



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR – TM184835

**PENGARUH KANDUNGAN UNSUR BESI
PADA ANODA KORBAN SENG TERHADAP
LAJU KOROSI DAN EFISIENSI
ELEKTROKIMIA UNTUK APLIKASI
LINGKUNGAN AIR LAUT**

FIRMAN RAMA PUTRA
NRP. 0211134000017

Dosen Pembimbing
Suwarno S.T, M.Sc, Ph.D

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



TUGAS AKHIR – TM184835

**PENGARUH KANDUNGAN UNSUR BESI
PADA ANODA KORBAN SENG TERHADAP
LAJU KOROSI DAN EFISIENSI
ELEKTROKIMIA UNTUK APLIKASI
LINGKUNGAN AIR LAUT**

FIRMAN RAMA PUTRA
NRP. 0211134000017

Dosen Pembimbing
Suwarno S.T., M.Sc, Ph.D

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



FINAL PROJECT – TM184835

**EFFECT OF IRON CONTENT ON ZINC
SACRIFICIAL ANODE'S CORROSION
RATE AND ELECTROCHEMICAL
EFFICIENCY FOR THE APPLICATION
OF SEAWATER ENVIRONMENT**

FIRMAN RAMA PUTRA
NRP. 0211134000017

Supervisor
Suwarno S.T., M.Sc, Ph.D

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
Faculty Of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute Of Technology
Surabaya 2019

**PENGARUH KANDUNGAN UNSUR BESI PADA
ANODA KORBAN SENG TERHADAP LAJU KOROSI
DAN EFISIENSI ELEKTROKIMIA UNTUK
APLIKASI LINGKUNGAN AIR LAUT**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

FIRMAN RAMA PUTRA
NRP. 0211134000017

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. **Suwarno, ST, MSc, PhD.** (Pembimbing)
NIP. 198005202005011003
2. **Dr. Ir. H. C. Kis Agustin, DEA** (Penguji I)
NIP. 196308151989032001
3. **Fahmi Mubarak, ST, MSc, PhD.** (Penguji II)
NIP. 197801152003121002
4. **Dr. Eng. Sutikno, ST, MT** (Penguji III)
NIP. 197407032000031001

**SURABAYA
JULI, 2019**

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

PENGARUH KANDUNGAN UNSUR BESI PADA ANODA KORBAN SENG TERHADAP LAJU KOROSI DAN EFISIENSI ELEKTROKIMIA UNTUK APLIKASI LINGKUNGAN AIR LAUT

Nama Mahasiswa : Firman Rama Putra
NRP : 0211134000017
Departemen : Teknik Mesin
Dosen Pembimbing : Suwarno S.T., M.Sc, Ph.D

ABSTRAK

Seng merupakan material yang sering digunakan sebagai anoda korban untuk proteksi katodik karena memiliki efisiensi yang tinggi dan reliabilitas karakter yang mudah larut untuk menyebar melindungi material struktur dari korosi. Anoda korban seng yang banyak digunakan pada kapal laut di Indonesia adalah produk impor yang berkualitas baik, namun memiliki harga yang cukup mahal. Serta anoda korban seng produk lokal yang mengandung unsur pengotor cukup tinggi sehingga mempengaruhi kualitas anoda korban seng. Unsur pengotor yang banyak terkandung pada produk lokal adalah unsur Besi (Fe) dan Timbal (Pb). Untuk mendapatkan anoda korban seng yang memiliki kualitas yang baik dan biaya produksi yang terjangkau produk lokal dan impor dicampurkan. Perlu diketahui pengaruh unsur pengotor yang terdapat pada anoda korban seng lokal saat dicampurkan dengan anoda korban seng impor. Unsur pengotor yang dominan muncul setelah proses pengecoran anoda korban seng lokal adalah unsur besi.

Anoda korban seng 1 dan anoda korban seng 2 dicampurkan untuk mendapatkan spesimen anoda korban seng dengan variasi kandungan unsur besi yang berbeda. Dilakukan proses pengecoran menggunakan metode die-casting dengan cetakan pelat baja. Didapatkan spesimen anoda korban seng dengan kandungan unsur besi 0,14 ppm,

36,45 ppm, 58,58 ppm, dan 86,17 ppm. Pada penelitian ini dilakukan pengujian korosi secara elektrokimia menggunakan potensiostat dan pengujian korosi jangka pendek sesuai DNV-RP-B401 Annex B. Material seng dipotong dengan panjang, lebar, dan tinggi sebesar 15 mm x 15 mm x 5 mm secara berurutan. Pengujian korosi menggunakan potensiostat dilakukan untuk didapatkan nilai laju korosinya. Pada pengujian sesuai DNV-RP-B401 Annex B masing-masing material seng dibubut dengan dimensi diameter 10 mm serta panjang 50 mm, dihubungkan dengan power supply DC dan direndam selama 4 hari di dalam air laut buatan, selanjutnya dihitung pengurangan beratnya untuk didapatkan nilai efisiensi elektrokimianya.

Hasil yang didapatkan adalah dengan semakin meningkatnya kandungan unsur besi pada material anoda korban seng maka nilai laju korosi yang terjadi semakin tinggi. Demikian juga efisiensi elektrokimia material anoda korban seng semakin tinggi dengan semakin rendahnya kandungan unsur besi pada material anoda korban seng. Anoda korban seng dengan kandungan unsur Fe 0,14 ppm memiliki efisiensi elektrokimia tertinggi. Hasil korosi yang terjadi pada permukaan anoda korban seng semakin kasar dan tidak merata dengan kandungan unsur besi yang semakin tinggi pada material anoda korban seng. Kandungan unsur besi yang terkandung pada anoda korban seng diikuti dengan kemunculan partikel $FeZn_{13}$ phase yang terlihat pada pengamatan struktur mikro.

Kata Kunci: Anoda korban, performa elektrokimia, seng, unsur besi.

EFFECTS OF BIFILM ON THE RESPONSE OF ARTIFICIAL AGING OF ALUMINIUM ALLOY ADC12

Student's Name : Firman Rama Putra
NRP : 0211134000017
Department : Mechanical Engineering
Supervisor : Suwarno S.T., M.Sc, Ph.D

ABSTRACT

Zinc is a material that is often used as a sacrificial anode for cathodic protection because it has high efficiency and the reliability of easily soluble characters to spread protects structural material from corrosion. Zinc sacrificial anodes those are widely used on ships in Indonesia are imported products those are of good quality, but have quite expensive prices. As well as the zinc sacrificial anodes of local products containing impurities are high enough to affect the quality of zinc sacrificial anodes. The impurity elements contained in many local products are Iron (Fe) and Lead (Pb). To obtain good quality zinc sacrificial anodes and production cost those are affordable, local and imported products is mixed. It is necessary to know the effect of the impurity element on the local zinc sacrificial anode when mixed with the sacrificial anode of imported zinc. The dominant impurity element that appears after the anode casting process of local zinc is iron.

Zinc sacrificial anode 1 and zinc sacrificial anode 2 are mixed to obtain zinc sacrificial anode specimens with different variations in iron content. The casting process is carried out using a die-casting method with steel plate molds. Zinc sacrificial anode specimens were obtained with iron content of 0.14 ppm, 36.45 ppm, 58.58 ppm and 86.17 ppm. In this study electrochemical corrosion testing was carried out using potentiostats and short-term corrosion testing according to

DNV-RP-B401 Annex B. Zinc materials were cut to length, width and height of 15 mm x 15 mm x 5 mm respectively. Corrosion test using a potentiostat is done to obtain the value of the corrosion rate. In corrosion test according to DNV-RP-B401 Annex B each zinc material is lathed with dimensions of 10 mm in diameter and 50 mm in length, connected to a DC power supply and immersed for 4 days in artificial sea water, then the weight reduction is calculated to obtain an efficiency value electrochemistry.

The results obtained are that with increasing iron content in zinc sacrificial anode material the higher corrosion rate. Likewise, the electrochemical efficiency of zinc sacrificial anode material is higher with the lower iron content in zinc sacrificial anode material. Zinc sacrificial anode with Fe content of 0.14 ppm have the highest electrochemical efficiency. The results of corrosion that occurs on the surface of zinc sacrificial anodes are increasingly rough and uneven with the higher iron content in zinc sacrificial anode material. The iron content contained in zinc sacrificial anodes is followed by the appearance of FeZn₁₃ phase particles seen in microstructure observations.

Keywords: Sacrificial anode, electrochemical performance, zinc, iron elements.

KATA PENGANTAR

Puji syukur yang sebesar-besarnya penulis panjatkan atas kehadiran dan rahmat Allah SWT yang telah melimpahkan kasih, pertolongan, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul : **“Pengaruh Kandungan Unsur Besi Pada Anoda Korban Seng Terhadap Laju Korosi dan Efisiensi Elektrokimia Untuk Aplikasi Lingkungan Air Laut”**. Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan kelulusan pendidikan Sarjana Teknik S-1 di Departemen Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Dalam kesempatan ini, secara khusus penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada :

1. **Allah SWT** yang telah melimpahkan segala anugerah dan ridho kepada penulis hingga di tahap ini. **Rasulullah Muhammad SAW** yang telah menjadi panutan hidup bagi seluruh makhluk di semesta alam.
2. Bapak **Heriyanto** dan Ibu **Jumariyah** selaku orang tua yang dengan sepenuh hati merawat, mendidik, dan menyanggah dari dalam kandungan hingga sekarang.
3. Bapak **Suwarno ST., MSc., PhD** dan Bapak **Indra Sidharta ST., MSc.** Selaku dosen pembimbing yang begitu luar biasa membimbing sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan.
4. Bapak **Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA.** Selaku dosen wali penulis yang telah memberikan bimbingan selama masa perkuliahan.
5. Ibu **Dr. Ir. H. C. Kis Agustin, DEA.**, Bapak **Fahmi Mubarak ST., MSc., PhD.**, dan Bapak **Dr.Eng. Sutikno ST., MT.** Selaku dosen penguji tugas akhir yang telah memberikan saran untuk menyempurnakan penulisan tugas akhir ini.
6. **Seluruh Dosen dan Karyawan Teknik Mesin ITS.** Terkhusus **Prof. Dr-Eng. Ir. Prabowo, M.Eng., Bapak**

- Ari Kurniawan Saputra, ST., MT.** Terima kasih yang tidak terkira.
7. **Pak Mantri, Pak Gatot, Mas Agus, Pak Budi, Mas Yaya, Mas Faisal, Cak Solikin Bud** yang telah banyak membantu pengerjaan eksperimen tugas akhir penulis.
 8. **M-56.** Angkatan penyedap rasa selama berkuliah yang merepotkan dan menyenangkan.
 9. **Anderson, Afif, Karlino, Rayhan, Arief Maulana, Bintang, Dipta, Dani, Danar, Adul, Alham, dan Arek-Arek M-Cangkir.** Kalian membantu saya melebihi saudara. Semoga Allah SWT selalu memberikan kebaikan kepada kalian.
 10. **OC Acara POROS 2014.** Afif, Anderson, Meidina, Ayu, dan Ubed. Telah kebersamai untuk membentuk pondasi menjadi SMRM.
 11. **BPH dan Seluruh Pengurus Himpunan Mahasiswa Mesin FTI-ITS 2015/2016.** Terima kasih pengalaman berorganisasi yang dinamis.
 12. **BPH dan Seluruh Pengurus Himpunan Mahasiswa Mesin FTI-ITS 2014/2015.** Terima kasih pengalaman berorganisasi yang menjadi dasar.
 13. **SC Poros 2013, 2014, dan 2015.** Menjadi tim *Steering Committee* yang memberi pengetahuan kaderisasi.
 14. **Tim Pemandu Kompas, Atlas, Amplas, Kipas, Ikhlas, Andalas.** Terima kasih menjadi tim yang hebat mengonsep dan menyelenggarakan pelatihan LKMM ITS.
 15. **Rakyat Laboratorium Metalurgi. Rayhan, Sutrisno, Wira, Bagong, Sendok, Faizal, Tya, Ishlah, Rayhan, Ita, Nasir, Izda, Zuli, Rizqu, Jokul, Afif, Weli, Galih, dan masih banyak lagi.** Terima kasih meramaikan suasana tahun-tahun terakhir di Teknik Mesin ITS.
 16. **Kelompok SC 8 Poros 2013 dan Kelompok SC 11 Poros 2015.** Kalian menjadi bagian penting dalam kehidupan di kampus merah ini.

17. **Senior.** Angkatan M51, M52, M53, M54, M55 terutama untuk telah membantu penulis untuk berkembang di kampus merah Teknik Mesin ini, Terima kasih.
18. **Junior.** Angkatan M57, M58, M59, M60, M61. **Izda M57, Zuli M57, Yola M57, Amanda M57, Rahma M57, Dani M57, Kusuma M57, Fitri M57, Edwin M57, Fitri M58, Adis M58, Ridho Gary M58, Aufar M58, Teduh M58, Auli M59, Adib M59, Hanif M59, Josep M60, Putra M61.** Telah menjadi tempat diskusi yang baik dan pertolongan yang telah diberikan, terima kasih.
19. **Bidik Misi, Ikoma, IKA ITS, dan Rakyat Indonesia.** Yang telah mewujudkan impian saya untuk dapat berkuliah di Kampus Negeri yang luar biasa.
20. **Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.** Almamater tercinta, semoga kejayaan selalu membersamai.
21. Semua **Ilmuan** yang menciptakan penemuan sehingga membantu mempermudah untuk menggali ilmu.
22. Seluruh **Guru-Guru** penulis. Terkhusus **Ust. Zaenuri S.Ag, KH. Abdurrahman Qomari** Ponpes Darul Falah Plaosan, **Gus Ahmad** Ponpes Darul Falah Plaosan. Terima kasih banyak bekal ilmu yang menjadi pedoman hidup dan beragama.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih jauh dari sempurna. Akhir kata, semoga tulisan ini dapat memberikan manfaat bagi siapapun yang membacanya.

Surabaya, 30 Juli 2019

Penulis

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL	xxiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Penelitian	3
1.3. Tujuan Penelitian	3
1.4. Batasan Penelitian	3
1.5. Manfaat Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Tinjauan Pustaka	5
2.2. Korosi	6
2.3. Elektrokimia dan Redoks	6
2.4. Sel Galvani dan Contohnya	8
2.5. Deret Volta	11
2.6. Laju Korosi	13
2.6.1. Polarisation	17
2.6.2. Pasivitas	18
2.7. Proteksi Katodik	19
2.7.1. Prinsip dan Aplikasi	21
2.7.2. Impressed Current Cathodic Protection (ICCP) ..	24
2.7.3. Sacrificial Anode Cathodic Protection (SACP) ..	26
2.8. Anoda Korban Seng	27

2.8.1 Pengaruh Unsur Paduan Terhadap Anoda Korban Seng	29
2.9. Kapasitas dan Efisiensi Anoda	31
2.10. Recommended Practice DNV-RP-B401	32
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	35
3.1. Diagram Alir Penelitian	35
3.2. Spesimen Uji	36
3.3 Peralatan Penelitian	38
3.3.1 Peralatan Potong	38
3.3.2 Electric Melting Furnace	38
3.3.3 Mesin Grinding dan Polishing	38
3.3.4 Mesin Bubut	39
3.3.5 Peralatan Uji Korosi (Potensiostat)	39
3.3.6 DC Power Supply	40
3.3.7 Timbangan Digital	41
3.3.8 Multimeter	41
3.4 Pelaksanaan Penelitian.....	41
3.4.1 Proses Pengecoran	41
3.4.1.1 Persiapan Material.....	42
3.4.1.2 Pengecoran Material.....	42
3.4.2 Proses Pengujian	44
3.4.2.1 Persiapan Pengujian	44
3.4.2.2 Pengujian Korosi Secara Elektrokimia Menggunakan Potensiostat.....	44
3.4.2.3 Pengujian Korosi Secara Elektrokimia Jangka Pendek	49
BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN.....	55

4.1	Pengujian Komposisi Kimia	55
4.2	Pengamatan Struktur Mikro.....	57
4.3	Pengujian Laju Korosi Secara Elektrokimia.....	60
4.3.1	Pembahasan Pengujian Laju Korosi Secara Elektrokimia	62
4.4	Pengujian Korosi DNV-RP-B401	68
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		77
5.1	Kesimpulan.....	77
5.2	Saran.....	77
DAFTAR PUSTAKA		79
BIODATA PENULIS		83

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Proses Perpindahan Elektron Pada Sel Elektrokimia [3].....	8
Gambar 2.2 Bagian Sel Galvani/Volta [3]	10
Gambar 2.3 Notasi Sel [3].....	11
Gambar 2.4 Skema Alat Uji Korosi Tipe Sel Tiga Elektroda [5].....	14
Gambar 2.5 Tegangan vs Log Intensitas Arus [11]	14
Gambar 2.6 Proteksi Katodik Menggunakan <i>Impressed Current</i> [11].....	21
Gambar 2.7 Proteksi Katodik Menggunakan <i>Sacrificial Anode</i> [11].....	23
Gambar 2.8 Anoda Tumbal Aluminium yang Terpasang Pada Sebuah <i>Offshore Drilling Platform</i> [2]	23
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	35
Gambar 3.2 Material Penelitian:(a) Anoda Korban Seng 1; (b) Anoda Korban Seng 2	37
Gambar 3.3 Alat Uji Korosi Secara Elektrokimia: (a) Potensiostat (b) Rangkaian Pengujian	40
Gambar 3.4 DC Power Supply	40
Gambar 3.5 Multimeter	41
Gambar 3.6 Electric Melting Furnace	42
Gambar 3.7 Cetakan Pelat Baja	43
Gambar 3.8 Dimensi Spesimen Uji Korosi Secara Elektrokimia Menggunakan Potensiostat	45
Gambar 3.9 Spesimen Uji yang Telah disambungkan dengan Kawat Kabel Tembaga dan dimounting	45
Gambar 3.10 Rangkaian Kabel Untuk Kalibrasi Pada Dummycell	46
Gambar 3.11 Rangkaian Kabel Elektroda Pada Penyangga .	47
Gambar 3.12 Tampilan Input Pengolahan Data	48
Gambar 3.13 Tampilan Output Pengolahan Data	49
Gambar 3.14 Dimensi Spesimen Uji Korosi Secara Elektrokimia Jangka Pendek	50

Gambar 3.15 Susunan Spesimen Uji Pada Wadah Baja Berisi Air Laut [12]	51
Gambar 3.16 Rangkaian Pengujian Korosi Secara Elektrokimia Jangka Pendek	52
Gambar 3.17 Spesimen Hasil Pengujian yang sudah dibersihkan lalu ditimbang	53
Gambar 4.1 Anoda Korban Seng Pengecoran <i>Die Casting</i> ...	56
Gambar 4.2 Struktur Mikro Spesimen Anoda Korban Seng (a) Zn A [0,14 ppm Fe], (b) Zn B [34,65 ppm Fe], (c) Zn C [58,58 ppm Fe], (d) Zn D [86,17 ppm Fe]	58
Gambar 4.3 Struktur Mikro Seng Hasil Pengecoran dengan 0,2% Fe [26] Partikel adalah $FeZn_{13}$ phase.....	59
Gambar 4.4 Diagram Fase Seng-Besi [27]	60
Gambar 4.5 Kurva Polarisasi Hasil Pengujian Korosi Menggunakan Potensiostat, (a) Zn A [0,14 ppm Fe], (b) Zn B [34,65 ppm Fe], (c) Zn C [58,58 ppm Fe], (d) Zn D [86,17 ppm Fe].....	61
Gambar 4.6 Laju Korosi Anoda Korban Seng Hasil Pengujian Menggunakan Potensiostat	63
Gambar 4.7 Struktur Mikro Spesimen Anoda Korban Seng Zn D.....	63
Gambar 4.8 Potensial Korosi Anoda Korban Seng Hasil Pengujian Korosi Menggunakan Potensiostat.....	65
Gambar 4.9 Seri Galvanik Logam dan Paduan Dalam Air Laut [2]	66
Gambar 4.10 Rapat Arus Korosi Anoda Korban Seng Hasil Pengujian Korosi Menggunakan Potensiostat	67
Gambar 4.11 Kapasitas Elektrokimia Anoda Korban Seng Hasil Pengujian DNV-RP-B401	70
Gambar 4.12 Hasil Korosi Spesimen Anoda Korban Seng Setelah Pengujian DNV Selama 4 Hari (a) Zn A [0,14 ppm Fe], (b) Zn B [34,65 ppm Fe], (c) Zn C [58,58 ppm Fe], (d) Zn D [86,17 ppm Fe]	72

