut dengan pengujian korosi. Pengujian yang akan dilakukan adalah berupa pengujian struktur mikro dan uji korosi yang menunjukkan sifat paling korosif terhadap air laut.

1.2 Perumusan Masalah

Pada penelitian yang akan dilakukan, didapatkan beberapa rumusan masalah. Adapun rumusan masalah tersebut adalah:

1. Bagaimana pengaruh penambahan unsur paduan Zn terhadap struktur mikro anoda korban berbasis aluminium?
2. Bagaimana pengaruh penambahan unsur Zn terhadap potensial, efisiensi, laju korosi, dan laju konsumsi anoda korban berbasis aluminium?

1.3 Batasan Masalah

Pada penelitian yang akan dilakukan, terdapat beberapa batasan masalah. Adapun batasan masalah tersebut adalah:

1. Pendistribusian unsur paduan dianggap merata
2. Produk hasil pengecoran dianggap homogen
3. Adanya cacat pada pengecoran tidak diperhitungkan
4. Tekanan dianggap konstan saat melakukan proses peleburan
5. Temperatur tuang dianggap konstan saat melakukan penuangan
6. Pengaruh oksigen akibat interaksi dengan lingkungan dianggap tidak ada
7. Interaksi logam cair dengan lingkungan diabaikan
8. Pengaruh unsur pengotor diabaikan
9. Massa jenis anoda aluminium dianggap sama dengan 2.7 gram/cm³

1.4 Tujuan Penelitian

Pada penelitian yang akan dilakukan, terdapat beberapa tujuan yang ingin dicapai. Adapun tujuan penelitian tersebut adalah:

1. Menganalisis pengaruh penambahan unsur paduan Zn terhadap karakteristik anoda korban berbasis aluminium yaitu struktur mikro dari anoda korban tersebut.
2. Menganalisis pengaruh penambahan unsur Zn terhadap potensial, efisiensi, laju korosi, dan laju konsumsi anoda korban berbasis aluminium.

1.5 Manfaat Penelitian

Pada penelitian ini diharapkan dapat memberikan beberapa manfaat, antara lain:

1. Hasil dari penelitian ini akan memberikan informasi terkait dengan pengaruh penambahan unsur Zn terhadap parameter anoda korban berbasis aluminium yaitu berupa potensial, efisiensi, laju korosi, dan laju konsumsi serta struktur mikro dari anoda korban tersebut.
2. Hasil penelitian ini akan memberikan rekomendasi untuk penelitian selanjutnya dengan topik anoda korban terkait dengan pemilihan perancangan anoda korban menggunakan komposisi yang telah ada ataukah dengan menambahkan unsur paduan pada anoda korban konvensional untuk mendapatkan hasil yang terbaik.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Korosi

Korosi merupakan suatu kerusakan yang terjadi secara spontan dan dialami oleh material khususnya logam dan paduannya. Korosi dapat disebabkan karena adanya reaksi meliputi reaksi kimia, biokimia, dan elektrokimia antara logam dan paduannya dengan lingkungan-lingkungan yang korosif. Lingkungan korosif meliputi kelembaban, oksigen, larutan asam organik maupun anorganik, tekanan tinggi, temperatur, dan klorida. Pada saat terjadi korosi, logam akan berubah ke bentuk stabil secara termodinamika seperti oksida, hidroksida, garam, atau karbonat (Popov, 2015).

Terjadinya korosi tak lepas dari empat komponen yaitu: anoda, katoda, elektrolit, dan kontak metalik. Anoda merupakan elektroda yang bermuatan negatif dan bersifat lebih reaktif karena melepaskan elektron. Pelepasan elektron pada anoda merupakan reaksi oksidasi. Katoda merupakan elektroda yang bermuatan positif dan akan cenderung menerima elektron. Reaksi reduksi terjadi pada katoda dimana ditandai dengan penerimaan elektron yang dilepaskan oleh anoda. Elektrolit merupakan larutan yang bersifat konduktif, seperti larutan garam. Kontak metalik (*metallic path*) yaitu anoda dan katoda terhubung oleh konduktor metalik. Pada konduktor metalik akan terjadi perpindahan arus listrik dari katoda yang bermuatan positif ke anoda yang bermuatan negatif, sedangkan perpindahan elektron terjadi dengan arah yang berkebalikan (Ahmad, 2006).

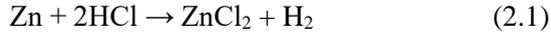
2.1.1 Aspek Peninjauan Korosi

Korosi dapat ditinjau dari beberapa aspek antara lain adalah sebagai berikut (Fontana, 1987):

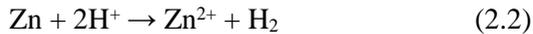
1. Elektrokimia

Sifat elektrokimia dari proses korosi dapat dicontohkan oleh reaksi yang terjadi antara atom seng dengan asam klorida. Ketika seng diletakkan dalam larutan asam klorida yang encer, maka akan

terjadi reaksi yang kuat, yaitu adanya evolusi gas hidrogen dan seng akan larut dan membentuk larutan seng klorida. Reaksi tersebut dapat dituliskan sesuai Persamaan 2.1.



Karena ion klorida tidak ikut bereaksi, maka Persamaan 2.1 dapat disederhanakan menjadi Persamaan 2.2.



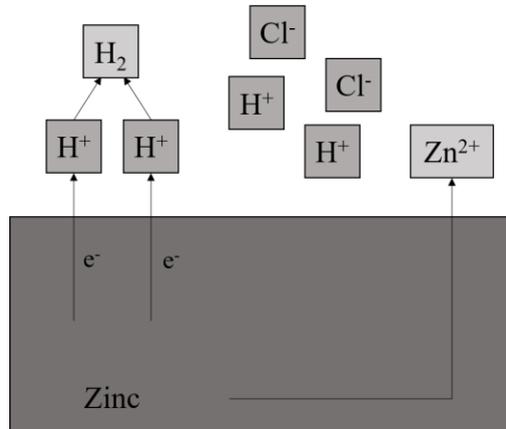
Jadi, seng akan bereaksi dengan ion hidrogen dari larutan asam untuk membentuk ion seng dan gas hidrogen. Dari persamaan di atas dapat dilihat bahwa selama reaksi, seng dioksidasi menjadi ion seng dan ion hidrogen direduksi menjadi hidrogen. Sehingga, dari Persamaan 2.2 dapat dengan mudah dibagi menjadi dua reaksi, oksidasi seng seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 2.3 dan reduksi ion hidrogen pada Persamaan 2.4.



Suatu oksidasi atau reaksi anodik merupakan suatu reaksi yang ditandai dengan adanya peningkatan valensi atau elektron yang terbentuk. Sedangkan penurunan valensi atau konsumsi elektron menandakan reduksi atau reaksi katodik. Persamaan 2.3 dan Persamaan 2.4 merupakan persamaan setengah reaksi dimana kedua reaksi tersebut terjadi secara bersamaan dan pada laju yang sama pada permukaan logam. Hal ini mengarah pada salah satu prinsip dasar korosi yang paling penting yaitu selama proses korosi logam, laju oksidasi sama dengan laju reduksi (dalam hal produksi dan konsumsi elektron).

Konsep oksidasi dan reduksi di atas diilustrasikan pada Gambar 2.1. Disini atom seng berubah menjadi ion seng dan dua

elektron. Elektron-elektron yang berada di dalam logam akan segera dikonsumsi ketika terjadi proses evolusi hidrogen. Pada beberapa reaksi korosi, reaksi oksidasi terjadi secara seragam pada permukaan, sedangkan pada kasus lain dapat terjadi secara lokal atau pada area tertentu.



Gambar 2.1 Reaksi elektrokimia pada proses korosi seng dan larutan asam klorida

Korosi yang terjadi pada seng dalam asam hidroklorik adalah proses elektrokimia dimana setiap reaksi yang dapat dibagi menjadi dua (atau lebih) reaksi parsial oksidasi dan reduksi dapat disebut sebagai reaksi elektrokimia.

Jika dilihat dari persamaan setengah reaksi pada persamaan oksidasi dan reduksi, maka persamaan yang terjadi dapat diklasifikasikan menjadi persamaan yang lebih umum. Persamaan umum dari reaksi anodik atau oksidasi seperti ditunjukkan pada Persamaan 2.5.



dimana pada persamaan reaksi tersebut, jumlah elektron yang terproduksi 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 2.6, reduksi oksigen pada larutan asam seperti pada Persamaan 2.7, reduksi oksigen pada larutan basa atau netral seperti pada Persamaan 2.8, reduksi ion logam pada Persamaan 2.9, serta reaksi endapan logam pada Persamaan 2.10.



Evolusi hidrogen adalah reaksi katodik yang paling umum karena asam atau media asam sering dijumpai. Reduksi oksigen sangat umum, karena setiap larutan berair yang kontak dengan udara mampu menghasilkan reaksi ini. Reduksi ion logam dan endapan logam adalah reaksi yang jarang ditemukan karena reaksi ini biasanya terjadi dalam aliran proses kimia. Semua reaksi tersebut merupakan reaksi yang membutuhkan atau menyerap elektron.

Selama proses korosi, ada kemungkinan terjadinya lebih dari satu reaksi reduksi maupun oksidasi. Ketika korosi terjadi pada suatu paduan, maka masing-masing komponen pepaduan akan terkorosi dan larut menjadi ion masing-masing dalam suatu larutan. Sebagai suatu contoh, adalah korosi yang terjadi pada logam seng dalam larutan asam klorida yang teraerasi akan terjadi dua reaksi katodik yang memungkinkan yaitu evolusi hidrogen dan reduksi oksigen. Pada permukaan seng ada dua reaksi yang menyerap elektron. Karena laju oksidasi sama dengan laju reduksi,

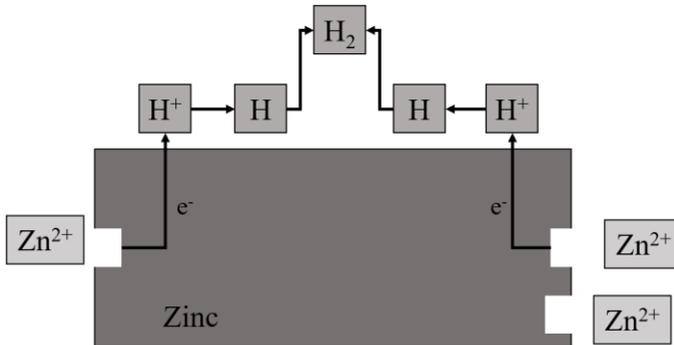
maka laju reduksi yang meningkat pada kasus ini akan meningkatkan laju terlarutnya seng ke dalam larutan. Hal ini menunjukkan bahwa larutan asam yang mengandung oksigen terlarut memiliki sifat yang lebih korosif dibandingkan dengan larutan asam tanpa kandungan oksigen terlarut.

Karena reaksi anodik dan katodik yang terjadi pada proses korosi saling bergantung satu sama lain, dan juga laju dari reaksi tersebut sama, maka laju korosi dapat dikurangi dengan cara mengurangi laju dari salah satu reaksi tersebut. Misalnya, untuk mengurangi kandungan oksigen terlarut dalam suatu larutan maka dapat dilakukan dengan menghindari kontak antara larutan dengan udara ataupun dengan mengurangi jumlah udara yang telah terlarut dalam larutan tersebut. Jika permukaan dari suatu logam terdapat perlakuan pelapisan menggunakan cat atau lapisan nonkonduksi yang lain, laju reaksi anodik dan katodik akan berkurang dan begitu pula dengan laju korosinya. Beberapa faktor yang mempengaruhi aspek elektrokimia adalah sebagai berikut:

a. Polarisasi

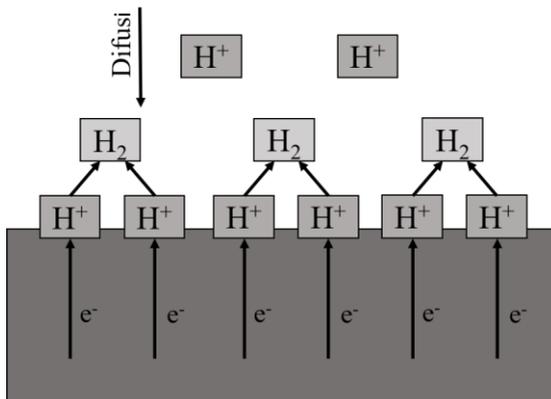
Laju reaksi elektrokimia dibatasi oleh berbagai faktor fisik dan kimia. Oleh karena itu, reaksi elektrokimia dikatakan terpolarisasi atau terhambat oleh faktor-faktor lingkungan ini. Polarisasi dapat dibagi menjadi dua jenis, polarisasi aktivasi dan polarisasi konsentrasi.

Polarisasi aktivasi mengacu pada urutan proses elektrokimia yang terjadi pada antarmuka logam dan-elektrolit. Hal dapat digambarkan melalui reaksi evolusi hidrogen yang terjadi pada seng di lingkungan asam. Secara skematis urutan terjadinya polarisasi aktivasi dapat dilihat pada Gambar 2.2. Dimulai dengan proses adsorpsi atau melekatnya hidrogen ke permukaan yang kemudian menyebabkan terjadinya transfer elektron. Kemudian, dua atom hidrogen yang telah mengalami transfer elektron kaan bergabung dan membentuk gelembung gas hidrogen (H_2).



Gambar 2.2 Reaksi reduksi hidrogen selama polarisasi aktivasi

Polarisasi konsentrasi mengacu pada reaksi kimia yang dipengaruhi oleh difusi dalam elektrolit. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 2.3 yang merupakan kasus evolusi hidrogen. Dalam kasus ini, jumlah ion hidrogen dalam larutan cukup rendah, dan laju reduksi dikontrol oleh difusi ion hidrogen pada permukaan logam.



Gambar 2.3 Polarisasi konsentrasi pada evolusi hidrogen

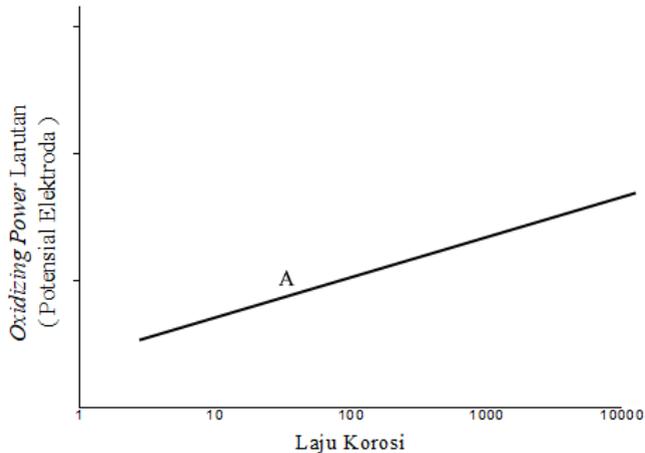
Polarisasi aktivasi biasanya merupakan faktor pengontrol pada korosi yang terjadi di media yang mengandung spesies aktif dengan konsentrasi yang tinggi seperti larutan asam. Sementara itu, polarisasi konsentrasi pada umumnya akan mendominasi pada konsentrasi dari spesies yang tereduksi relatif kecil seperti pada larutan asam yang diencerkan dan larutan garam yang teraerasi. Dalam beberapa kasus polarisasi konsentrasi pada disolusi logam biasanya sangat kecil sehingga dapat diabaikan, polarisasi ini menjadi penting hanya pada reaksi reduksi.

Pembedaan antara polarisasi aktivasi dan konsentrasi tidak dapat terlalu dipaksakan. Apapun jenis polarisasi yang menjadi pengontrol reaksi reduksi, efek dari lingkungan dimana terjadinya reaksi tersebut merupakan suatu hal yang memberikan dampak besar terhadap reaksi tersebut. Misalnya, ketika laju difusi meningkat, maka akan terjadi penurunan efek dari polarisasi konsentrasi dan kemudian meningkatkan laju reaksi. Jadi, dengan menambah kecepatan agitasi suatu media korosi akan menyebabkan meningkatnya laju korosi hanya ketika proses katodik dikontrol oleh polarisasi reduksi. Ketika reaksi anodik dan katodik yang terjadi dikontrol oleh polarisasi aktivasi, maka pengaruh kecepatan agitasi akan menjadi nihil terhadap laju korosi yang terjadi (Fontana, 1987).

b. Pasivitas

Pasivitas suatu logam merupakan suatu hal yang sangat kompleks dan terjadi pada kondisi yang spesifik. Secara sederhana, pasivitas dapat mengacu pada hilangnya reaktivitas kimia yang terjadi pada suatu logam atau paduan pada suatu lingkungan tertentu. Pada kasus ini, logam akan bersifat menjadi lebih mulia (*inert*) seperti emas dan platina. Logam yang biasanya mengalami fenomena pasivitas yaitu antara lain besi, nikel, silikon, krom, dan titanium atau paduan yang mengandung logam-logam tersebut. Gambaran

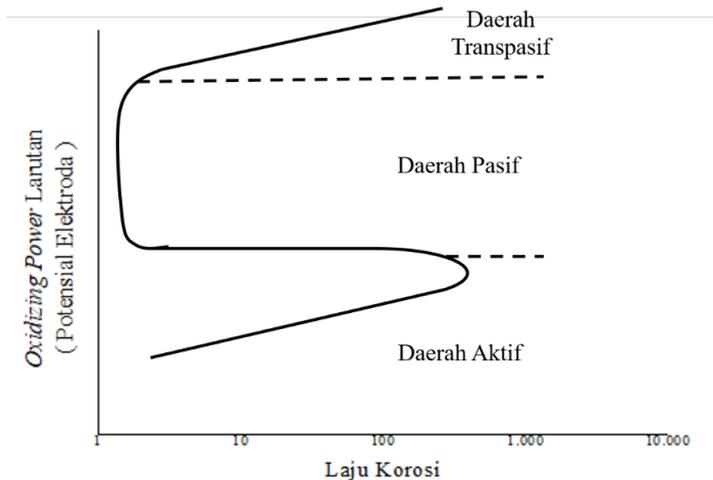
mengenai fenomena pasivitas pada logam yang tidak memiliki efek pasivitas ditunjukkan oleh Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Laju korosi suatu logam tanpa efek pasivitas terhadap fungsi potensial elektroda

Pada Gambar 2.5 menunjukkan efek pasivitas pada suatu logam atau paduan. Perilaku logam atau paduan ini dapat dibagi menjadi tiga wilayah: aktif, pasif, dan transpasif. Di wilayah aktif perilaku logam atau paduan ini identik dengan logam normal. Ketika dilakukan sedikit penambahan *oxidizing power* pada larutan akan menyebabkan naiknya laju korosi secara cepat. Penambahan lebih banyak zat pengoksidasi akan menyebabkan penurunan secara tiba-tiba pada laju korosinya. Hal ini berkaitan dengan permulaan wilayah pasif. Jika lebih banyak zat pengoksidasi ditambahkan, laju korosi menunjukkan penurunan mendadak. Ini sesuai dengan awal wilayah pasif. Selanjutnya, pada konsentrasi oksidator yang sangat tinggi atau dengan oksidator yang sangat kuat, laju

korosi kembali meningkat seiring meningkatnya daya oksidator. (Fontana, 1987).



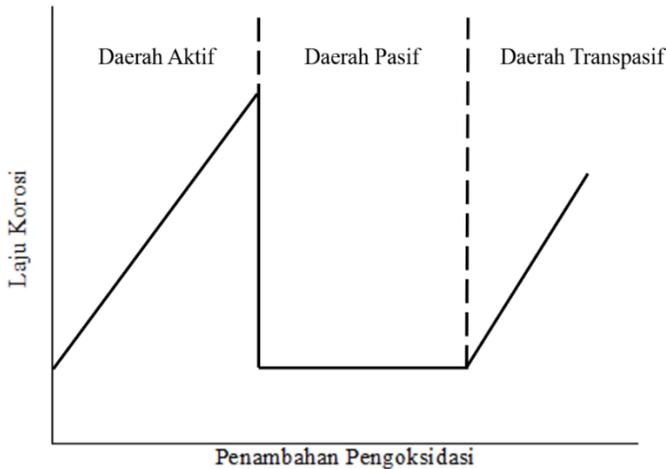
Gambar 2.5 Laju korosi suatu logam dengan efek pasivitas terhadap fungsi potensial elektroda

2. Aspek Lingkungan

Pada penerapan di dunia industri sering diinginkan beberapa variabel dari proses. Ada beberapa hal yang menjadi faktor dalam mempengaruhi laju korosi. Beberapa faktor berikut merupakan variabel lingkungan yang sering terjadi dalam mempengaruhi laju korosi, antara lain:

a. Pengaruh Oksigen dan Pengoksidasi

Gambar 2.6 menunjukkan pengaruh pengoksidasi terhadap suatu logam atau paduan. Berdasarkan pada gambar, dapat dibagi menjadi tiga daerah yang berbeda sama dengan pembahasan sebelumnya tentang pasivitas logam.



Gambar 2.6 Pengaruh penambahan pengoksidasi terhadap laju korosi

Pada suatu logam yang memiliki transisi aktif-pasif, pasivitas dapat diperoleh hanya dengan kadar pengoksidasi yang cukup, atau penambahan pengoksidasi yang kuat terhadap suatu medium korosi. Peningkatan laju korosi seiring penambahan konsentrasi seperti pada daerah 1 merupakan contoh dari karakteristik material monel dan tembaga ketika berada di larutan asam yang mengandung oksigen. Kedua material ini tidak mengalami pasivasi. Besi dapat terpasivasi di dalam air, namun karena kelarutan oksigen yang terbatas menyebabkan tidak mencukupi untuk mencapai kondisi pasif dalam beberapa kasus.

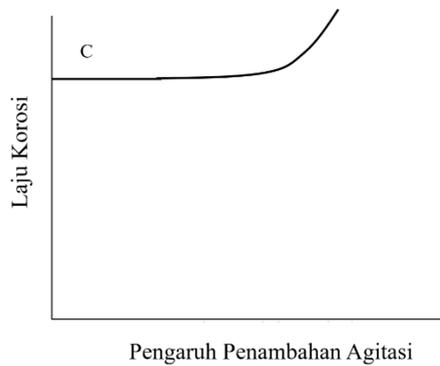
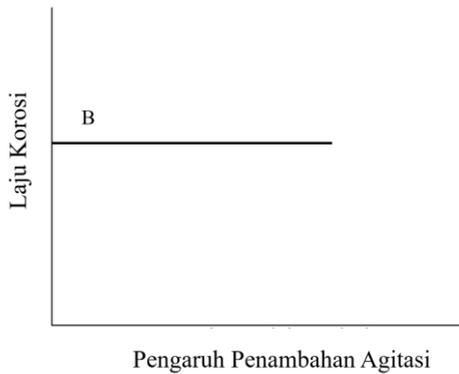
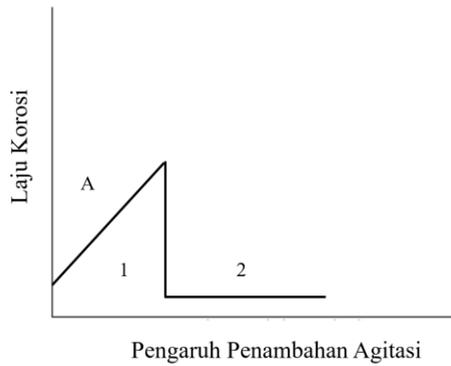
Ketika suatu logam yang memiliki transisi aktif-pasif berada pada daerah pasif ketika berada di suatu media korosi, penambahan agen pengoksidasi tidak akan memberikan dampak terhadap laju korosinya. Kondisi ini pada umumnya terjadi pada logam aktif-pasif ketika dicelupkan ke media pengoksidasi berupa asam nitrat atau besi klorida. Pada daerah 2 dan 3 menunjukkan perilaku dimana suatu logam

berada pada kondisi pasif pada awalnya kemudian ditambahkan dengan pengoksidasi yang sangat kuat hingga menyebabkan terjadinya transisi ke daerah transpasif. Kondisi ini biasanya terjadi pada material *stainless steel* yang diberikan pengoksidasi berupa kromat pada larutan atau media korosinya.

Dari beberapa penjelasan tersebut dapat disimpulkan bahwa dampak penambahan pengoksidasi atau keberadaan oksigen pada laju korosi bergantung pada jenis media maupun logam itu sendiri. Laju korosi dapat meningkat seiring dengan penambahan pengoksidasi, atau pengoksidasi bahkan tidak memberikan dampak terhadap laju korosi, atau bahkan perilaku yang sangat kompleks pun dapat terjadi (Fontana, 1987).

b. Pengaruh agitasi

Sama seperti pengaruh pengoksidasi, pengaruh agitasi atau kecepatan terhadap laju korosi juga memiliki pengaruh yang kompleks dan bergantung pada kondisi media korosi dan karakteristik logam itu sendiri. Pengaruh adanya agitasi atau kecepatan terhadap laju korosi dapat dilihat pada Gambar 2.7. Proses korosi yang dikontrol oleh polarisasi aktivasi, dimana agitasi dan kecepatan tidak memiliki pengaruh terhadap laju korosi, ditunjukkan oleh kurva B pada Gambar 2.7. Jika proses korosi dikontrol oleh difusi katodik, maka agitasi akan mempengaruhi naiknya laju korosi seperti yang ditunjukkan pada kurva A, pada bagian 1. Kondisi ini pada umumnya terjadi ketika keberadaan pengoksidasi dalam kadar yang kecil, dimana pengoksidasi digunakan untuk melarutkan oksigen dalam asam atau air.