Gambar 4.13 (a) Lapisan yang Terbentuk Pada Permukaan
Spesimen Anoda Korban Seng, (b) Lapisan yang Melekat
Pada Sekeliling Permukaan Bagian Dalam Tong Pengujian. 74
Gambar 4.14 CCP Anoda Korban Seng Hasil Pengujian DNV
..... 76

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Konstanta <i>Corrosion Rate</i> [3]	17
Tabel 2.2 Anoda Korban Seng Sebagai Aplikasi Dalam Media Air Laut [20].....	29
Tabel 3.1 Komposisi Kimia Material Anoda Korban Seng ..	36
Tabel 3.2 Variasi Komposisi Kimia Anoda Korban Seng Pada Proses Pengecoran	44
Tabel 3.3 Tabel Rancangan Eksperimen Pengujian Korosi Secara Elektrokimia Menggunakan Potensiostat	49
Tabel 4.1 Hasil Uji ICP-OES Material Anoda Korban Seng Hasil Pengecoran	56
Tabel 4.2 Hasil Uji OES Material Anoda Korban Seng Hasil Pengecoran	57
Tabel 4.3 Data Rerata Laju Korosi Anoda Korban Seng Hasil Pengujian Potensiostat	62
Tabel 4.4 Data Rerata Potensial Korosi Anoda Korban Seng Hasil Pengujian Potensiostat	64
Tabel 4.5 Data Rerata Rapat Arus Korosi Anoda Korban Seng Hasil Pengujian Potensiostat	67
Tabel 4.6 Hasil Pengujian Kapasitas Elektrokimia Anoda Korban Seng Menggunakan Metode DNV	69
Tabel 4.7 Hasil Pengujian CCP Anoda Korban Seng Menggunakan Metode DNV	75

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Berdasarkan data dari Kantor Administrasi Pelabuhan, Direktorat Perhubungan Laut yang dihimpun oleh Badan Pusat Statistik menunjukkan angka bongkar dan muat pada antar pulau maupun luar negeri menggunakan kapal laut mengalami peningkatan setiap tahunnya. Salah satu hal yang harus diperhatikan dalam perawatan kapal laut adalah pada konstruksi kapal laut area bawah garis air laut. Pelat bawah kapal laut adalah daerah yang pertama kali kontak dengan air laut, pada daerah bagian lambung ataupun bagian garis air laut (bawah dan atas) rentan mengalami korosi. Korosi pada pelat baja kapal laut menyebabkan penurunan performa dari material sehingga masa pemakaian kapal berkurang, serta dapat mengurangi jaminan keselamatan penumpang dan muatan barang. Material besi dan baja masih digunakan sebagai bahan utama untuk pembuatan kapal laut, namun di sisi lain memiliki kecenderungan terserang korosi air laut yang cukup tinggi. Untuk menghindari dampak negatif yang timbul akibat korosi air laut, maka pelat baja lambung kapal laut perlu diberikan perlindungan dari korosi secara baik dan berkala. Hingga saat ini untuk melindungi pelat bagian bawah kapal terhadap korosi air laut menggunakan perlindungan secara pasif dengan pelapisan (*coating*) dan perlindungan secara aktif dengan metode proteksi katodik (*cathodic protection*). Proteksi katodik dapat didefinisikan sebagai sel elektrokimia untuk mengendalikan korosi dengan mengkonsentrasikan reaksi oksigen pada sel galvanis dan menekan korosi pada katoda dalam sel yang sama pada proteksi katodik. Logam yang dilindungi menjadi katoda dan reaksi oksidasi terjadi pada anoda [14].

Metode yang banyak digunakan untuk memproteksi pelat lambung kapal laut adalah sistem perlindungan proteksi katodik anoda korban (*Sacrificial Anode Cathodic Protection*). Kelebihan

metode ini adalah lebih sederhana dan biaya perawatan yang lebih rendah dibandingkan dengan metode proteksi katodik arus tanding (*Impressed Current Cathodic Protection*). Material yang banyak digunakan sebagai anoda korban adalah seng dan aluminium. Anoda korban seng memiliki efisiensi yang tinggi serta reliabilitas karakter yang mudah larut untuk menyebar melindungi bagian lambung kapal laut. Anoda korban seng yang banyak digunakan pada kapal laut di Indonesia adalah produk impor yang berkualitas baik, namun memiliki harga yang cukup mahal. Serta anoda korban seng produk lokal yang mengandung unsur pengotor cukup tinggi sehingga mempengaruhi kualitas anoda korban seng. Unsur pengotor yang banyak terkandung pada produk lokal adalah unsur Besi (Fe) dan Timbal (Pb). Untuk mendapatkan anoda korban seng yang memiliki kualitas yang baik dan biaya produksi yang terjangkau produk lokal dan impor dicampurkan. Perlu diketahui pengaruh unsur pengotor yang terdapat pada anoda korban seng lokal saat dicampurkan dengan anoda korban seng impor. Unsur pengotor yang dominan muncul setelah proses pengecoran anoda korban seng lokal adalah unsur besi.

Kualitas anoda korban seng dapat dipengaruhi oleh komposisi paduan yang terdapat pada material seng tersebut. Vassilev pada tahun 1974 melakukan penelitian keberadaan Tembaga (Cu), Timah (Sn), dan Besi (Fe) pada komposisi paduan seng dapat menyebabkan masalah pada polarisasi serta penggunaan Aluminium (Al) ($\leq 1\%$), Kadmium (Cd), dan Raksa (Hg) dapat mengatasi kerugian yang ditimbulkan oleh adanya Besi (Fe) [1]. M. Bounoughaz (2003) melakukan studi tentang perbandingan performa seng Aljazair dan anoda korban seng yang biasa dijual di pasaran. Tanapat Kaewmaneekul (2013) meneliti tentang pengaruh aluminium terhadap pasivasi dari paduan seng-aluminium dalam air laut buatan pada temperatur 80 °C. Tomas Prosek pada 2016 meneliti tentang pengaruh struktur mikro dari paduan model Zn-Al dan Zn-Al-Mg pada stabilitas korosi.

Pada penelitian-penelitian terdahulu telah disebutkan bahwa unsur paduan yang terdapat pada anoda korban seng memiliki pengaruh terhadap perilaku korosi pada performa kerjanya. Sehingga, pada penelitian ini akan dilakukan eksperimen mengenai pengaruh unsur besi pada anoda korban seng terhadap perilaku korosi yang mempengaruhi performa kerja anoda korban.

1.2. Perumusan Penelitian

Permasalahan yang akan dianalisa pada penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh kandungan unsur besi yang terdapat pada anoda korban seng terhadap laju korosi.
2. Bagaimana pengaruh kandungan unsur besi yang terdapat pada anoda korban seng terhadap efisiensi elektrokimia.

1.3. Tujuan Penelitian

Sesuai dengan perumusan penelitian di atas, penelitian ini memiliki tujuan diantara lain adalah:

1. Menganalisa pengaruh kandungan unsur besi yang terdapat pada anoda korban seng terhadap laju korosi.
2. Menganalisa pengaruh kandungan unsur besi yang terdapat pada anoda korban seng terhadap efisiensi elektrokimia.

1.4. Batasan Penelitian

Untuk dapat memperoleh tujuan penelitian yang ada, maka diberikan batasan masalah sebagai berikut:

1. Alat uji dan peralatan yang digunakan dalam kondisi baik dan sudah dikalibrasi.
2. Temperatur dan tekanan lingkungan konstan.
3. Material yang diteliti berasal dari proses *die casting* dengan variabel proses yang seragam.
4. Larutan elektrolit yang digunakan adalah air laut buatan berdasarkan ASTM D1141.
5. Pengaruh unsur selain besi tidak ditinjau dalam penelitian ini.

1.5. Manfaat Penelitian

Dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Memberikan wawasan dan pengetahuan bagi peneliti mengenai pengaruh perbedaan unsur besi yang terdapat pada anoda korban seng terhadap laju korosi dan efisiensi elektrokimia.
2. Memberikan masyarakat dan industri sebuah referensi dalam penentuan material anoda korban seng yang sesuai untuk desain sistem proteksi katodik peralatan-peralatan dari ancaman korosi.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Tinjauan Pustaka

M. Bounoughaz pada 2003 melakukan studi tentang perbandingan performa seng Aljazair dan anoda korban seng yang biasa dijual di pasaran. Dilakukan pengujian elektrokimia pada larutan elektrolit air pembuangan dari tangki penyimpanan minyak pada temperatur 25 ± 1 °C dengan komposisi kimia yang dominan adalah Cl^- dan Na^+ . Didapatkan hasil potensial korosi dari spesimen uji seng Aljazair nilai awalnya adalah -1070 mV/SCE dan setelah direndam 4000 detik mencapai -1046 mV/SCE. Sedangkan potensial korosi dari spesimen uji anoda korban seng pasaran nilai awalnya -1083 mV/SCE dan setelah direndam 4000 detik mencapai -1053 mV/SCE. Potensial korosi dari kedua spesimen tersebut cukup rendah untuk digunakan sebagai anoda korban untuk mencegah korosi tangki minyak mentah yang terbuat dari material baja. Kedua material dapat digunakan sebagai anoda korban untuk melindungi bagian bawah tangki penyimpanan dari korosi, tetapi efektifitas yang lebih besar menggunakan seng Aljazair.

Tanapat Kaewmaneekul pada 2013 meneliti tentang pengaruh aluminium terhadap pasivasi dari paduan seng-aluminium dalam air laut buatan pada temperatur 80 °C. Dilakukan pengujian elektrokimia, *scanning electron microscopy* (SEM), dan *X-ray diffraction* (XRD). Didapatkan hasil seng murni dan paduan seng-aluminium dapat terpasivasi dalam air laut buatan pada waktu imersi 120 hingga 288 jam serta terdepasivasi pada waktu imersi 288-720 jam. Adanya unsur aluminium (0.15, 0.3, dan 1.0 wt.%) memperlambat pasivasi dari paduan seng-aluminium. Aluminium mengurangi resistansi lapisan tetapi meningkatkan rapat arus pasif, kapasitansi lapisan, konduktifitas lapisan dan konsentrasi dari cacat pada lapisan dari pada paduan seng-aluminium. Lapisan pasif dari seng murni dan

paduan Zn-1.0Al terdiri dari ZnO, Zn(OH)₂, garam seng, γ -AlOOH dan β -Al(OH)₃.

Tomas Prosek pada 2016 meneliti tentang pengaruh struktur mikro dari paduan model Zn-Al dan Zn-Al-Mg pada stabilitas korosi. Didapatkan hasil memadukan seng dengan aluminium dan magnesium dapat mereduksi limpasan permukaan seng disebabkan oleh stabilisasi produk korosi seng yang kurang larut dan lebih protektif. Pembentukan dari oksida seng yang tidak diinginkan sangat berkurang dikarenakan oleh paduan.

2.2. Korosi

Korosi adalah kerusakan material akibat reaksi dengan lingkungannya. Korosi membentuk senyawa yang tidak dikehendaki [2]. Jenis-jenis korosi secara umum yaitu *general corrosion*, *galvanic corrosion*, *crevice corrosion*, *pitting corrosion*, korosi batas butir, korosi erosi, *stress corrosion cracking*, dan *selective leaching*. Contoh korosi yang umum terjadi adalah perkaratan besi. Karat logam umumnya adalah berupa oksida dan karbonat. Rumus kimia karat besi adalah Fe₂O₃.xH₂O, suatu zat padat yang berwarna coklat-merah. Terdapat tiga aspek utama pada proses korosi, yaitu reaksi yang terjadi, material, dan media korosif. Korosi merupakan proses elektrokimia [3].

2.3. Elektrokimia dan Redoks

Elektrokimia adalah cabang ilmu kimia yang mempelajari reaksi kimia yang berlangsung dalam larutan pada antarmuka konduktor elektron (logam atau material penghantar lain) dan konduktor ionik (elektrolit). Melibatkan perpindahan elektron antara elektroda dan elektrolit atau sejenis dalam larutan. Secara umum, elektrokimia berkaitan dengan situasi dimana reaksi oksidasi dan reduksi dipisahkan dalam ruang atau waktu, dihubungkan oleh sebuah sirkuit listrik eksternal [4].

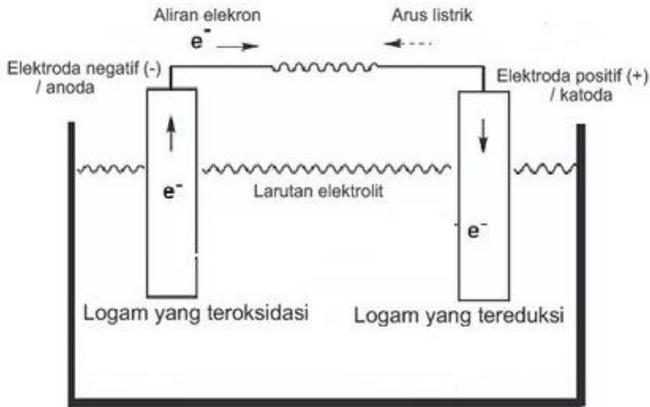
Ada dua jenis sel elektrokimia, yaitu sel galvanik dan elektrolisis. Sel galvanik adalah sel yang menghasilkan tenaga

listrik ketika sel mengalami reaksi kimia, sedangkan Sel elektrolisis adalah sel yang mengalami reaksi kimia ketika tegangan listrik diterapkan. Elektrolisis dan korosi adalah contoh dari proses penting yang ada pada elektrokimia. Prinsip-prinsip dasar elektrokimia didasarkan pada rasio tegangan antara dua zat dan memiliki kemampuan untuk bereaksi satu sama lain. Teori Elektrokimia dan metode elektrokimia memiliki aplikasi praktis dalam teknologi dan industri dalam banyak cara. Penemuan dan pemahaman reaksi elektrokimia telah memberikan kontribusi untuk mengembangkan sel bahan bakar dan baterai, dan pemahaman logam relatif terhadap satu sama lain dalam elektrolisis dan korosi. Ada 2 prinsip sel elektrokimia:

1. Sel yang melakukan kerja dengan melepaskan energi dari reaksi spontan
2. Sel yang melakukan kerja dengan menyerap energi dari sumber listrik untuk menggerakkan reaksi non spontan [6].

Sel elektrokimia baik yang melepas atau menyerap energi selalu melibatkan perpindahan elektron-elektron dari satu senyawa ke senyawa yang lain dalam suatu reaksi oksidasi dan reduksi seperti pada gambar 2.1, dapat dijelaskan dengan mudah sebagai berikut:

- Oksidasi menjelaskan pelepasan elektron oleh sebuah molekul, atom, atau ion
- Reduksi menjelaskan penambahan elektron oleh sebuah molekul, atom, atau ion.



Gambar 2.1 Proses Perpindahan Elektron Pada Sel Elektrokimia [3]

Oksidasi dan reduksi tepatnya merujuk pada perubahan bilangan oksidasi karena transfer elektron yang sebenarnya tidak akan selalu terjadi. Sehingga oksidasi lebih baik didefinisikan sebagai peningkatan bilangan oksidasi, dan reduksi sebagai penurunan bilangan oksidasi. Dalam praktiknya, transfer elektron akan selalu mengubah bilangan oksidasi, namun terdapat banyak reaksi yang diklasifikasikan sebagai "redoks" walaupun tidak ada transfer elektron dalam reaksi tersebut (misalnya yang melibatkan ikatan kovalen) [6].

2.4 Sel Galvani dan Contohnya

Sel volta atau sel galvani adalah suatu sel elektrokimia yang terdiri atas dua buah elektrode yang dapat menghasilkan energi listrik akibat terjadinya reaksi redoks secara spontan pada kedua elektroda tersebut. yaitu sel yang mengubah energi kimia menjadi energi listrik. Sel Galvani / Sel Volta disebut juga sel kimia. Sel Galvani dipakai sebagai sumber listrik untuk penerangan, pemanasan, menjalankan motor, dan sebagainya. Reaksi redoks spontan yang dapat mengakibatkan terjadinya energi listrik ini ditemukan oleh Alessandro Guiseppe Volta

(1800) dan Luigi Galvani (1780). Deret Volta merupakan deret yang menyatakan unsur-unsur logam berdasarkan potensial elektrode standarnya. Dan ini digunakan sebagai acuan apakah sebuah logam bisa bereaksi dengan ion logam lain [8].

Untuk prinsip kerja sel galvani sendiri yaitu:

- a) Terdiri atas elektrode dan elektrolit yang dihubungkan dengan sebuah jembatan garam
- b) Pada anode terjadi reaksi oksidasi dan pada katode terjadi reaksi reduksi
- c) Arus elektron mengalir dari katode ke anode
- d) Arus listrik mengalir dari katode ke anode
- e) Adanya jembatan garam untuk menyeimbangkan ion-ion

Untuk perlu dipahami juga anoda dan katoda adalah elektroda dengan polaritas yang berlawanan, Pada sel galvani, Anoda adalah elektroda sel kutub negatif (-), sedangkan katoda adalah elektroda sel yang berkutub (+). Anoda mengalami oksidasi (Pelepasan Elektron) yaitu sebagai reduktor sedangkan katoda mengalami reaksi reduksi (mengikat elektron) yaitu sebagai oksidator [9].

Bagian – bagian Sel Galvani atau Sel Volta (gambar 2.2) yaitu:

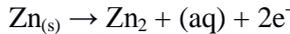
1. Voltmeter, untuk menentukan besarnya potensial sel
2. Jembatan garam (*salt bridge*), untuk menjaga kenetralan muatan listrik pada larutan
3. Anode, elektrode negatif, tempat terjadinya reaksi oksidasi. pada gambar, yang bertindak sebagai anoda adalah elektroda seng (*zinc electrode*)
4. Katode, elektrode positif, tempat terjadinya reaksi reduksi. Pada gambar 2.2, yang bertindak sebagai katode adalah elektrode Cu/tembaga (*copper electrode*)

Susunan Sel Voltanya dinotasikan dengan Notasi sel: $Y | \text{ion } Y || \text{ion } X | X$. Dimana pada bagian kanan menyatakan katode (yang mengalami reduksi), dan bagian kiri menyatakan anode (yang mengalami oksidasi). Pemisahan oleh jembatan garam

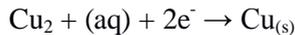
dinyatakan dengan || sedangkan batas fasa dinyatakan |. Penggambaran notasi sel juga dapat dilihat pada gambar 2.3.

Pada gambar di atas, logam X mempunyai potensial reduksi yang lebih positif dibanding logam Y, sehingga logam Y bertindak sebagai anoda dan logam X bertindak sebagai katoda. Jembatan garam mengandung ion-ion positif dan ion-ion negatif yang berfungsi menetralkan muatan positif dan negatif dalam larutan elektrolit. Contoh Soal Penulisan Notasi Sel : Notasi sel untuk reaksi $\text{Cu}^{2+} + \text{Zn} \rightarrow \text{Cu} + \text{Zn}^{2+}$ yaitu $\text{Zn} | \text{Zn}^{2+} || \text{Cu}^{2+} | \text{Cu}$. Proses yang terjadi adalah:

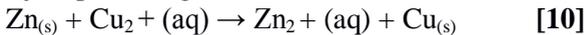
a) Pada anode, logam Zn melepaskan elektron dan menjadi Zn^{2+} yang larut.



b) Pada katode, ion Cu^{2+} menangkap elektron dan mengendap menjadi logam Cu.

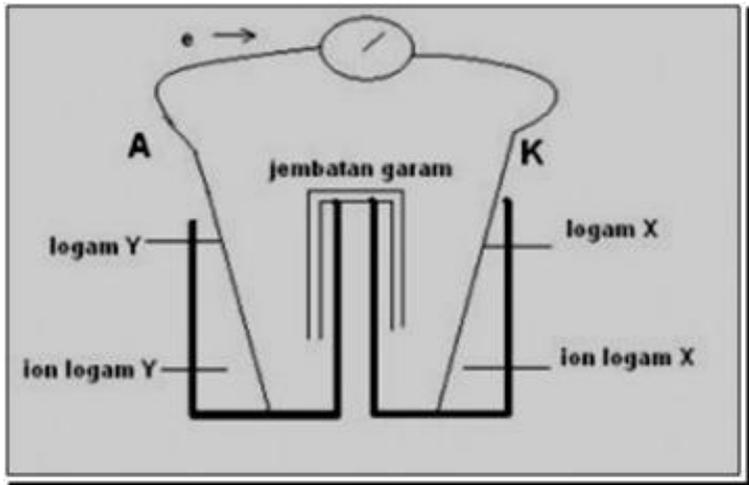


Hal ini dapat diketahui dari berkurangnya massa logam Zn setelah reaksi, sedangkan massa logam Cu bertambah. Reaksi total yang terjadi pada sel galvanik adalah:



merupakan tabung berbentuk U terbalik yang berisi larutan garam seperti NaNO_3 , KCl , KNO_3 , dan lain lain, berfungsi untuk menjaga kenetralan listrik dari kedua larutan.

Gambar 2.2 Bagian Sel Galvani/Volta [3]



Gambar 2.3 Notasi Sel [3]

2.5. Deret Volta

Untuk mengetahui unsur yang lebih anodik dan lebih katodik dapat kita lihat pada deret Volta. Berikut deret Volta :



Pada Deret Volta, unsur logam dengan potensial elektrode lebih negatif ditempatkan di bagian kiri, sedangkan unsur dengan potensial elektrode yang lebih positif ditempatkan di bagian kanan.

Semakin ke kiri kedudukan suatu logam dalam deret tersebut, maka

- Logam semakin reaktif (semakin mudah melepas elektron)
- Logam merupakan reduktor yang semakin kuat (semakin mudah mengalami oksidasi)

Sebaliknya, semakin ke kanan kedudukan suatu logam dalam deret tersebut, maka

- Logam semakin kurang reaktif (semakin sulit melepas elektron)

- Logam merupakan oksidator yang semakin kuat (semakin mudah mengalami reduksi)

Salah satu metode untuk mencegah korosi antara lain dengan menghubungkan logam (misalnya besi) dengan logam yang letaknya lebih kiri dari logam tersebut dalam deret volta (misalnya magnesium) sehingga logam yang mempunyai potensial elektrode yang lebih negatif lah yang akan mengalami oksidasi. Metode pencegahan karat seperti ini disebut perlindungan katodik. Contoh lain dari perlindungan katodik adalah pipa besi, tiang telepon, dan berbagai barang lain yang dilapisi dengan seng, atau disebut Galvanisasi. Seng dapat melindungi besi dari korosi sekalipun lapisannya tidak utuh. Oleh karena potensial reduksi besi lebih positif daripada seng (posisinya dalam deret Volta lebih ke kanan), maka besi yang kontak dengan seng akan membentuk sel elektrokimia dengan besi sebagai katoda. Dengan demikian besi terlindungi dan seng yang mengalami oksidasi. Badan mobil-mobil baru pada umumnya telah digalvanisasi, sehingga tahan karat.

Selain contoh reaksi sebelumnya kita juga dapat lihat peristiwa korosi lainnya yaitu pada peristiwa perkaratan (korosi) logam Fe mengalami oksidasi dan oksigen (udara) mengalami reduksi. Rumus kimia dari karat besi adalah $Fe_2O_3 \cdot xH_2O$ dan berwarna coklat-merah. Pada korosi besi, bagian tertentu dari besi itu berlaku sebagai anoda, dimana besi mengalami oksidasi.



Ion besi (II) yg terbentuk pada anoda selanjutnya teroksidasi membentuk ion besi(III) yang kemudian membentuk senyawa oksida terhidrasi $Fe_2O_3 \cdot xH_2O$.

Berdasarkan sifatnya korosi terbagi atas :

1. Korosi Aktif

Ciri-ciri dari korosi aktif ini antara lain :

- Mudah melepaskan ion
- Mudah menempel di tangan

Contoh : Paku yang berkarat

2. Korosi Pasif

Ciri-ciri dari korosi pasif ini antara lain :

- Sulit melepaskan ion
- Sulit menempel di tangan

Contoh : Korosi pada Al [7]

2.6. Laju Korosi

Mengetahui seberapa besar korosi yang terjadi, dapat diukur dengan melakukan perhitungan terhadap laju korosi pada suatu material. Cara untuk mendapatkan nilai laju korosi adalah dengan metode hilang berat (*weight loss*) dan metode polarisasi linier. Metode *weight loss* adalah metode yang sederhana, menggunakan material logam yang telah ditimbang untuk mengetahui massa awalnya. Kemudian diletakkan pada lingkungan korosif dalam waktu tertentu, lalu logam dibersihkan dari produk korosi dan ditimbang untuk mengetahui massa akhir untuk menentukan kehilangan berat yang terjadi. Besar laju korosi yang terjadi pada metode ini, ditunjukkan persamaan 2.9.

Pengujian laju korosi dengan tipe tiga sel elektroda didasarkan pada metode ekstrapolasi tafel. Sel tiga elektroda adalah perangkat baku laboratorium untuk penelitian kuantitatif terhadap sifat-sifat korosi bahan-bahan. Pengujian ini menggunakan tiga elektroda (Gambar 2.4), yaitu:

i. Elektroda kerja (*working electrode*).

Elektroda kerja sebagai elektroda yang akan diteliti, digunakan istilah elektroda kerja sebagai ganti dari anoda karena penelitiannya tidak terbatas hanya pada perilaku yang bersangkutan dengan anoda, tetapi juga menyelidiki tentang perilaku katoda.

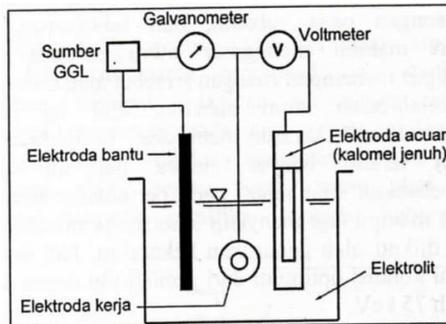
ii. Elektroda bantu (*counter / auxiliary electrode*).

Elektroda pembantu adalah elektroda kedua yang khusus untuk mengangkut arus dalam rangkaian yang terbentuk dalam penelitian. Elektroda ini tidak digunakan untuk mengukur potensial. Platina, emas, titanium, dan batang grafit dapat digunakan sebagai bahan elektroda pembantu.

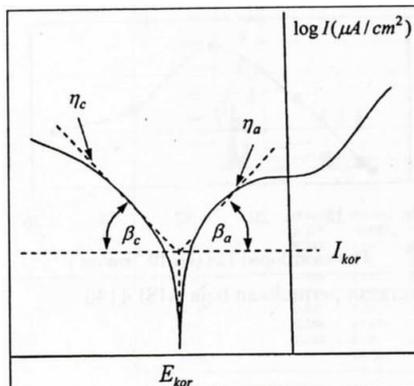
iii. Elektroda acuan (*reference electrode*).

Elektroda acuan adalah elektroda yang digunakan sebagai titik dasar yang sangat mantap untuk mengacu pengukuran-pengukuran potensial elektroda kerja. Arus yang mengalir melalui elektroda ini kecil sekali sehingga dapat diabaikan. Elektroda acuan yang sering digunakan adalah elektroda kalomel jenuh.

Ketiga elektroda tersebut dicelupkan ke dalam larutan elektrolit pada tabung elektrokimia dan terhubung dengan potensiostat/galvanostat.



Gambar 2.4 Skema alat uji korosi tipe sel tiga elektroda [5]



Gambar 2.5 Tegangan vs log intensitas arus [11]

Proses korosi dimulai dengan pemberian potensial pada elektroda kerja dari -1300 mV sampai dengan 1300 mV dan di-scanning dengan kecepatan tertentu kemudian diplot pada diagram kurva potensial lawan logaritma intensitas arus seperti pada gambar 2.5. Proses yang terjadi pada elektroda kerja adalah sebagai berikut:

- a. Elektroda kerja diberi potensial negatif (polarisasi katodik).
Elektroda kerja mengalami **reaksi reduksi** yang ditunjukkan dengan gradien negatif pada grafik sebelah kiri. Reaksi ini terjadi saat diberi potensial -1300 mV dan diperbesar sampai dengan arus reduksi mencapai nol pada potensial korosi (E_{kor}) tertentu. Proses reduksi berakhir ketika arus mencapai nilai nol.
- b. Elektroda kerja diberi potensial positif (polarisasi anodik).
Elektroda kerja mengalami **reaksi oksidasi** setelah reaksi reduksi berakhir, ditunjukkan dengan gradien positif pada grafik sebelah kanan. Reaksi ini terjadi saat diberi potensial dan arus yang semakin besar. Potensial yang biasanya diberikan sampai dengan 1300 mV.

Rapat arus korosi (I_{kor}) diperoleh dari hasil ekstrapolasi kurva potensial lawan logaritma intensitas arus yaitu dengan cara menentukan titik perpotongan garis tafel reaksi reduksi (η_c) dan garis tafel reaksi oksidasi (η_a) pada garis potensial korosi (E_{kor}). Nilai η_c dan η_a ditentukan dengan persamaan berikut [2]:

$$\eta_a = \beta_a \log \frac{i_a}{i_0} \quad (2.4)$$

$$\eta_c = \beta_c \log \frac{i_c}{i_0} \quad (2.5)$$

dengan:

- η_c = tafel reaksi reduksi
- η_a = tafel reaksi oksidasi
- i_c = arus pada reaksi katoda
- i_a = arus pada reaksi anoda
- i_0 = arus saat perubahan reaksi reduksi menuju reaksi oksidasi
- $i_0 = i_a = -i_c = i_{kor}$
- β_c = gradien tafel reaksi katoda

β_c = gradien tafel reaksi anoda

Penentuan harga rapat arus korosi secara tepat sangat diperlukan, karena rapat arus korosi sebanding dengan laju korosi suatu logam dalam medium / lingkungannya, hal ini sesuai dengan persamaan laju korosi dalam mils (0,001 in) per year (mpy) seperti dibawah ini [2] :

$$\text{Corrosion penetration rate} = K \frac{ai}{nD} \quad (2.6)$$

dengan:

CR = laju korosi (mpy)

K = konstanta (mpy 0,129; $\mu\text{m}/\text{yr}$ 3,27; mm/yr 0,00327)

a = berat atom

i = rapat arus korosi/current density ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)

n = valensi atom

D = massa jenis/density (g/cm^3)

Perhitungan laju korosi untuk paduan, perlu dihitung terlebih dahulu berat equivalennya (*equivalen weight* = E_w) dengan persamaan [2] :

$$EW = N_{EQ}^{-1} \quad (2.7)$$

$$N_{EQ} = \sum \left(\frac{\omega_i}{a_i/n_i} \right) = \sum \left(\frac{\omega_i n_i}{a_i} \right) \quad (2.8)$$

dengan:

E_w = berat ekivalen

N_{EQ} = nilai ekivalen total

ω_i = fraksi berat atom ke i

a_i = berat atom ke i

n_i = valensi atom ke i

Laju korosi diperhitungkan dengan menyatakan berat yang hilang per satuan luas permukaan per satuan waktu. Mengingat laju korosi (mpy) merupakan ekspresi yang terbaik karena merupakan penetrasi korosi tanpa desimal, maka satuan laju korosi ini bisa didekati dengan rumus:

$$CR = \frac{k \times W}{A \times t \times D} \quad (2.9)$$

dimana:

CR = *corrosion rate*

- k = konstanta laju korosi (dapat dilihat pada tabel)
 W = berat yang hilang (gram)
 A = Luas permukaan specimen (cm²)
 t = waktu paparan (s)
 D = Densitas specimen (g/cm³)

Tabel 2.1 Konstanta *Corrosion Rate* [16]

Corrosion Rate Unit Desire	K
Mils per year (mpy)	3,45 x 10 ⁶
Inches per year (ipy)	3,45 x 10 ³
Inches per month (ipm)	2,87 x 10 ²
Millimetres per year (mm/y)	8,76 x 10 ⁴
Micrometres per year (um/y)	8,76 x 10 ⁷
Picometres per second (pm/s)	2,78 x 10 ⁶
Grams per square meter per hour (g/m ² .h)	1,00 x 10 ⁴ x D
Milligrams per square decimeter per day (mdd)	2,40 x 10 ⁶ x D

Berikut ini adalah beberapa faktor-faktor lingkungan yang mempengaruhi laju korosi suatu material:

2.6.1. **Polarisasi**

Suatu reaksi elektrokimia dikatakan terpolarisasi apabila terjadi proses perlambatan dari laju reaksi semula. Polarisisasi bertindak sebagai pelapis tambahan, dan mempengaruhi tingkat pH dan konsentrasi ion pada elektrolit. Kecepatan pada reaksi elektrokimia terbatas oleh bermacam-macam faktor fisis dan kimia. Oleh karena itu reaksi elektrokimia dapat dikatakan sebagai polarisisasi atau penurunan yang disebabkan oleh faktor lingkungan. Polarisisasi dapat dibagi menjadi dua jenis yang berbeda yaitu akitifasi polarisisasi dan konsentrasi polarisisasi. Polarisisasi aktivasi adalah polarisisasi yang disebabkan oleh faktor pelambat yang berasal dari reaksi elektrokimia itu sendiri, yakni terjadinya evolusi terbentuknya gas hidrogen di katoda.

Sebagai ilustrasi yang mudah adalah reaksi terlepasnya atom hidrogen pada logam seng sebagai akibat dari korosi pada lingkungan asam. Tahapan proses tereduksinya hidrogen pada permukaan logam seng dapat pula terjadi pada suatu jenis atom yang tereduksi pada permukaan logam. Tahap pertama atom tersebut harus dapat mengikat suatu permukaan sebelum terjadinya reaksi. Tahap kedua harus terjadi transfer elektron sebagai hasil reduksi dari atom tersebut. Tahap ketiga, dua atom hidrogen menyatu untuk membentuk gelembung dan pada tahap ke empat, gelembung tersebut menjadi gas hidrogen. Kecepatan reduksi pada ion hidrogen dapat dikendalikan dengan memperlambat empat tahap di atas.

2.6.2. Pasivitas

Pada dasarnya, pasivitas adalah lepasnya suatu unsur akibat reaksi kimia yang dialami oleh beberapa logam dan paduan pada suatu kondisi lingkungan khusus. Logam dan paduan yang mengalami pasivitas diantaranya besi, nikel, silikon, kromium, titanium dan paduan- paduannya. Observasi juga telah dilakukan untuk mengetahui efek pasivitas pada beberapa logam, diantaranya seng, kadmium, timah dan torium. Pasivitas sulit untuk didefinisikan, karena pasivitas hanya dapat digambarkan secara kuantitatif dimana karakteristik suatu logam akan mengalami pengaruh yang luar biasa akibat pasivitas. Suatu pasivitas yang dialami oleh logam, dimana laju korosi logam tersebut dipengaruhi oleh daya oksidasi dengan menggunakan potensial elektron. Gambar tersebut mengilustrasikan bahwa sebuah logam dicelupkan pada lingkungan asam yang terbebas dari kandungan udara, lingkungan tersebut ditambahkan daya oksidasi pada titik A dan laju korosinya digambarkan dengan sebuah garis pada gambar tersebut. Jika daya oksidasi pada lingkungan ini meningkat, maka laju korosi pada logam tersebut juga meningkat.

2.7. Proteksi Katodik

Proses korosi adalah proses alamiah yang pasti terjadi, sebagai bagian dari proses pengrusakan material dalam siklus material. Berbagai metode yang dapat dilakukan bukan untuk menghilangkan korosi, melainkan untuk memperlambat proses korosi. Proses pengendalian korosi ini bukan merupakan metode atau langkah yang dilakukan pada masa konstruksi atau masa operasi, terlebih lagi proses pengendalian korosi adalah suatu proses terintegrasi yang menyeluruh untuk melindungi aset.

Penanggulangan masalah korosi dapat berupa hal-hal berikut:

a. *Design improvement*

Pengendalian korosi dimulai dari tahap desain. Meningkatkan desain untuk menghindarkan terjadinya korosi. Misalkan, mencegah terjadinya genangan maka permukaan didesain dengan kemiringan. Karena genangan atau air akan mempercepat terjadinya korosi atau modifikasi desain yang lebih jauh lagi.

b. *Material selection*

Pemilihan material harus disesuaikan dengan kondisi lingkungan dan operasi sehingga bisa mencegah terjadinya korosi. Misalkan, bila memungkinkan menggunakan material plastik, atau menggunakan stainless steel.

c. *Coating and lining*

Fungsi pengecatan adalah untuk melindungi besi kontak dengan air dan udara. Cat yang mengandung timbal dan seng akan lebih melindungi besi terhadap korosi. Pengecatan harus sempurna karena jika terdapat bagian yang tidak tertutup oleh cat, maka besi di bawah cat akan terkorosi. Pagar bangunan dan jembatan biasanya dilindungi dari korosi dengan pengecatan.

d. *Cathodic protection*

Pengaplikasian sistem proteksi katodik baik sistem anoda korban maupun tanding.

Cathodic Protection (Proteksi katodik) adalah metode untuk melindungi struktur logam dari korosi. Proteksi katodik

merupakan salah satu metode yang digunakan secara umum untuk pencegahan korosi. Prinsip kerjanya, dapat mengurangi atau mencegah korosi dari berbagai jenis material logam atau paduan yang bekerja pada berbagai cairan elektrolit. Korosi dapat dikurangi hingga mendekati nol, dan sistem yang dirawat dengan baik akan memberikan proteksi yang tak terbatas. Inggris pertama kali menggunakan proteksi katodik pada peralatan tembaga yang terdapat di kapal yang sedang berlayar pada tahun 1820 [2]. Terdapat dua jenis dari proteksi katodik: *impressed current cathodic protection* (ICCP) dan *sacrificial anode cathodic protection* (SACP), disebut pula dengan *galvanic cathodic protection*.

Reaksi dapat melibatkan logam yang menyerah elektron dan didorong oleh jejak garam terlarut dalam air, menyebabkan air untuk bertindak sebagai elektrolit. Korosi dapat dipandang sebagai proses elektrokimia. Proteksi katodik mengubah struktur logam ke katoda – elektroda bermuatan positif – dengan mendirikan sebuah sel elektrokimia menggunakan logam yang lebih elektropositif sebagai anoda, sehingga struktur tidak kehilangan elektron ke lingkungannya. Metode perlindungan dapat digunakan pada pipa bawah tanah dan tangki; struktur bagian atas tanah, seperti tiang listrik; dan sebagian struktur terendam, seperti kapal dan rig pengeboran. Hal ini juga dapat digunakan untuk melindungi batang baja pada beton bertulang.

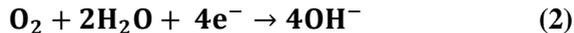
Logam yang lebih tahan terhadap korosi cenderung lebih mahal daripada baja dan mungkin tidak memiliki kekuatan yang diperlukan, sehingga mencegah korosi pada baja dengan melindunginya yang merupakan pilihan terbaik, meskipun logam lain yang dapat menimbulkan korosi juga dapat dilindungi dengan cara ini.