Gambar 2.7 Pengaruh kecepatan terhadap laju korosi

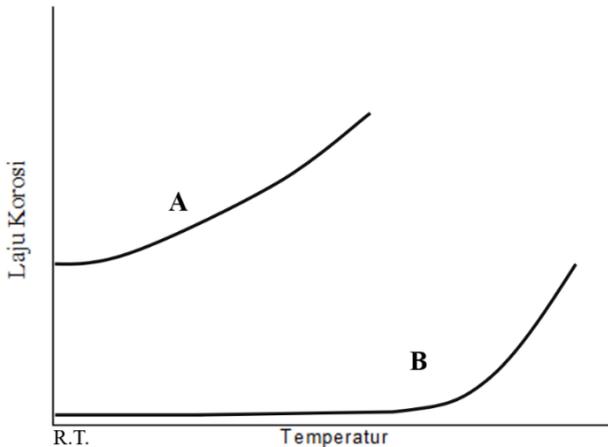
Ketika proses korosi yang terjadi dikontrol oleh difusi dan logam telah berada pada kondisi terpasifasi, maka perilaku laju korosi dapat dilihat pada kurva A pada daerah 1 dan 2. Dimana dengan seiring bertambahnya agitasi, logam akan mengalami transisi dari aktif menjadi pasif. Material yang mudah terpasifkan seperti *stainless steel* dan titanium sering kali akan lebih tahan terhadap korosi ketika agitasi yang diberikan pada media korosi meningkat.

Beberapa logam memiliki ketahanan terhadap korosi pada media tertentu dengan cara membentuk lapisan protektif pada permukaannya. Lapisan ini berbeda dengan lapisan pasif biasa yang telah terlihat dan bersifat kurang kuat. Sebagai contoh bahwa timbal dan baja memiliki ketahanan terhadap serangan korosi pada lingkungan yang mengandung sulfur dengan membentuk lapisan sulfat yang tidak terlarut. Ketika material lain semacam kedua material ini berada pada lingkungan korosif dengan kecepatan yang tinggi, maka kerusakan atau hilangnya lapisan protektif bisa saja terjadi yang akan menyebabkan percepatan laju korosi seperti kurva C. Hal ini selanjutnya disebut dengan korosi erosi. Sampai dengan rusaknya lapisan protektif dari suatu logam di lingkungan tertentu, maka pengaruh kecepatan atau agitasi tidak akan menyebabkan naiknya laju korosi pada logam tersebut (Fontana, 1987).

c. Pengaruh temperatur

Temperatur memiliki pengaruh pada hampir seluruh laju reaksi kimia. Gambar 2.8 menunjukkan pengaruh dari temperatur terhadap laju korosi suatu logam. Kurva A menggambarkan perilaku dari beberapa logam di lingkungan tertentu seperti 18Cr-18Ni dalam H_2SO_4 , Nikel dalam HCl, dan Fe dalam HF. Penambahan temperatur menyebabkan kenaikan laju korosi yang sangat cepat pada material-material tersebut seperti ditunjukkan pada kurva A yang membentuk kurva eksponensial. Pada kurva B menunjukkan bahwa pada awalnya kenaikan temperatur

tidak berpengaruh secara signifikan namun kemudian diikuti oleh naiknya laju korosi dengan sangat cepat pada temperatur yang sangat tinggi. Contoh dari laju korosi pada kurva B ini adalah korosi yang terjadi pada 18-8 *stainless steel* yang berada pada lingkungan asam nitrat. Peningkatan temperatur pada asam nitrat memberikan dampak yang sangat besar terhadap kekuatan oksidasinya. Pada temperatur yang rendah dan sedang, *stainless steel* pada asam nitrat dalam keadaan pasif dan sangat dekat dengan daerah transpasif. Sehingga, hanya kenaikan yang sangat signifikan pada kekuatan pengoksidasi lah yang akan menyebabkan kenaikan yang sangat signifikan pula pada laju korosinya. Hal ini juga dapat terjadi pada material lain seperti monel dalam HF dan Nikel dalam NaOH. Ketika laju korosi sangat rendah pada temperatur yang rendah pula, dan meningkat secara eksponensial pada temperatur yang tinggi, maka perilaku korosinya digambarkan seperti pada kurva B. Jadi, hal ini menunjukkan bahwa kenaikan temperatur akan berpengaruh terhadap meningkatnya laju korosi menjadi lebih cepat, kurang sesuai plot kenaikan temperatur terhadap laju korosi disebabkan oleh kurang sesuai pemilihan skala dalam pembuatan kurva (Fontana, 1987).



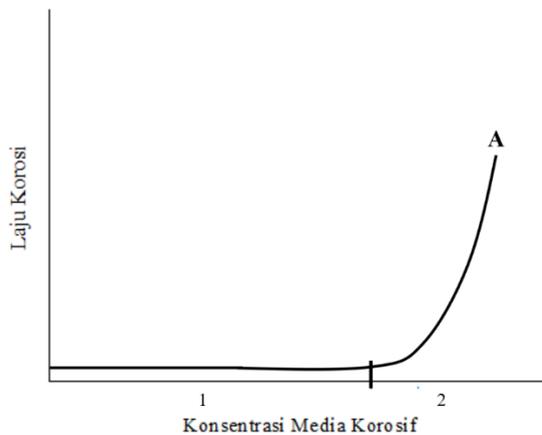
Gambar 2.8 Pengaruh temperatur terhadap laju korosi

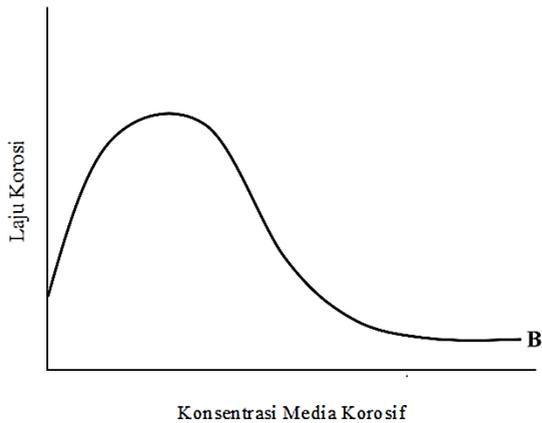
d. Pengaruh konsentrasi

Gambar 2.9 menunjukkan pengaruh konsentrasi media korosif terhadap laju korosi. Beberapa material yang menunjukkan efek pasivitas kurang begitu terpengaruh terhadap konsentrasi media korosif pada laju korosinya seperti ditunjukkan pada kurva A daerah 1. Material lain menunjukkan perilaku yang sama kecuali pada konsentrasi yang sangat tinggi, ketika laju korosinya meningkat dengan sangat cepat seperti ditunjukkan pada kurva A, daerah 1 dan 2. Timbal merupakan salah satu contoh dari perilaku tersebut. Hal itu dikarenakan timbal sulfat yang membentuk lapisan protektif pada asam sulfat dengan konsentrasi yang rendah, akan terlarut pada asam sulfat dengan konsentrasi yang lebih tinggi atau lebih pekat.

Perilaku dari asam yang terlarut pada semua konsentrasi air sering kali digambarkan oleh kurva B. Pada awalnya ketika konsentrasi media korosif meningkat, maka laju korosi dari logam juga akan meningkat. Hal ini disebabkan karena ion hidrogen yang merupakan spesies aktif akan

meningkat seiring dengan meningkatnya konsentrasi asam. Namun, seiring dengan peningkatan konsentrasi asam lebih lanjut, laju korosi mencapai nilai maksimum dan selanjutnya akan menurun. Fenomena ini sangat jelas karena asam dengan konsentrasi yang sangat tinggi akan menyebabkan berkurangnya ionisasi. Hal ini menyebabkan beberapa asam seperti sulfat, asetat, hydroflourat, dan lainnya akan menjadi *inert* ketika dalam kondisi murni, atau pada 100% kadar konsentrasinya dan berada pada temperatur sedang (Fontana, 1987).



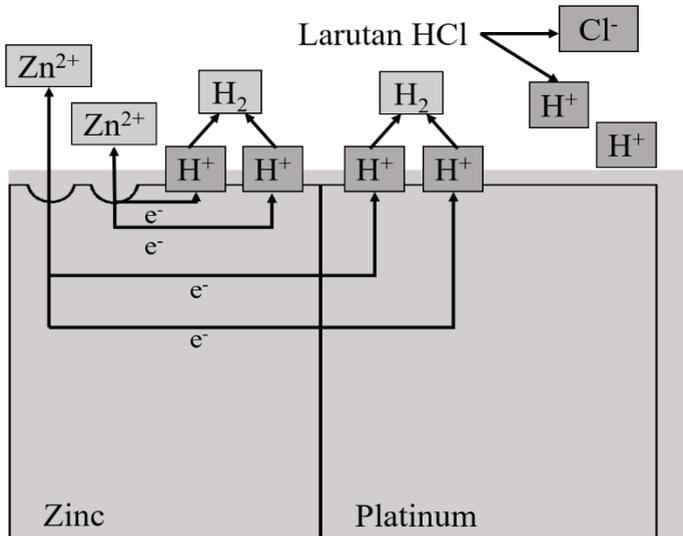


Gambar 2.9 Pengaruh konsentrasi terhadap laju korosi

e. Pengaruh efek galvanik

Ada banyak sekali aplikasi pada dunia industri yang melibatkan kontak antara dua logam. Pada aliran proses dan penyusunan pemipaan yang kompleks, logam dan paduan logam yang berbeda sering kali kontak satu sama lain dalam lingkungan atau media yang korosif. Sebagai contoh selambar seng dicelupkan dalam larutan asam klorida dan disambungkan dengan logam yang lebih mulia seperti platina yang ditunjukkan pada Gambar 2.10. Karena platina merupakan logam yang *inert* pada jenis media ini menyebabkan peningkatan permukaan dimana evolusi hidrogen dapat berlangsung. Lebih lanjut, evolusi hidrogen lebih cenderung terjadi pada permukaan platina dibandingkan dengan seng. Kedua faktor tersebut menyebabkan meningkatnya laju reaksi katodik yang tentu akan meningkatkan laju korosi dari seng. Pada kasus ini, pengaruh galvanik disebabkan pula oleh penambahan zat pengoksidasi pada media korosi yang menyebabkan laju konsumsi elektron menjadi meningkat dan akhirnya berdampak pada peningkatan laju korosi. Penting untuk

diketahui, bahwa sel galvanik tidak selalu meningkatkan laju korosi dari suatu logam, dalam beberapa kasus faktor-faktor lain bahkan dapat mengurangi laju korosi dari suatu logam tersebut.



Gambar 2.10 Ilustrasi pengaruh efek galvanik

2.1.2 Jenis- jenis Korosi

Korosi dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis, salah satunya adalah klasifikasi berdasarkan temperatur terjadinya korosi yaitu korosi basah (*wet corrosion*) dan korosi kering (*dry corrosion*). Korosi basah terjadi ketika terdapat larutan yang berperan sebagai elektrolit dalam suatu sel korosi. Korosi basah merupakan korosi yang paling umum dan sering terjadi contohnya adalah korosi pada baja yang disebabkan oleh air, dimana air berperan sebagai elektrolit. Korosi kering terjadi ketika tidak adanya larutan ataupun ketika suatu logam atau paduannya terdapat pada lingkungan yang berada di atas titik embun (*dew point*). Uap air dan gas merupakan contoh zat yang menyebabkan terjadinya

korosi kering. Korosi kering ini biasanya terjadi pada temperatur yang tinggi. Contoh dari korosi kering adalah korosi pada baja yang terdapat pada furnace (Fontana, 1987).

Selain itu, korosi juga dapat diklasifikasikan menjadi beberapa bentuk korosi antara lain:

1. Korosi seragam (*uniform corrosion*)
2. Korosi galvanik (*galvanic corrosion*)
3. Korosi sumuran (*pitting corrosion*)
4. Korosi celah (*crevice corrosion*)
5. Korosi retak tegang (*stress corrosion cracking*)
6. Korosi batas butir (*intergranular corrosion*)
7. *Selective leaching*
8. Korosi erosi (*erosion corrosion*)
9. *Hydrogen damage*

(Popov, 2015)

2.1.3 Mekanisme Terjadinya Korosi

Pada umumnya korosi yang terjadi pada logam melibatkan reaksi elektrokimia, dimana akan terjadi serah terima elektron dari satu elektroda ke elektroda yang lainnya. Atom logam yang melepas atau kehilangan ion elektronnya akan disebut sebagai anoda dan proses pelepasan ion elektron ini disebut dengan reaksi oksidasi. Misalnya, sebuah logam dengan elektron valensi n akan mengalami reaksi oksidasi menurut Persamaan 2.11.



dimana M akan berubah menjadi bermuatan positif M^{n+} dan e^{-} menunjukkan bahwa reaksi tersebut melepaskan elektron sebanyak n . Reaksi oksidasi tersebut biasa disebut dengan reaksi anodik karena berlangsung di anoda.

Elektron yang telah dilepaskan oleh anoda pada reaksi oksidasi selanjutnya akan diterima oleh logam lain yang bertindak sebagai katoda dan akan mengalami reaksi reduksi. Beberapa

kemungkinan terjadi reaksi reduksi ini dapat berbeda tergantung pada elektrolitnya, seperti:

1. Larutan asam yang mempunyai konsentrasi ion H^+ yang tinggi seperti pada Persamaan 2.12.



2. Larutan asam dengan kandungan oksigen terlarut seperti pada Persamaan 2.13.



3. Larutan netral dan basa dengan kandungan oksigen terlarut seperti pada Persamaan 2.14.



4. Reaksi reduksi ion logam *multivalence* seperti pada Persamaan 2.15.

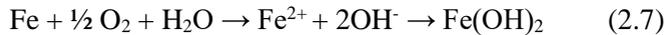


5. Reduksi total ion logam dari ionic menjadi netral pada Persamaan 2.16.

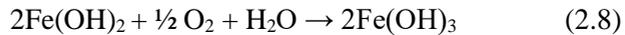


Reaksi elektrokimia terjadi apabila setidaknya terdapat satu reaksi oksidasi dan satu reaksi reduksi, dan merupakan gabungan dari reaksi tersebut. Reaksi oksidasi yang terjadi tanpa adanya reaksi reduksi tidak dapat disebut sebagai reaksi elektrokimia, namun biasanya disebut dengan reaksi setengah sel. Laju reaksi oksidasi akan sama dengan laju reaksi reduksi, hal ini disebabkan karena elektron yang dilepaskan oleh anoda akan sepenuhnya digunakan untuk reaksi reduksi di katoda.

Contoh dari reaksi elektrokimia pada proses korosi adalah terjadinya karat pada baja yang diletakkan pada lingkungan air yang mengandung oksigen terlarut. Proses ini akan terjadi dalam dua tahap, yang pertama yaitu oksidasi Fe menjadi Fe^{2+} berupa $\text{Fe}(\text{OH})_2$ seperti pada Persamaan 2.7.



kemudian oksidasi berlanjut dan akan menghasilkan Fe^{3+} berupa $\text{Fe}(\text{OH})_3$ seperti pada Persamaan 2.18.



$\text{Fe}(\text{OH})_3$ merupakan produk korosi berupa karat yang biasa kita lihat pada permukaan baja (Callister, 2010).

2.2 Pengendalian Korosi

Korosi pada suatu logam dapat dikendalikan ataupun dihambat dengan beberapa cara antara lain adalah menggunakan logam pada lingkungan yang bersifat imun, membuat penghalang yang berfungsi untuk menghalangi adanya reaksi antara logam dengan lingkungannya, menambahkan arus listrik, ataupun dengan mengubah lingkungan dari logam agar korosi bisa terhambat. Beberapa metode pengendalian tersebut digunakan berdasarkan beberapa pertimbangan antara lain penggunaan logam, biaya, sampai perkiraan masa pakai dari suatu struktur. Bahkan penggunaan gabungan dari beberapa metode tersebut bisa saja digunakan, seperti misalnya pada lambung kapal yang memanfaatkan lapisan penghalang berupa coating dan rekayasa arus dengan menggunakan perlindungan katodik.

Beberapa metode yang sering digunakan untuk pengendalian korosi antara lain:

1. Desain material

Yang dimaksud dengan desain material disini adalah tentang pemilihan material yang akan digunakan. Pemilihan material dapat

didasarkan atas beberapa aspek diantaranya adalah aspek ekonomi yang harus disesuaikan dengan ketahanan logam yang diinginkan. Beberapa sifat atau properties dari suatu material adalah sifat mekaniknya dan *machinability* dari suatu material. Selain itu yang tak kalah penting diperhatikan adalah dari aspek korosi dimana logam diharapkan dapat terproteksi, misalnya dengan menghindari adanya kontak galvanik antara dua logam yang berbeda.

2. Proteksi menggunakan pelapisan (*protective coatings*)

Sebelum dilakukan proses pelapisan maka logam harus dipastikan telah dipersiapkan dengan baik terutama untuk bagian permukaan logam yang akan dilapisi. Pada umumnya permukaan logam harus bersih dari kerak, minyak, lapisan coating sebelumnya, cat, dan sebagainya. Proteksi menggunakan teknik pelapisan (*coating*) dapat dibedakan menjadi dua yaitu *metallic coating* dan *non-metallic coating*.

3. Penggunaan inhibitor

Inhibitor merupakan suatu zat yang ditambahkan pada suatu media korosif yang biasanya berupa larutan, dan berfungsi untuk menghambat laju korosi dari suatu logam. Inhibitor yang digunakan harus sesuai dengan media korosifnya dimana ia tidak boleh mengganggu atau merusak suatu karutan yang diberikan inhibitor. Inhibitor biasanya spesifik terhadap satu larutan dan satu jenis logam. Cara kerja inhibitor adalah dengan menghambat laju reaksi anodik maupun laju reaksi katodik ataupun menghambat laju reaksi keduanya. Berdasarkan cara kerjanya inhibitor umumnya dibedakan menjadi tiga yaitu anodik, katodik, dan adsorpsi.

4. Proteksi katodik

Proteksi katodik menggunakan prinsip elektrokimia dalam melakukan pengendalian korosi. Dalam hal ini struktur yang ingin dilindungi akan dibuat berperan sebagai katoda pada sel elektrokimia dan potensialnya diubah menjadi lebih negatif dimana logam tersebut akan berada pada lokasi imun (dalam diagram *pourbaix*). Setelah logam menjadi katoda dan berada pada daerah imunnya maka dapat dikatakan logam tersebut telah terproteksi.

Reaksi yang terjadi pada bagian permukaan struktur yang hendak dilindungi yaitu berupa reduksi oksigen ataupun evolusi hidrogen. Proteksi katodik dapat dibedakan menjadi dua jenis yaitu dengan menggunakan anoda korban dan dengan menggunakan arus paksa yang didapat dari sumber arus searah (Hammonds, 1989).

2.3 Proteksi Katodik

Proteksi katodik merupakan salah satu metode pengendalian korosi pada suatu logam dengan cara menjadikan logam tersebut berperan sebagai katoda dalam suatu sel elektrokimia. Cara yang paling sederhana dalam melakukan proteksi katodik ini adalah dengan menghubungkan suatu logam ke logam lain yang lebih mudah terkorosi atau “logam korban” untuk berperan sebagai anoda pada sel elektrokimia, yang selanjutnya disebut dengan anoda korban. Logam yang dijadikan anoda kemudian akan mengalami korosi sedangkan logam yang dilindungi berperan sebagai katoda dimana logam tersebut akan terlindungi. Namun, pada beberapa struktur penggunaan anoda korban ini tidak cukup digunakan, misalnya pada jaringan pipa yang jangkauannya panjang dan luas. Pada keadaan tersebut biasanya akan ditambahkan sumber arus searah untuk mencukupi kebutuhan arus.

Sistem proteksi katodik digunakan secara luas pada beberapa lingkungan. Beberapa aplikasi umum dari sistem proteksi katodik ini adalah perlindungan korosi pada baja dalam air atau pipa pengangkut bahan bakar dan tangki penyimpanan; bahkan sistem proteksi katodik ini juga diterapkan pada lambung kapal dan struktur di lepas pantai.

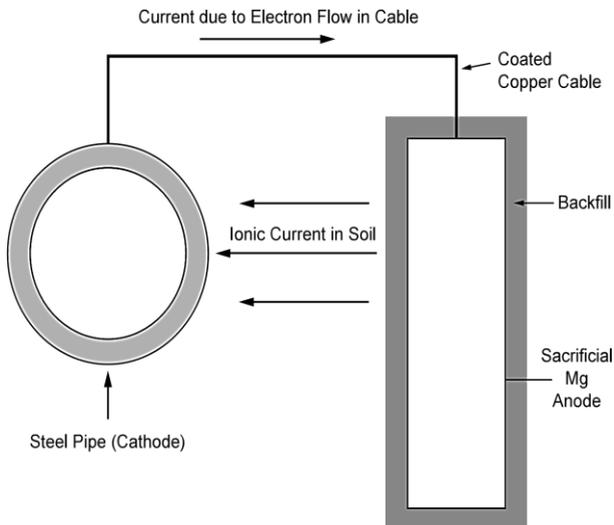
Pada dasarnya terdapat dua metode yang digunakan pada sistem proteksi katodik, yaitu:

1. Dengan menambahkan logam yang bersifat lebih aktif yang akan digunakan sebagai anoda yang akan melindungi logam yang ingin dilindungi.
2. Dengan menambahkan arus searah yang disambungkan dengan anoda untuk memberikan proteksi.

Secara umum, proteksi katodik dibagi menjadi dua tipe yaitu *Sacrificial Anode Cathodic Protection (SACP)* dan *Impressed Current Cathodic Protection (ICCP)* (Bahadori, 2014)

2.3.1 *Sacrificial Anode Cathodic Protection (SACP)*

Proteksi katodik akan efektif ketika potensial dari permukaan baja terpolarisasi menjadi lebih negatif sampai permukaan tersebut memiliki potensial yang seragam. Pada tahap ini, dorongan untuk terjadinya reaksi korosi pada permukaan yang telah dilindungi akan hilang. Sementara itu anoda korban akan terus mengalami korosi hingga anoda korban tersebut habis dan perlu diganti secara berkala. Polarisasi dari struktur yang lebih luas akan menimbulkan adanya aliran elektron dari anoda menuju katoda, sehingga kedua logam antara anoda dan katoda harus memiliki konduktivitas yang sama baiknya (Bahadori, 2014).



Gambar 2.11 Skema proteksi katodik menggunakan anoda Mg di dalam tanah (Roberge, 2000)

Proteksi katodik SACP dapat diterapkan seperti pada Gambar 2.11, dimana pada sistem proteksi katodik ini menggunakan prinsip yang sama dengan sel galvanik. Anoda korban akan berperan sebagai anoda yang akan mengalami korosi, dan struktur pipa baja sebagai katoda yang akan terproteksi. Struktur baja akan bisa terproteksi karena adanya aliran arus galvanik. Dalam penerapannya mungkin anoda yang dipasang pada sistem proteksi katodik dapat berjumlah lebih dari satu dan anoda yang digunakan dapat berbeda tergantung pada lingkungannya untuk memastikan katoda dapat terproteksi secara keseluruhan. Berikut merupakan beberapa keuntungan menggunakan proteksi katodik anoda tumbal:

1. Tidak membutuhkan arus dari luar sistem
2. Instalasi mudan dan biaya yang diperlukan relatif murah
3. Kemungkinan terjadinya interferensi rendah
4. Perawatan sistem mudah
5. Biaya yang diperlukan lebih murah dibandingkan dengan sistem arus paksa

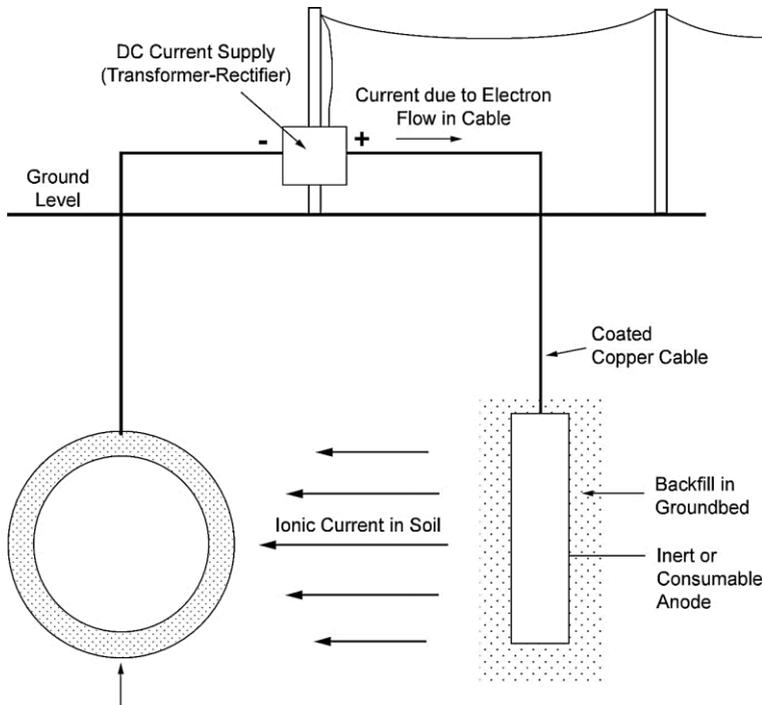
Selain memiliki kelebihan seperti yang telah disebutkan di atas, sistem proteksi katodik anoda korban juga memiliki beberapa kelemahan antara lain:

1. Keluaran arus dan daya yang relatif terbatas, karena tidak adanya sumber tambahan dari luar sistem
2. Anoda yang diperlukan akan terlalu banyak jika sistem diaplikasikan pada lingkungan yang memiliki resistivitas yang relatif tinggi, atau jika digunakan untuk melindungi struktur yang sangat besar. Resistivitas maksimum dari lingkungan adalah 6000 sampai 10000 Ω .cm.
3. Penggantian anoda akan lebih sering dilakukan jika arus yang dibutuhkan sangat banyak.
4. Anoda dapat menambah berat struktur jika dipasang secara langsung pada struktur.

(Roberge, 2000)

2.3.2 Impressed Current Cathodic Protection

Penggunaan sistem proteksi katodik anoda korban atau SACP memiliki kelemahan terutama pada penggunaannya untuk memproteksi struktur yang luas. Arus yang dihasilkan pada sistem proteksi ini tidak cukup untuk memenuhi kebutuhan proteksi dari struktur. Untuk memenuhi kebutuhan arus tersebut maka digunakan sistem proteksi katodik arus paksa atau ICCP. Berbeda dengan sistem proteksi katodik anoda korban, arus yang mengalir dari anoda ke katoda disuplai oleh sumber arus searah. Rangkaian sistem proteksi katodik arus paksa dapat dilihat pada Gambar 2.12. Sumber arus searah digunakan untuk membuat struktur yang ingin dilindungi menjadi lebih katodik. Sistem proteksi arus paksa dapat digunakan untuk melindungi struktur tanpa cat, karena dengan sistem ini akan dihasilkan kapasitas arus yang tinggi sehingga mampu melindungi struktur tersebut (Popov, 2015).



Gambar 2.12 Rangkaian sistem proteksi katodik arus paksa (ICCP) dalam media tanah (Roberge, 2000)

Pada sistem proteksi katodik anoda yang digunakan tidak harus lebih rendah potensialnya daripada struktur yang ingin dilindungi. Hal ini dimaksudkan agar laju konsumsi dari anoda yang digunakan dapat lebih rendah sehingga dapat meningkatkan efisiensi penggunaan anoda tersebut. Laju konsumsi anoda pada sistem ini bergantung pada kapasitas arus yang digunakan dan pada lingkungan mana sistem ini diaplikasikan (elektrolit). Misalnya, laju konsumsi anoda jenis *platinized titanium* akan lebih rendah ketika diaplikasikan untuk melindungi struktur yang berada di bawah tanah daripada di laut. Hal ini disebabkan karena pada lingkungan air laut terdapat beberapa zat kontaminan yang dapat menyebabkan reaksi korosi pada anoda yang digunakan sehingga

menyebabkan laju konsumsi dari anoda tersebut meningkat (Roberge, 2000).

2.4 Potensial Elektrokimia

Salah satu syarat terjadinya korosi adalah adanya perbedaan potensial dari kedua logam yang saling berinteraksi. Potensial elektrokimia digunakan untuk memprediksi terjadinya korosi pada suatu logam. Untuk mengetahui potensial elektrokimia dari berbagai logam, maka dapat dilakukan melalui sel elektrokimia. Dalam sel elektrokimia akan terjadi reaksi oksidasi yang berlangsung di anoda dan reaksi katodik (reduksi) yang berlangsung di katoda. Adanya reaksi tersebut akan berpengaruh pada potensial sel (E_{sel}). Pada sel elektrokimia setidaknya membutuhkan dua logam yang berbeda dimana pada kedua logam tersebut akan berperan sebagai anoda dan ada yang berperan sebagai katoda. Pada saat elektroda tersebut dihubungkan maka akan terjadi reaksi oksidasi dan reduksi yang akan mengubah potensial sel menjadi lebih positif. Persamaan potensial sel seperti pada Persamaan 2.19 (Elayaperumal, 2015).

$$E_{sel} = E_c - E_a \quad (2.9)$$

Pada tabel 2.1 berikut ini merupakan beberapa nilai potensial standar dari beberapa logam:

Tabel 2.1 Potensial standar dari beberapa logam (Elayaperumal, 2015)

$\text{Au}^{3+} + 3e^- = \text{Au}$	+1.498
$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4e^- = 2\text{H}_2\text{O}$	+1.229
$\text{Pt}^{2+} + 2e^- = \text{Pt}$	+1.20
$\text{Pd}^{2+} + 2e^- = \text{Pd}$	+0.987
$\text{Ag}^+ + e^- = \text{Ag}$	+0.800
$\text{Hg}^{2+} + 2e^- = \text{Hg}$	+0.854
$\text{Hg}_2^{2+} + 2e^- = 2\text{Hg}$	+0.789
$\text{Fe}^{3+} + e^- = \text{Fe}^{2+}$	+0.771
$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4e^- = 4\text{OH}^-$	+0.401
$\text{Cu}^{2+} + 2e^- = \text{Cu}$	+0.337
$2\text{H}^+ + 2e^- = \text{H}_2$	0.000 (Referensi)
$\text{Pb}^{2+} + 2e^- = \text{Pb}$	-0.126
$\text{Sn}^{2+} + 2e^- = \text{Sn}$	-0.136
$\text{Ni}^{2+} + 2e^- = \text{Ni}$	-0.250
$\text{Co}^{2+} + 2e^- = \text{Co}$	-0.277
$\text{Tl}^+ + e^- = \text{Tl}$	-0.336
$\text{In}^{3+} + 3e^- = \text{In}$	-0.342
$\text{Cd}^{2+} + 2e^- = \text{Cd}$	-0.403
$\text{Fe}^{2+} + 2e^- = \text{Fe}$	-0.440
$\text{Cr}^{3+} + 3e^- = \text{Cr}$	-0.744
$\text{Zn}^{2+} + 2e^- = \text{Zn}$	-0.763
$\text{Al}^{3+} + 3e^- = \text{Al}$	-1.662
$\text{Mg}^{2+} + 2e^- = \text{Mg}$	-2.363
$\text{Na}^+ + e^- = \text{Na}$	-2.714

2.5 Potensial Proteksi

Potensial proteksi sesungguhnya dari suatu sistem proteksi katodik bergantung pada lingkungan dimana ia akan diterapkan. Nilai dari potensial proteksi ini mungkin lebih rendah dari -800 mV SCC, namun banyak teknisi menggunakan angka -850 mV SCC. Dalam hal ini angka-angka tersebut diperoleh dari metode coba-coba (*trial and error*) pada lingkungan yang berbeda. Sebagai acuan yang umum untuk digunakan, nilai potensial proteksi dari

sistem proteksi katodik berada pada rentang antara -800 mV SCC sampai dengan -900 mV SCC (Trethewey, 1988).

Berdasarkan standar DNV GL RP-B401 nilai potensial yang terukur -800mV menggunakan elektroda Ag/AgCl dalam lingkungan air laut dapat dijadikan acuan untuk desain potensial proteksi yang umum untuk baja karbon dan baja karbon paduan rendah. Namun nilai tersebut dapat berubah ketika berada pada lingkungan yang anaerob dimana nilai potensial peroteksinya -900 mV. Suatu struktur dapat dikatakan terlindungi dengan sistem proteksi katodik ketika memiliki nilai potensial proteksi yang berkisar antara -900 sampai dengan -1050 mV. Tetapi, seiring berjalannya waktu potensial tersebut dapat turun bersamaan dengan penggunaan anoda yang hampir habis. Penurunan nilai potensial proteksi tersebut dapat terjadi hingga nilainya -800mV, dimana angka tersebut merupakan batas minimal suatu sistem proteksi katodik masih bekerja dengan baik. Jika potensial proteksi berada pada nilai kurang dari -800mV, maka dapat dikatakan bahwa sistem kurang terproteksi. Sebaliknya, jika nilai potensial proteksi yang ada lebih besar dari -1150mV maka sistem dikatakan mengalami overproteksi (DNV GL RP-B401, 2017).

2.6 Anoda Korban

Anoda korban yang digunakan pada proteksi katodik dibuat dalam bentuk dan ukuran yang beragam dan menggunakan paduan antara seng, magnesium, dan aluminium. Komposisi dan proses manufaktur dari anoda korban ini telah diatur dalam standar internasional yaitu *American Society for Testing and Materials (ASTM)*. Syarat agar proteksi katodik menggunakan anoda korban ini dapat berjalan adalah anoda harus memiliki potensial elektrokimia yang lebih rendah (lebih negatif) dibandingkan dengan struktur yang ingin dilindungi (Bahadori, 2014).

Selain harus memiliki potensial elektrokimia yang lebih rendah dibandingkan dengan struktur yang ingin dilindungi, pemilihan anoda korban juga dipilih berdasarkan parameter-parameter yang lain. Parameter tersebut antara lain adalah

kapasitas dari anoda korban, dimana kapasitas yang dimaksudkan disini adalah suatu besaran yang menyatakan banyaknya arus dalam ampere-jam yang dapat dipasok oleh setiap satuan berat (kilogram) anoda. Parameter lain yang digunakan untuk pemilihan anoda korban antara lain adalah keluaran arus per satuan luas permukaan terbuka, atau bisa disebut dengan laju pengausan (*wastage*) yang menyatakan laju berkurangnya anoda korban baik secara satuan volume maupun satuan massa. Selain itu ada satu faktor lain yang dapat mempengaruhi pemilihan dan penggunaan anoda korban yaitu efek *throwing power*. Efek ini berhubungan dengan jarak dari anoda korban ke struktur yang ingin dilindungi, dimana biasanya jarak yang jauh dari anoda korban ke struktur yang dilindungi akan mengakibatkan terjadinya kehilangan sebagian besar potensial yang digunakan untuk mengatasi hambatan elektrolit. Penentuan lokasi anoda ditujukan untuk mengusahakan agar potensial seragam pada seluruh bagian struktur (Trethewey, 1988).

2.6.1 Anoda Korban Aluminium

Anoda korban aluminium tidak dapat digunakan pada kondisi murni. Hal ini disebabkan karena kecenderungannya membentuk lapisan pasif ketika berada di lingkungan yang korosif. Untuk keperluan anoda korban, biasanya aluminium digunakan dalam bentuk paduan dengan beberapa elemen atau unsur pepadu untuk menghindari terbentuknya lapisan pasif pada aluminium tersebut. Biasanya pada anoda aluminium akan ditambahkan unsur paduan hingga 8% Zn dan 5% Mg. Selain unsur paduan tersebut juga terdapat unsur paduan lain seperti Cd, Ga, In, Hg, dan Ti (Bohnes, 1997).

Pemilihan anoda korban aluminium dapat didasari oleh beberapa kelebihan yang dimilikinya antara lain adalah anoda korban aluminium lebih ringan dibandingkan dengan anoda korban jenis lain, dan juga memiliki kapasitas arus yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan anoda korban jenis seng (Zn). Namun anoda aluminium akan menjadi pasif ketika konsentrasi

klorida di air laut berada di bawah angka 1.446 ppm (De Rincón, 2010).

2.6.2 Anoda Korban Seng

Anoda korban seng sudah banyak digunakan untuk melindungi struktur pada lepas pantai sejak tahun 1824. Namun pada penggunaannya masih terdapat masalah yaitu sifatnya yang dapat menjadi pasif. Untuk menghindari fenomena pasifitas pada anoda korban seng, maka diperlukan anoda seng dengan kadar yang mendekati murni atau mengandung sekitar 99.995% Zn tanpa penambahan unsur lain.

Laju korosi dari anoda seng sendiri relatif rendah. Pada kondisi *fresh cold water*, laju korosinya mencapai 0.02 g/m²h, atau setara dengan laju korosi sebesar 25 μm/a. Sementara pada *cold water* laju korosinya meningkat hingga 50%. Kondisi-kondisi tersebut menggambarkan laju korosi yang terjadi pada air dengan kondisi yang tenang. Sementara, untuk air dengan kondisi mengalir akan memberikan dampak berupa laju korosi yang meningkat secara signifikan. Seng tidak digunakan pada air dengan kondisi hangat, karena kecenderungannya untuk membentuk lapisan pasif akan semakin besar.

Pada beberapa kasus, nilai potensial dari seng dapat menjadi lebih positif daripada struktur yang ingin dilindungi (baja) pada air yang mengandung oksigen pada temperatur 60°C. Hal ini biasa disebut dengan *potential reversal*. Dampak langsung dari *potential reversal* ini terjadi pada blok mesin di kapal yang memiliki sirkuit air pendingin tertutup. Pada blok mesin ini akan sangat mudah bereaksi dengan anoda seng yang dipasang di sekitarnya dengan seng berperan menjadi katoda. Hal ini akan menyebabkan blok mesin yang terbuat dari baja akan mengalami korosi lokal yang hebat (Bohnes, 1997).

2.7 Pengaruh Unsur Paduan

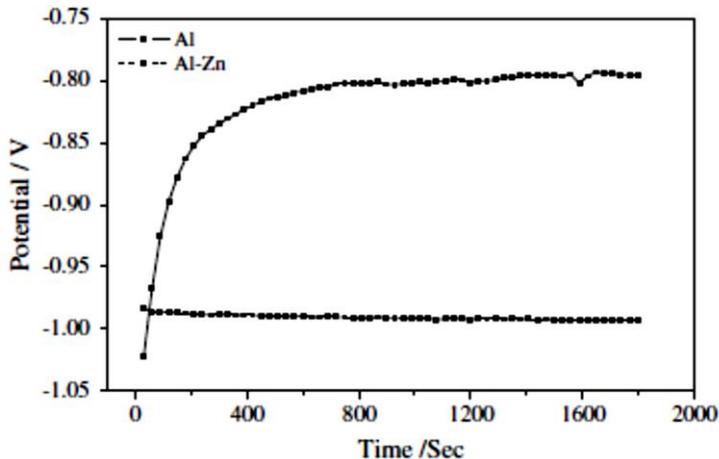
Anoda korban biasanya tidak dibuat dalam kondisi murni. Beberapa unsur paduan ditambahkan dalam anoda korban dengan beberapa tujuan, seperti memperbaiki butir anoda korban, dan

memberikan pengurangan massa yang seragam pada permukaan logam. Selain itu, elemen atau unsur padu juga ditambahkan dengan tujuan untuk mengurangi korosivitas dari anoda itu sendiri dan menaikkan keluaran arus dari anoda tersebut. Penambahan unsur paduan juga dapat mencegah dan mengurangi kemungkinan terbentuknya lapisan pasif pada permukaan anoda yang akan menyebabkan anoda menjadi lebih mulia daripada struktur yang ingin dilindungi dan akan cenderung membahayakan struktur. Penambahan unsur paduan untuk mencegah pembentukan lapisan pasif biasa dilakukan pada anoda korban aluminium (Bohnes, 1997).

2.7.1 Pengaruh Unsur Zn

Penambahan unsur Zn pada anoda korban aluminium akan memberikan beberapa pengaruh pada karakteristik anoda korban tersebut. Salah satu pengaruh yang disebabkan oleh adanya unsur Zn adalah mencegah adanya pembentukan lapisan pasif yang ada pada permukaan aluminium. Lapisan pasif ini dapat menghalangi terjadinya korosi pada aluminium yang menyebabkan sifatnya menjadi lebih mulia dari struktur yang ingin dilindungi. Selain itu penambahan Zn pada anoda korban aluminium adalah meningkatkan elektronegativitas dari anoda tersebut. Adanya peningkatan elektronegativitas ini akan membantu mendorong elektron lebih banyak ke sistem SACP sehingga dapat menyebabkan arus yang dilepaskan oleh anoda juga akan semakin besar sehingga menyebabkan proteksinya semakin baik (Khan, 2017).

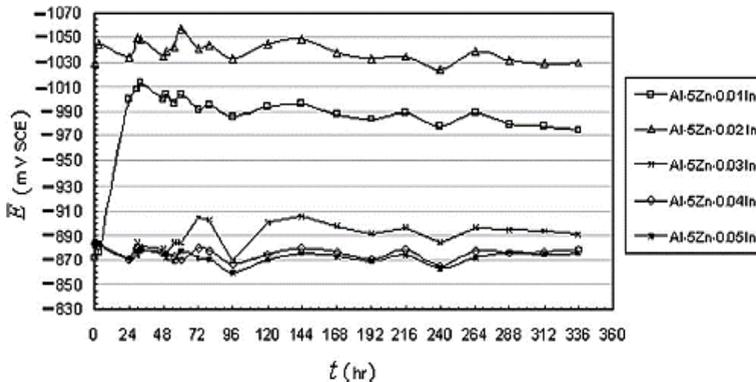
Menurut penelitian yang telah dilakukan oleh Lameche-Djeghaba, S. Pengaruh lain dari penambahan unsur Zn adalah terjadinya penurunan nilai *open circuit potential* atau OCP seperti ditunjukkan pada Gambar 2.13 berikut. Hal ini disebabkan oleh fenomena rusaknya lapisan pasif pada permukaan aluminium yang disebabkan oleh keberadaan unsur Zn dalam hal ini pada kadar 5% Zn.



Gambar 2.13 Pengaruh penambahan unsur Zn terhadap nilai *open circuit potential* terhadap waktu (Lameche-Djehghaba, S., 2014)

2.7.2 Pengaruh Unsur In

Penambahan unsur Indium (In) dalam kadar yang kecil yaitu berkisar 0.01-0.03 wt% pada anoda korban Al-5wt% Zn akan membuat potensial dari anoda korban berbasis aluminium menjadi lebih negatif atau mengalami penurunan potensial. Hal ini seperti ditunjukkan pada Gambar 2.14. Selain itu, penambahan unsur ini juga dapat menaikkan kapasitas arus dan menaikkan efisiensi dari anoda korban aluminium. Penambahan indium pada anoda korban aluminium juga dapat meningkatkan performa anoda pada keadaan salinitas air laut yang berbeda-beda. Air laut yang memiliki kadar klorida yang tinggi akan cenderung membantu proses transfer elektron dari anoda korban sehingga membuat performa anoda korban meningkat apabila dibandingkan dengan lingkungan air laut dengan kadar klorida yang rendah. (Eltigani, 2015).



Gambar 2.14 Pengaruh penambahan unsur indium terhadap nilai potensial anoda korban aluminium (Keyvani, 2012)

2.7.3 Pengaruh Unsur Fe

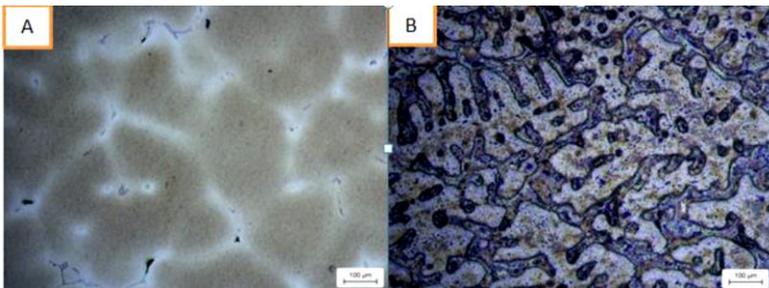
Adanya unsur Fe dalam anoda korban aluminium sebenarnya dibatasi, karena unsur ini termasuk ke dalam unsur pengotor dalam pembuatan anoda korban aluminium. Adanya unsur Fe ini secara umum akan menyebabkan terjadinya korosi akibat evolusi hidrogen dan juga korosi sumuran. Namun apabila kadarnya dibatasi, maka unsur Fe ini juga dapat memiliki beberapa kegunaan. Penambahan unsur Fe pada anoda korban aluminium dapat menyebabkan potensial kerja dan *open circuit potential* dari anoda korban lebih positif. Namun, penambahan unsur Fe melebihi 0.1% akan menyebabkan performa elektrokimia dari anoda korban akan menurun. Selain itu presipitasi katodik Fe menyebabkan terbentuknya fasa $FeAl_3$ dan Fe_2SiAl_6 yang dapat meningkatkan kecenderungan evolusi hidrogen akibat rendahnya potensial hidrogen dan perbedaan potensial dengan matriksnya. Keadaan ini dapat menyebabkan terjadinya peleburan yang tidak merata (*non-uniform dissolution*) pada paduan aluminium (Wang, 2014).

2.7.4 Pengaruh Unsur Cu

Penambahan unsur tembaga (Cu) akan berpengaruh terhadap kekuatan dan kekerasan dari paduan aluminium baik melalui

mekanisme perlakuan panas maupun tidak, dan juga baik diaplikasikan pada temperatur biasa maupun pada temperatur tinggi. Selain itu, unsur tembaga (Cu) pada umumnya akan mengurangi ketahanan korosi pada aluminium, dan meningkatkan ketahanannya terhadap korosi retak tegang (Rana, 2012). Sifat unsur tembaga (Cu) juga memberikan efek toksik pada mikroorganisme yang ada pada lingkungan air laut dimana keberadaan mikroorganisme ini dapat mempengaruhi potensial dari logam (Ahmad, 2009).

Penambahan unsur Cu juga akan menyebabkan penurunan ketahanan korosi anoda aluminium. Hal ini dikarenakan penambahan Cu akan menyebabkan munculnya deposit berupa lapisan tipis Cu pada permukaan aluminium yang menyebabkan terjadinya korosi yang merata di daerah permukaan anoda aluminium. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 2.15. Pada penelitian terbaru unsur tembaga (Cu) pada komposisi yang rendah akan menyebabkan fenomena katodik logam tembaga dan dapat meningkatkan potensial proteksi dari anoda korban sehingga dapat menjadi kandidat anoda korban *low voltage* aluminium (Ferdian, 2017).

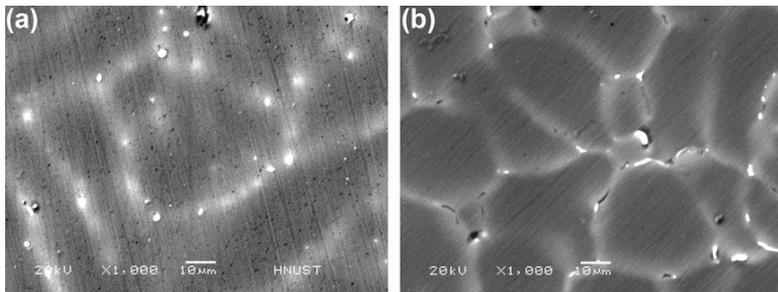


Gambar 2.15 Kondisi struktur mikro pada Al-Zn-Cu sebelum imersi (a) dan setelah imersi selama lima hari (b) (Pratesa, 2017)

2.7.5 Pengaruh Unsur Si

Penambahan unsur silikon (Si) pada noda korban berbasis aluminium dapat memperbaiki korosi tidak merata dan

meningkatkan sifat-sifat elektrokimia dari anoda korban tersebut. Presipitasi unsur Si pada anoda korban berbasis aluminium dengan terdapat kandungan Mg akan menghasilkan fasa Mg_2Si dan fasa Mg_2Zn dimana keberadaan fasa Mg_2Si tersebut akan mengurangi terjadinya korosi galvanik pada anoda korban aluminium. Hal ini disebabkan karena perbedaan potensial antara Mg_2Si dan $\alpha-Al$ lebih rendah daripada $MgZn_2$ dan $\alpha-Al$. Penambahan unsur Si juga akan memperbaiki sifat korosi merata pada anoda karena butiran halus yang *equiaxed* dan presipitasi yang merata dari partikel Mg_2Si . Hal ini disebabkan karena penambahan unsur Si akan mengurangi pembentukan segregasi dari elemen lain pada bagian batas butir seperti ditunjukkan pada Gambar 2.16 (b). Mikrostruktur, karakteristik elektrokimia, dan korosi yang merata dapat meningkat setelah penambahan 0.1 wt% Si pada anoda korban berbasis aluminium (Wen, 2011).