Proteksi katodik digunakan untuk mengendalikan korosi pada permukaan logam. Proses yang dilakukan biasanya berupa reaksi elektrokimia dimana logam yang dilindungi akan bertindak sebagai katoda. Arus mengalir berasal dari anoda melalui sel elektrolit menuju ke katoda. Sehingga kemampuan proteksi

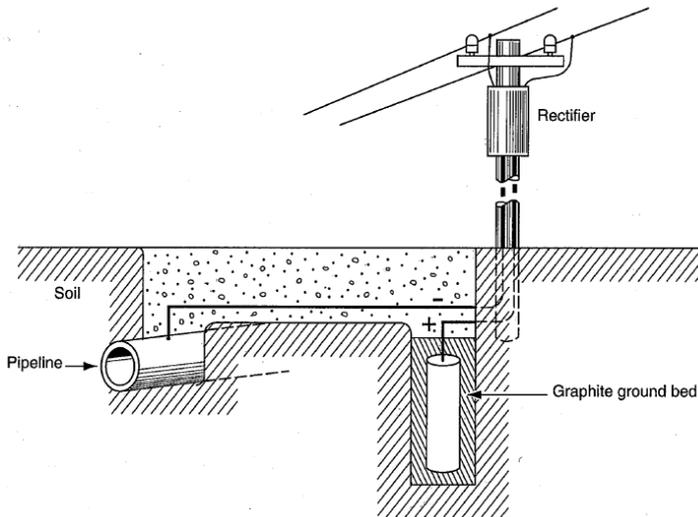
terhadap katoda dapat dicapai dengan mengalirkan arus listrik tersebut.

2.7.1. Prinsip dan Aplikasi

Cathodic protection mengurangi laju korosi oleh polarisasi katodik dari permukaan logam yang terkorosi. Berdasarkan besi yang terkorosi dalam larutan elektrolit soda netral encer. Masing-masing reaksi dari anoda dan katoda adalah:



Polarisasi katodik mengurangi laju reaksi setengah sel (1) dengan kelebihan elektron, yang mana juga meningkatkan laju dari reduksi oksigen dan produksi OH^- oleh reaksi (2).

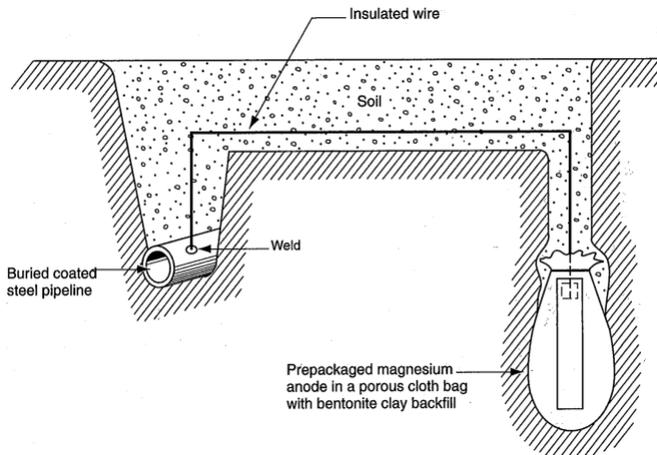


Gambar 2.6 Proteksi Katodik menggunakan *Impressed Current* [11]

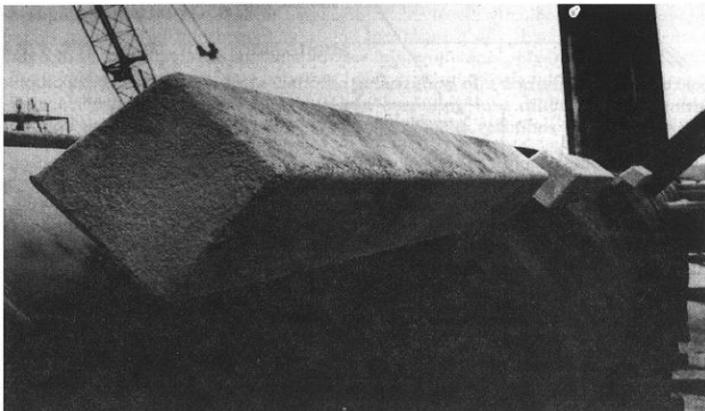
Sebuah perlengkapan penyearah arus terpasang untuk polarisasi katodik dengan pemeroses arus AC dari saluran listrik

menjadi arus DC, seperti ditunjukkan pada gambar 2.6. Pada daerah terpencil, dimana biasanya saluran listrik AC tidak tersedia, arus terpasang eksternal akan disediakan menggunakan generator gas atau dieselsl atau sel surya. Anoda tunggal atau ganda mendistribusikan arus katodik menuju struktur yang dilindungi. Untuk struktur yang dipendam, anoda yang sering digunakan adalah *inert graphite*. Sedangkan struktur yang terpasang di air laut, dapat menggunakan besi tuang yang memiliki kandungan silikon yang tinggi atau platinum-dilapisi dengan titanium.

Struktur logam dapat dilindungi secara katodik dengan dihubungkan dengan logam kedua, yang disebut dengan anoda korban (*sacrificial anode*), yang mana memiliki potensial korosi yang lebih aktif. Struktur yang lebih positif (*noble*) pada pasangan galvanik ini terpolarisasi secara katodik, sementara itu logam yang aktif terlarut secara anodik. Contoh dari baja yang dipendam terlindungi dengan anoda korban magnesium ditunjukkan pada gambar 2.7. Anoda korban magnesium, seng, dan aluminium dari massa sedikit pon hingga beberapa ratus pon, dilas pada struktur yang dipendam dan ditenggelamkan, memberikan proteksi katodik jangka panjang. Anoda korban harus diganti secara periodik selama terkonsumsi karena *anodic dissolution*. Gambar 2.8 menunjukkan anoda korban aluminium berukuran besaar yang terpasang pada kaki-kaki sebuah *offshore drilling platform*.



Gambar 2.7 Proteksi Katodik menggunakan *Sacrificial Anode* [11]



Gambar 2.8 Anoda tumbal aluminium yang terpasang pada sebuah *offshore drilling platform* [2]

Anoda yang terpendam, pada arus paksa atau anoda korban, biasanya diberikan *backfill* atau dibungkus dengan material konduktif, sering kali yang digunakan adalah *granulated*

coke, untuk menyebarkan arus melewati area yang lebih luas dan mengurangi konsumsi anoda.

Reaksi (1) dapat digantikan dengan reaksi anoda untuk berbagai jenis logam, dan laju korosi dari berbagai jenis logam dapat dikurangi dengan polarisasi katodik. Bagaimanapun, struktur dari baja karbon dalam lingkungan berair netral yang tidak terlalu korosif, seperti tanah, air, dan air laut adalah keuntungan terbesar dari proteksi katodik. Beberapa paduan, seperti *stainless steels* dan tembaga, adalah pada hakekatnya tahan korosi dan tidak memerlukan perlindungan tambahan. Selain itu, seperti aluminium dan seng, adalah untuk “korosi katodik” dengan larutan alkalin terbentuk oleh reaksi katodik, dan tingkat polarisasi katodik harus dikontrol secara hati-hati. Proteksi katodik tidak memungkinkan secara ekonomi ketika laju korosi lebih tinggi (misal: baja dalam larutan asam), karena perlindungan yang cukup memerlukan hubungan arus yang tinggi dan penyearah arus yang besar. Perubahan yang berlebihan dari hidrogen yang mudah terbakar oleh reaksi (2) bisa berbahaya, dan pelapisan yang ekonomis untuk mengurangi kebutuhan arus pada umumnya tidak berhasil dalam larutan asam.

Laju korosi maksimum dari baja yang tidak diberi pelapis dalam air soda yang diam adalah sekitar 20 mpy (0,47 mm/y). Laju korosi tingkat menengah ini masih dapat ditoleransi dalam banyak aplikasi tetapi tidak untuk struktur baja permanen dimana usia pemakaian yang lama dibutuhkan. Demikian juga, saluran pipa yang terpendam dan *platform* pengeboran minyak lepas pantai adalah penerima dari proteksi katodik untuk mengurangi laju korosi untuk tingkatan yang dapat diabaikan.

2.7.2. **Impressed Current Cathodic Protection (ICCP)**

Perlindungan katodik dengan *impressed current cathodic protection* atau arus paksa adalah dengan mengaplikasikan katodik pada permukaan yang terkorosi, dengan tujuan arus DC yang dihasilkan digunakan untuk meluruskan dan arus AC diluruskan menggunakan transformator. Saat *cathodic* ada pada

permukaan yang dilapisi, potensi di permukaan akan turun. Objek yang terhubung secara elektrik ke sistem penyearah, sehingga dapat menutup jaringan listrik. Berbeda dengan sistem anoda korban, sumber arus pada sistem arus tanding berasal dari luar, biasanya berasal dari DC dan AC yang dilengkapi dengan penyearah arus (*rectifier*), dimana kutub negatif dihubungkan ke struktur yang dilindungi dan kutub positif dihubungkan ke anoda. Arus mengalir dari anoda melalui elektrolit ke permukaan struktur, kemudian mengalir sepanjang struktur dan kembali ke *rectifier* melalui konduktor listrik. Karena struktur menerima arus dari elektrolit, maka struktur menjadi terproteksi. Keluaran (*output*) arus *rectifier* diatur untuk mengalirkan arus yang cukup sehingga dapat mencegah arus korosi yang akan meninggalkan daerah anoda pada struktur yang dilindungi. Dengan keluaran arus dari anoda ini maka anoda tersebut terkonsumsi. Untuk itu maka sebaiknya menggunakan bahan yang laju konsumsinya lebih rendah dari magnesium, seng dan aluminium yang biasa dipakai untuk sistem tersebut, umumnya digunakan paduan kombinasi bahan yang khusus.

Sistem arus tanding digunakan untuk melindungi struktur yang besar atau yang membutuhkan arus proteksi yang lebih besar dan dipandang kurang ekonomis jika menggunakan anoda korban. Sistem ini dapat dipakai untuk melindungi struktur baik yang tidak dicoating, kondisi coating yang kurang baik maupun yang kondisi *coating*nya baik. Kelebihan sistem arus tanding adalah dapat didesain untuk aplikasi dengan tingkat fleksibilitas yang tinggi karena mempunyai rentang kapasitas *output* arus yang luas. Artinya kebutuhan arus dapat diatur baik secara manual maupun secara otomatis dengan merubah tegangan *output* sesuai dengan kebutuhan. Kelebihan lain dari sistem ini, dengan hanya memasang sistem di salah satu tempat dapat memproteksi struktur yang cukup besar.

Kekurangan dari sistem ini yaitu memerlukan perawatan yang lebih banyak dibanding sistem anoda korban sehingga biaya operasional akan bertambah. Sistem ini juga mempunyai

ketergantungan terhadap kehandalan pemasok energi (*rectifier*) sehingga kerusakan pada sistem ini akan berakibat fatal terhadap kinerja sistem proteksi. Kekurangan yang lain sistem arus tanding adalah cenderung lebih mahal karena peralatan dan bahan yang digunakan lebih banyak. Di samping itu ada kemungkinan dapat menimbulkan masalah efek interferensi arus terhadap struktur di sekitarnya [19].

2.7.3. Sacrificial Anode Cathodic Protection (SACP)

Sacrificial anode (anoda korban) merupakan suatu sistem perlindungan terhadap korosi yang sering digunakan pada struktur pipa bawah laut. Hal ini dikarenakan proses instalasi yang sederhana dan tidak membutuhkan media penghantar arus listrik lain. Sistem *sacrificial anode* juga dikenal sebagai *galvanic anode*, dimana cara kerja dan sumber arus yang digunakan berasal dari reaksi galvanis dari anoda itu sendiri. Prinsip dasar dari sistem anoda korban adalah dengan menciptakan elektrokimia galvanis dimana dua logam yang berbeda dihubungkan secara elektrik dan ditanam dalam elektrolit alam (tanah atau air). Dalam sel logam yang berbeda tersebut, logam yang lebih aktif dalam seri galvanik akan menjadi anoda terhadap logam yang kurang aktif dan terkonsumsi selama reaksi elektrokimia. Logam yang kurang aktif akan menerima proteksi katodik pada permukaannya karena adanya aliran listrik melalui elektrolit dari logam anodik dan logam yang diproteksi tersebut akan menerima elektron. Terdapat jenis-jenis *sacrificial anode* diantaranya *bracelet anodes* dan *sled anode*.

Sistem anoda korban secara umum digunakan untuk melindungi struktur dimana kebutuhan arus proteksinya kecil dan resistivitas tanah rendah. Di samping itu sistem ini juga digunakan untuk keperluan dan kondisi yang lebih spesifik seperti untuk memproteksi struktur dimana sumber listrik tidak tersedia. Memproteksi struktur yang kebutuhan arusnya relatif kecil, yang jika ditinjau dari segi ekonomi akan lebih menguntungkan dibandingkan dengan sistem arus tanding.

Ada beberapa keuntungan yang diperoleh jika menggunakan sistem anoda korban diantaranya:

1. Tidak memerlukan arus tambahan dari luar, karena arus proteksi berasal dari anodanya itu sendiri.
2. Pemasangan dilapangan relatif lebih sederhana.
3. Perawatannya mudah.
4. Ditinjau dari segi biaya, sistem ini lebih murah dibanding sistem arus tanding.
5. Kemungkinan menimbulkan efek interferensi kecil.
6. Kebutuhan material untuk sitem anoda korban relatif sedikit yaitu anoda, kabel dan *test box*.

Kelemahan proteksi katodik dengan anoda korban dibandingkan dengan sistem arus tanding adalah *driving voltage* dari sistem ini relatif rendah karena arus proteksi hanya terjadi dari reaksi galvanis material itu sendiri sehingga sistem ini hanya dapat digunakan untuk memproteksi struktur yang arus proteksinya relatif kecil dan resistivitas lingkungan rendah. Karena kondisi yang demikian itu, sistem ini akan menjadi kurang ekonomis jika dipakai untuk keperluan memproteksi struktur yang relatif besar. Kemampuan untuk mengontrol variabel efek arus sesat terhadap struktur yang diproteksi relatif kecil [19].

2.8. Anoda Korban Seng

Seng merupakan salah satu unsur dengan simbol Zn, memiliki nomor atom 30, massa atom 65,37 g/mol, konfigurasi elektron $[\text{Ar}]3d^{10}4s^2$ dan terdapat pada golongan IIB unsur transisi di dalam tabel periodik. Seng adalah logam yang berwarna putih kebiruan yang sangat mudah ditempa. Seng liat pada suhu 110-150 °C, melebur pada suhu 410 °C, dan mendidih pada suhu 906 °C. Beberapa sifat kimia seng mirip dengan magnesium (Mg). Hal ini dikarenakan ion kedua unsur ini berukuran hampir sama. Selain itu, keduanya juga memiliki keadaan oksidasi +2. Seng merupakan unsur paling melimpah ke-24 di kerak bumi dan memiliki

lima isotop stabil. Bijih seng yang paling banyak ditambang adalah sfalerit (seng sulfida).

Anoda korban harus terbuat dari logam yang mempunyai potensial listrik lebih rendah dari logam yang diproteksi. Logam yang diproteksi dalam hal ini adalah tiang pancang pipa baja. Dengan demikian akan terjadi aliran elektron (*supply electron*) dari anoda ke katoda yang berlangsung secara terus menerus sampai logam anoda yang dikorbankan habis. Anoda yang digunakan pada proteksi katodik tiang pancang pipa baja dengan metoda anoda korban biasanya digunakan logam paduan dari Magnesium, Seng, dan Alumunium. Perlindungan yang akan diberikan oleh seng akan luar biasa seandainya logam tersebut dapat dilarutkan dengan laju yang kurang-lebih konstan. Seng murni yang tersedia di pasaran, terkorosi di air laut sambil membentuk selapis kulit kedap air yang sangat membatasi keluaran arusnya. Diantara bahan-bahan pengotor: besi, tembaga dan timbale yang paling menimbulkan efek merusak pada anoda adalah besi. Kelarutannya dalam seng sedemikian rendah ($< 0.0014\%$) sehingga apabila berlebih maka kelebihan-kelebihan itu akan berupa partikel-partikel terpisah. Hal ini pada gilirannya akan membentuk sel galvanik lokal yang menghasilkan suatu lapisan seng hidroksida/seng karbonat yang tidak dapat larut dan tidak menghantarkan listrik; yang akhirnya menjadikan anoda tidak efektif [5].

Komposisi kimia anoda korban yang dianjurkan untuk dipakai pada kapal berdasarkan Biro Klasifikasi Indonesia dalam *Regulation for the Corrosion Protection and Coating System* sesuai Tabel 2.2 sebagai berikut ini:

Tabel 2.2 Anoda Korban Seng Sebagai Aplikasi Dalam Media Air Laut [20]

Element	KI-Zn1	KI-Zn2
Al	0,10 – 0,50	≤ 0,10
Cd	0,025 – 0,07	≤ 0,004
Cu	≤ 0,005	≤ 0,005
Fe	≤ 0,005	≤ 0,0014
Pb	≤ 0,006	≤ 0,006
Zn	> 99,22	≥ 99,88
Potential (T = 20 °C)	-1,03 V Ag/AgCl/See	-1,03 V Ag/AgCl/See
Q _g (T = 20 °C)	780 Ah/kg	780 Ah/kg
Efficiency (T = 20 °C)	95%	

2.8.1 Pengaruh Unsur Paduan Terhadap Anoda Korban Seng

a. Aluminium

Kekuatan tumbukan sangat dipengaruhi oleh kandungan aluminium yang sangat tinggi. Penurunan sifat ini dimulai pada 4,5 persen dan pada 5,0 persen paduannya sangat rapuh. Sangat penting bahwa kandungan aluminium maksimum ditetapkan pada jumlah, yang tidak merusak kekuatan, dan untuk alasan ini, nilai maksimum ditetapkan pada 4,3 persen. Alasan untuk menetapkan batas maksimum aluminium pada 4,3 persen sedangkan kekuatan tumbukan tidak terjadi sampai kadar aluminium mencapai 4,5 persen atas dasar bahwa tidak biasa untuk menemukan penyimpangan 0,15 persen dari aluminium kandungan yang murni dalam pembuatan dan analisis paduan jenis ini. Kesalahan positif sebesar ini masih membuat paduan di bawah batas kritis jika nilai maksimumnya ditetapkan pada 4,3 persen.

Kandungan aluminium minimum adalah nilai yang ditetapkan pada 3,5 persen untuk memungkinkan rentang yang cukup untuk pembuatan cetakan. Ada beberapa kehilangan

kemampuan cor dan sifat ketika kandungan aluminium menurun di bawah batas minimum spesifikasi. Kehilangan ini terjadi pada tingkat yang mengurangi kestabilannya menjadi 50 persen dari yang optimal ketika kandungan aluminium diturunkan menjadi 2,0 persen. Pengurangan lebih lanjut dalam kandungan aluminium membawa penyusutan cepat yang berkelanjutan dari paduan. Ketahanan lapisan pada *die casting* yang diperpendek dengan penggunaan paduan dengan kandungan yang terlalu rendah [22].

b. Kadmium

Kadmium berdampak buruk pada beberapa tingkat konsentrasi dan netral pada tingkat konsentrasi yang lain. Konsentrasi yang diberikan pada paduan oleh yang kelas tinggi khusus tidak merugikan, karenanya batas spesifikasi harus ditetapkan untuk mengecualikan hanya kontaminasi dari sumber lain [22].

c. Besi

Besi tidak memiliki efek merugikan pada sifat permanen atau sifat diecasting yang. Kelebihan kandungan besi akan membentuk senyawa keras dengan aluminium, yang jika tertanam pada *die casting* akan mempengaruhi kemampuan kerja. Sekitar 0,02 persen besi tetap dalam larutan cair pada suhu beku. Setiap kelebihan besi akan membentuk senyawa, yang lebih ringan dari paduan dan akan melayang di permukaan lelehan, dari mana mereka dapat dihilangkan dengan *skimmings*. Jadi, dengan praktik yang baik, coran tidak boleh mengandung lebih dari 0,02 persen besi. Karena praktik pengecoran yang buruk dapat menyebabkan kelebihan besi terperangkap dalam paduan, maka perlu memiliki batas spesifikasi untuk elemen ini. Nilai ini ditetapkan berkisar pada 0,1 persen [22].

d. Tembaga

Efek penambahan tembaga dalam jumlah yang meningkat adalah untuk meningkatkan kekuatan tarik dan kekerasan cukup

sebanding dengan jumlah yang ditambahkan. Dalam penggunaan suhu kamar tidak ada efek penting lainnya hingga kandungan tembaga sekitar 1,5 persen. Kandungan tembaga yang lebih tinggi menghasilkan efek *aging*, yang terlihat pada penurunan kekuatan tumbukan dan pertumbuhan dimensi. Di bawah kondisi layanan suhu tinggi, misalnya, 100 ° C. Efek-efek ini pertama kali diamati pada sekitar 0,4 persen tembaga tetapi tingkat perubahan sifat dan dimensi tidak serius sampai kandungan sekitar 1,5 persen tembaga tercapai.