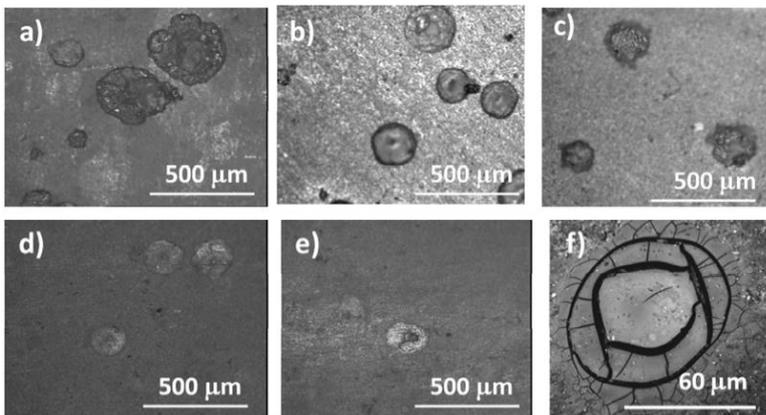


Gambar 2.16 Struktur mikro hasil pengamatan SEM pada hasil coran (a) Al-Zn-In-Mg-Ti dan (b) Al-Zn-In-Mg-Ti dengan penambahan Si sebesar 0.1% (Wen, 2011)

2.7.6 Pengaruh Unsur Sn

Kecenderungan untuk terjadinya korosi lokal (sumuran) dapat diturunkan dengan kenaikan temperatur pada saat peleburan paduan anoda korban. Hal ini menunjukkan bahwa korosi yang terjadi pada paduan anoda korban berubah dari korosi lokal menjadi korosi merata. Adanya unsur Sn yang tidak terlarut dalam paduan anoda korban dan membentuk presipitasi menunjukkan

bahan paduan masih mengalami korosi lokal pada permukaannya terutama pada anoda korban aluminium, dimana unsur Sn diketahui lebih katodik daripada aluminium. Adanya ion klorida dalam larutan akan memiliki kecenderungan untuk menghancurkan lapisan pasif pada permukaan anoda korban aluminium. Dibantu dengan keberadaan unsur Sn yang mengendap pada matriks aluminium dapat menyebabkan terjadinya korosi seragam seperti ditunjukkan pada Gambar 2.17. Dengan menggunakan temperatur peleburan yang lebih tinggi, biasanya lebih tinggi dari 450°C akan menyebabkan unsur Sn terlarut dalam matriks aluminium dan membentuk permukaan yang homogen dan akan menyebabkan terjadinya korosi merata pada paduan anoda korban aluminium. Selain itu adanya logam Sn yang terlarut ini juga akan menyebabkan laju korosi dari anoda akan menurun (Srinivas, 2016).



Gambar 2.17 Struktur mikro hasil pengamatan SEM pada paduan anoda Al-Mg-Sn-Ga dengan variasi pengaruh perlakuan panas (a) *as-rolled*, (b) 400°C, (c) 450°C, (d) 500°C, (e) 550°C, (f) 600°C (Srinivas, 2016)

2.8 Korosi pada Air Laut

Salah satu faktor yang dapat menyebabkan terjadinya korosi adalah faktor lingkungan. Lingkungan air laut termasuk ke dalam lingkungan yang korosif. Air laut merupakan suatu larutan elektrolit yang mengandung banyak sekali zat-zat yang dapat menyebabkan air laut memiliki sifat elektrik. Salah satu sifat elektrik yang paling penting dari air laut adalah konduktivitas. Konduktivitas air laut disebabkan adanya garam yang memiliki banyak sekali zat-zat anorganik, selain itu garam akan terlarut dalam bentuk ion-ion dalam air laut. Jenis dan konsentrasi dari ion-ion yang terlarut dalam air laut ini dapat digunakan untuk menentukan konduktivitas dari air laut.

Selain dapat digunakan untuk menentukan konduktivitas dari air laut, kandungan ion-ion yang terlarut dalam air laut dapat digunakan untuk menentukan sifat-sifat lain dari air laut. Salah satunya adalah keberadaan ion hidrogen dalam air laut yang dapat digunakan untuk menentukan pH dari air laut. Penentuan pH air laut merupakan hasil dari adanya interaksi antara elektroda yang digunakan dengan air laut. Adanya sifat-sifat elektrik pada air laut ini dapat memberikan efek yang signifikan terhadap korosi dalam air laut terutama pada korosi galvanik yang melibatkan dua logam yang berbeda dalam hal ini biasanya adalah terjadi pada struktur di lingkungan lepas pantai (Pawlowicz, 2018).

2.8.1 Komposisi Kimia dan Salinitas Air Laut

Komposisi kimia dari air laut sangat beragam. Hal ini disebabkan karena ada banyak sekali ion-ion yang terlarut dalam air laut. Beberapa ion terlarut dalam air laut tersebut dapat mempengaruhi sifat-sifat dari air laut terutama adalah sifat korosifnya. Komposisi ion-ion yang terlarut dalam air laut pada umumnya adalah natrium (Na^+) dan klorida (Cl^-), dengan sedikit tambahan magnesium (Mg^{2+}) dan sulfat (SO_4^{2-}) dan juga beberapa ion yang terlarut dalam jumlah kecil dapat dilihat pada Tabel 2.2. Selain terdiri dari ion-ion, pada air laut juga terlarut beberapa gas seperti oksigen (O_2) dan Nitrogen (N_2) yang merupakan gas inert

dan tidak mempengaruhi konduktivitas dan densitas dari air laut. Selain itu, terdapat kandungan gas karbon dioksida (CO_2) yang terdapat dalam ion-ion karbonat (CO_3^-) dan bikarbonat (HCO_3^-).

Pada umumnya dalam satu kilogram air laut akan mengandung 35 gram zat-zat yang terlarut. Jumlah zat yang terlarut dalam air laut dapat berbeda pada tiap-tiap daerah. Akan tetapi, meskipun konsentrasi dari zat terlarut yang terdapat dalam air laut, namun biasanya perbandingan antara konsentrasi dari zat-zat penyusun air laut dengan komposisi kimia relatif dari air laut akan tetap. Komposisi kimia relatif yang tetap dari air laut ini kemudian akan sangat berguna dalam hal penentuan salinitas dari air laut, terlebih dalam hal penelitian yang biasanya menggunakan air laut dengan salinitas tertentu yang dapat dihitung melalui rasio tersebut. Hal ini tentu akan lebih memudahkan peneliti untuk menentukan salinitas air laut bukannya menggunakan rasio komposisi kimia relatif air laut daripada melakukan perhitungan dari masing-masing zat penyusun air laut yang jumlahnya sangat banyak. Akan tetapi, dalam beberapa penelitian diperlukan perhitungan salinitas yang sangat teliti sehingga data yang dihasilkan akan lebih akurat (Pawlowicz, 2018).

Tabel 2.2 Komposisi kimia air laut (Pawlowicz, 2018)

Komposisi	mmol kg ⁻¹ ₁	mg kg ⁻¹
Na ⁺	468.9675	10781.45
Mg ²⁺	52.8170	1283.72
Ca ²⁺	10.2820	412.08
K ⁺	10.2077	399.10
Sr ²⁺	0.0907	7.94
Cl ⁻	545.8695	19352.71
SO ₄ ²⁻	28.2353	2712.35
HCO ₃ ⁻	1.7178	104.81
Br ⁻	0.8421	67.29
B(OH) ₃	0.3143	19.43
CO ₃ ²⁻	0.2389	14.34
B(OH) ₄ ⁻	0.1008	7.94
F ⁻	0.0683	1.30
CO ₂	0.0097	0.43
OH ⁻	0.0080	0.14
Total		35165.04
H ⁺	0.0002	<0.01
Variasi yang diketahui		
O ₂	0 – 0.3	0 – 10
N ₂	0.4	14
Si(OH) ₄	0 – 0.17	0 – 16
NO ₃ ⁻	0 – 0.04	0 – 2
ΔCa ⁺	≤0.1	≤4
ΔHCO ₃ ⁻	≤0.3	≤20
<i>Dissolved Organic Matter (DOM)</i>	-	0 – 2

Salinitas air laut dapat diartikan sebagai jumlah total dari garam-garam anorganik yang terlarut dalam air laut dengan satuan gram dalam satu kilogram air laut. Beberapa unsur seperti unsur bromida dan iodida akan digantikan dengan unsur klorida dalam jumlah yang sesuai. Selain itu, unsur-unsur karbonat juga akan digantikan dengan unsur oksida dengan jumlah yang sesuai.

Salinitas air laut biasanya dinyatakan dalam per seribu (‰). Besaran dari nilai salinitas air laut beragam mulai dari 32.5‰ hingga 37 ‰. (Anggono, 1999).

2.8.2 Kandungan Oksigen dalam Air Laut

Salah satu gas terlarut yang dapat mempengaruhi terjadinya reaksi korosi dalam air laut adalah oksigen dan gas sulfur. Oksigen merupakan gas yang paling berperan dalam hal ini, karena pada umumnya gas oksigen dapat mempercepat laju korosi pada kebanyakan logam. Kandungan oksigen dalam air laut yang paling banyak adalah pada permukaan air laut dan juga oksigen dihasilkan oleh alga. Selain gas oksigen terdapat gas lain yang merupakan gas yang berpengaruh dalam korosi di air laut yaitu sulfur dioksida dan hidrogen sulfida yang merupakan hasil dari aktivitas mikroorganisme yang ada di laut. Reaksi reduksi sulfat oleh bakteri akan mengubah sulfat menjadi sulfida (Craig, 2006).

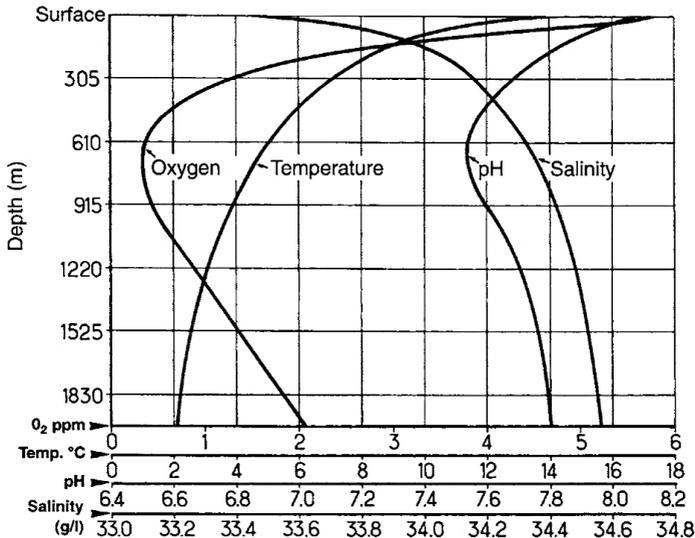
2.8.3 Temperatur

Pada umumnya kenaikan temperatur akan menyebabkan terjadinya kenaikan laju korosi. Namun hal ini tidak terjadi jika korosi terjadi pada air laut, dimana faktor utama dari terjadinya korosi bukan hanya terjadi oleh pengaruh temperatur saja. Adanya kenaikan temperatur pada air laut akan menyebabkan penurunan kelarutan oksigen, aktivitas biologis dari organisme di air laut akan meningkat, dan presipitasi magnesium dan karbonat meningkat. Hal ini justru akan mengakibatkan terbentuknya lapisan pasif (Vargel, 2004).

2.8.4 pH

Permukaan air laut mengandung pH yang relatif stabil yaitu pada kisaran 8.2. Perubahan pH pada air laut dapat disebabkan oleh beberapa faktor salah satunya adalah sedikit aktivitas dari organisme laut seperti plankton dan alga. Selain itu faktor lain yang dapat mempengaruhi perubahan pH pada air laut adalah kedalaman. Seperti ditunjukkan pada Gambar 2.18. Kestabilan pH

air laut dapat mempengaruhi pembentukan lapisan pasif pada aluminium (Vargel, 2004).

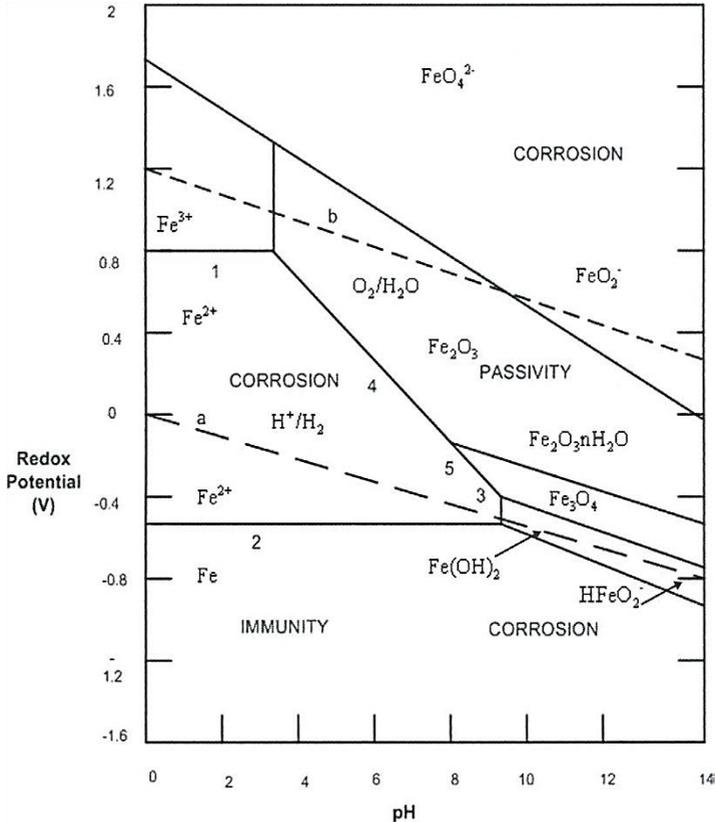


Gambar 2.18 Konsentrasi oksigen terlarut, salinitas, temperatur, dan pH terhadap fungsi kedalaman (Vargel,2004).

2.9 Diagram Pourbaix

Diagram pourbaix merupakan suatu diagram yang menunjukkan kestabilan suatu logam yang dipengaruhi oleh hubungan antara potensial dan juga pH. Kestabilan suatu logam terhadap adanya perubahan nilai potensial dan nilai pH dapat diketahui dengan menggunakan diagram ini. Dalam diagram pourbaix, nilai potensial dari suatu logam disajikan dalam sumbu vertikal dan sumbu horizontal menunjukkan adanya perubahan pH. Diagram ini dibuat berdasarkan persamaan Nernst dan data kelarutan dari logam dan spesiesnya seperti Fe, Fe₂O₃, Fe(OH)₂, Fe₃O₄, dan sebagainya dalam kondisi yang equilibrium (temperatur 25°C). Pada diagram pourbaix konsentrasi dari ion logam dianggap sama yaitu bernilai 10⁻⁶ mol per liter larutan. Angka ini merupakan

batas dimana suatu logam akan mengalami korosi, pada nilai konsentrasi yang lebih rendah korosi tidak dapat berlangsung. Diagram pourbaix dari logam Fe dalam lingkungan air ditunjukkan oleh Gambar 2.19.



Gambar 2.19 Diagram pourbaix Fe dalam air (Ahmad, 2006)

Pada gambar 2.19 di atas dapat diketahui bahwa diagram pourbaix memiliki tiga daerah yaitu daerah korosi, imun, dan daerah pasif. Daerah ini kemudian akan dijadikan acuan untuk

menentukan kecenderungan suatu logam dalam mengalami korosi. Penjelasan mengenai ketiga daerah tersebut adalah sebagai berikut:

1. Daerah Imun

Daerah imun yang ditunjukkan pada gambar diagram pourbaix Fe dalam air menunjukkan bahwa pada daerah tersebut korosi tidak dapat terjadi di daerah ini.

2. Daerah Korosi

Pada daerah ini, logam khususnya Fe akan mengalami korosi.

3. Daerah Pasifasi

Pada daerah ini oksida logam yang mengalami kontak dengan larutan akan menyebabkan terbentuknya lapisan pasif yang terbentuk pada permukaan logam. Lapisan pasif ini dapat melindungi logam dari korosi apabila lapisan ini memiliki ketahanan terhadap larutan yang tinggi serta memiliki sifat yang adheren. Lapisan pasif yang terbentuk pada permukaan seperti Fe_2O_3 dan Fe_3O_4 akan bersifat melindungi logam Fe jika memiliki syarat-syarat tersebut (Ahmad, 2006).

Selain dapat digunakan sebagai acuan untuk menentukan kecenderungan logam dalam mengalami korosi, diagram pourbaix juga dapat digunakan untuk acuan dalam menerapkan proteksi korosi dari suatu struktur. Dalam hal ini proteksi logam seperti baja yang biasa digunakan sebagai struktur di lingkungan berair dapat dilakukan menggunakan beberapa cara seperti:

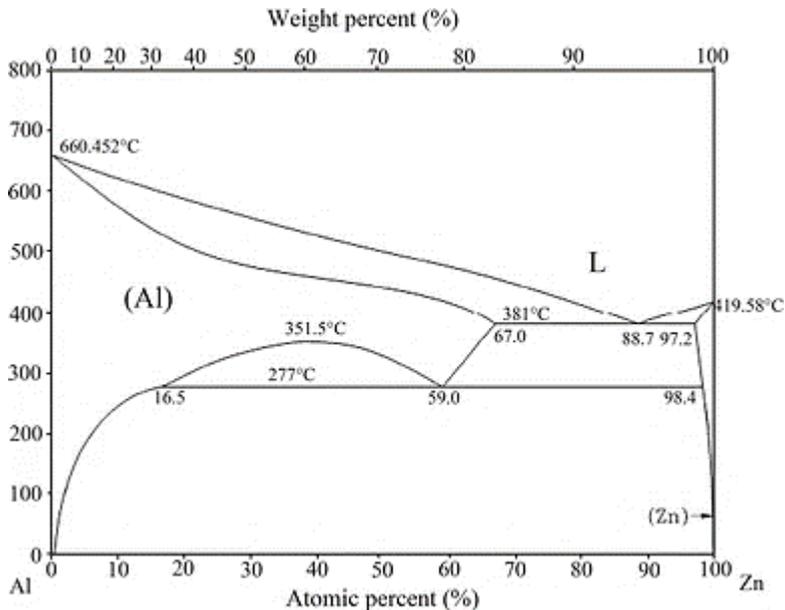
1. Menurunkan nilai potensial dari sistem atau biasa disebut proteksi katodik
2. Menaikkan nilai potensial dari suatu sistem atau bisa disebut proteksi anodik
3. Menaikkan nilai pH dari larutan dengan menambahkan inhibitor yang bersifat basa, dalam hal ini disebut dengan alkalisasi

Pada proteksi logam menggunakan prinsip (a) dilakukan dengan menggeser potensial sistem yang semula berada pada daerah korosi menjadi bergeser ke daerah imun. Sedangkan untuk proteksi menggunakan prinsip (b) dan (c) dilakukan dengan

menggeser nilai potensial sistem dari yang semula berada di daerah korosi bergeser ke daerah pasif (Harsisto, 2001).

2.10 Diagram Fasa Al-Zn

Gambar 2.20 berikut merupakan diagram fasa dari paduan aluminium dengan seng (Al-Zn).



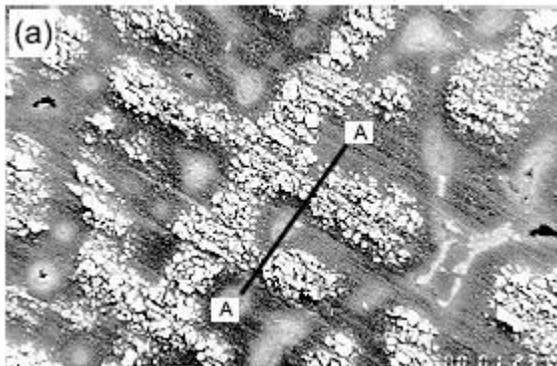
Gambar 2.20 Diagram fasa paduan Al-Zn (ASM Handbook Vol.3, 1992).

Berdasarkan diagram fasa Al-Zn yang terdapat pada ASM Handbook Vol. 3, Zn memiliki batas kelarutan yang cukup tinggi dalam aluminium pada temperatur tinggi, dan juga memiliki kelarutan yang masih cukup tinggi pada temperatur ruang yaitu sekitar 5%. Hal ini menunjukkan bahwa kandungan seng (Zn) dibawah batas kelarutan tersebut masih dapat terlarut dalam aluminium berdasarkan diagram fasa biner Al-Zn. Sementara kandungan Zn yang lebih besar melebihi batas kelarutan tersebut

dapat memungkinkan terjadinya presipitasi Zn dalam batas butir aluminium (Shayegh Boroujeny, B., 2017).

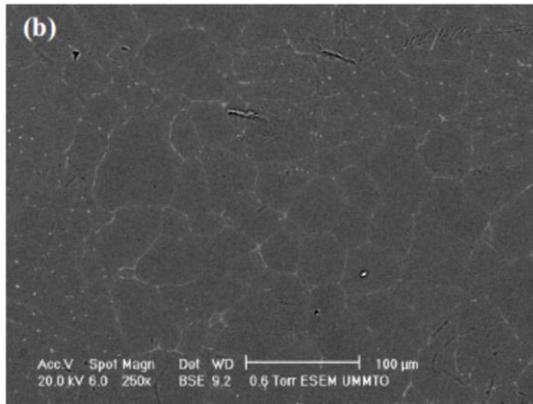
2.11 Struktur Mikro Al-Zn

Struktur mikro dari paduan Al-Zn mengacu pada diagram fasa biner Al-Zn dimana pada diagram fasa ini menunjukkan dua fasa utama berupa α dan β . Pada kondisi pengecoran yang *noequilibrium*, campuran dari kedua fasa ini akan tampak pada kondisi temperatur ruang. Pada kadar Zn yang rendah yaitu kurang dari 5% fasa α akan mendominasi, sementara pada kadar Zn yang lebih besar akan muncul fasa β seperti ditunjukkan pada Gambar 2.21 dimana bagian A merupakan fasa β (Salinas, 1999).



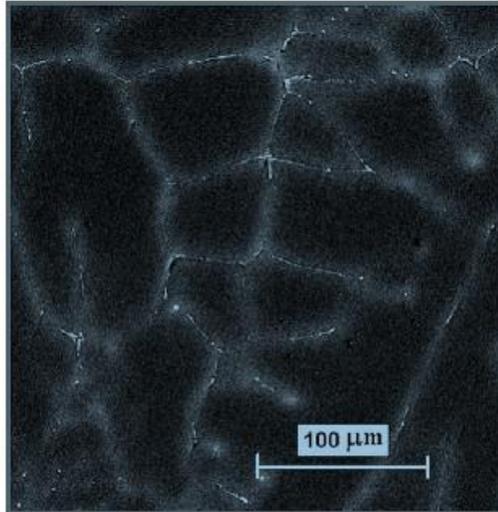
Gambar 2.21 Struktur mikro hasil SEM pada paduan Al – 40 wt% Zn (Salinas, 1999)

Pada penambahan 5% Zn pada paduan Al-Zn menunjukkan adanya matriks α -Al berwarna abu-abu seperti ditunjukkan pada Gambar 2.22 berikut. Selain itu ditemukan pula segregasi Zn pada bagian batas butir. Hal ini disebabkan karena kelarutan Zn dalam Al yang terbatas (Khireche, S., 2014).



Gambar 2.22 Struktur mikro hasil SEM pada paduan Al – 5% Zn (Khireche, S., 2014)

Penambahan unsur Zn pada paduan Al-Zn-In menunjukkan adanya perubahan pada struktur mikronya. Hasil dari penambahan unsur Zn sebesar 5% menunjukkan adanya struktur mikro penyusun paduan terdiri dari matriks berupa α -Al dan adanya presipitat Zn pada bagian batas butir seperti ditunjukkan pada Gambar 2.23. Selain itu penambahan unsur Zn juga dapat meningkatkan keseragaman mikrostruktur yang terbentuk pada paduan ini (Keyvani, 2016).



Gambar 2.23 Struktur mikro Al-Zn-In dengan penambahan 5%Zn. (Keyvani, 2016)

2.12 Pengecoran

Pengecoran merupakan salah satu proses dalam manufaktur suatu material khususnya logam. Pengecoran merupakan proses yang memiliki keunikan tersendiri dibanding dengan proses manufaktur yang lain. Alasan paling kuat terhadap keunikan proses pengecoran adalah proses ini dapat digunakan untuk memproduksi berbagai jenis logam mulai dari logam yang bentuknya paling sederhana hingga logam yang paling kompleks sekalipun. Tak hanya itu pengecoran juga dapat menghasilkan logam dengan berat yang tak terbatas mulai dari yang paling ringan hingga yang paling berat sekalipun. Proses pengecoran dapat digunakan untuk memproduksi satu benda atau bagian, namun pengecoran akan lebih ekonomis jika digunakan untuk memproduksi benda dalam jumlah yang banyak terutama pada benda-benda yang sama. Pada umumnya logam yang dapat mencair akan dapat dicor.