Paduan Zamak mewakili komposisi yang dipilih dari kisaran tembaga 0 hingga sekitar 1,5 persen. Zamak-3 adalah paduan paling stabil dalam seri ini. Zamak-5 memberikan kekerasan maksimum dan kekuatan tarik yang konsisten dengan stabilitas sifat dan dimensi yang wajar pada suhu tinggi. Semua paduan stabil ketika digunakan pada suhu kamar. Konten tembaga maksimum yang diizinkan dalam diecasting Zamak-3 di bawah spesifikasi ASTM Alloy AG40A adalah 0,25 persen. Karena tidak ada tembaga yang ditambahkan dengan sengaja pada paduan ini, apa pun yang hadir berasal dari bahan baku yang digunakan dalam paduan, atau dari kontaminasi selama diecasting.

Kisaran tembaga untuk diecasting Zamak-5 di bawah spesifikasi ASTM Alloy AC41A adalah 0,75 hingga 1,25 persen. Batas rendah menempatkan paduan dalam rentang kekuatan tarik dan kekerasan tinggi, sedangkan batas atas aman di bawah kandungan tembaga yang menghasilkan perubahan penuaan pada suhu kamar [22].

e. **Timbal**

Batas maksimum ditetapkan pada jumlah yang tidak mempromosikan korosi jaringan bawah permukaan pada tingkat minimum magnesium yang diperbolehkan dalam *die casting* [22].

2.9. Kapasitas dan Efisiensi Anoda

Kapasitas anoda adalah arus yang dihasilkan oleh berat dari anoda dan biasanya dinyatakan dengan ampere jam dibagi dengan

kilogram (Ah/Kg). Dalam teori hukum Faraday, 1 gram *equivalen* = 96500. Dari sini dapat dihitung, bahwa 1 kg seng = 819,74 Ah. Yang artinya jika 1 kg seng dilarutkan secara elektrokimia, muatan yang dipindahkan kepada logam yang akan dilindungi sebesar 819,74 elektron yang berfungsi untuk perlindungan katodik dari struktur. Efisiensi anoda adalah prosentase dari kapasitas arus yang dicapai secara praktis, berbanding dengan kapasitas arus secara teoritis. Anoda korban seng umumnya didesain untuk masa waktu penggunaan yang lebih pendek yaitu 1 sampai 3 tahun di lingkungan laut dan suhu lingkungan yang relatif rendah. Untuk mencegah terjadinya korosi anoda korban yang tidak merata dan menurunnya keaktifan anoda seng, pada umumnya ditambahkan unsur paduan Kadmium (Cd) sampai batas tertentu yang dipersyaratkan terhadap kelestarian lingkungan, sedangkan Aluminium (Al) ditambahkan untuk memperbaiki sifat karakteristik dari elektrokimianya [23].

2.10. Recommended Practice DNV-RP-B401

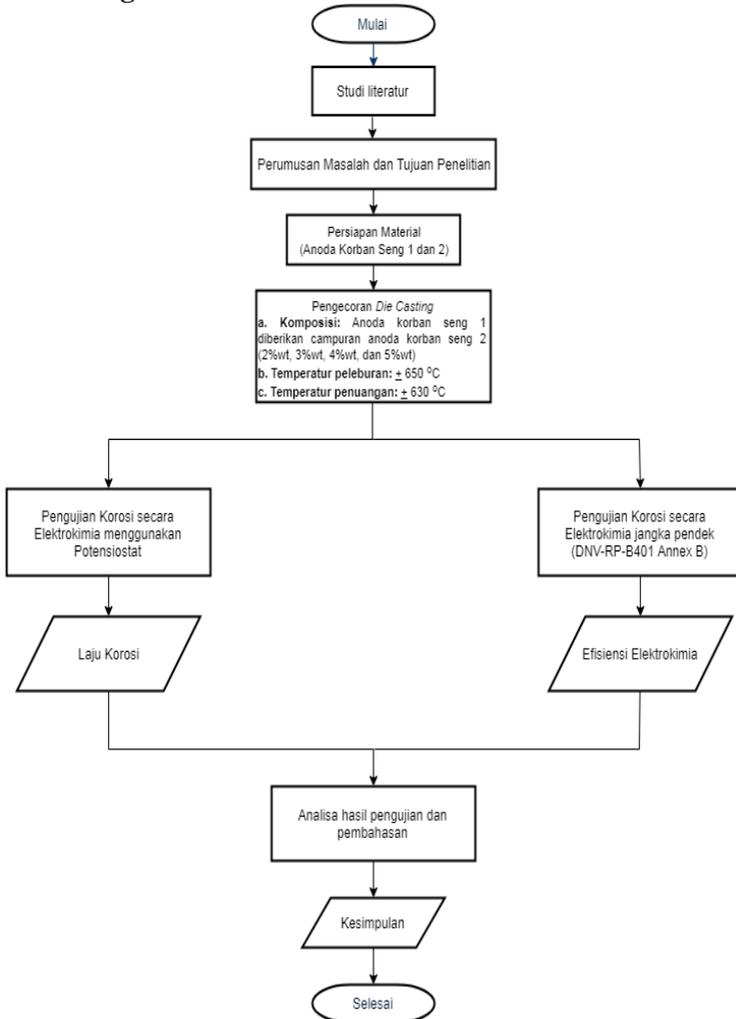
Det Norske Veritas-Germanischer Lloyd (DNV GL) adalah lembaga registrasi dan klasifikasi terakreditasi internasional yang berkantor pusat di Hovik, Norwegia. DNV-RP-B401 merupakan pedoman pelaksanaan bagi perusahaan manufaktur yang memproduksi anoda, perusahaan yang memiliki kapal laut yang menggunakan anoda untuk memproteksi kapal laut, atau sebagai pedoman untuk pembelajaran mengenai proteksi katodik. Pedoman pelaksanaan ini dipersiapkan untuk memfasilitasi pelaksanaan perancangan sistem proteksi katodik menggunakan anoda korban aluminium atau seng. DNV-RP-B401 memiliki tiga lampiran, yaitu *Appendix A* berisi tabel dan gambar rekomendasi desain rapat arus untuk kedalaman serta jenis air laut tertentu, rekomendasi batas komposisi material anoda korban berbasis aluminium dan seng, rekomendasi desain kapasitas elektrokimia dan *closed circuit potential* untuk material anoda pada temperatur lingkungan air laut, dan beberapa data lain yang menunjang untuk pedoman pelaksanaan. *Appendix B* berisi pengujian laboratorium

dari material anoda korban untuk kontrol kualitas. *Appendix C* berisi pengujian laboratorium untuk material anoda korban sebagai kualifikasi performa elektrokimia jangka panjang [12].

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Diagram Alir Penelitian



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

3.2. Spesimen Uji

Penelitian ini menggunakan dua jenis material seng yang selanjutnya dicampurkan dengan variasi presentase 2 Wt.%, 3 Wt.%, 4 Wt.%, dan 5 Wt.% pada proses *die casting*. Tabel 3.1 menunjukkan komposisi kimia material seng yang didapatkan dari Pengujian *Optical Emission Spectroscopy Test* yang dilakukan di Laboratorium Uji Bahan, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya (PPNS):

Tabel 3.1 Komposisi Kimia Material Anoda Korban Seng:

Unsur Paduan/Pengotor	DNV-RP-B401 [12]	Anoda Korban Seng 1	Anoda Korban Seng 2
Zn	99,4 - 99,8	99,7	99,7
Al	0,10-0,50	0,0169	0,0495
Cd	$\leq 0,07$	$< 0,0001$	0,0004
Fe	$\leq 0,005$	$< 0,0020$	0,0058
Cu	$\leq 0,005$	$< 0,0004$	$< 0,0004$
Pb	$\leq 0,006$	0,0184	0,0102
Lainnya	-	$\pm 0,26$	$\pm 0,23$

Pada gambar 3.2 berikut merupakan foto dari material seng yang digunakan pada penelitian ini, yaitu (a) Anoda Korban Seng 1, (b) Anoda Korban Seng 2.



(a) (b)
Gambar 3.2 Material Penelitian:(a) Anoda Korban Seng 1; (b) Anoda Korban Seng 2

Material seng yang digunakan pada penelitian ini sebelum dicor dilakukan pengujian komposisi kimia *Optical Emission Spectroscopy Test* di Laboratorium Uji Bahan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya menggunakan alat *Optical Emission Spectroscope* untuk mengetahui kandungan komposisi kimia yang dimiliki anoda korban seng 1 dan seng 2. Hasil pengujian komposisi kimia *Optical Emission Spectroscopy Test* ditunjukkan pada tabel 3.1 dan lampiran 1.

Unsur-unsur kimia yang mempengaruhi performa kerja suatu anoda korban berbasis seng sesuai dengan *Regulation for the Corrosion Protection and Coating System* dari Biro Klasifikasi Indonesia adalah unsur Aluminium (Al), Kadmium (Cd), Besi (Fe), Tembaga (Cu), dan Timbal (Pb). Dari hasil pengujian komposisi kimia *Optical Emission Spectroscopy Test* yang telah dilakukan didapatkan komposisi kimia anoda korban seng 1 dan seng 2 memiliki kandungan seng yang sama yaitu sebesar 99,7% dari hasil pengujian komposisi kimia *Optical Emission Spectroscopy Test* yang telah dilakukan. Anoda korban seng 1 memiliki kandungan unsur Fe yang lebih rendah

dibandingkan dengan anoda korban seng 2. Jika dibandingkan unsur-unsur yang terkandung pada anoda korban seng 1 dan seng 2 dengan rekomendasi batas komposisi kimia untuk material anoda korban berbasis seng dari DNV-RP-B401 *Annex A* seperti pada tabel 3.1. Kandungan unsur Zn dari anoda korban seng 1 dan seng 2 sudah sesuai dengan rekomendasi dari DNV-RP-B401.

Unsur Fe, Cu, dan Pb merupakan unsur pengotor dari material seng, dalam batas nilai kandungan tertentu masih dianggap tidak mempengaruhi performa elektrokimia anoda korban seng. Namun apabila kandungan unsur pengotor melebihi batas nilai yang telah ditentukan dapat menghambat performa elektrokimia anoda korban seng. Oleh sebab itu diberikan unsur paduan Al dan Cd untuk mengurangi pengaruh dari unsur pengotor yang ada.

3.3 Peralatan Penelitian

3.3.1 Peralatan Potong

Peralatan yang digunakan untuk persiapan spesimen uji adalah gergaji besi, *hacksaw machine*, dan gerinda tangan.

3.3.2 Electric Melting Furnace

Tungku pelebur logam yang menggunakan bahan bakar berupa daya listrik dalam pengoperasiannya sering dikenal dengan tanur induksi. Kapasitas peleburan pada *electric melting furnace* (tanur induksi) ini sebesar 1,5 kilogram yang mampu dileburkan pada krusibelnya.

3.3.3 Mesin Grinding dan Polishing

Mesin *grinding* dan *polishing* digunakan untuk menghaluskan permukaan dari spesimen uji yang akan diamati pada penelitian ini. Proses *grinding* dilakukan secara bertahap menggunakan kertas gosok dengan tiga jenis tingkat *grit* kekasaran yaitu *grit* 800, 1200, dan 1500 dengan dialiri air sampai permukaan spesimen tersebut menjadi rata. Permukaan spesimen untuk pengujian korosi menggunakan *potensiostat*

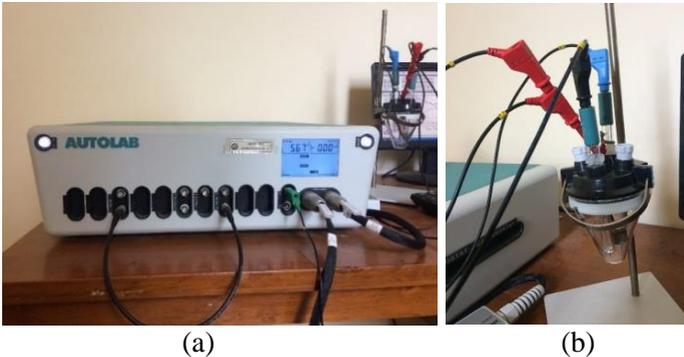
dihaluskan terlebih dahulu menggunakan mesin *grinding* sebelum dilakukan pengujian korosi.

3.3.4 Mesin Bubut

Mesin bubut merupakan salah satu mesin perkakas yang digunakan untuk memotong spesimen dengan cara memutar spesimen yang dipotong. Bubut adalah suatu proses pemakanan spesimen yang sayatannya dilakukan dengan cara memutar spesimen kemudian dikenakan pada pahat yang digerakkan secara translasi sejajar dengan sumbu putar dari spesimen. Spesimen dibentuk untuk persiapan spesimen uji pada pengujian korosi secara elektrokimia jangka pendek.

3.3.5 Peralatan Uji Korosi (Potensiostat)

Penelitian ini menggunakan potensiostat untuk pengujian korosi secara elektrokimia seperti pada gambar 3.3(a), potensiostat yang digunakan pada penelitian ini menggunakan sel tiga elektroda yang disertai perangkat lunak NOVA 1.8. Sel tiga elektroda adalah perangkat baku laboratorium untuk penelitian kuantitatif terhadap sifat-sifat korosi bahan-bahan. Pengujian ini menggunakan tiga elektroda yaitu elektroda kerja (*working electrode*), elektroda bantu (*counter / auxiliary electrode*), dan elektroda acuan (*reference electrode*) seperti pada rangkaian pengujian pada gambar 3.3(b). Data yang bisa kita dapatkan dari pengujian menggunakan potensiostat adalah arus korosi (I_{corr}), potensial korosi (E_{corr}), dan laju korosi (dalam milimeter/tahun).



Gambar 3.3 Alat Uji Korosi Secara Elektrokimia: (a) Potensiostat (b) Rangkaian Pengujian

3.3.6 DC Power Supply

Pada pengujian korosi secara elektrokimia jangka pendek, digunakan *DC Power Supply* seperti pada gambar 3.4 sebagai pencatu daya untuk menyediakan dan mengontrol tegangan maupun arus listrik dalam bentuk *DC (Direct Current)*. *DC Power Supply* memiliki polaritas yang tetap yaitu positif dan negatif untuk bebannya. Spesimen dan katoda dihubungkan pada kabel positif dan negatif secara berurutan yang terhubung pada *DC Power Supply*.



Gambar 3.4 DC Power Supply

3.3.7 Timbangan Digital

Timbangan digital digunakan untuk menimbang berat spesimen sebelum dan setelah pengujian korosi secara elektrokimia jangka pendek, agar didapatkan nilai pengurangan berat karena spesimen uji terkorosi.

3.3.8 Multimeter

Multimeter digunakan untuk mengukur tegangan listrik, arus listrik, dan tahanan (resistansi) seperti pada gambar 3.5 berikut. Pada pengujian korosi secara elektrokimia jangka pendek digunakan multimeter untuk mengukur laju arus listrik serta mengukur potensial anoda pada saat pengujian.



Gambar 3.5 Multimeter

3.4 Pelaksanaan Penelitian

3.4.1 Proses Pengecoran

Pengecoran dilakukan di Laboratorium Cor Departemen Teknik Mesin FTI-ITS, menggunakan *electric melting furnace* dengan kapasitas krusibel maksimal 1 kilogram seperti pada gambar 3.6 berikut.



Gambar 3.6 *Electric Melting Furnace*

3.4.1.1 Persiapan Material

Material seng 1 dipotong menggunakan *hacksaw machine* untuk didapatkan material yang akan dicor ± 1200 gram untuk satu kali pengecoran. Material seng 2 dipotong menggunakan gergaji tangan untuk didapatkan variasi komposisi yang diinginkan yaitu 2%, 3%, 4% dan 5%. Material seng 1 dicor terlebih dahulu tanpa diberi campuran material seng 2 untuk didapatkan kondisi awal material yang seragam.

3.4.1.2 Pengecoran Material

Material seng 1 yang telah dipotong dimasukkan ke dalam *furnace* yang telah dipanaskan hingga temperatur 50 °C terlebih dahulu. Kemudian *furnace* yang telah diatur untuk meleburkan material seng 1 hingga temperatur ± 650 °C ditutup. Setelah mencapai temperatur 650 °C penutup *furnace* dibuka lalu dimasukkan batang besi pengaduk ke dalam krusibel, seng cair diaduk selama 5 menit untuk memastikan material seng tercampur dengan rata serta telah melebur semua. Saat temperatur

$\pm 630 \text{ }^{\circ}\text{C}$ krusibel diangkat menggunakan tang penjepit untuk menuangkan seng cair ke dalam cetakan pelat baja seperti pada gambar 3.7. Dilakukan tiga kali pengecoran untuk didapatkan material seng yang akan dicampurkan dengan material seng 2 untuk divariasikan komposisinya sesuai perencanaan awal.



Gambar 3.7 Cetakan Pelat Baja

Anoda korban seng 1 yang telah dicor diberikan campuran anoda korban seng 2 dengan variasi komposisi seperti pada tabel 3.2.

Tabel 3.2 Variasi Komposisi Kimia Anoda Korban Seng Pada Proses Pengecoran:

Anoda Korban	Komposisi Rancangan				Komposisi Aktual	
	Seng 1 (Wt%)	Seng 2 (Wt%)	Massa Seng 1 (gram)	Massa Seng 2 (gram)	Seng 1 (Wt%)	Seng 2 (Wt%)
Zn A	98	2	653,32	14	97,90	2,10
Zn B	97	3	559,08	17	97,05	2,95
Zn C	96	4	500	21	95,97	4,03\
Zn D	95	5	654,17	35,83	94,81	5,19

3.4.2 Proses Pengujian

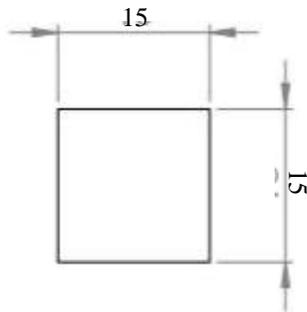
3.4.2.1 Persiapan Pengujian

Persiapan yang dilakukan pada penelitian ini material seng dipotong menjadi spesimen uji berukuran 15 mm x 15 mm x 5 mm serta dibubut menjadi spesimen uji berbentuk silinder dengan diameter 10 mm \pm 1 mm dan panjang 50 mm \pm 5 mm. Seng yang dipotong digunakan sebagai spesimen pengujian korosi secara elektrokimia menggunakan *potensiostat*, sedangkan yang dibubut digunakan sebagai spesimen pengujian korosi secara elektrokimia jangka pendek (DNV-RP-B401).

3.4.2.2 Pengujian Korosi Secara Elektrokimia Menggunakan Potensiostat

Langkah-langkah untuk pengujian korosi secara elektrokimia menggunakan alat uji *potensiostat* adalah sebagai berikut:

1. Material paduan seng dipotong dengan ukuran 15 mm x 15 mm x 5 mm seperti pada gambar 3.8.



Gambar 3.8 Dimensi spesimen uji korosi secara elektrokimia menggunakan potensiostat

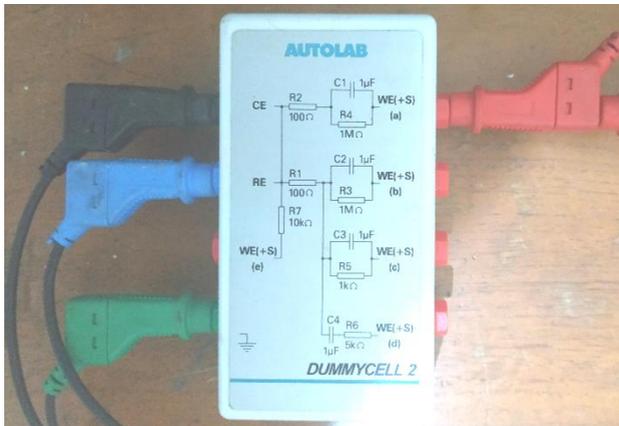
2. Spesimen uji disambungkan dengan kawat kabel tembaga kemudian *dimounting* dengan menggunakan resin agar hanya permukaan material yang dikehendaki bereaksi pada saat pengujian seperti pada gambar 3.9.