Pengecoran sendiri dapat didefinisikan sebagai satu proses dimana logam cair dialirkan dengan bantuan gravitasi maupun

dengan dituang ke dalam cetakan dimana logam cair tersebut akan berubah menjadi padat sesuai dengan bentuk dari rongga cetakan yang dibuat. Prinsip kerja dari pengecoran ini nampak sederhana seperti melelehkan logam, menuangkannya ke cetakan, dan menunggunya dingin hingga memadat; namun pada kenyataannya banyak faktor dan variabel yang penting dan perlu diperhatikan agar proses pengecoran dapat berhasil (Groover, 2010).

Proses pengecoran dapat dilakukan dengan beberapa macam kategori teknik yang digunakan, diantaranya ada lima teknik yaitu:

1. Proses pencetakan sederhana (*greend sand, shell, flakkes molding*)
2. Proses pencetakan dan pengecoran presisi (*investment casting, permanent mold, die casting*)
3. Proses pencetakan dan pengecoran khusus (*vacuum molding, evaporative pattern casting, centrifugal casting*)
4. Cetakan pasir dengan pengaturan ikatan kimia otomatis (*no-blake, sodium silicate*)
5. Proses pencetakan dan pengecatan inovatif (*theocasting, squeeze casting, elelctroslag casting*)

(ASM Handbook, 1992)

2.13 *Pattern*

Pattern merupakan salah satu bagian yang diperlukan dalam pengecoran pasir. *Pattern* sendiri merupakan replika keseluruhan dari produk yang ingin dihasilkan dimana dimensinya akan sedikit lebih besar akibat adanya beberapa toleransi yang diterapkan seperti *shrinkage* dan *machining allowance* pada proses akhir pengecoran, Material yang digunakan untuk membuat *pattern* biasanya berupa kayu, plastik, maupun logam. Kayu merupakan material yang paling umum karena sifatnya yang mudah dibentuk. Namun kayu memiliki kelemahan yaitu kecenderungannya berubah bentuk seperti bengkok dan juga dapat tergores oleh pasir-pasir yang digunakan untuk menutupinya. Kayu biasanya kurang kuat ketika pasir dikenai tekanan untuk dimampatkan sehingga akan cenderung mengalami kebengkokan. Karena keterbatasan

tersebut biasanya kayu tidak dapat dipakai secara berulang. Jika *pattern* dibuat dari bahan logam, maka harganya akan mahal, namun masa pakainya akan lama. Plastik merupakan material dengan sifat gabungan antara logam dan kayu tersebut, dalam hal ini mudah dibentuk dan cenderung lebih tahan lama masa pakainya daripada kayu. Pemilihan material yang akan digunakan untuk *pattern* sendiri tergantung pada kebutuhan misalnya seberapa banyak benda yang ingin dihasilkan dari proses pengecoran (Groove, 2010).

2.14 Cetakan

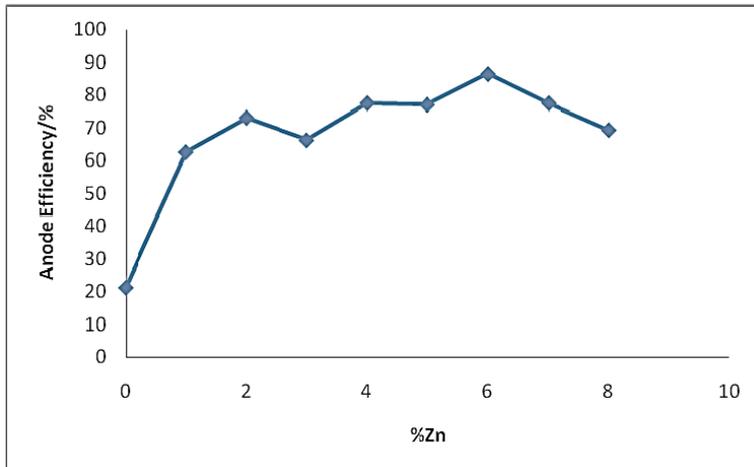
Cetakan pada pengecoran pasir terbuat dari pasir silika (SiO_2) yang dicampur dengan mineral lain. Syarat yang harus dimiliki oleh pasir ini adalah memiliki sifat refraktori (ketahanan terhadap temperatur yang tinggi dari meleleh dan kerusakan yang lain) yang baik. Kriteria penting lain yang harus dimiliki oleh pasir adalah ukuran butirannya, distribusi butirannya pada campuran, dan juga bentuk butiran dari pasir tersebut. Butiran yang kecil akan berpengaruh pada hasil produk yang ingin dicor akan memiliki permukaan yang lebih halus, namun jika butiran pasirnya besar maka akan menyebabkan permeabilitas terhadap gas ketika proses penuangan akan semakin tinggi juga. Cetakan yang terbuat dari pasir dengan bentuk butir yang tak beraturan akan lebih baik pula daripada yang terbentuk dari butiran yang bulat. Hal ini disebabkan karena butiran yang tidak teratur akan mampu membentuk *interlock* yang akan mencegah adanya permeabilitas udara.

Dalam membuat cetakan pasir, butiran-butiran pasir akan dicampur dengan beberapa campuran dan juga dengan *bonding clay*. Spesifikasi campuran dari volumenya yaitu 90% terdiri dari pasir, 3% air, dan 7% tanah liat. Agen pengikat lain dapat digunakan untuk menggantikan keberadaan tanah liat, seperti organik resin (contoh *phenolic resins*) dan pengikat anorganik (seperti *sodium silicate* dan fosfat). Selain pasir dan pengikat, beberapa zat tambahan seringkali ditambahkan ke campuran untuk

meningkatkan sifatnya salah satunya adalah sifat kekuatan dan juga permeabilitas dari cetakan (Groove, 2010).

2.15 Penelitian Sebelumnya

Beberapa penelitian telah dilakukan terkait dengan pengaruh unsur paduan terhadap kinerja dari paduan anoda korban, khususnya anoda korban aluminium. Salah satu penelitian yang dilakukan tersebut adalah penelitian yang dilakukan oleh Muazu, A yang berjudul “Pengaruh Penambahan Unsur Zn terhadap Performa Anoda Korban Aluminium pada Air Laut”. Penelitian ini dilakukan menggunakan variasi komposisi dari penambahan Zn yang berkisar antara 1% sampai dengan 8% Zn. Paduan anoda yang dihasilkan dari penambahan unsur tersebut kemudian diuji sebagai anoda korban yang digunakan untuk melindungi baja *mild steel* pada lingkungan air laut dengan temperatur ruangan. Hasil dari penelitian tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.24 berikut:



Gambar 2.24 Variasi efisiensi anoda menggunakan perbedaan komposisi %Zn (Muazu, 2011)

Dari pengolahan data yang telah dilakukan didapatkan bahwa penambahan unsur 6% Zn dapat menyebabkan efisiensi dari

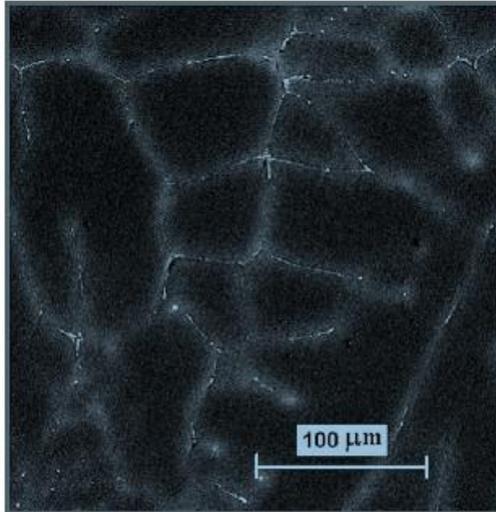
anoda aluminium berada pada tingkat yang paling tinggi yaitu 86.69%. Selain efisiensi dari anoda korban, dari penelitian ini juga dapat ditarik hasil berupa efisiensi dari proteksi anoda korban aluminium tersebut dalam melindungi baja *mildsteel* setelah dilakukan pengujian dalam waktu 7 dan 8 minggu. Data pengujian ini dapat dilihat pada Tabel 2.3 berikut:

Tabel 2.3 Efisiensi proteksi dari paduan anoda korban Al-Zn
(Muazu, 2011)

	Control	1% Zn	2% Zn	3% Zn	4% Zn	5% Zn	6% Zn	7% Zn	8% Zn
Minggu 7	93.13	94. 89	95. 04	95. 99	97. 20	95. 13	99. 26	98. 39	97. 13
Minggu 8	93.76	95. 72	95. 28	96. 35	97. 49	95. 35	99. 13	97. 62	97. 29

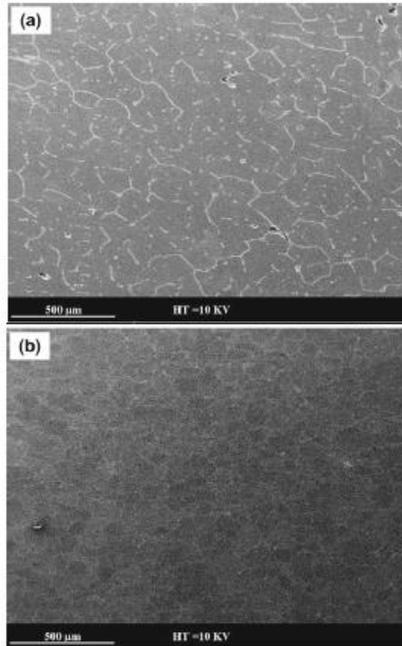
Berdasarkan data pada tabel tersebut dapat diketahui bahwa nilai efisiensi proteksi tertinggi didapat pada penambahan 6%Zn. Selain itu penambahan unsur paduan berupa Zn pada penelitian ini juga menunjukkan terjadinya perubahan terhadap struktur mikro yang menunjukkan adanya fasa intermetalik B-yang dapat merusak lapisan pasif alumina pada anoda korban berbasis aluminium yang akibatnya dapat meningkatkan efisiensi dari anoda korban ini (Muazu, 2011).

Pada tahun 2016, Keyvani melakukan penelitian tentang pengaruh penambahan kadar unsur Zn dan In yang berbeda terhadap perilaku anodik dari paduan Al-Zn-In yang menggunakan variasi kadar Zn 1 sampai 6% dan variasi kadar In dari 0.01-0.05%. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa kandungan Zn dan In yang berada pada paduan dapat mengubah potensial anoda menjadi lebih aktif dan juga dapat meningkatkan keseragaman mikrostruktur yang terbentuk pada anoda seperti ditunjukkan pada Gambar 2.25. Pada gambar tersebut dapat terlihat bahwa struktur mikro penyusunnya berupa matriks α -Al dan presipitat berupa Zn pada batas butir.

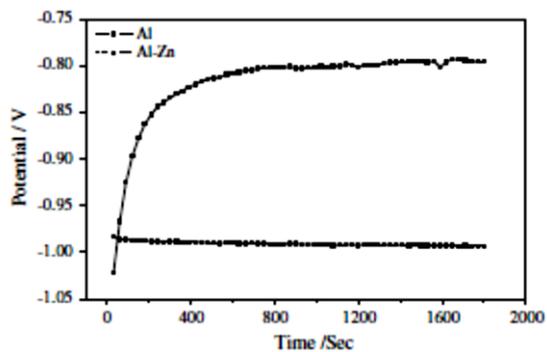


Gambar 2.25 Struktur mikro paduan Al-Zn-In dengan penambahan Zn 5% dan In 0.02%. (Keyvani, 2016)

Pada tahun 2014 Lameche-Djegabha melakukan penelitian tentang perbandingan antara perilaku elektrokimia aluminium murni dan aluminium dengan penambahan unsur Zn sebesar 5% pada lingkungan 3% NaCl. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa dengan adanya penambahan Zn sebanyak 5% akan mengakibatkan struktur mikro yang terbentuk memiliki fasa berupa matriks α -Al tanpa adanya pembentukan fasa β pada bagian butir. Selain itu, terdapat banyak Zn yang terkumpul pada bagian batas butir seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.26. Selain itu, dari penelitian ini juga menghasilkan kesimpulan bahwa adanya unsur Zn tersebut akan meningkatkan aktivitas anoda yang akan menyebabkan turunnya nilai OCP pada paduan Al-5%Zn. Hal ini seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.27.

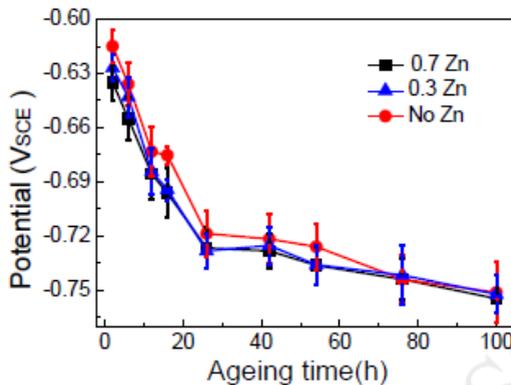


Gambar 2.26 (a) Struktur mikro aluminium tanpa penambahan Zn; (b) Struktur mikro aluminium dengan penambahan 5% Zn (Lameche-Djegabha, 2014)



Gambar 2.27 Grafik perbandingan nilai OCP aluminium dan Al-5%Zn pada lingkungan 3% NaCl (Lameche-Djegabha, 2014)

Pada tahun 2018, Liu, D.Y. melakukan penelitian tentang pengaruh penambahan Zn terhadap struktur mikro dan korosi pada paduan Al-Cu-Li. Salah satu parameter yang diteliti adalah OCP atau *open circuit potential* yang dilakukan dengan perlakuan waktu *ageing* pada temperatur 175°C pada larutan NaCl 3.5%. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa pada penambahan Zn sebesar 0.3 % dan 0.7 % menunjukkan bahwa nilai OCP nya menjadi lebih negatif dibandingkan dengan nilai OCP dari paduan tanpa penambahan unsur Zn seperti ditunjukkan pada Gambar 2.25. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan Zn pada paduan akan membantu terjadinya polarisasi negatif pada paduan. Hal ini diakibatkan karena adanya penambahan unsur Zn akan mengakibatkan adanya fasa yang kaya Zn di bagian batas butir, yang akan mengakibatkan menurunnya nilai OCP dari paduan tersebut. Grafik penurunan nilai OCP dapat dilihat pada Gambar 2.28 berikut.

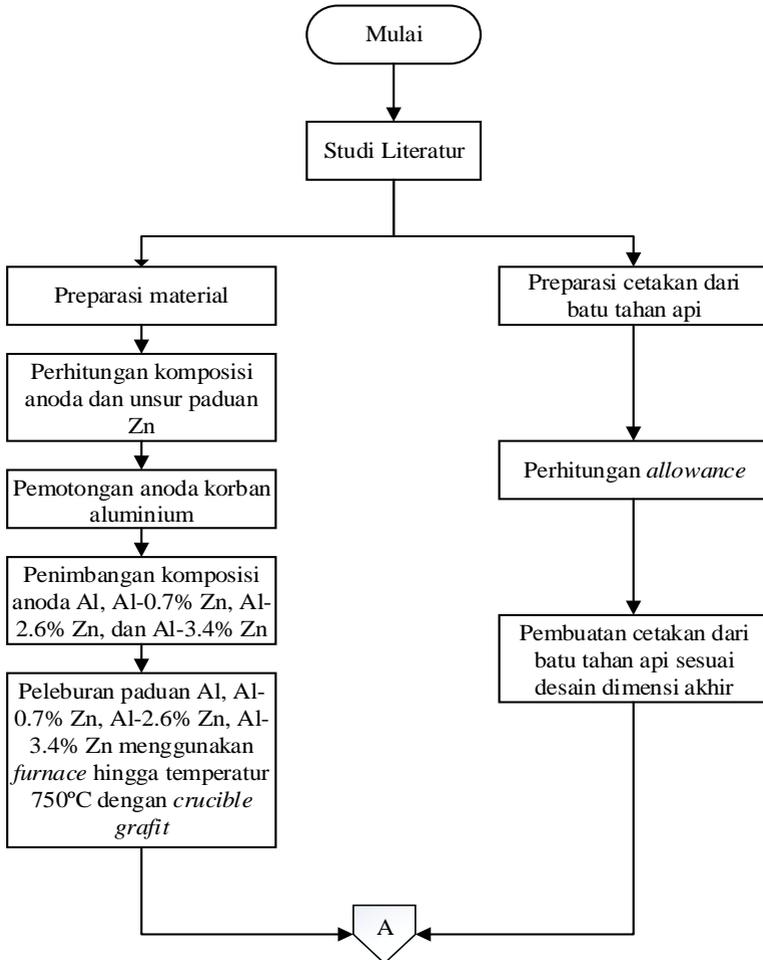


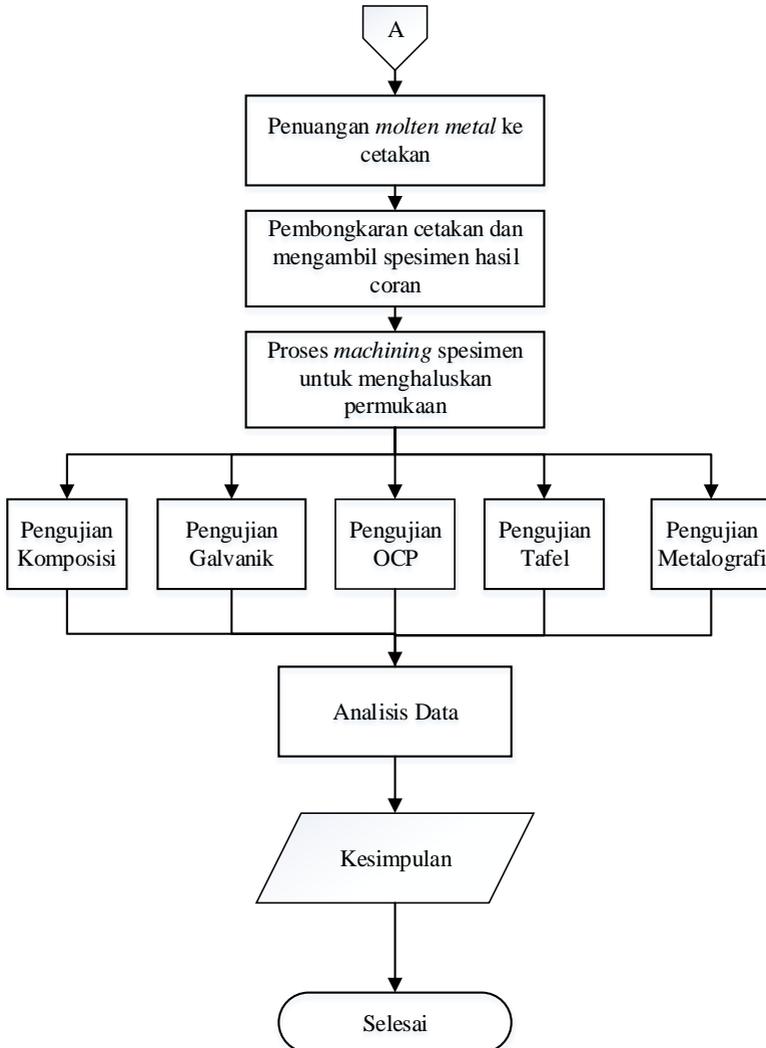
Gambar 2.28 Nilai OCP paduan Al-Cu-Li dengan penambahan unsur Zn dengan variasi 0%, 0.3%, dan 0.7% terhadap waktu *ageing* pada temperatur 175°C di media 3.5% NaCl (Liu, D. Y., 2018)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir

Penelitian dilakukan dengan urutan pengerjaan seperti pada Gambar 3.1 berikut:



**Gambar 3.1** Diagram alir penelitian

3.2 Standar yang Digunakan

Dalam melakukan penelitian akan digunakan beberapa standar yaitu sebagai berikut:

1. ASTM E407-07 (standar larutan etsa)
2. ASTM E3 -11 (standar pengujian metalografi)
3. ASTM G1 - 90 (standar preparasi, pembersihan, dan evaluasi spesimen uji korosi)
4. ASTM D1141 – 90 (standar spesifikasi air laut buatan)
5. ASTM G71 – 81 (standar pengujian korosi galvanik)
6. ASTM G5 (standar pengujian tafel polarisasi)

3.3 Alat dan Bahan

Dalam melakukan penelitian ini digunakan beberapa alat dan bahan sebagai berikut

3.3.1 Alat

Adapun alat yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. *Furnace*

Furnace yang digunakan pada penelitian ini adalah berupa *muffle furnace* seperti ditunjukkan pada Gambar 3.2. *Furnace* ini menggunakan bahan bakar yang berasal dari gas LPG. Dimensi dari *furnace* ini adalah memiliki diameter dalam sekitar 30 cm, tinggi kurang lebih 50 cm, serta memiliki ketebalah kurang lebih 15 cm.



Gambar 3.2 *Muffle furnace*

2. *Crucible* Grafit

Merupakan alat yang digunakan sebagai media peleburan anoda korban ketika dimasukkan ke dalam *muffle furnace*. *Crucible* grafit ini berbentuk tabung dengan diameter 5 cm dan tinggi 13 cm seperti pada Gambar 3.3 berikut.



Gambar 3.3 *Crucible* grafit

3. Neraca Digital

Merupakan alat yang digunakan untuk menimbang massa dari anoda korban aluminium yang akan dileburkan dan juga massa dari unsur paduan yang dibutuhkan.

4. Pipa 1 dm

Merupakan alat yang digunakan untuk preparasi spesimen metaografi maupun spesimen uji tafel dimana pipa ini berfungsi sebagai cetakan yang kemudian diisi resin sebagai *mounting* untuk mempermudah preparasi lebih lanjut terhadap spesimen.

5. Mikroskop Optik

Merupakan alat yang digunakan untuk melihat struktur mikro anoda korban aluminium pada pengujian metalografi.

6. Alat Uji XRF

Merupakan peralatan yang digunakan untuk keperluan pengujian komposisi pada anoda korban aluminium maupun baja yang digunakan.

7. Peralatan Uji Tafel

Merupakan peralatan yang digunakan untuk melakukan uji tafel polarisasi.

8. *Multimeter*

Merupakan alat yang digunakan untuk mengukur beda potensial atau tegangan yang ada pada pengujian *open circuit potential* sekaligus mengukur arus pada saat pengujian galvanik.

3.3.2 Bahan

Adapun bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Anoda korban aluminium
2. Serbuk Zn 99.99%
3. Larutan etsa (keller)
4. Aquades
5. Pasta Al_2O_3
6. Larutan NaCl
7. Resin *polyester*
8. Baja AISI 1040

9. Batu tahan api / *Mullite brick* ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$)

3.3.3 Spesifikasi Bahan

Beberapa bahan yang digunakan dalam penelitian ini memiliki beberapa spesifikasi khusus antara lain sebagai berikut:

1. Anoda Korban Aluminium

Anoda korban aluminium memiliki kandungan beberapa unsur yang diketahui dari pengujian komposisi yang telah dilakukan. Adapun kandungan unsur-unsur tersebut terdapat dalam Tabel 3.1 berikut.

Tabel 3.1 Komposisi anoda korban berbasis aluminium

No.	Unsur	Komposisi (%)
1.	Al	81.45
2.	P	0.78
3.	Ca	0.84
4.	Ti	0.045
5.	Fe	0.3835
6.	Co	0.01
7.	Ni	0.023
8.	Cu	0.165
9.	Zn	16.31

2. Baja AISI 1040

Baja yang digunakan pada penelitian ini merupakan Baja AISI 1040 dengan kandungan unsur berdasarkan pengujian komposisi yang telah dilakukan tertera pada bagian lampiran

3. Larutan NaCl 3.5%

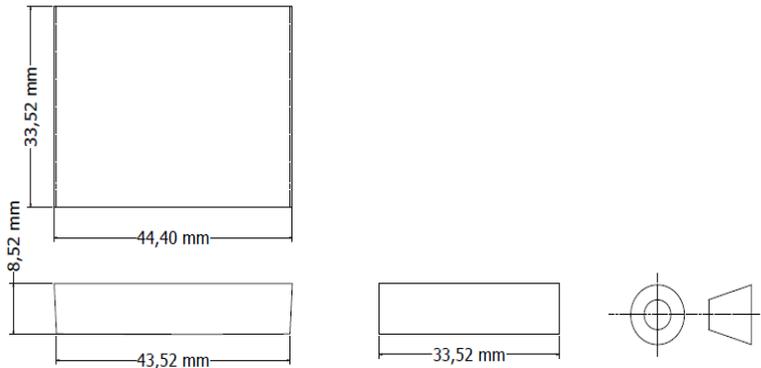
Larutan yang digunakan pada penelitian ini adalah berupa NaCl dengan kadar salinitas 3.5% yang dibuat dengan melarutkan 350 gram NaCl yang dilarutkan dalam 10L aquades dan dihomogenkan. Pembuatan larutan elektrolit ini didasarkan atas standar pengujian ASTM D1141 – 90 tentang media air laut buatan.