Gambar 3.9 Spesimen uji yang telah disambungkan dengan kawat kabel tembaga dan *dimounting*

3. Permukaan spesimen uji dihaluskan menggunakan kertas gosok yang dipasangkan pada mesin *grinding* dengan *grid* kekasaran 800, 1200, dan 1500. Proses ini berlaku untuk semua spesimen uji.

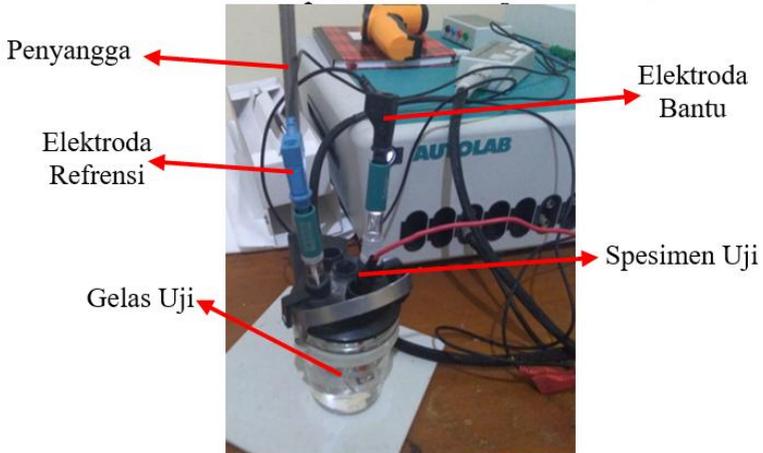
4. Larutan elektrolit menggunakan air laut buatan berdasarkan ASTM D1141 [30] dengan salinitas 35 ‰ [12].
5. Pada komputer yang terhubung dengan alat uji *potensiostat* dibuka aplikasi NOVA 1.8.
6. Alat uji dikalibrasi untuk polarisasi linear (Tafel). Kabel warna hitam, biru, dan hijau dipasang pada *dummycell*. Opsi *start* dipilih untuk menjalankan program, untuk menentukan posisi kabel merah ditunggu *command* pada program, kemudian kabel merah dipasangkan pada *dummycell* sesuai dengan *command* yang diinstruksikan, seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.10.



Gambar 3.10 Rangkaian Kabel Untuk Kalibrasi Pada Dummycell

7. Setelah terpasang, untuk melanjutkan proses kalibrasi dipilih opsi OK. Hasil dari kalibrasi dilihat pada opsi *analysis view*. *Residual plot measurement* (biru), *residual plot refrence* (merah), nilai *upper limit* (hijau), dan *lower limit* (hijau) ditampilkan dengan menekan tombol “ctrl”. *Residual plot* dibandingkan dengan *limit*. Apabila plot biru dan merah didalam batas hijau, kalibrasi berhasil dilakukan.

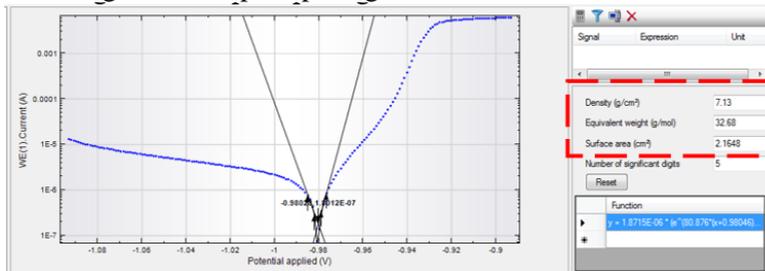
8. Kabel warna hitam disambungkan dengan *counter electrode* (platina), kabel warna biru dengan *refrence electrode* (Ag/AgCl), dan kabel warna merah dengan *working electrode* (spesimen uji). Air laut dituangkan pada gelas uji. Kemudian ketiga elektroda dan gelas uji diletakkan pada penyangga, seperti pada gambar 3.11. Ketiga elektroda dipastikan tercelup ke dalam air laut.



Gambar 3.11 Rangkaian Kabel Elektroda Pada Penyangga

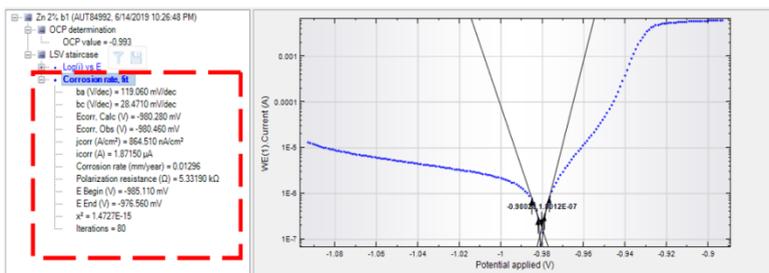
9. Pada aplikasi NOVA 1.8 yang telah dibuka pada komputer, prosedur baru dibuat. Opsi *view* dipilih pada program, kemudian *setup view* dan *linear polarization* dipilih selanjutnya.
10. *OCP determination* diatur. *Maximum time* diatur untuk menentukan durasi pengujian. Durasi pengujian yang diatur untuk pengujian ini sebesar 120 detik.
11. Opsi *LSC staircase* dipilih, *start potential* dan *stop potential*, *step potential*, serta *scan rate* diatur. Untuk pengujian ini digunakan pengaturan *default*.

12. Opsi *start* dipilih untuk memulai program, kemudian proses ditunggu sampai selesai dan didapatkan kurva polarisasi didapatkan.
13. Untuk mendapatkan data tambahan dari kurva pengujian, dilakukan ekstrapolasi Tafel. Ekstrapolasi dilakukan dengan cara menarik garis lurus pada daerah linier kurva polarisasi katodik dan kurva polarisasi anodik, sehingga dari kedua garis tersebut didapatkan perpotongan pada satu titik yang akan menunjukkan nilai potensial korosi (E_{corr}) dan arus korosi (I_{corr}).
14. Untuk mendapatkan data laju korosi yang sesuai dengan spesimen uji, dimasukkan data massa jenis material, *equivalent weight*, dan luasan area spesimen yang digunakan, seperti pada gambar 3.12.



Gambar 3.12 Tampilan Input Pengolahan Data

15. Nilai $E_{corrosion\ calculation}$ dibandingkan dengan $E_{corrosion\ observation}$. Selisih antara kedua nilai tersebut harus sekecil mungkin. Apabila perbandingan sudah dianggap sesuai, maka data I_{corr} , dan *corrosion rate* dari pengujian sudah dapat digunakan, seperti pada gambar 3.13. Data yang didapatkan dituliskan pada tabel rancangan eksperimen seperti pada tabel 3.3.



Gambar 3.13 Tampilan Output Pengolahan Data

Tabel 3.3 Tabel Rancangan Eksperimen Pengujian Korosi Secara Elektrokimia Menggunakan Potensiostat

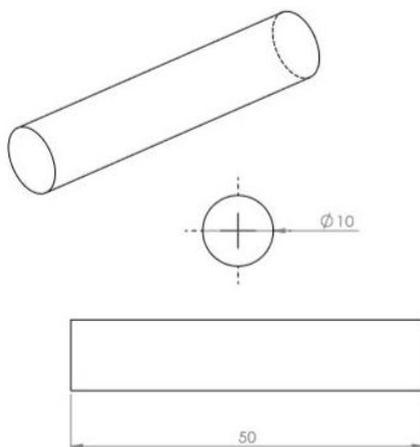
Sampel	Variabel Proses	Variabel Respon		
	Jenis Material	OCP	Icorr	Laju Korosi
1	Zn A			
2				
3				
4	Zn B			
5				
6				
7	Zn C			
8				
9				
10	Zn D			
11				
12				

3.4.2.3 Pengujian Korosi Secara Elektrokimia Jangka Pendek

Pengujian ini dilakukan untuk kontrol kualitas material anoda seng dalam proses pembuatan anoda galvanis, sehingga pengujian ini juga disebut dengan pengujian kontrol kualitas material anoda tumbal. Spesifikasi spesimen, peralatan, dan

prosedur pengujian ini berdasarkan *Recommended Practice* DNV-RP-B401 Oktober 2010, *Annex B*. Langkah-langkah untuk pengujian korosi secara elektrokimia jangka pendek adalah sebagai berikut:

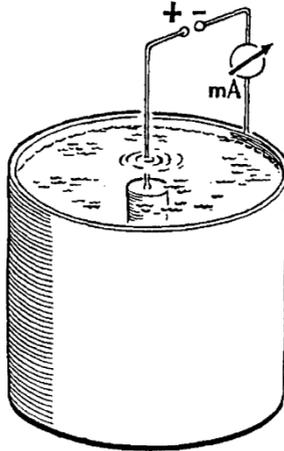
1. Material paduan seng dibubut menjadi spesimen uji berbentuk silinder dengan diameter $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ dan panjang $50 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ seperti pada gambar 3.14.



Gambar 3.14 Dimensi Spesimen Uji Korosi Secara Elektrokimia Jangka Pendek

2. Spesimen uji berbentuk silinder dihubungkan dengan pipa aluminium pada salah satu ujungnya.
3. Spesimen uji terlebih dahulu dihaluskan menggunakan kertas amplas *grid* 1200, dicuci menggunakan air keran, kemudian dicuci menggunakan etanol, dikeringkan dan ditimbang pada timbangan dengan akurasi $\pm 0,1 \text{ mg}$.
4. Setelah batang penyangga dipasang, sambungan spesimen uji dan pipa aluminium yang terendam air laut ditutup dengan *silicon rubber*.

5. Wadah baja berbentuk silinder berdiameter 200 mm dan panjang 350 mm disiapkan, kemudian diisi dengan air laut hingga batas yang telah ditandai pada wadah baja.
6. Spesimen uji yang sudah diletakkan pada batang penyangga dan dilapisi *silicon rubber* diletakkan di dalam wadah baja berisi air laut seperti pada gambar 3.15.



Gambar 3.15 Susunan Spesimen Uji Pada Wadah Baja Berisi Air Laut [12]

7. Spesimen uji dan katoda dihubungkan dengan *DC power source* menggunakan kabel penjepit. Spesimen uji dengan kabel penjepit positif dan katoda dengan kabel penjepit negatif seperti pada gambar 3.16.



Gambar 3.16 Rangkaian Pengujian Korosi Secara Elektrokimia Jangka Pendek

8. Rangkaian spesimen uji dengan *DC power source* dihubungkan dengan multimeter untuk diketahui besaran arus listrik yang dialirkan pada spesimen uji sesuai dengan luas permukaan yang tercelup dalam air laut.
9. Kerapatan arus dikontrol setiap 24 jam \pm 1 jam dengan akurasi 0,1 mA/cm², total waktu pengujian untuk setiap spesimen uji 96 jam \pm 4 jam. Skema besar kerapatan arus setiap harinya adalah:

Hari 1:	1,5 mA/cm ²
Hari 2:	0,4 mA/cm ²
Hari 3:	4,0 mA/cm ²
Hari 4:	1,5 mA/cm ²
10. Pada setiap akhir periode pengujian, potensial anoda diukur pada tiga posisi setiap spesimen. Elektroda referensi standar (*Ag/AgCl/seawater*) digunakan untuk menentukan nilai potensial.
11. Pada akhir periode pengujian secara keseluruhan, batang penyangga dilepaskan dan lapisan *silicon rubber* dibersihkan.

12. Produk korosi yang menempel pada spesimen uji dibersihkan dengan direndam selama 2 jam di dalam larutan amonium klorida jenuh pada temperatur ruangan. Kemudian dicuci menggunakan air kran, lalu dicuci menggunakan ethanol. Serta ditimbang kembali menggunakan timbangan dengan akurasi $\pm 0,1$ mg, seperti gambar 3.17.



Gambar 3.17 Spesimen hasil pengujian yang sudah dibersihkan lalu ditimbang

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian mengenai pengaruh komposisi unsur besi terhadap laju korosi dan efisiensi elektrokimia anoda korban seng untuk aplikasi lingkungan air laut ini hasil yang diperoleh adalah data berupa angka (nilai), grafik, dan gambar. Pengujian yang telah dilakukan mencakup uji komposisi kimia *Optical Emission Spectroscopy Test* (OES) dan *Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry* (ICP-OES), pengujian korosi menggunakan potensiostat, pengujian korosi jangka pendek sesuai DNV-RP-B401 *Annex B*, dan pengamatan struktur mikro hasil pengecoran.

4.1 Pengujian Komposisi Kimia

Anoda korban seng 1 diberikan campuran anoda korban seng 2 dengan variasi komposisi seperti pada tabel 4.1. Dilakukan pengujian komposisi kimia *Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry* (ICP-OES) pada material hasil pengecoran seperti pada gambar 4.1 untuk mengetahui peningkatan unsur besi (Fe) yang terdapat pada material seng hasil pengecoran. Hasil pengujian komposisi kimia *Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry* (ICP-OES) seperti pada tabel 4.1 dan lampiran 2.



Gambar 4.1 Anoda Korban Seng Hasil Pengecoran *Die Casting*

Tabel 4.1 Hasil Uji ICP-OES Material Anoda Korban Seng Hasil Pengecoran

No.	Sampel	Anoda Korban Seng 1 (%)	Anoda Korban Seng 2 (%)	Kandungan Unsur Fe (ppm)
1.	Zn A	97,90	2,10	0,14
2.	Zn B	97,05	2,95	34,65
3.	Zn C	95,97	4,03	58,58
4.	Zn D	94,81	5,19	86,17

Sesuai dengan DNV-RP-B401 batas kandungan unsur Fe yang direkomendasikan adalah ≤ 50 ppm ($\leq 0,005\%$). Hasil dari pengujian komposisi kimia *Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry* (ICP-OES) yang memenuhi ketentuan batas kandungan unsur Fe yang telah direkomendasikan yaitu anoda korban Zn A dan Zn B dengan kandungan unsur Fe 0,14 ppm dan 34,65 ppm secara berurutan. Pengujian komposisi kimia *Optical Emission Spectroscopy Test* (OES) dilakukan untuk mengetahui komposisi unsur Aluminium (Al) dan Kadmium (Cd)

pada anoda korban Zn A, Zn B, Zn C, dan Zn D didapatkan hasil seperti pada tabel 4.2.

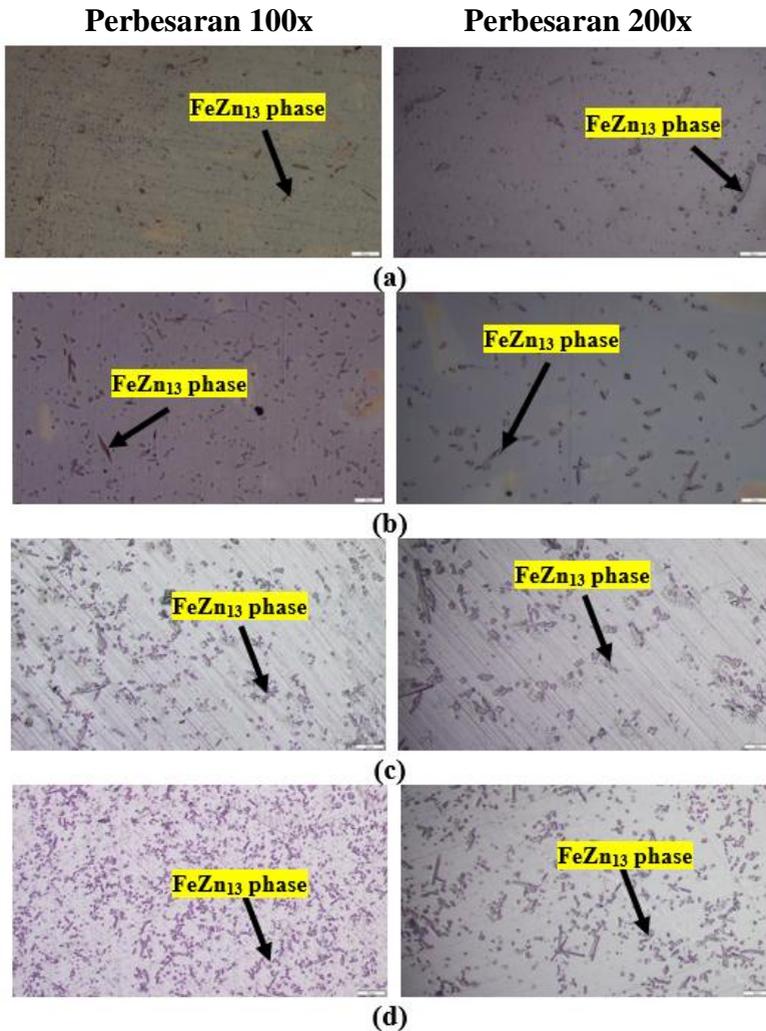
Tabel 4.2 Hasil Uji OES Material Anoda Korban Seng Hasil Pengecoran

No.	Sampel	Unsur Al (%)	Unsur Cd (%)
1.	Zn A	0,0305	<0,0001
2.	Zn B	0,0265	<0,0001
3.	Zn C	0,0200	<0,0001
4.	Zn D	0,0327	<0,0001
DNV-RP-B401		0,10-0,50	≤ 0,07

Anoda korban berbasis seng yang berasal dari material seng murni hanya bisa digunakan jika kadar kotoran besi kurang dari 0,0014 % (14 ppm) namun, dengan penambahan aluminium tingkat pengotor besi yang dapat diterima ini dapat sedikit meningkat, dan penambahan kadmium lebih lanjut membuat pembentukan produk korosi yang lembut pada anoda korban seng [13].

4.2 Pengamatan Struktur Mikro

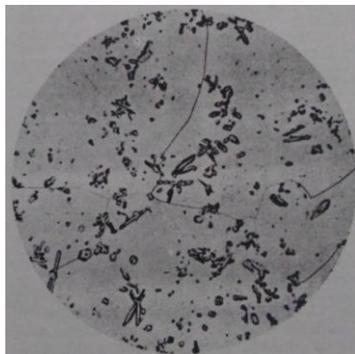
Spesimen untuk pengamatan struktur mikro yang didapatkan dari hasil pengecoran metode *die casting* menggunakan cetakan pelat baja dengan temperatur penuangan yang sama pada temperatur ± 630 °C. Material hasil pengecoran *die casting* seperti pada gambar 4.1 dipotong pada ujungnya untuk diamati struktur mikro yang terbentuk dari hasil pengecoran. Gambar yang diambil yaitu pada perbesaran 100x dan 200x untuk setiap jenis variasi material.



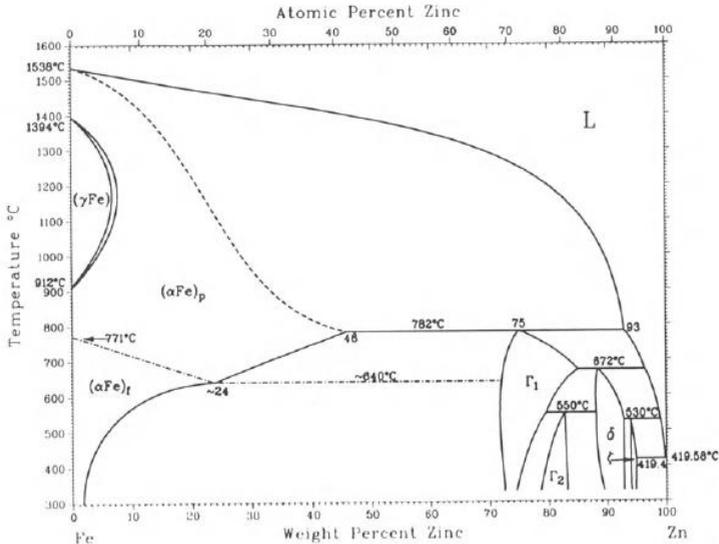
Gambar 4.2 Struktur Mikro Spesimen Anoda Korban
 (a) Zn A [0,14 ppm], (b) Zn B [34,65 ppm], (c) Zn C [58,58 ppm], (d) Zn D [86,17 ppm]

Gambar 4.2 menunjukkan hasil pengamatan struktur mikro pada spesimen anoda korban Zn A, Zn B, Zn C, dan Zn D dengan perbesaran 100x. Setiap spesimen dipotong pada salah satu ujungnya secara melintang. Setelah itu material digrinding menggunakan kertas amplas dengan *grit* 80 sampai 2000, lalu dipoles. Spesimen yang sudah dipoles kemudian dietsa menggunakan larutan pengetsa campuran 100 mL alkohol 96% dan 5 mL HNO₃. Permukaan spesimen yang sudah dipoles dicelupkan ke dalam larutan pengetsa selama 60 detik setelah itu spesimen dibilas menggunakan alkohol 96% dan air keran, lalu dikeringkan.