3.4 Prosedur Penelitian

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

3.4.1 Perancangan Dimensi Pengecoran

Perancangan dimensi untuk pengecoran anoda korban aluminium dilakukan dengan menyertakan perhitungan *allownce* yang telah dilakukan kemudian menerapkannya ke dalam cetakan yang akan digunakan. Hasil rancangan dimensi benda coran yang telah dilakukan dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 3.4 berikut:



Gambar 3.4 Rancangan dimensi spesimen untuk pengecoran anoda korban aluminium

3.4.2 Preparasi Spesimen Uji Korosi

Preparasi spesimen uji korosi dilakukan melalui beberapa tahap atau prosedur berikut:

1. Melakukan perhitungan kebutuhan anoda aluminium dan serbuk seng (Zn) yang akan digunakan pada proses peleburan menggunakan perhitungan *mass balance*.
2. Memotong anoda aluminium sesuai kebutuhan berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan

3. Menimbang serbuk seng (Zn) sesuai dengan kebutuhan berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan.
4. Melakukan perhitungan *allowance* dari proses pengecoran yang akan dilakukan.
5. Membuat cetakan dari batu tahan api sesuai dengan perhitungan *allownce* yang telah dilakukan.
6. Memasukkan anoda aluminium dan serbuk seng (Zn) yang telah dihitung ke dalam *crucible* grafit.
7. Memasukkan *crucible* grafit ke dalam *furnace*, dilanjutkan dengan proses peleburan anoda aluminium dan serbuk seng (Zn) hingga *furnace* mencapai temperatur sekitar 750 °C.
8. Mengangkat *crucible* grafit dari dalam *furnace* menggunakan penjepit kemudian menuangkan cairan paduan logam ke dalam cetakan yang telah disiapkan.
9. Menunggu beberapa saat hingga proses solidifikasi selesai.
10. Mengambil spesimen hasil coran dari cetakan.
11. Melakukan *machining* pada spesimen hasil coran untuk memperoleh dimensi sesuai dengan dimensi akhir spesimen yang diinginkan dan juga untuk memperhalus permukaan benda hasil coran.

3.4.3 Preparasi Spesimen Uji Metalografi

Preparasi spesimen uji korosi dilakukan melalui beberapa tahap atau prosedur berikut:

1. Memotong spesimen anoda korban hasil pengecoran sesuai dimensi spesimen metalografi yaitu 10mm x 10 mm x 10 mm.
2. Memotong pipa dengan ketinggian 50 mm.
3. Mengoleskan vaseline pada bagian dalam pipa.
4. Meletakkan spesimen di bagian bawah pipa yang sebelumnya diberi selotip untuk mencegah bergesernya spesimen ketika diberi resin.
5. Menyiapkan cairan resin dan katalis kemudian mencampurkannya sesuai dengan komposisi.

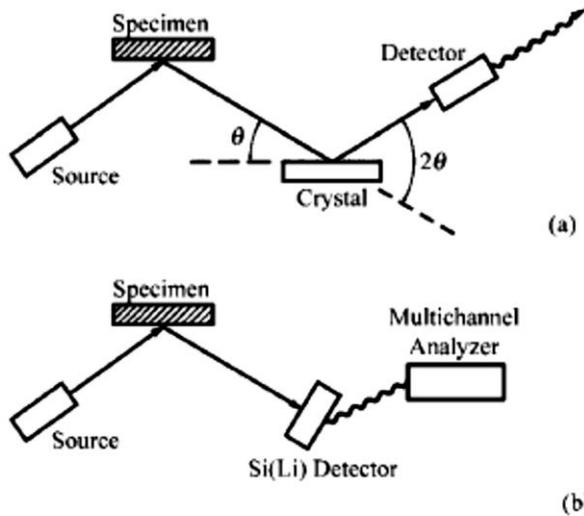
6. Menuangkan cairan resin ke dalam pipa dan menunggu hingga cairan resin mengeras.
7. Melepaskan spesimen yang telah *dimounting* menggunakan resin dari dalam pipa.
8. Melakukan proses penghalusan permukaan spesimen (*grinding*) menggunakan kertas ampelas hingga *grade* 5000.
9. Melakukan proses *polishing* terhadap permukaan spesimen yang telah di *grinding*.
10. Menyiapkan larutan etsa keller yang terdiri dari campuran aquades, HNO_3 , HCl , dan HF dengan komposisi yang sesuai.
11. Melakukan proses pengetsaan pada permukaan spesimen.
12. Mengamati permukaan spesimen yang telah dietsa dengan menggunakan mikroskop.

3.5 Pengujian

Pada penelitian ini akan dilakukan beberapa pengujian untuk mengetahui parameter anoda korban setelah dilakukan penambahan unsur paduan seng (Zn) dengan komposisi yang berbeda. Pengujian yang dilakukan antara lain::

3.5.1 Pengujian Komposisi Kimia

Pengujian komposisi kimia pada logam dilakukan untuk mengetahui kandungan unsur yang terdapat pada logam tersebut. Pengujian komposisi kimia menggunakan *X Ray Flourescence (XRF)* yang menggunakan prinsip penembakan elektron pada bidang datar spesimen sehingga memantulkan gelombang cahaya yang akan diterima oleh *receiver* dan sensor. Gelombang cahaya yang tertangkap kemudian akan diolah dan dicocokkan dengan *database* yang ada. Dimensi spesimen uji untuk pengujian ini adalah $2 \times 2 \times 0.5$ cm untuk masing-masing spesimen dngan variasi komposisi yang berbeda. Rangkaian atau skema dari percobaan ini seperti ditunjukkan pada Gambar 3.5 berikut.



Gambar 3.5 Skema pengujian XRF

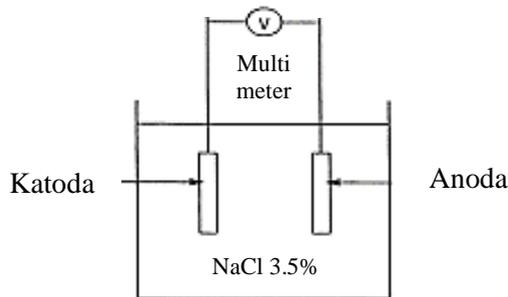
3.5.2 Pengujian Metalografi

Pengujian metalografi merupakan pengujian yang dilakukan untuk mengetahui struktur mikro apa saja yang ada dalam suatu material. Dalam penelitian ini, uji metalografi akan dilakukan untuk mengetahui bagaimana perubahan struktur mikro terhadap anoda korban berbasis aluminium setelah ditambahkan unsur paduan berupa Zn dengan berbagai variasi komposisi. Spesimen anoda korban berbasis aluminium dipotong kemudian dilakukan proses *mounting*. Setelah itu, dilakukan pengampelasan terhadap spesimen tersebut menggunakan kertas ampelas hingga *grade 2000* dan selanjutnya dioleskan autosol berupa pasta Al_2O_3 hingga permukaan spesimen tampak mengkilat. Setelah itu dilakukan pencampuran larutan etsa sesuai dengan standar ASTM E 407 -07 untuk spesimen berupa anoda korban berbasis aluminium. Melakukan proses etsa sesuai dengan metode yang ada pada standar, kemudian melihat struktur mikro dari spesimen

menggunakan mikroskop optik yang berada di Laboratorium Metalurgi Departemen Teknik Material.

3.5.3 Pengujian Korosi Galvanik

Pengujian potensial korosi dilakukan dengan prinsip sel galvanik dengan menggunakan standar ASTM G71 – 81 dengan menggunakan anoda korban berbasis aluminium dan katoda berupa pelat baja karbon dengan larutan elektrolit berupa NaCl 3.5%. Semua alat dirangkai dengan menghubungkan anoda korban berbasis aluminium ke katoda berupa pelat baja karbon dan menghubungkannya ke voltmeter dan amperemeter dalam kondisi tercelup sebagian seperti pada Gambar 3.6. Pengujian dilakukan selama 10 hari untuk setiap spesimen. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh penambahan unsur paduan Zn terhadap nilai kapasitas arsu anoda korban berbasis aluminium, laju konsumsi dan efisiensinya.

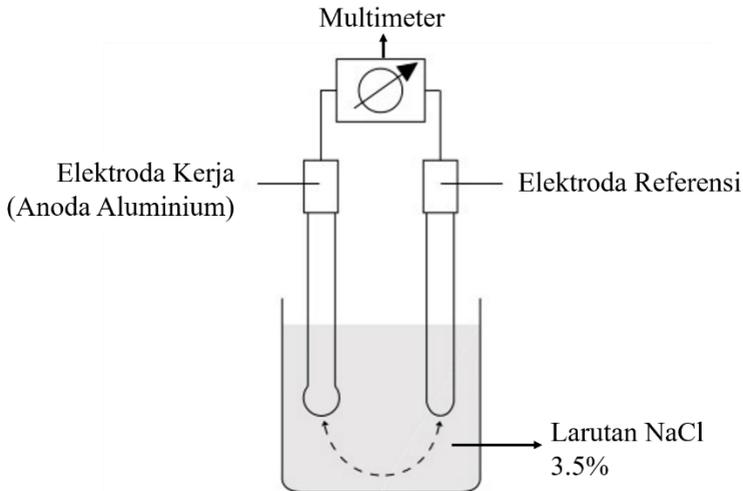


Gambar 3.6 Skema pengujian korosi galvanik

3.5.4 Pengujian *Open Circuit Potential* (OCP)

Pengujian *Open Circuit Potential* dilakukan untuk mengetahui perbandingan nilai *open cicuit potential* antara anoda aluminium sebelum penambahan komposisi unsur seng (Zn) dan setelah penambahan komposisi seng (Zn). Pengujian ini dilaukan dengan cara menghubungkan anoda dengan katoda berupa elektroda referensi Ag/AgCl pada multimeter. Kedua elektroda

dicelupkan hingga setengah bagian ke dalam larutan NaCl 3.5%. Rangkaian atau skema pengujian *open circuit potential* ditunjukkan seperti Gambar 3.7 berikut.

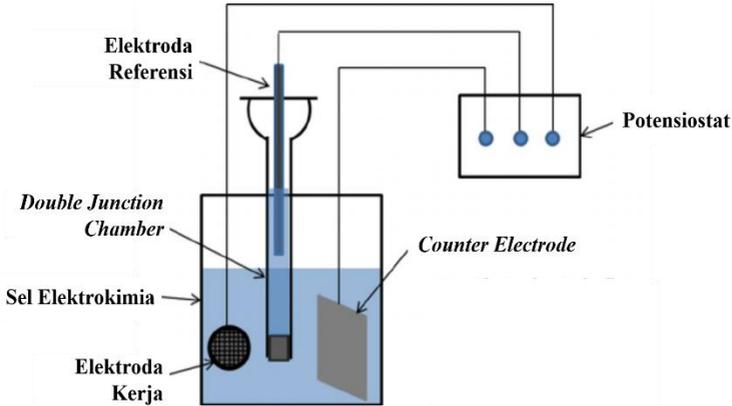


Gambar 3.7 Skema pengujian *open circuit potential*

3.5.5 Pengujian Tafel Polarisasi

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh penambahan unsur paduan Zn terhadap laju korosi anoda korban berbasis aluminium menggunakan alat uji CorrTest dan aplikasi C5 Studio5. Pengujian dilakukan berdasarkan standar pengujian ASTM G-5. Komponen pengujian terdiri atas elektroda referensi, elektroda kerja, dan elektroda bantu yang digunakan untuk mengetahui laju korosi anoda korban aluminium pada larutan elektrolit berupa 3.5% NaCl. Pengujian ini dilakukan dengan cara menyiapkan dan memasang rangkaian pengujian sesuai dengan standar. Kemudian memasang elektroda ke alat uji polarisasi dan menyalakan alat uji tersebut. Setelah itu memasukkan parameter yang digunakan dan mengaktifkan program CR Studio5. Pengujian dilakukan di Laboratorium Korosi dan Kegagalan Material

Departemen Teknik Material. Rangkaian atau skema dari percobaan ini seperti ditunjukkan pada Gambar 3.8 berikut.



Gambar 3.8 Skema pengujian tafel polarisasi

3.6 Rancangan Penelitian

Untuk memudahkan dalam melaksanakan penelitian khususnya saat melakukan pengujian dan analisis. Oleh karena itu diperlukan pengambilan data yang sistematis yang dimuat dalam rancangan pengambilan data seperti pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Rancangan penelitian

Spesimen	Jenis Pengujian					
	Kom posis i	Meta logra fi	OCP	Galva nik	Efisi ensi	Tafel Polarisa si
Al	√	√	√	√	√	√
Al + 0.7 Zn	√	√	√	√	√	√
Al + 2.6 Zn	√	√	√	√	√	√
Al + 3.4 Zn	√	√	√	√	√	√

(Halaman sengaja dikosongkan)

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Perancangan Pengecoran Anoda Korban Aluminium

Berikut ini merupakan data-data yang berkaitan dengan pengecoran aluminium diantaranya adalah:

4.1.1 Data Pengecoran

Data pengecoran yang dimaksud merupakan data-data yang digunakan untuk proses pengecoran meliputi material yang akan dicor, dimensi dari benda cor, temperatur pemanasan, temperatur penuangan, dan jenis cetakan yang digunakan. Data-data tersebut adalah sebagai berikut.

1. Material yang digunakan

Material yang digunakan dalam pengecoran ini seperti ditunjukkan pada Gambar 4.1 adalah anoda korban aluminium yang didapat dari PT. PAL Surabaya dengan komposisi tertera pada Tabel 4.1. Material anoda korban ini memiliki berat jenis sebesar 2.7 gram/cm^3 .



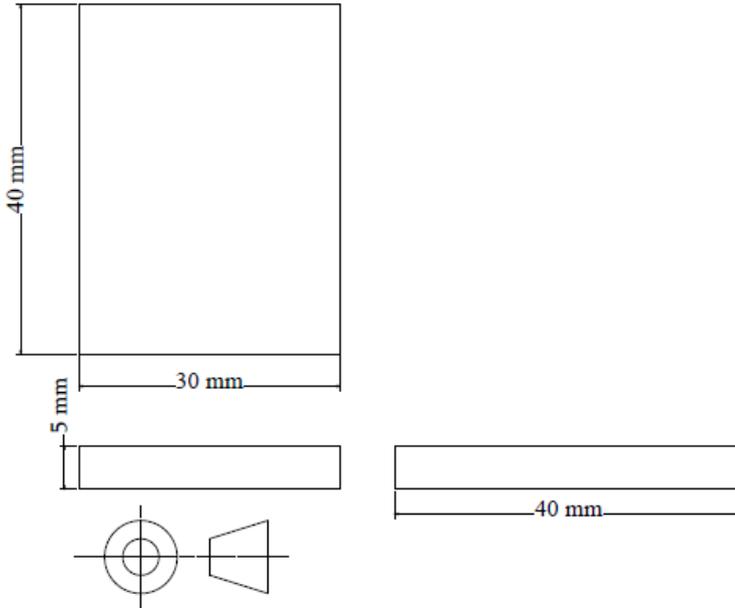
Gambar 4.1 Material anoda korban aluminium

2. Dimensi benda cor

Perhitungan dimensi benda cor dimulai dengan menentukan dimensi akhir dari benda cor yang diinginkan. Benda cor yang dihasilkan akan memiliki bentuk balok dengan dimensi akhir sebagai berikut:

Panjang : 40 mm
Lebar : 30 mm
Tebal : 5 mm

Gambar 4.2 berikut menunjukkan rancangan hasil benda cor dengan dimensi tersebut.



Gambar 4.2 Dimensi hasil benda cor

Untuk memperoleh dimensi sesuai dengan yang diinginkan ketika melakukan pengecoran diperlukan adanya perhitungan *allowance* untuk mempermudah proses pengecoran dan mencegah terjadinya cacat pada benda hasil cor setelah proses penuangan seperti adanya penyusutan. Beberapa *allowance* yang dihitung meliputi *shrinkage allowance*, *machining allowance*, dan *draft allowance*. *Shrinkage allowance* digunakan untuk mencegah berkurangnya dimensi ketika terjadi penyusutan pada benda hasil cor, sehingga saat terjadi penyusutan maka benda hasil cor tetap

memiliki dimensi sesuai dengan yang diinginkan. *Draft allowance* digunakan untuk mempermudah pengambilan benda cor dari cetakan, terutama bila menggunakan cetakan berupa cetakan pasir. *Machining allowance* digunakan untuk mendapatkan dimensi sesuai dimensi yang diinginkan setelah dilakukan proses akhir dari benda cor yaitu proses *machining*. Perhitungan *allowance* dari pengecoran anoda aluminium adalah sebagai berikut:

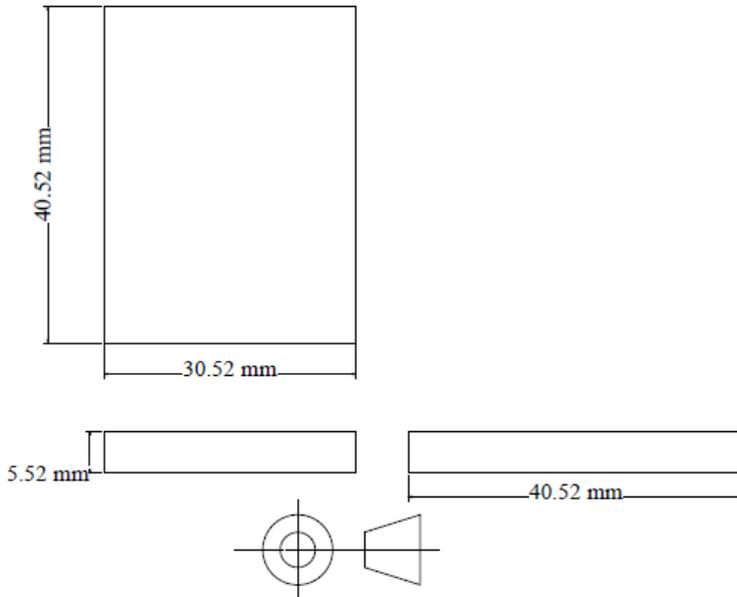
a. *Shrinkage allowance*:

$$\text{Panjang} : 40 \text{ mm} + (40 \times 13/1000) = 40.52 \text{ mm}$$

$$\text{Lebar} : 30 \text{ mm} + (30 \times 13/1000) = 30.52 \text{ mm}$$

$$\text{Tebal} : 5 \text{ mm} + (5 \times 13/1000) = 5.52 \text{ mm}$$

Gambar 4.3 berikut merupakan gambar dari *pattern* dan desain benda cor yang akan digunakan pada proses pengecoran aluminium terutama dalam membuat cetakan setelah dilakukan perhitungan *shrinkage allowance*. Dimana terjadi penambahan ukuran dimensi dari masing-masing panjang, lebar, dan tebal dari dimensi akhir benda cor yang diinginkan.



Gambar 4.3 Dimensi *pattern* dan benda hasil cor dengan *shrinkage allowance*

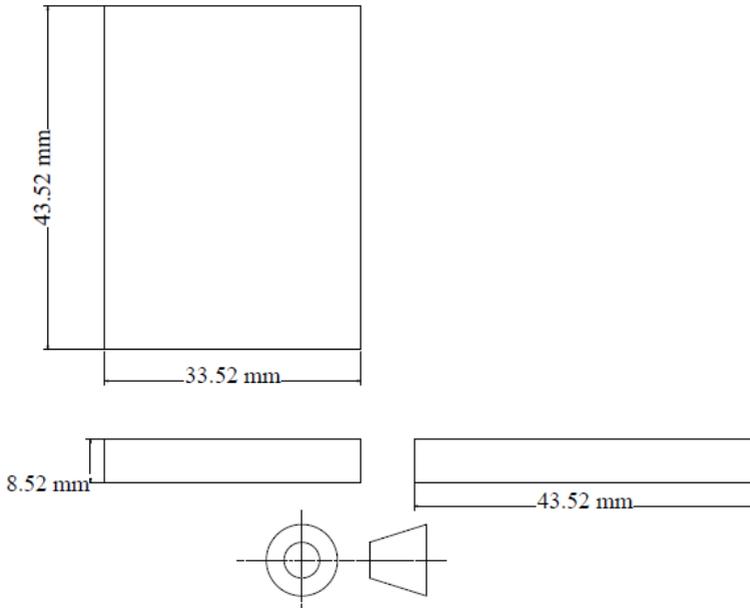
b. Machining Allowance

Panjang : $40,52 \text{ mm} + (1.5 \times 2) = 43.52 \text{ mm}$

Lebar : $30,52 \text{ mm} + (1.5 \times 2) = 33.52 \text{ mm}$

Tebal : $5,52 \text{ mm} + (1.5 \times 2) = 8.52 \text{ mm}$

Gambar 4.4 berikut merupakan gambar dari *pattern* dan desain benda cor yang akan digunakan pada proses pengecoran aluminium terutama dalam membuat cetakan setelah dilakukan perhitungan *machining allowance*. Dimana terjadi penambahan ukuran dimensi dari masing-masing panjang, lebar, dan tebal dari dimensi akhir benda cor yang diinginkan.

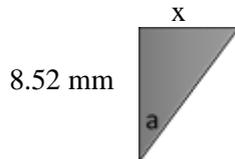


Gambar 4.4 Dimensi *pattern* dan benda hasil cor dengan *machining allowance*

c. *Draft allowance*

Perhitungan *draft allowance* dimulai dengan menghitung nilai penambahan panjang dari salah satu sisi menggunakan rumus dengan perhitungan sebagai berikut:

$$\tan a = x/8.52 \text{ mm}$$



Gambar 4.5 Perhitungan *draft allowance*

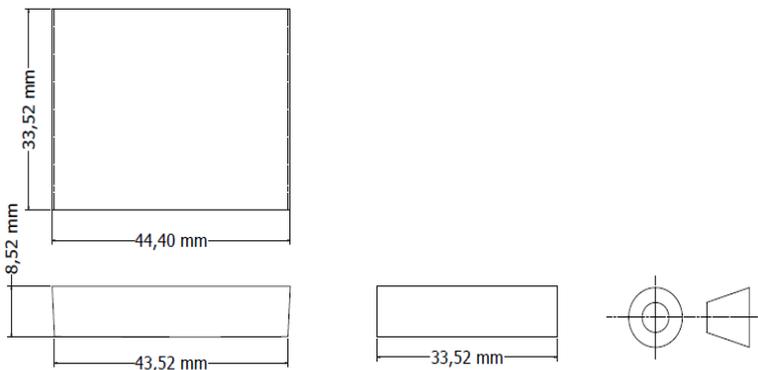
nilai dari $\tan \alpha$ adalah 0.052 sehingga dapat ditentukan nilai dari x adalah

$$x = 0.052 \times 8.52 = 0.44304 \text{ mm}$$

Sehingga penambahan panjang untuk sisi yang terkena *draft allowance* adalah sebagai berikut:

$$\text{Panjang (draft)} = 43.52 + 2 \times 0.44304 = 44.4 \text{ mm}$$

Gambar 4.6 berikut merupakan gambar dari *pattern* dan desain benda cor yang akan digunakan pada proses pengecoran aluminium terutama dalam membuat cetakan setelah dilakukan perhitungan *draft allowance*. Dimana terjadi penambahan ukuran dimensi dari salah satu panjang yang dikenai *draft allowance*.



Gambar 4.6 Dimensi *pattern* dan benda hasil cor dengan *draft allowance*

3. Temperatur

Dalam proses pengecoran ini menggunakan temperatur 750°C untuk melakukan proses peleburan anoda korban aluminium. Penggunaan temperatur ini didasarkan pada penelitian

sebelumnya yang telah dilakukan oleh Ndaliman, M. B. dan Pius, A. P. dimana temperatur optimum untuk pengecoran aluminium dan paduannya adalah pada 700°C hingga 750°C. Penggunaan temperatur diatas temperatur tersebut dapat menyebabkan terjadinya beberapa cacat pada benda coran berupa *blowholes* serta beberapa kasus lain seperti turunnya sifat mekanik dari benda hasil coran. Sementara temperatur penuangan yang digunakan adalah pada sekitar temperatur 700°C.