Dari hasil pengamatan struktur mikro 4 spesimen seperti pada gambar 4.2. Terlihat terdapat partikel-partikel yang tersebar secara acak, partikel-partikel tersebut merupakan FeZn₁₃ *phase* seperti ditunjukkan pada gambar 4.3 yang merupakan seng hasil pengecoran dengan kandungan 0,2% Fe yang terdapat pada *ASM Metals Handbook 8th Edition Vol. 7 Atlas of Microstructures of Industrial Alloys* [26]. Seperti ditunjukkan pada gambar 4.4 adalah diagram fase Zn-Fe, besi memiliki *solid solubility* pada seng yang sangat kecil. Ketika kandungan dari besi di dalam seng lebih dari 0,001%, kemunculannya sudah dapat terdeteksi secara mikrofografi oleh kemunculan dari fase *intermetallic*, misalnya FeZn₁₃ [27].



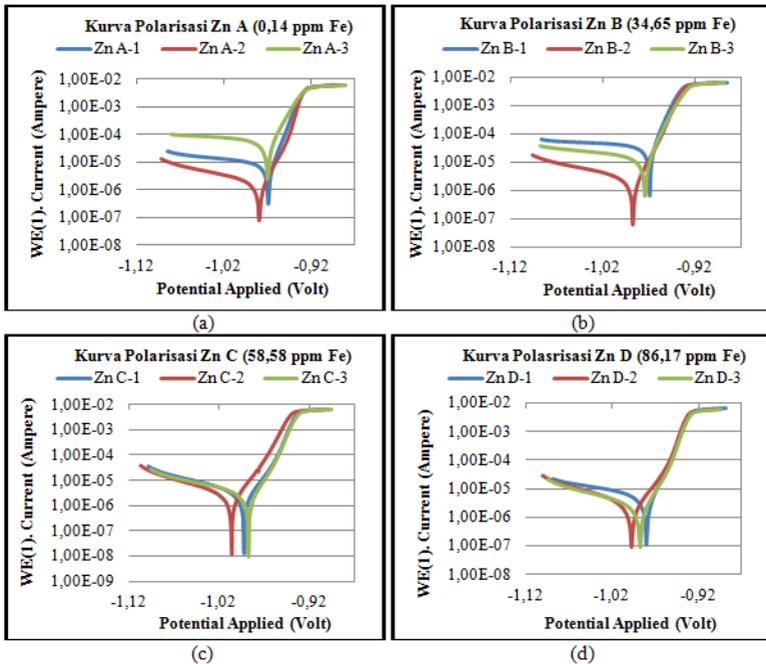
Gambar 4.3 Struktur Mikro Seng Hasil Pengecoran dengan 0,2% Fe [26] Partikel adalah FeZn₁₃ *phase*



Gambar 4.4 Diagram Fase Seng-Besi [27]

4.3 Pengujian Laju Korosi Secara Elektrokimia

Pengujian korosi menggunakan potensiostat tiga elektroda dilakukan pada 4 spesimen anoda korban Zn A, Zn B, Zn C, dan Zn D. Larutan elektrolit yang digunakan pada pengujian ini adalah air laut buatan sesuai ASTM D1141 [30]. Pada pengujian polarisasi linier menggunakan potensiostat ini didapatkan kurva polarisasi anodik dan katodik. Untuk mendapatkan data i_{corr} dalam satuan $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, *Open Circuit Potential (OCP)* dan *E_{corr}* dalam satuan Volt, serta *corrosion rate* (laju korosi) dalam satuan $\mu\text{m}/\text{tahun}$ dilakukan ekstrapolasi tafel terlebih dahulu. Hasil pengujian polarisasi linier yang telah dilakukan dapat dilihat pada gambar 4.5.



Gambar 4.5 Kurva Polarisasi Hasil Pengujian Korosi Menggunakan Potensiostat, (a) Zn A [0,14 ppm Fe], (b) Zn B [34,65 ppm Fe], (c) Zn C [58,58 ppm Fe], (d) Zn D [86,17 ppm Fe]

Pengujian korosi menggunakan potensiostat dilakukan pada setiap spesimen anoda korban yang dipotong menjadi tiga bagian (potongan 1, 2, dan 3). Dari kurva polarisasi hasil pengujian korosi yang telah dilakukan, didapatkan hasil kurva polarisasi potongan 2 dari setiap variasi kandungan unsur Fe yang berbeda memiliki E_{corr} yang lebih negatif dibandingkan dengan potongan 1 dan 3 dari setiap variasi kandungan unsur Fe. Potongan 2 dari spesimen anoda korban seng Zn A, Zn B, Zn C, dan Zn D semuanya diambil dari potongan tengah dari masing-masing spesimen anoda korban seng. Sedangkan potongan 1 dan 3 masing-masing didapatkan dari potongan material pada bagian

sisi kanan dan kiri dari setiap spesimen anoda korban seng. Untuk kurva polarisasi yang dihasilkan oleh potongan 1 dan 3 dari semua spesimen anoda korban seng memiliki bentuk kurva yang hampir sama.

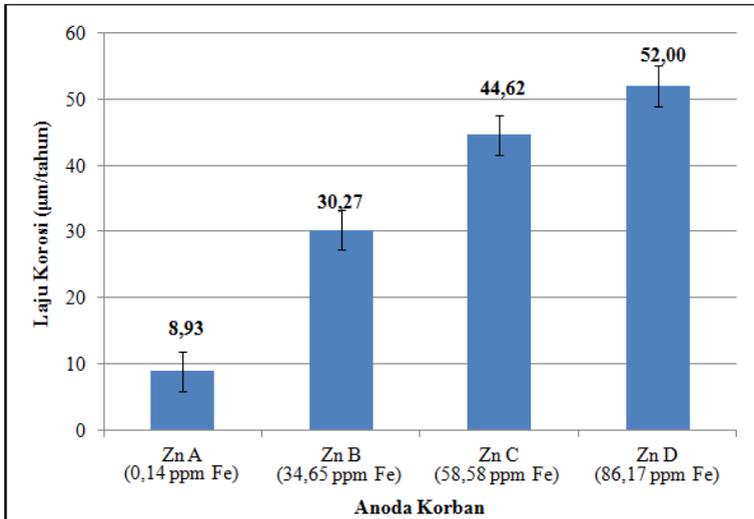
4.3.1 Pembahasan Pengujian Laju Korosi Secara Elektrokimia

Pada pengujian korosi menggunakan potensiostat tiga elektroda yang telah dilakukan ekstrapolasi tafel didapatkan data hasil pengujian seperti pada tabel 4.3 dan gambar 4.6.

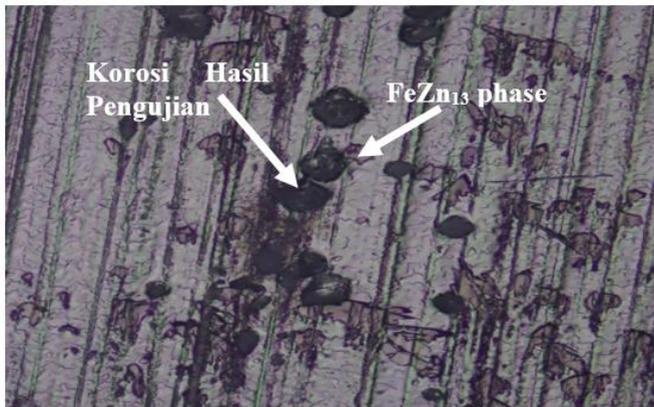
Tabel 4.3 Data Rerata Laju Korosi Anoda Korban Seng Hasil Pengujian Potensiostat

Spesimen	Kandungan Unsur Besi (ppm)	Rata-Rata Laju Korosi ($\mu\text{m}/\text{tahun}$)
Zn A	0,14	8,93
Zn B	34,65	30,27
Zn C	58,58	44,62
Zn D	86,17	52,00

Dari hasil pengujian korosi menggunakan potensiostat yang telah dilakukan didapatkan bahwa seiring dengan meningkatnya kandungan unsur Fe yang terdapat pada spesimen anoda korban seng mempengaruhi peningkatan laju korosinya. Didapatkan laju korosi terendah sebesar 8,93 $\mu\text{m}/\text{tahun}$ untuk spesimen Zn A. Sedangkan laju korosi tertinggi sebesar 52,00 $\mu\text{m}/\text{tahun}$ untuk spesimen Zn D. Hal tersebut sesuai dengan penelitian yang pernah dilakukan oleh Tytell dan Preiser [28] dengan menggunakan anoda korban seng yang memiliki kemurnian kandungan unsur seng yang tinggi dan kandungan unsur besi yang rendah dapat memproteksi lambung kapal dalam jangka waktu penggunaan yang lebih lama.



Gambar 4.6 Laju Korosi Anoda Korban Seng Hasil Pengujian Menggunakan Potensiostat



Gambar 4.7 Struktur Mikro Spesimen Anoda Korban Zn D

Pada gambar 4.7 ditunjukkan hasil pengamatan struktur mikro spesimen anoda korban Zn D setelah dilakukan pengujian korosi secara elektrokimia menggunakan potensiostat. Sesuai

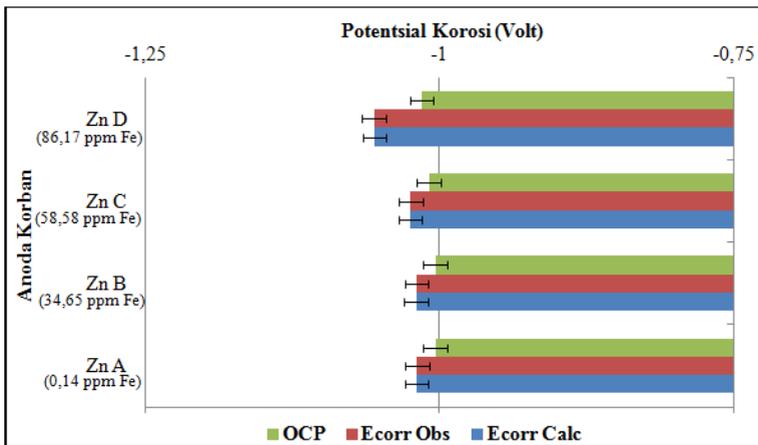
pada gambar tersebut bahwa korosi yang terjadi pada permukaan spesimen anoda korban seng setelah dilakukan pengujian korosi terjadi pada bagian yang terdapat kumpulan partikel FeZn_{13} phase. Pada hasil pengamatan struktur mikro yang telah dilakukan jumlah partikel FeZn_{13} phase yang terdapat pada material anoda korban seng meningkat dalam jumlah yang tidak linier dengan bertambahnya kandungan unsur Fe. Partikel FeZn_{13} phase yang terdapat pada tiap spesimen anoda korban seng tersebar secara tidak merata pada permukaan spesimen sehingga mempengaruhi persebaran korosi yang tidak merata. Maka apabila korosi yang terjadi selama pengujian terkonsentrasi pada kumpulan partikel FeZn_{13} phase, seiring dengan meningkatnya keberadaan partikel FeZn_{13} phase pada spesimen anoda korban seng akan semakin banyak daerah permukaan spesimen yang terkorosi. Sehingga laju korosi semakin meningkat seiring dengan keberadaan partikel FeZn_{13} phase yang tersebar pada permukaan spesimen anoda korban seng.

Tabel 4.4 Data Rerata Potensial Korosi Anoda Korban Seng Hasil Pengujian Potensiostat

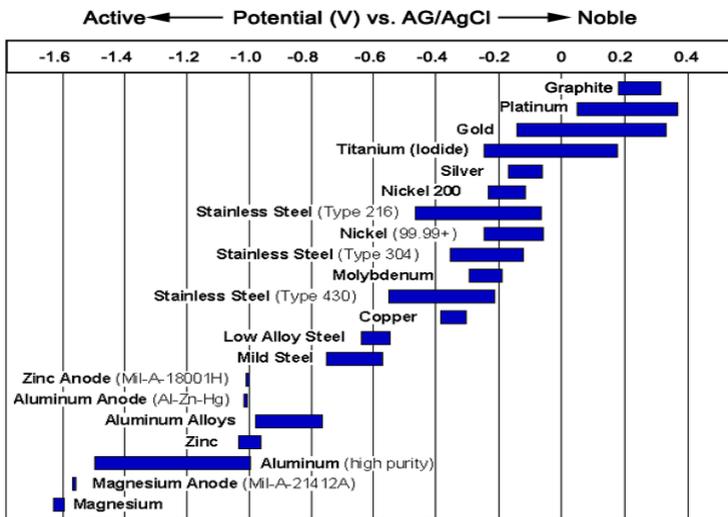
Anoda Korban	Kandungan Unsur Besi (ppm)	Rata-Rata OCP (V)	<i>E_{corr}</i> Calculations (V)	<i>E_{corr}</i> Observarion (V)
Zn A	0,14	-1,0036667	-1,01923	-1,01909
Zn B	34,65	-1,0036667	-1,01974	-1,01967
Zn C	58,58	-1,0089444	-1,02462	-1,02452
Zn D	86,17	-1,0153333	-1,05543	-1,05556

Open Circuit Potential (OCP) merupakan perbedaan potensial listrik yang terjadi di antara dua peralatan terminal

listrik ketika terlepas dari sirkuit yang tidak melibatkan beban eksternal. OCP merupakan potensial pada elektroda kerja (*working electrode*) dibandingkan dengan elektroda referensi (*reference electrode*) ketika tidak ada arus atau potensial yang ada dalam sel. OCP juga diartikan sebagai potensial ekuilibrium atau potensial korosi. Pada proses pengujian korosi secara elektrokimia menggunakan potensiostat tiga elektroda, OCP dari spesimen anoda korban seng yang menjadi elektroda kerja diukur nilainya saat arus listrik belum dialirkan pada pengujian korosi secara elektrokimia. Elektroda kerja dan elektroda referensi saja yang bekerja untuk mengukur OCP dari spesimen anoda korban seng.



Gambar 4.8 Potensial Korosi Anoda Korban Seng Hasil Pengujian Menggunakan Potensiostat

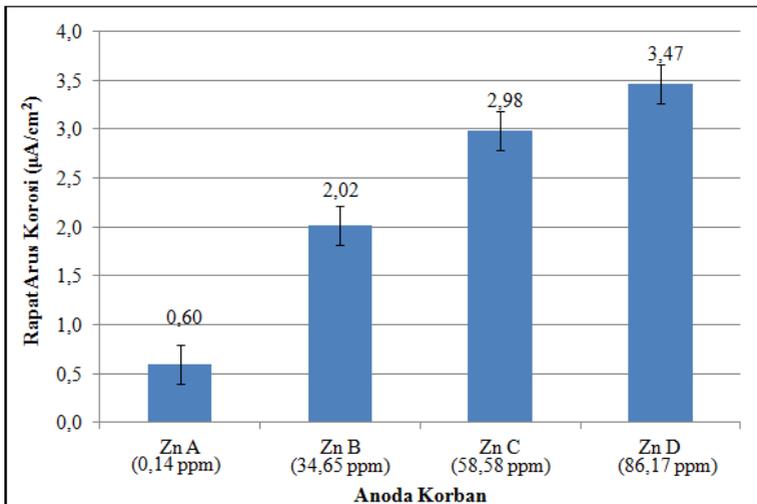


Gambar 4.9 Seri Galvanik Logam dan Paduan Dalam Air Laut [2]

Nilai OCP yang dihasilkan pada pengujian korosi secara elektrokimia seperti pada tabel 4.4 memiliki nilai mendekati *E corrosion calculation* dan *E corrosion observation* yang dihasilkan dari pengujian seperti ditunjukkan pada gambar 4.8. Potensial korosi yang dihasilkan dari pengujian korosi secara elektrokimia menggunakan potensiostat menghasilkan potensial korosi pada kisaran nilai yang masih sesuai dengan seri galvanik logam dan paduan dalam air laut yang terdapat pada buku Jones: *Principals and Prevention of Corrosion* seperti pada gambar 4.9 [2]. Pada spesimen anoda korban seng Zn D nilai *E corrosion calculation* dan *E corrosion observation* yang dihasilkan dari proses pengujian korosi menggunakan potensiostat memiliki nilai yang sedikit lebih negatif dibandingkan dengan tiga spesimen anoda korban seng yang lain.

Tabel 4.5 Data Rerata Rapat Arus Korosi Anoda Korban Seng Hasil Pengujian Menggunakan Potensiostat

Anoda Korban	Kandungan Unsur Besi (ppm)	Rata-Rata Rapat Arus Korosi ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
Zn A	0,14	0,60
Zn B	34,65	2,02
Zn C	58,58	2,98
Zn D	86,17	3,47



Gambar 4.10 Rapat Arus Korosi Anoda Korban Seng Hasil Pengujian Menggunakan Potensiostat

Rapat arus korosi (*corrosion current density*) yang dihasilkan dari pengujian korosi secara elektrokimia menggunakan potensiostat didapatkan hasil dengan semakin meningkatnya kandungan unsur Fe pada spesimen anoda korban seng maka i_{cor} yang dihasilkan semakin tinggi seperti pada gambar 4.10. Dibuktikan dengan nilai i_{cor} tertinggi yaitu pada spesimen anoda korban seng Zn D sebesar $3,47 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, serta

nilai i_{cor} terendah pada spesimen anoda korban seng Zn A yaitu sebesar $0,60 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Semakin tingginya nilai i_{cor} yang dihasilkan oleh pengujian korosi secara elektrokimia menggunakan potensiostat akan mempengaruhi peningkatan laju korosi dari spesimen anoda korban seng. Hal tersebut terbukti pada nilai laju korosi tertinggi adalah $52,00 \mu\text{m}/\text{tahun}$ yang dihasilkan oleh spesimen anoda korban seng Zn D yang menghasilkan nilai i_{cor} yang tertinggi pula. Sesuai dengan persamaan 2.6 bahwa semakin besar nilai rapat arus korosi maka nilai laju korosi akan semakin tinggi.

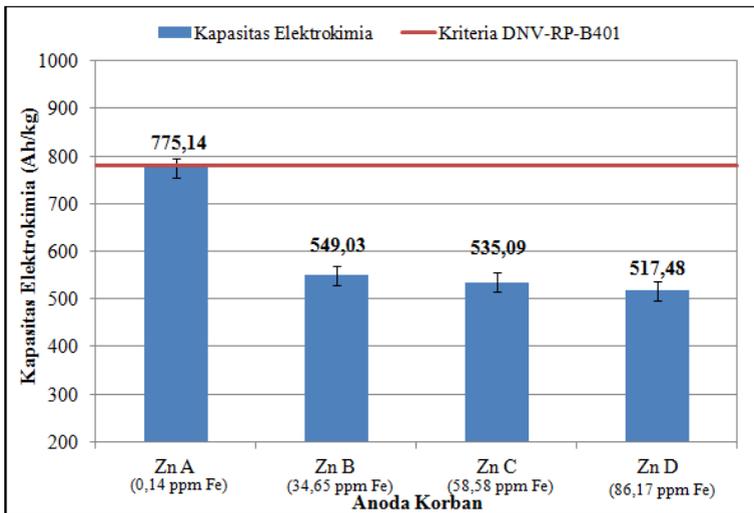
4.4 Pengujian Korosi DNV-RP-B401

Pengujian korosi menggunakan metode sesuai dengan *Recommended Practice* DNV-RP-B401 Annex B bertujuan untuk mengetahui masing-masing efisiensi elektrokimia dari material anoda korban seng Zn A, Zn B, Zn C, dan Zn D. Pada *Recommended Practice* DNV-RP-B401 pengujian ini disebut sebagai pengujian laboratorium material anoda korban (*galvanic anode*) untuk kontrol kualitas. Hasil pengujian ini diharapkan dapat memenuhi kriteria penerimaan yang terdapat pada *Recommended Practice* DNV-RP-B401 yaitu untuk anoda korban berbasis seng memiliki kapasitas elektrokimia (efisiensi elektrokimia) minimal $780 \text{ Ah}/\text{kg}$ serta *closed circuit potential* (CCP) $\leq -1,00 \text{ V}$ pada akhir periode pengujian hari ke empat. Kriteria penerimaan yang ditentukan *Det Norske Veritas* (DNV) pada *Recommended Practice* DNV-RP-B401 tersebut didapatkan berdasarkan pengalaman yang dimiliki oleh DNV dalam mendesain dan mengoperasikan proteksi katodik selama perjalanan waktu [12].