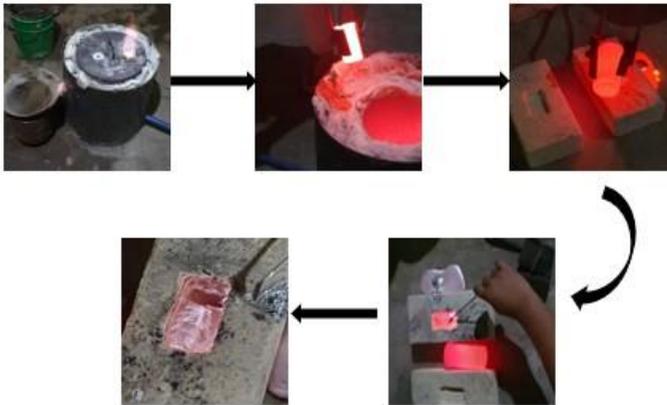
4. Cetakan

Cetakan yang digunakan dalam proses pengecoran ini adalah cetakan terbuka (*open mould*) dengan menggunakan batu tahan api (*insulation fire brick*). Penggunaan batu tahan api ini dikarenakan sifatnya yang mudah dilubangi untuk membuat bentuk sesuai dengan *pattern* yang tersedia. Selain itu batu tahan api ini juga tahan temperatur tinggi hingga mencapai 1200°C. Gambar 4.7 merupakan gambar dari cetakan yang digunakan pada proses pengecoran anoda korban aluminium.



Gambar 4.7 Batu tahan api sebagai cetakan pengecoran anoda korban aluminium

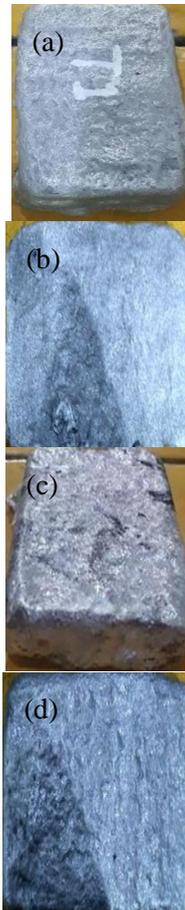
Setelah didapatkan data-data terkait pengecoran, maka dapat dilakukan proses pengecoran dengan langkah-langkah sesuai dengan skema pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8 Skema pengecoran anoda korban aluminium

4.1.2 Hasil Coran Anoda Korban Aluminium

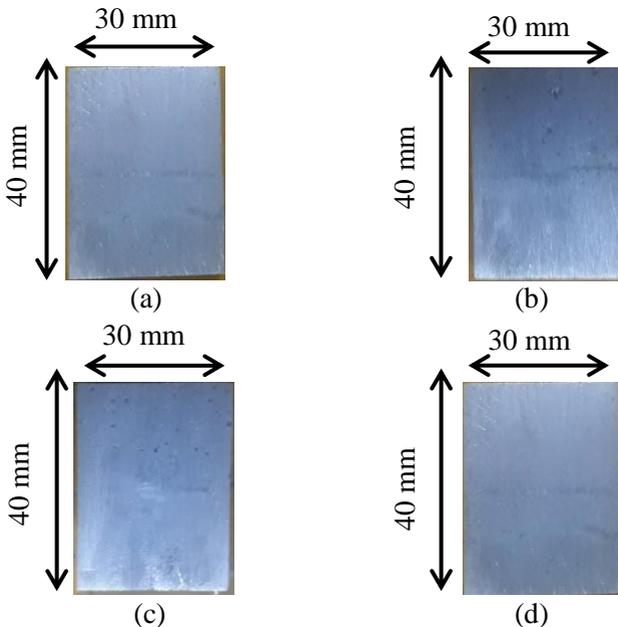
Pengamatan secara makro dilakukan untuk mengamati bahwa penambahan unsur paduan telah homogen pada proses pencampuran menggunakan metode pengecoran yang telah dilakukan. Pengamatan secara visual juga dilakukan untuk mengamati hasil coran anoda korban aluminium dimana didapatkan adanya cacat berupa permukaan hasil coran yang terlihat kasar seperti ditunjukkan pada Gambar 4.9. Hal ini disebabkan karena cetakan yang digunakan terbuat dari batu tahan api yang memiliki permukaan yang kasar juga. Selain itu dimensi yang dihasilkan juga kurang presisi sesuai dengan perhitungan yang telah dilakukan. Hal ini disebabkan karena sifat fisik dari cetakan berupa batu tahan api yang mudah sekali hancur sehingga sulit mencapai dimensi yang presisi sesuai dengan perhitungan.



Gambar 4.9 Hasil coran anoda korban aluminium sebelum dilakukan proses *machining* dengan penambahan unsur (a) 16.31% Zn, (b) 17.25% Zn, (c) 18.95% Zn, (d) 19.8% Zn

4.1.3 Hasil Coran Anoda Korban Aluminium Setelah Proses *Machining*

Pada Gambar 4.8 berikut merupakan gambar penampang melintang hasil coran yang telah dilakukan proses *machining* untuk mendapatkan dimensi sesuai dengan target yang diharapkan.



Gambar 4.10 Hasil coran anoda korban aluminium dengan penambahan unsur (a) 16.31% , (b) 17.25%Zn (c) 18.95% Zn, dan (d) 19.8% Zn

Pada pengamatan secara makro hasil coran sudah menunjukkan terjadinya pencampuran yang homogen antara anoda korban dan unsur pemadu yang ditambahkan. Pada pengamatan secara visual juga menunjukkan tidak adanya *internal defect* pada benda coran seperti pada gambar 4.10 (a), (b), (c), dan (d) di atas. Hal ini sesuai dengan penelitian sebelumnya oleh Ndaliman, M. B. dan Pius, A. P. dimana temperatur penuangan dilakukan pada 700°C tidak ditemukan adanya cacat berupa *internal defect*.

4.2 Komposisi Kimia Anoda Korban

Pengujian komposisi hasil coran dilakukan dengan menggunakan instrumen pengujian *X-Ray Fluorescence (XRF)*. Pengujian dilakukan di Lembaga Pusat Penelitian Mahasiswa, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (LPPM ITS) untuk

mengetahui perbandingan antara komposisi unsur pada aluminium hasil coran berdasarkan perhitungan target komposisi dan komposisi unsur pada aluminium hasil pengujian. Hasil pengujian komposisi anoda korban aluminium dapat dilihat pada Tabel 4.1, Tabel 4.2, Tabel 4.3, dan Tabel 4.4 berikut.

Tabel 4.1 Komposisi anoda korban aluminium tanpa penambahan unsur paduan

Unsur	Al	P	Ca	Ti	Fe	Co	Ni	Cu	Zn
Hasil	81.4	0.7	0.8	0.04	0.38	0.0	0.02	0.16	16.3
Pengujian (%)	5	8	4	5	35	1	3	5	1

Tabel 4.2 Komposisi anoda korban aluminium dengan penambahan unsur paduan 0.7% Zn (Al + 17.25% Zn)

Unsur	Al	P	Ca	Ti	Fe	Co	Ni	Cu	Zn
Target (%)	81.45	0.58	0.54	0.045	0.1835	0.01	0.023	0.165	17.01
Hasil Pengujian (%)	81,25	0,655	0,65	0,025	0,3385	0,07	0,021	0,071	17,025

Tabel 4.3 Komposisi anoda korban aluminium dengan penambahan unsur paduan 2.6% Zn (Al + 18.95% Zn)

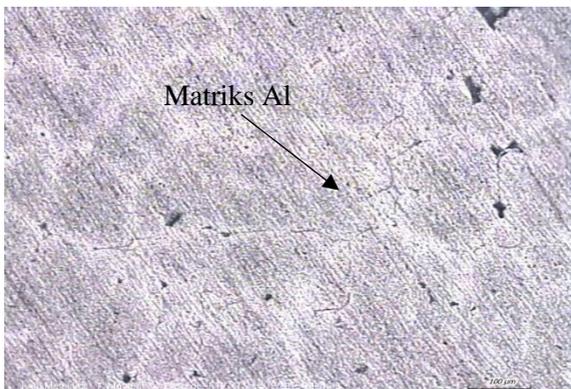
Unsur	Al	P	Ca	Ti	Fe	C	Ni	Cu	Zn
Target (%)	81.45	0,5335	0,5935	0,045	0,3835	0,01	0,023	0,165	18,91
Hasil Pengujian (%)	78	1,25	1,4	0,02	0,3765	0,01	0,0255	0,086	18,95

Tabel 4.4 Komposisi anoda korban aluminium dengan penambahan unsur paduan 3.5% Zn (Al + 19.8% Zn)

Unsur	Al	P	Ca	Ti	Fe	Co	Ni	Cu	Zn
Targe	78,	0,6	0,6	0,04	0,38	0,01	0,0	0,1	19,
t (%)	25	35	95	5	35		23	65	81
Hasil	74,	2,2	2,2	0,07	0,57	0,00	0,0	0,1	19,
Pengu	9		6	65	7	85	32	2	8
jian									
(%)									

4.3 Uji Metalografi

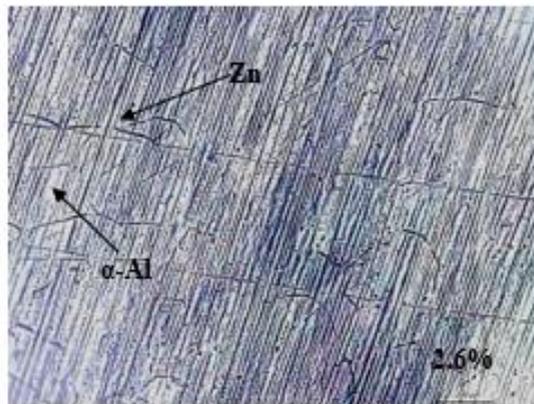
Pengujian metalografi digunakan untuk mengidentifikasi pengaruh penambahan unsur paduan Zn terhadap anoda korban aluminium berupa struktur mikronya. Pengujian dilakukan di Laboratorium Metalurgi, Departemen Teknik Material, ITS dengan menggunakan standar ASTM E 407-07. Pengujian dilakukan dengan menggunakan larutan etsa keller yang terdiri dari campuran larutan 2 mL HF, 3 mL HCl, 5 mL HNO₃, dan 190 mL Aquades. Hasil pengujian metalografi ditunjukkan pada Gambar 4.11, Gambar 4.12, Gambar 4.13 sampai dengan Gambar 4.14.



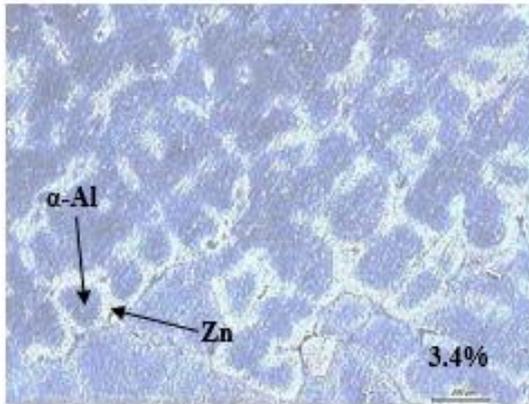
Gambar 4.11 Struktur mikro anoda korban aluminium tanpa penambahan unsur paduan (Al) perbesaran 10x



Gambar 4.12 Struktur mikro anoda korban aluminium dengan penambahan unsur paduan 0.7%Zn (Al-17.25%Zn) perbesaran 10x



Gambar 4.13 Struktur mikro anoda korban aluminium dengan penambahan unsur paduan 2.6%Zn (Al-18.95%Zn) perbesaran 10x



Gambar 4.14 Struktur mikro anoda korban aluminium dengan penambahan unsur paduan 3.5%Zn (Al-19.8%Zn) perbesaran 10x

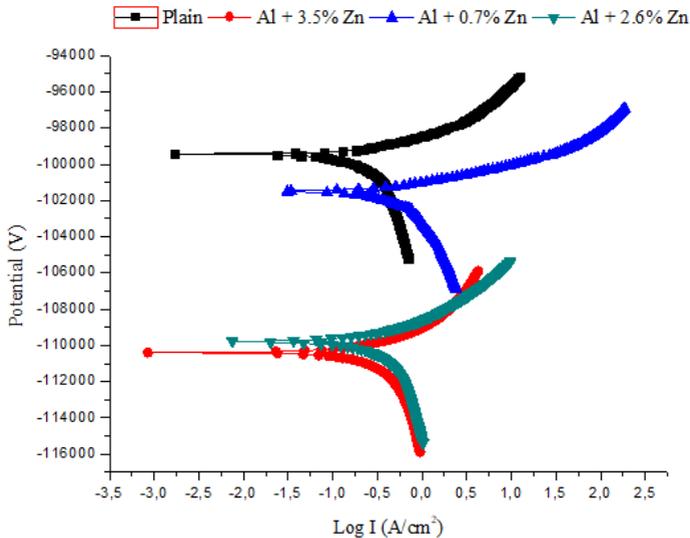
Berdasarkan diagram fasa Al-Zn yang terdapat pada ASM Handbook Vol. 3, Zn memiliki batas kelarutan yang cukup tinggi dalam aluminium pada temperatur tinggi, dan juga memiliki kelarutan yang masih cukup tinggi pada temperatur ruang yaitu sekitar 5% (Shayegh Boroujeny, B., 2017). Hal ini menunjukkan bahwa kandungan seng (Zn) dibawah batas kelarutan tersebut masih dapat terlarut dalam aluminium berdasarkan diagram fasa biner Al-Zn. Sementara kandungan Zn yang lebih besar melebihi batas kelarutan tersebut dapat memungkinkan terjadinya presipitasi Zn dalam batas butir aluminium.

Berdasarkan pengamatan yang telah dilakukan pada struktur mikro aluminium dengan variasi penambahan unsur seng (Zn) menunjukkan beberapa perbedaan. Pada gambar 4.11 yang merupakan gambar struktur mikro anoda aluminium tanpa penambahan seng (Zn) menunjukkan bahwa terdapat adanya batas butir yang berwarna lebih terang, dan menunjukkan adanya matriks Al yang memiliki warna lebih gelap. Selanjutnya pada pengamatan struktur mikro dari anoda aluminium dengan penambahan unsur seng (Zn) sebesar 0.7% menunjukkan adanya presipitat Zn yang

terdapat pada batas butir yang ditunjukkan oleh gambar 4.12. Selain itu dapat dilihat pula bahwa matriks Al masih terdapat pada penambahan 0.7% Zn ini, dan ditunjukkan dengan warna putih dalam batas butir. Setelah itu, pada pengamatan struktur mikro anoda korban aluminium dengan penambahan seng (Zn) sebesar 2.6% tampak adanya perubahan pada matriks Al dimana pada pengamatan yang dilakukan tampak area matriks mulai mengecil dan batas butir dengan kandungan Zn terlihat bertambah seperti ditunjukkan pada gambar 4.13. Kemudian, untuk pengaruh penambahan unsur seng (Zn) sebesar 3.5% ditunjukkan pada gambar 4.14 dimana pada hasil pengamatan yang dilakukan terdapat perbedaan yang cukup signifikan dibandingkan hasil dari pengamatan sebelumnya. Pada struktur mikro, ditemukan adanya penyempitan pada daerah matriks Al pada beberapa bagian struktur mikro dan juga dapat diketahui terdapat adanya penebalan batas butir dimana terdapat kandungan Zn didalamnya dan berwarna kehitaman. Hal ini bersesuaian dengan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Shin, S. Pada tahun 2016 terkait dengan pengaruh penambahan Zn terhadap struktur mikro paduan Al-Zn dimana penambahan unsur Zn akan menyebabkan perubahan ukuran butir matriks Al menjadi lebih kecil yang disebabkan adanya perubahan fraksi volume Al yang juga menurun seiring dengan penambahan unsur Zn.

4.4 Uji Tafel Polarisasi

Pengujian tafel polarisasi digunakan untuk mendapatkan nilai laju korosi dari anoda korban aluminium dengan penambahan unsur berupa seng (Zn). Pengujian dilakukan di Laboratorium Korosi dan Kegagalan Material, Departemen Teknik Material, ITS dengan mengacu pada standar berupa ASTM G5 dan ASTM G102. Hasil pengujian berupa grafik polarisasi tafel dari masing-masing anoda dengan penambahan komposisi unsur yang berbeda dapat dilihat pada Gambar 4.15.



Gambar 4.15 Grafik hasil uji tafel polarisasi

Kurva polarisasi tafel seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.15 tersebut merupakan kurva yang menggunakan representasi skala secara logaritmik. Pada umumnya, gambar kurva yang dihasilkan dari suatu uji tafel terdiri atas 2 kurva, kurva bagian atas yang merupakan kurva anodik dan kurva bagian bawah yang merupakan kurva katodik. Kedua kurva tersebut menggambarkan dua hal yang berbeda dari pengujian tafel yang dilakukan. Kurva bagian atas yang merupakan kurva anodik menggambarkan reaksi oksidasi yang terjadi pada sampel saat dilakukan pengujian tafel polarisasi. Sedangkan kurva bagian bawah yang merupakan kurva katodik menggambarkan reaksi reduksi yang terjadi pada sampel saat dilakukan pengujian tafel polarisasi. Pembentukan kurva tafel polarisasi dimulai dengan menggabungkan kedua kurva anodik dan katodik tersebut yang kemudian akan ditarik garis berupa garis lurus yang menyinggung masing-masing kurva dari kedua kurva tersebut. Setelah itu, dengan melakukan metode ekstrapolasi akan

didapatkan suatu titik yang berpotongan antara kedua kurva tersebut. Titik yang berpotongan tersebut kemudian digunakan untuk menentukan nilai dari E^{corr} dan I^{corr} dari sampel yang diuji.

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan pada masing-masing sampel anoda korban aluminium dengan penambahan unsur Zn dengan komposisi masing-masing yaitu 0%Zn, 0.7%Zn, 2.6%Zn, dan 3.5% Zn didapatkan nilai E^{corr} dan I^{corr} dari masing-masing sampel tersebut. Dari kurva anoda korban aluminium tanpa penambahan seng (Zn) menunjukkan nilai E^{corr} sebesar -0.9667 V dan nilai I^{corr} sebesar $3.3219\text{E-}06$ A/cm². Seiring dengan penambahan komposisi seng (Zn) pada anoda korban aluminium menunjukkan adanya peningkatan aktivitas anoda korban aluminium ke arah yang lebih negatif yang ditunjukkan dengan pergerakan kurva E^{corr} dan I^{corr} ke arah yang lebih negatif. Pada penambahan seng (Zn) dengan komposisi 0.7%Zn menunjukkan nilai E^{corr} dan I^{corr} sebesar -1.015 V dan $9.0827\text{E-}06$ A/cm². Penambahan komposisi 2.6%Zn menurunkan nilai E^{corr} dan I^{corr} menjadi sebesar -1.015 V dan $9.3409\text{E-}06$ A/cm². Sementara itu penambahan komposisi unsur sampai dengan 3.4%Zn juga menyebabkan turunnya nilai E^{corr} dan I^{corr} dengan nilai masing-masing adalah sebesar -1.1039 V dan $1.063\text{E-}05$ A/cm². Menurut Krakowiak (2017), I^{corr} adalah sebagai nilai kinetik dan E^{corr} sebagai nilai termodinamik. Hal ini menunjukkan bahwa yang I^{corr} akan mempengaruhi nilai laju korosi dari suatu material. Sedangkan nilai E^{corr} akan menunjukkan nilai kecenderungan dari suatu material mengalami korosi bukan laju korosi. Selain itu berdasarkan perhitungan menggunakan rumus juga dapat diketahui bahwa nilai I^{corr} berbanding lurus dengan laju korosi dari suatu material.

Selain data berupa nilai E^{corr} dan I^{corr} akan didapat pula data berupa laju korosi. Data nilai laju korosi beserta nilai E^{corr} dan I^{corr} seiring penambahan komposisi unsur Zn pada anoda korban aluminium dapat dilihat pada Tabel 4.5 berikut ini.

Tabel 4.5 Nilai E^{corr} , I^{corr} , dan laju korosi anoda korban aluminium dengan penambahan unsur Zn

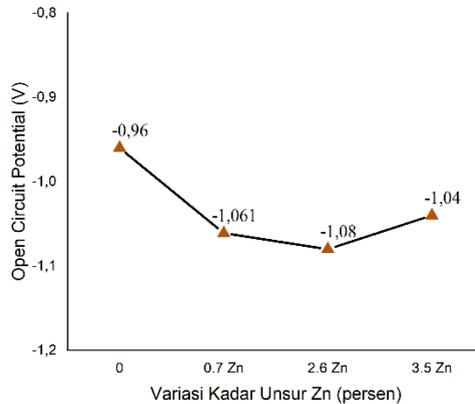
No.	Komposisi	E^{corr} (V)	I^{corr} (A/cm ²)	Laju Korosi (mpy)
1.	Al	-0.9667	3.3219E-06	0.11227
2.	Al + 0.7 Zn	-1.015	9.0827E-06	0.30697
3.	Al + 2.6 Zn	-1.098	9.3409E-06	0.3157
4.	Al + 3.4 Zn	-1.1039	1.063E-05	0.35927

Berdasarkan Tabel 4.5 menunjukkan bahwa terjadi perubahan nilai E^{corr} dan I^{corr} menjadi lebih negatif dimana hal ini menunjukkan bahwa penambahan unsur seng (Zn) dapat menyebabkan anoda korban aluminium menjadi lebih aktif. Adanya unsur seng (Zn) dalam batas butir aluminium berfungsi sebagai aktivator (depassivator) sehingga dapat menyebabkan rusaknya lapisan pasif yang berada pada anoda korban aluminium. Dengan adanya kerusakan lapisan pasif yang berada pada anoda korban aluminium inilah yang akan mengakibatkan adanya kenaikan laju korosi pada penambahan komposisi unsur Zn. Sesuai dengan hasil yang ada pada Tabel 4.5 tersebut, laju korosi naik dari tiap penambahan unsur Zn mulai dari 0% Zn, 0.7% Zn, 2.6% Zn, dan 3.5% Zn dengan nilai laju korosi masing-masing yaitu 0,11227; 0,30697; 0,3157; dan 0,35927 dalam satuan mpy.

4.5 Uji *Open Circuit Potential* (OCP)

Pengujian *Open Circuit Potential* dilakukan untuk mengetahui perbandingan nilai *open circuit potential* antara anoda aluminium sebelum penambahan komposisi unsur seng (Zn) dan setelah penambahan komposisi seng (Zn). Pengujian ini dilakukan dengan cara menghubungkan anoda dengan katoda berupa elektroda referensi Ag/AgCl pada multimeter. Kedua elektroda dicelupkan hingga setengah bagian ke dalam larutan NaCl 3.5%.

Hasil dari pengujian ini berupa nilai OCP seperti ditunjukkan pada Gambar 4.16



Gambar 4.16 Grafik nilai *Open Circuit Potential* pada anoda korban aluminium dengan variasi penambahan Zn

Dari Gambar 4.16 tersebut didapatkan bahwa terjadi penurunan nilai OCP pada penambahan komposisi 2,6% Zn namun mengalami kenaikan ketika pada penambahan komposisi 3,4% Zn. Hal ini telah sesuai dengan penelitian yang sebelumnya dilakukan oleh Muller, I. L. bahwa penambahan unsur Zn akan berpengaruh pada nilai potensial dari anoda korban aluminium yaitu nilai potensialnya akan menurun yang disebabkan karena anoda yang berubah menjadi lebih aktif. Namun demikian, nilai potensial ini akan menurun hingga penambahan unsur seng (Zn) dengan komposisi 3% Zn, dimana penambahan komposisi yang lebih tinggi dari komposisi tersebut tidak mengakibatkan penurunan yang cukup signifikan jika dibandingkan dengan anoda korban aluminium tanpa penambahan komposisi seng (Zn). Selain itu, menurut penelitian Lameche-Djegabha pada tahun 2014 adanya penambahan unsur Zn akan menyebabkan munculnya struktur

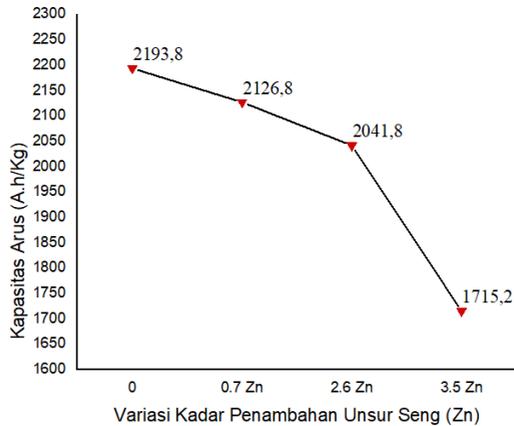
mikro yang berupa matriks α -Al tanpa adanya pembentukan fasa β pada bagian butir. Selain itu, terdapat banyak Zn yang terkumpul pada bagian batas butir yang dapat meningkatkan aktivitas anoda sehingga nilai OCP nya akan menurun.

4.6 Uji Galvanik

Pengujian galvanik dilakukan untuk mengetahui beberapa data elektrokimia dari anoda korban berupa keluaran arus (mA) dan beda potensial (mV) antara anoda dan katoda yang terukur melalui multimeter. Selain didapatkan data berupa keluaran arus dan beda potensial, perendaman anoda dan katoda yang dilakukan dalam waktu tertentu akan menghasilkan data berupa pengurangan massa anoda korban. Setelah mendapatkan data-data tersebut maka selanjutnya akan dilakukan perbandingan parameter anoda korban berupa nilai kapasitas arus, laju konsumsi, serta efisiensi dari anoda korban aluminium sebelum dilakukan penambahan komposisi unsur seng (Zn) dengan setelah dilakukan penambahan unsur seng (Zn) dengan variasi komposisi tertentu. Pengujian galvanik dilakukan sesuai dengan standar ASTM G71-81.

4.6.1 Kapasitas Arus

Hasil perhitungan kapasitas arus ditunjukkan seperti pada Gambar 4.17, dimana nilai dari kapasitas arus anoda korban aluminium mengalami penurunan nilai seiring dengan penambahan unsur seng (Zn).



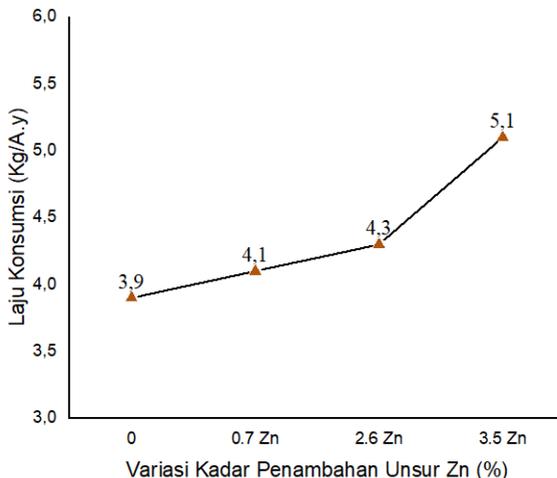
Gambar 4.17 Grafik nilai kapasitas arus pada anoda korban aluminium dengan variasi penambahan Zn

Berdasarkan Gambar 4.17 kapasitas arus anoda korban aluminium tanpa penambahan unsur seng (Zn) adalah senilai 2193,8 A.h/Kg. Setelah penambahan unsur seng (Zn) sebesar 0.7%Zn, 2.6%Zn, dan 3.5%Zn didapatkan nilai kapasitas arus berturut-turut sebesar 2126,8; 2041,8; dan 1715,2. Jika dibandingkan dengan kapasitas arus teori, maka hasil tersebut tidak sesuai dengan teori bahwa kapasitas arus anoda korban aluminium seharusnya bernilai 2600 A.h/kg (L. Sherwood). Ketidaksesuaian nilai kapasitas arus aktual dengan kapasitas arus teori ini dipengaruhi oleh faktor waktu. Dimana seiring berjalannya waktu pengurangan massa dari anoda korban akan semakin banyak sehingga menyebabkan hasil perhitungan kapasitas arus anoda korban aluminium menjadi berkurang. Sementara itu, hal ini sudah sesuai dengan peningkatan E^{corr} dan I^{corr} yang terjadi akan berpengaruh terhadap laju korosi anoda korban aluminium yang juga akan meningkat (Krokawiak, S). Hal inilah yang menyebabkan pengurangan massa dari anoda korban aluminium menjadi meningkat seiring dengan meningkatnya laju korosi. Hal ini tentu akan berpengaruh pula terhadap kapasitas arus yang semakin turun, karena berdasar perhitungan nilai kapasitas arus berbanding terbalik dengan pengurangan massa. Selain itu,

menurut penelitian Lameche-Djegabha pada tahun 2014 adanya penambahan unsur Zn akan menyebabkan munculnya struktur mikro yang berupa matriks α -Al tanpa adanya pembentukan fasa β pada bagian butir. Banyaknya Zn yang terkumpul pada bagian batas butir dapat meningkatkan aktivitas anoda yang akan mengakibatkan korosi galvanik karena adanya beda potensial dengan fasa Al yang ada. Hal ini akan mengakibatkan laju korosi meningkat dan pengurangan massanya pun akan meningkat. Sehingga ketika dilakukan perhitungan kapasitas arus akan menyebabkan nilainya menurun akibat adanya pengurangan massa yang semakin meningkat ini.

4.6.2 Laju Konsumsi

Hasil perhitungan laju konsumsi ditunjukkan seperti pada Gambar 4.18, dimana nilai dari laju konsumsi anoda korban aluminium mengalami kenaikan seiring dengan penambahan unsur seng (Zn).

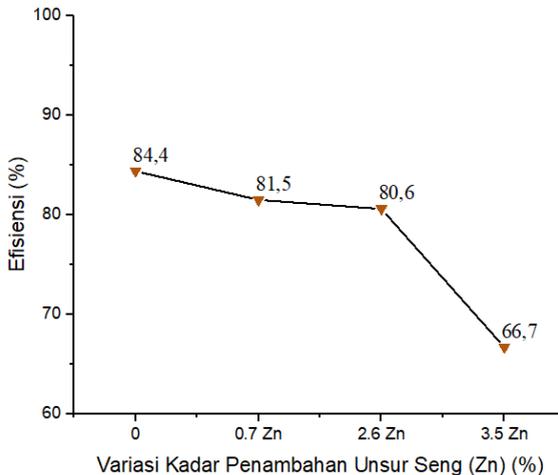


Gambar 4.18 Grafik nilai laju konsumsi pada anoda korban aluminium dengan variasi penambahan Zn

Berdasarkan gambar 4.18 kapasitas arus anoda korban aluminium tanpa penambahan unsur seng (Zn) adalah senilai 3,9 Kg/Ay. Setelah penambahan unsur seng (Zn) sebesar 0.7%Zn, 2.6%Zn, dan 3.5%Zn didapatkan nilai kapasitas arus berturut-turut sebesar 4,1; 4,3; dan 5,1. Nilai laju konsumsi tersebut didapatkan dari perhitungan menggunakan rumus berupa pengurangan massa dibagi dengan arus dan waktu celup. Pengurangan massa yang semakin besar terjadi seiring dengan penambahan unsur seng (Zn) pada anoda korban. Hal ini berkesesuaian dengan teori bahwa penambahan unsur seng (Zn) akan meningkatkan I^{corr} dari anoda korban aluminium. Peningkatan nilai I^{corr} sebanding dengan meningkatnya laju korosi anoda korban aluminium (Krakowiak, S, 2017). Selain itu, keberadaan unsur Zn yang mengumpul pada batas butir akan mengakibatkan teradanya peningkatan aktivitas anoda yang semakin meningkat sehingga laju korosi dan pengurangan massanya pun meningkat. Hal tersebut menjadikan laju konsumsi pada anoda korban aluminium juga akan meningkat seiring dengan penambahan unsur seng (Zn).

4.6.2 Efisiensi Anoda

Efisiensi anoda korban yang dimaksudkan disini merupakan efisiensi proteksi yang berhubungan dengan nilai kapasitas arus pada anoda korban aluminium dimana nilai kapasitas arus ini berhubungan dengan transfer elektron aktif yang terjadi pada larutan elektrolit. Hal ini mengindikasikan bahwa dengan adanya nilai kapasitas arus yang tinggi maka akan menimbulkan banyaknya transfer elektron aktif ke lingkungan. Sehingga dapat ditarik kesimpulan bahwa tingginya nilai kapasitas arus menunjukkan bahwa anoda korban memiliki efisiensi yang tinggi. Hasil perhitungan efisiensi anoda ditunjukkan seperti pada gambar 4.19, dimana nilai dari efisiensi anoda korban aluminium mengalami penurunan seiring dengan penambahan unsur seng (Zn).



Gambar 4.19 Grafik nilai efisiensi pada anoda korban aluminium dengan variasi penambahan Zn

Berdasarkan gambar 4.19 efisiensi anoda korban aluminium tanpa penambahan unsur seng (Zn) adalah senilai 84,4%. Setelah penambahan unsur seng (Zn) sebesar 0.7% Zn, 2.6% Zn, dan 3.5% Zn didapatkan nilai kapasitas arus berturut-turut sebesar 81,5%; 80,6%; dan 66,7%. Perhitungan efisiensi dilakukan dengan cara membandingkan nilai kapasitas arus yang telah dihitung atau kapasitas arus aktual dengan kapasitas arus teori dari anoda aluminium yaitu sebesar 2600 A.h/Kg (L. Sherwood). Selain dilihat dari kapasitas arus anoda, penurunan efisiensi anoda korban yang terjadi seiring dengan penambahan unsur seng (Zn) juga dapat terjadi karena seiring dengan penambahan unsur tersebut akan menimbulkan terkumpulnya Zn pada batas butir yang akan mengakibatkan anoda aluminium menjadi semakin aktif dan akan berakibat laju korosinya meningkat (Lameche-Djegabha, 2014). Peningkatan laju korosi meningkatkan laju konsumsi dari anoda korban itu sendiri. Sementara itu tingginya laju konsumsi akan menyebabkan anoda korban aluminium akan semakin cepat habis sehingga nilai efisiensinya menurun. Berdasarkan hal

tersebut, untuk menaikkan efisiensi dari anoda korban berdasarkan laju konsumsinya, maka diperlukan pengurangan massa yang kecil sehingga laju konsumsinya juga kecil.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penambahan unsur seng (Zn) berpengaruh terhadap beberapa parameter anoda korban aluminium seperti penurunan nilai *open circuit potential* yaitu sebesar -0.96 V pada anoda aluminium tanpa penambahan unsur Zn menjadi -1.061 V pada penambahan unsur 0.7% Zn, dan menurun lagi menjadi -1.08 V pada penambahan unsur 2.6% Zn, namun terjadi kenaikan hingga -1.04 V pada penambahan 3.4% Zn, peningkatan laju konsumsi dan laju korosi masing-masing 3,9 Kg/A.y dan 0.11227 mpy pada anoda tanpa penambahan unsur Zn menjadi 4,1 Kg/A.y dan 0.30697 mpy pada penambahan unsur 0.7% Zn, dilanjutkan dengan peningkatan laju konsumsi dan laju korosi pada penambahan unsur 2.6% Zn dan 3.4% Zn dengan nilai masing-masing sebesar 4.3 Kg/A.y dan 0.3157 mpy; 5.1 Kg/A.y dan 0.3597 mpy. Selain itu terjadi penurunan nilai kapasitas arus dan efisiensi anoda yang berurutan dari anoda tanpa penambahan unsur Zn dan setiap penambahan kadar unsur Zn (0.7% Zn, 2.6% Zn, dan 3.4% Zn) dimulai dari 2.1938 A.h/Kg, 2126,8 A.h/Kg, 2041,8 A.h/Kg, hingga 1715,2 A.h/Kg dan untuk penurunan efisiensinya dimulai dari 84,4%, 81,5%, 80,6%, hingga 66,7% disebabkan adanya peningkatan aktivitas anoda aluminium.
2. Penambahan unsur seng (Zn) berpengaruh terhadap struktur mikro anoda korban aluminium. Dengan adanya penambahan unsur seng (Zn) menyebabkan adanya presipitat Zn pada batas butir. Hal ini disebabkan karena penambahan unsur Zn melebihi batas kelarutannya yaitu sebesar 5% dalam matriks Al dalam temperatur ruang (25°C).

5.2 Saran

Adapun saran yang diperoleh dari penelitian ini untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Melakukan komparasi penelitian anoda korban aluminium dengan menggunakan bahan berupa Al ingot dan juga Zn ingot dengan kadar pengotor seminimal mungkin.
2. Melakukan penelitian terkait pengaruh sifat mekanik seperti uji kekerasan terhadap paduan anoda orban aluminium hasil dari pengecoran dengan penambahan komposisi Zn.
3. Melakukan penelitian terkait aplikasi anoda korban aluminium dengan variasi penambahan unsur seng (Zn) dalam lingkungan air laut.

DAFTAR PUSTAKA

- _____.1992. *ASM Handbook Vol 3: Alloy Phase Diagram* . United States.
- _____.2003. *ASM Handbook Vol 13: Corrosion:Fundamentals, Testing, and Protection* . United States.
- _____.2017. **DNVGL-RPB401. Recommended Practice Cathodic Protection Design.** DNV GL AS
- Ahmad, Z. 2006. *Basic Concepts In Corrosion. Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control*, 9–56.
- Anggono, J. & Tjitro, S.1999. Studi Perbandingan Kinerja Anoda Korban Paduan Aluminium dengan Paduan Seng dalam Lingkungan Air Laut. **Jurnal Teknik Mesin**. 1.
- Bahadori, A. 2014. *Principle of Electrochemical Corrosion and Cathodic Protection. Cathodic Corrosion Protection Systems*, 1–34.
- Bohnes, H., & Franke, G. 1997. *Galvanic (Sacrificial) Anodes. Handbook of Cathodic Corrosion Protection*, 179–206.
- Callister, W. D. 2010. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. U.S.A.: *John Wiley & Sons, Inc.*
- Craig, B. D., Lane, R. A., Rose, D. H. Corrosion. 2006. *Prevention and Control: A Program Management Guide for Selecting Materials*. New York: *Alion Science and Technology*.
- De Rincón, O. T., Salas, O., Sánchez, M., de Romero, M. F., Romero, G., Zamora, R., Suárez, J. 2010. *Comparative Behavior Of Sacrificial Anodes Based On Mg, Zn, And Al Alloys In Brackish Water. NACE International*.
- Elayaperumal, K., & Raja, V. S. 2015. *Corrosion Failures*. John Wiley & Sons, Inc.
- Eltigani, H., Mngsantisuk P. 2015. *The Effect of Indium on Al-5 wt% Zn Sacrificial Anode in different Salinity. The 3rd International Conference on Technical Education*.
- Ferdian, D., Pratesa, Y., Togina, I., & Adelia, I. 2017. *Development of Al-Zn-Cu Alloy for Low Voltage Aluminum Sacrificial Anode. Procedia Engineering, 184, 418–422*.

-
- Fontana, M. G. 1987. *Corrosion Engineering*. New York: McGraw-Hill
- Groover, M. P. 2010. *Fundamentals of Modern Manufacturing*. John Wiley & Sons, Inc.
- Hammonds, P. 1989. *Chapter 4 An Introduction to Corrosion and its Prevention. Comprehensive Chemical Kinetics*, 233–279.
- Harsisto, Ginting, I. , & Eddy, D.C. 2001. *Anodic Protection performance of Steels ASTM A 516-60 And JIS G 3131 SPHC In Concentrated Sulfuric Acid. Indonesian Journal of Materials Science*, 2(3), 19-25
- Keyvani, A., Saremi, M., & Saeri, M. R. 2012. *Anodic behavior of Al–Zn–In sacrificial anodes at different concentration of zinc and indium. International Journal of Materials Research*, 103(12), 1533–1538.
- Khan, B., Rosli, M. U., Jahidi, H., Ishak, M. I., Zakaria, M. S., Jamalludin, M. R., ... Nawi, M. A. M. 2017. *Effect of zinc addition on the performance of aluminium alloy sacrificial anode for marine application. AIP Conference Proceedings*.
- Khireche, S., Boughrara, D., Kadri, A., Hamadou, L., & Benbrahim, N. 2014. *Corrosion mechanism of Al, Al–Zn and Al–Zn–Sn alloys in 3 wt.% NaCl solution. Corrosion Science*, 87, 504–516.
- Lameche-Djeghaba, S., Benchettara, A., Kellou, F., & Ji, V. 2013. *Electrochemical Behaviour of Pure Aluminium and Al–5%Zn Alloy in 3% NaCl Solution. Arabian Journal for Science and Engineering*, 39(1), 113–122.
- Liu, D. Y., Li, J. F., Ma, Y. L., Gupta, R. K., Birbilis, N., & Zhang, R. 2018. *A closer look at the role of Zn in the microstructure and corrosion of an Al-Cu-Li alloy. Corrosion Science*.
- Muazu, A., Yaro, S. A. 2011. *Effects of Zinc Addition on the Performance of Aluminium as Sacrificial Anode in Seawater. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*
-

-
- Ndaliman, M. B., PIUS, Akpan. 2007. *Behavior of Aluminum Alloy Castings under Different Pouring Temperatures and Speeds. Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*. 6.
- Pawlowicz, R. 2018. *Electrical Properties of Sea Water: Theory and Applications. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*
- Popov, B. N. 2015. *Evaluation of Corrosion. Corrosion Engineering*, 1–28.
- Pratesa, Y., Ferdian, D., & Togina, I. 2017. *Effect of Copper and Silicon on Al-5%Zn Alloy as a Candidate Low Voltage Sacrificial Anode. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 204, 012026.
- Roberge, P. R. 2000. *Handbook of Corrosion Engineering*. New York: McGraw-Hill
- Shayegh Boroujeny, B., Ghashghaei, M. R., & Akbari, E. 2018. *Effects of SIMA (Strain Induced Melt Activation) on microstructure and electrochemical behavior of Al-Zn-In sacrificial anodes. Journal of Alloys and Compounds*, 731, 354–363.
- Salinas, D. R., García, S. G., & Bessone, J. B. 1999. *Influence of alloying elements and microstructure on aluminium sacrificial anode performance: case of Al – Zn. Journal of Applied Electrochemistry*, 29(9), 1063–1071.
- Srinivas, M., Adapaka, S. K., & Neelakantan, L. 2016. *Solubility effects of Sn and Ga on the microstructure and corrosion behavior of Al-Mg-Sn-Ga alloy anodes. Journal of Alloys and Compounds*, 683, 647–653.
- Trethewey, K.R., Chamberlain, J. 1988. *Corrosion, for Students of Science and Engineering*. U.K.: Longman Group
- Vargel, C. 2004. *Seawater. Corrosion of Aluminium*, 335–351
- Wang, S. S., Liang, C. H., & Huang, N. B. 2014. *Effects of Fe Content on the Corrosion Behavior of Al-Zn-In-Mg-Ti-Si Sacrificial Anode. Applied Mechanics and Materials*, 543-547, 3793–3797
-

Wen, J., He, J., & Lu, X. (2011). *Influence of silicon on the corrosion behaviour of Al–Zn–In–Mg–Ti sacrificial anode. Corrosion Science*, 53(11), 3861–3865.

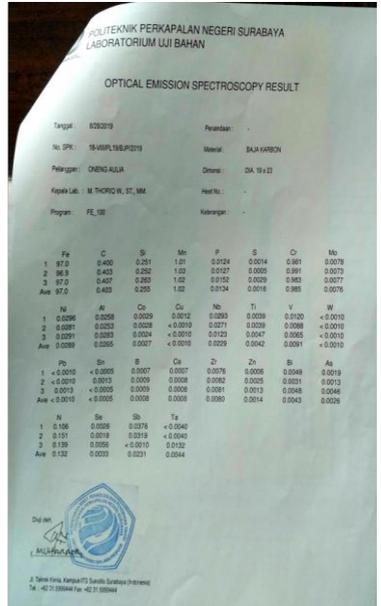
LAMPIRAN

Lampiran 1

Hasil Pengujian Komposisi Spesimen Baja

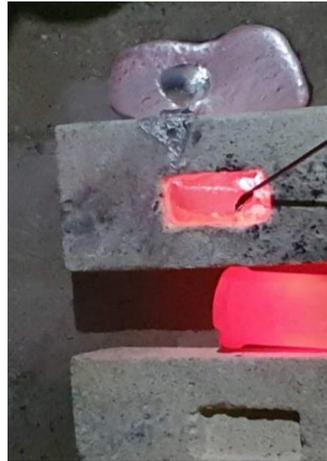
Tabel Hasil Pengujian Komposisi Spesimen Baja

Komposisi							
Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
97.0	0.403	0.255	1.02	0.013	0.001	0.985	0.0076
				4	6		
Ini	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W
0.0289	0.0265	0.002	<0.00	0.022	0.004	0.009	<0.00
		7	10	9	2	1	10
Pb	Sn	B	Ca	Zr	Zn	Bi	As
<0.00	<0.00	0.000	0.0008	0.008	0.001	0.004	0.0026
10	05	8		0	4	3	
N	Se	Sb	Ta				
0.132	0.0033	0.023	0.0044				
		1					



Lampiran 2
Dokumentasi Pengelasan







Lampiran 3
Dokumentasi Pengujian Metalografi





Lampiran 4
Pengujian Galvanik dan OCP



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

UCAPAN TERIMA KASIH

Selama berkuliah di Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS mulai dari mahasiswa baru hingga penulisan tugas akhir ini penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada:

1. Teman-teman angkatan MT18 yang selalu memberikan support dan bantuannya kepada penulis.
2. Teman-teman grup SP (SobatPromo): Adhy, Fadel Omar, Adit, dan (Dayyan) yang telah menjadi teman dekat serta selalu mendengarkan keluh kesah penulis.
3. Teman-teman Kos 3-30 Handis dan Dayyan yang telah menjadi teman kos yang sangat baik.
4. Teman-teman dan mas mbak pengurus BSO KWU HMMT FTI ITS periode 2017/2018 yang telah memberikan banyak sekali ilmu dan pengalaman kepada penulis.
5. Teman-teman sekaligus adik-adik pengurus BSO KWU HMMT FTI ITS periode 2018/2019 terkhusus kepada staff divisi produksi Albin, Nukha, dan Arsyad yang telah bekerja sama dengan sangat baik ketika menjadi pengurus.
6. Teman-teman pengurus LDJ Ash-Haabul Kahfi kabinet HAMASAH yang telah memberikan ilmu dan pengalaman yang baik pada penulis.
7. Teman-teman dan mas mbak asisten laboratorium korosi yang telah membagikan ilmu dan pengalamannya kepada penulis.
8. Teman-teman lab kimia material yang sudah sangat baik dalam menampung penulis di labnya.
9. Teman-teman lab komputasi Sugi, Iyando, Afrizal dan Alfa serta seluruh penghuni lab komputasi yang sudah sangat baik pada penulis dalam membantu mengerjakan tugas akhir.
10. Teman-teman lab fismat yang telah menerima penulis dengan sangat baik.
11. Teman-teman lab inovasi material yang telah menerima penulis dengan sangat baik.

12. Teman-teman lab pengolahan material Satrio, Henokh, Kepin, Erick, Naim, Rizki, Vito dan semuanya yang sudah membantu penulis dalam pengerjaan tugas akhir sekaligus mau menerima penulis dalam mengerjakan tugas akhir di lab ini.
13. Teman-teman seperjuangan Tugas Akhir Korosi dan Kegagalan Material Oneng, Fajar Naufal, Fajar Aditya, dan Siti, serta Nanda selaku partner tugas akhir penulis yang sudah sangat baik dan mau berbagi ilmu serta pengalamannya kepada penulis.
14. Teman-teman *Lazy Rented* yang sudah sangat baik kepada penulis.
15. Fauzan, Resna, Elgi, Yati, dan teman-teman SMA penulis yang masih setia menemani hingga masa-masa kuliah.
16. Semua pihak yang telah terlibat selama penulis berkuliah di ITS hingga menyelesaikan tugas akhir ini

BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Arif Rahman. Merupakan anak ke-2 dari dua bersaudara dari pasangan Moh. Imam Safi'i dan Robingaton yang lahir pada tanggal 24 Februari 1998 di Kabupaten Kediri. Penulis menempuh pendidikan dasar di MI Hidayatus Sholihin pada tahun 2004 – 2007, kemudian berpindah ke SDN Wonojoyo 1 pada tahun 2008 – 2010. Kemudian penulis melanjutkan jenjang pendidikannya ke SMP Negeri 1 Gurah pada tahun 2010 – 2013. Setelah itu penulis menempuh pendidikan atas di SMA Negeri 1 Kediri pada tahun 2013 – 2016. Setelah itu, penulis melanjutkan studi sarjananya di Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS mulai tahun 2016. Selama menempuh perkuliahan penulis pernah mengikuti beberapa pelatihan diantaranya LKMM Pra TD, LKMM TD, BES BSO KWU HMMT FTI ITS, dan Pearlite I LDJ Ash-Haabul Kahfi. Selain itu penulis pernah mengikuti beberapa organisasi seperti KWU HMMT FTI-ITS sebagai staff divisi produksi pada periode 2017/2018, KWU HMMT FTI-ITS sebagai Kepala Divisi Produksi pada periode 2018/2019, serta LDJ Ash-Haabul Kahfi sebagai Kepala Biro Produksi AK-Preneur pada periode 2018/2019. Selain itu, penulis juga pernah mengikuti kegiatan keprofesian seperti melakukan kerja praktik di Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia di bagian Pusat Penelitian Fisika selama 1 bulan, dan juga di PT Semen Indonesia (Persero), Tbk di seksi *Kiln and Coal Mill Maintenance* selama 1 bulan. Ketika berada di Departemen Teknik Material dan Metalurgi penulis melakukan penelitian tugas akhir pada bidang Korosi dan Analisis Kegagalan yang berjudul “PENGARUH KADAR SENG (Zn) PADA ANODA KORBAN ALUMINIUM TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN KARAKTERISTIK PROTEKSI”. Penulis dapat dihubungi di email arifsmst@gmail.com dan nomor handphone +6283846491466