Tabel 4.6 Hasil Pengujian Kapasitas Elektrokimia Anoda Korban Seng Menggunakan Metode DNV

Anoda Korban	Kandungan Unsur Besi (ppm)	Berat Awal (gram)	Berat Akhir (gram)	Kapasitas Elektrokimia (Ah/kg)
Zn A	0,14	28,3083	24,8715	775,14
Zn B	34,65	28,1910	23,3388	549,03
Zn C	58,58	28,9244	23,9458	535,09
Zn D	86,17	27,6310	22,4830	517,48

Pengujian dilakukan selama ± 96 jam menggunakan *power supply DC* yang dapat diatur perubahan arus listrik keluarannya dengan perubahan densitas arus listrik (*current density*) yang diubah setiap ± 24 jam sesuai dengan ketentuan yang tertulis pada *Recommended Practice DNV-RP-B401 Annex B* untuk mensimulasikan densitas arus listrik pada penggunaan di kapal laut yang berfluktuatif. Pada akhir periode pengujian diukur *closed circuit potential* (CCP) dari masing-masing spesimen anoda korban seng menggunakan elektroda referensi (Ag/AgCl) dan voltmeter. Setelah selesai pengujian, spesimen anoda korban seng dibersihkan dari produk korosi yang menempel pada permukaannya menggunakan larutan amonium klorida jenuh pada temperatur ruangan ± 25 °C selama 2 jam, kemudian ditimbang untuk mengetahui pengurangan beratnya (*weight loss*). Selanjutnya total arus listrik yang dialirkan selama pengujian dalam ampere (A) dikalikan dengan lama waktu pengujian dalam jam, dibagi dengan pengurangan berat spesimen anoda korban seng dalam kilogram (kg). Hasil pengujian yang telah dilakukan dapat dilihat pada tabel 4.6 dan gambar 4.11.



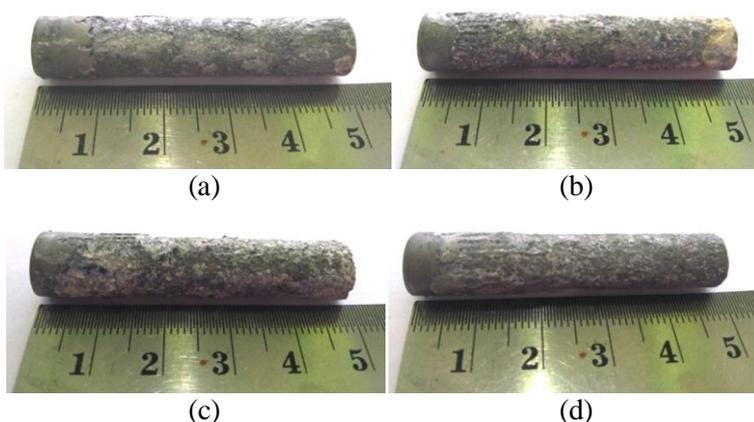
Gambar 4.11 Kapasitas Elektrokimia Anoda Korban Seng Hasil Pengujian DNV-RP-B401

Hasil pengujian korosi menggunakan metode dari *Recommended Practice* DNV-RP-B401 Annex B menghasilkan spesimen anoda korban seng Zn A memiliki kapasitas elektrokimia tertinggi dengan nilai 775,14 Ah/kg. Spesimen anoda korban seng Zn A merupakan material anoda korban seng yang memiliki kandungan unsur Fe terendah jika dibandingkan dengan yang lain, kandungan Fe yang terdapat pada spesimen anoda korban seng ini juga masih sesuai dengan ketentuan yaitu kurang dari 14 ppm serta masih di bawah dari batas maksimal kandungan unsur Fe yang ditentukan oleh *Recommended Practice* DNV-RP-B401 yaitu sebesar 50 ppm [13]. Namun kapasitas elektrokimia yang dihasilkan masih lebih rendah jika dibandingkan dengan kriteria penerimaan yang disarankan oleh *Recommended Practice* DNV-RP-B401, hal tersebut dapat terjadi karena walaupun kandungan unsur Fe yang dimiliki tergolong rendah namun berdasarkan pengujian OES yang telah dilakukan material anoda korban seng Zn A memiliki kandungan unsur Al

yang tergolong rendah dibandingkan dengan rekomendasi kandungan unsur Al untuk material anoda korban berbasis seng yang terdapat pada *Recommended Practice* DNV-RP-B401. Hal lain yang terjadi adalah permukaan spesimen Zn A setelah pengujian dilakukan, terkorosi secara tidak merata dan cukup kasar. Hal tersebut disebabkan oleh kandungan unsur Cd yang terlalu rendah, dengan penambahan unsur paduan Cd lebih lanjut menyebabkan pembentukan produk korosi yang lembut pada anoda korban berbasis seng [13]. Selain itu, dilihat dari spesimen pengamatan struktur mikro didapatkan persebaran partikel FeZn_{13} yang tidak merata yang disebabkan pengadukan saat proses pengecoran yang kurang merata dapat menyebabkan permukaan spesimen anoda korban seng tersebut terkorosi secara tidak merata. Hasil pengujian korosi dari spesimen anoda korban seng Zn A ditunjukkan pada gambar 4.12 (a).

Pada spesimen anoda korban seng Zn B, kapasitas elektrokimia yang dihasilkan dari pengujian korosi menggunakan metode dari *Recommended Practice* DNV-RP-B401 sebesar 549,03 Ah/kg. Nilai tersebut tidak memenuhi kriteria penerimaan yang ditentukan oleh *Recommended Practice* DNV-RP-B401. Sedangkan apabila mengacu pada batas kandungan unsur Fe maksimal yang ditentukan pada *Recommended Practice* DNV-RP-B401, spesimen anoda korban seng Zn B dengan kandungan unsur Fe 34,65 ppm ini masih memenuhi, karena batas maksimal kandungan unsur Fe pada material anoda korban seng adalah 50 ppm [12]. Namun apabila mengacu pada penelitian yang pernah dilakukan oleh Carson [28] kandungan unsur Fe pada spesimen anoda korban seng tersebut melebihi batas yang disarankan yaitu batas maksimalnya sebesar 14 ppm. Pada penelitian yang pernah dilakukan oleh Carson [28] dengan penambahan 0,11% aluminium pada material anoda korban seng dengan kandungan unsur Fe 0,033% (330 ppm) menghasilkan arus keluaran sama dengan anoda korban seng tanpa paduan dengan kandungan unsur Fe 0,0014% (14 ppm). Serta dengan penambahan campuran unsur aluminium 0,1% dan 0,05% kadmium pada material anoda

korban seng menghasilkan anoda korban dengan arus keluaran yang lebih tinggi secara konsisten dan pola korosi yang lebih lembut dibandingkan dengan material anoda korban seng dengan kandungan unsur Fe 0,0002% (2 ppm) [28]. Rendahnya kapasitas elektrokimia spesimen anoda korban seng Zn B ini sesuai dengan penelitian yang pernah dilakukan oleh Carson [28]. Apabila pada anoda korban seng yang memiliki kandungan unsur Fe lebih dari 14 ppm serta memiliki kandungan Al dan Cd yang rendah maka permukaan spesimen anoda korban seng akan terkorosi secara tidak merata dan menghasilkan permukaan hasil korosi yang kasar. Hasil pengujian anoda korban seng Zn B ditunjukkan oleh gambar 4.12 (b).



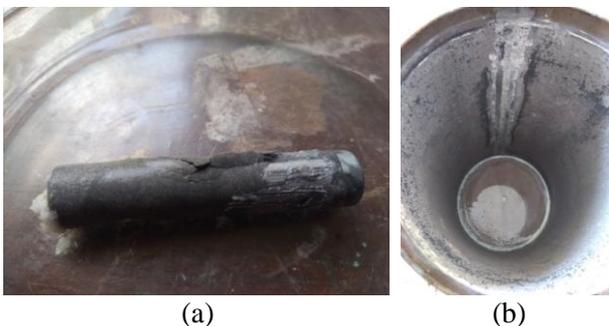
Gambar 4.12 Hasil Korosi Spesimen Anoda Korban Setelah Pengujian DNV Selama 4 Hari, (a) Zn A [0,14 ppm], (b) Zn B [34.65 ppm], (c) Zn C [58,58 ppm], (d) Zn D [86,17 ppm].

Spesimen anoda korban seng Zn C dan Zn D merupakan material anoda korban seng dengan kandungan unsur Fe melebihi batas yang terkandung pada material anoda korban berbasis seng yang ditentukan oleh *Recommended Practice* DNV-RP-B401 yaitu sebesar 50 ppm (0,005%). Sehingga pengaruh yang

ditimbulkan oleh kandungan unsur Fe pada kedua material anoda korban seng yang melebihi batas rekomendasi *Recommended Practice* DNV-RP-B401 tersebut adalah kapasitas elektrokimia yang dihasilkan dari proses pengujian yang telah dilakukan cukup jauh dari kriteria penerimaannya. Spesimen anoda korban seng Zn C menghasilkan kapasitas elektrokimia hanya sebesar 535,09 Ah/kg. Sedangkan spesimen anoda korban seng Zn D hanya menghasilkan kapasitas elektrokimia sebesar 517,48 Ah/kg dan menjadi spesimen anoda korban seng yang memiliki kapasitas elektrokimia terendah dibandingkan dengan tiga spesimen yang lain. Kedua hasil tersebut menunjukkan kecenderungan kenaikan unsur Fe yang terkandung pada material anoda korban seng menyebabkan penurunan pada kapasitas elektrokimia yang mampu dihasilkan oleh material anoda korban seng. Salah satu hal yang membedakan penampilan korosi yang terjadi pada spesimen anoda korban seng Zn C dan Zn D adalah permukaan spesimen hasil pengujian pada spesimen Zn D lebih terkorosi secara tidak merata. Pada spesimen anoda korban seng Zn D bagian yang paling banyak terkonsumsi selama pengujian hanya di bagian tengah hingga ke ujung bawah saja. Pada bagian atasnya hanya terkorosi di daerah-daerah tertentu saja tidak secara merata terkonsumsi pada sekelilingnya, seperti ditunjukkan oleh gambar 4.12 (d). Kandungan unsur Fe apabila melebihi batas kandungan unsur yang terdapat pada *Recommended Practice* DNV-RP-B401 walaupun hanya sedikit cukup mempengaruhi performa elektrokimia dari material anoda korban seng. Hal tersebut ditunjukkan oleh spesimen anoda korban seng Zn C. Walaupun unsur Fe yang terkandung pada spesimen hanya terpaut 8,58 ppm (0,000858 %) dibandingkan dengan batas kandungan yang ditentukan *Recommended Practice* DNV-RP-B401, namun kapasitas elektrokimia yang dihasilkan dari proses pengujian cukup jauh di bawah kriteria penerimaan *Recommended Practice* DNV-RP-B401. Serta permukaan spesimen anoda korban seng Zn C yang terkorosi menghasilkan

permukaan yang kasar dan terkonsumsi secara tidak merata seperti tiga spesimen yang lain ditunjukkan pada gambar 4.12 (c).

Salah satu kemampuan penting dari sebuah material anoda korban adalah dapat terlarut dengan kapasitas mendekati nilai teoritisnya. Yaitu, semua elektron yang dilepaskan oleh material anoda korban yang larut harus dapat tertransfer kepada struktur yang dilindungi oleh anoda korban untuk mendukung reaksi katodik yang terjadi pada material yang dilindungi, serta tidak boleh terkonsumsi atau habis pada reaksi katodik lokal pada permukaan anoda sendiri [29]. Hal yang menyebabkan material anoda korban seng dengan kandungan unsur Fe ≥ 14 ppm tidak berhasil secara penuh mengaktifkan seng disebabkan karena kelebihan unsur Fe pada material anoda korban seng. Unsur Fe lebih katodik dibandingkan dengan Zn sehingga elektron yang dikeluarkan habis untuk reaksi katodik pada anoda korban sendiri [29]. Hal tersebut ditunjukkan oleh produk korosi yang membentuk lapisan yang cukup tebal pada permukaan spesimen anoda korban seng saat sebelum dibersihkan menggunakan larutan amonium klorida seperti pada gambar 4.13 (a). Seharusnya lapisan yang menumpuk pada permukaan spesimen anoda korban seng tersebut melekat di sekeliling permukaan tong baja secara merata seperti gambar 4.13 (b).

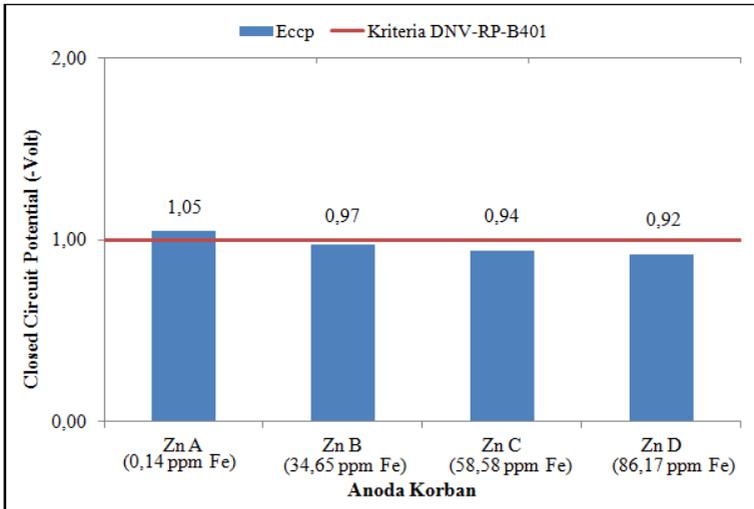


Gambar 4.13 (a) Lapisan yang Terbentuk Pada Permukaan Spesimen Anoda Korban Seng, (b) Lapisan yang Melekat Pada Sekeliling Permukaan Bagian Dalam Tong Pengujian

Closed Circuit Potential (CCP) atau potensial sirkuit tertutup merupakan perbedaan yang ada pada potensial listrik, yang biasanya terjadi antara dua terminal perangkat yang terpasang pada sirkuit yang tidak melibatkan beban eksternal. Potensial sirkuit tertutup adalah kebalikan dari potensial rangkaian terbuka. Pada proteksi katodik, material seng menjadi anoda korban dalam potensial sirkuit tertutup sehingga serangan korosi hanya terjadi pada anoda dalam sel galvanik sirkuit tertutup. CCP perlu dikontrol secara berkala pada pengaplikasian penggunaan proteksi katodik di lapangan untuk mengetahui kondisi dari anoda korban masih dalam kualifikasi yang baik atau tidak. CCP dari empat spesimen anoda korban seng Zn A, Zn B, Zn C, dan Zn D sesuai dengan data hasil pengujian seperti pada tabel 4.7.

Tabel 4.7 Hasil Pengujian CCP Menggunakan Metode DNV

Anoda Korban	Kandungan Unsur Besi (ppm)	Eccp (VAg/AgCl)
Zn A	0,14	-1,05
Zn B	34,65	-0,97
Zn C	58,58	-0,94
Zn D	86,17	-0,92



Gambar 4.14 CCP Anoda Korban Seng Hasil Pengujian DNV

Didapatkan spesimen anoda korban seng Zn A masih memenuhi kriteria penerimaan yang ditentukan oleh *Recommended Practice* DNV-RP-B401 yaitu $\leq -1,00$ V pada akhir periode pengujian hari ke 4 ditandai dengan berada di bawah garis merah pada gambar 4.14. CCP yang dihasilkan oleh spesimen anoda korban seng Zn A merupakan yang paling memenuhi yaitu -1,05 V. Sedangkan tiga spesimen anoda korban seng yang lain masih di luar kriteria penerimaan yang ditentukan *Recommended Practice* DNV-RP-B401 seperti ditunjukkan pada gambar 4.14.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat disimpulkan beberapa hal pada penelitian ini. Diantaranya adalah sebagai berikut:

1. Kandungan unsur Fe pada material anoda korban seng meningkatkan laju korosi. Semakin tinggi kandungan unsur Fe 0,14 - 86,17 ppm pada material anoda korban seng maka laju korosi yang dihasilkan juga semakin naik.
2. Efisiensi elektrokimia material anoda korban seng semakin rendah dengan semakin naiknya kandungan unsur Fe. Spesimen anoda korban seng Zn A dengan kandungan unsur Fe 0,14 ppm memiliki kapasitas elektrokimia memenuhi kriteria penerimaan yang ditentukan oleh DNV-RP-B401.
3. *Closed Circuit Potential* spesimen anoda korban seng yang memenuhi kriteria penerimaan yang ditentukan oleh DNV-RP-B401 hanya dicapai oleh spesimen anoda korban seng Zn A dengan kandungan unsur Fe 0,14 ppm.
4. Permukaan material anoda korban seng yang terkorosi semakin kasar dan tidak merata dengan kenaikan kandungan unsur Fe dari material anoda korban seng.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan setelah melakukan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pengecoran menggunakan cetakan yang berbentuk silinder berongga untuk mempermudah proses *machining* dan dimensi spesimen yang lebih akurat.
2. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh keberadaan FeZn13 pada pembentukan produk korosi, yang dimungkinkan mempengaruhi performa kerja anoda korban.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Vassilev, K. K., Petrov, M. D., and Krasteva, V. Z. (1974). *The influence of the structure of seng alloys on the protective capacity of seng anodes in seawater*. *Werkst. Korros.*, 25(8), 587-592 (in German).
- [2] D. A. Jones. (1996). *Principles and Prevention of Corrosion*.
- [3] Mulyono, P.R. (2017). *Perancangan Sistem Proteksi Katodik Anoda Tumbal Pada Pipa Baja Api 5l Grade B Dengan Variasi Jumlah Coating Yang Dipasang di Dalam Tanah*. Surabaya, Indonesia: Departemen Teknik Material dan Metalurgi Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [4] Octaviana, N. (2019). *Studi Eksperimental Pengaruh Arus Pengelasan GTAW Dan Konsentrasi NaClO Terhadap Kecenderungan Perilaku Korosi Pada Stainless Steel 304*. Surabaya, Indonesia: Departemen Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [5] Tretthewey, R. Keneth and J. Chamberlain. (1991). *Korosi untuk Mahasiswa dan Rekayasawan*, edisi ke-2. Jakarta : PT. Gramedia.
- [6] Day, R.A, dan A.L. Underwood. (1998). *Kimia Analisa Kuantitatif*. Jakarta : Erlangga.
- [7] Whitten, K., & Davis, R. E. (2013). *General Chemistry. 10th*. Texas: Cengage Learning.
- [8] Chang, Raymond. (2005). *Kimia Dasar: Konsep-Konsep Inti Jilid I*. Jakarta: Erlangga.
- [9] Keenan, Charles W. (1980). *Ilmu Kimia untuk Universitas Edisi keenam Jilid 2*. Jakarta :Erlangga.
- [10] Oxtoby, D.W., Gillis, H.P., Nachtrieb, N.H. (2001). *Prinsip-Prinsip Kimia Modern. Edisi ke-4. Jilid 1*. Diterjemahkan oleh S.S.Achmadi. Jakarta: Erlangga.

- [11] Revie, R. W., & Uhlig, H. H. (2008). *Corrosion and Corrosion Control An Introduction to Corrosion Science and Engineering*. New York: Wiley.
- [12] DNV Recommended Practice RP-B401 (2010). *Cathodic Protection Design*, Det Norske Veritas Industry Norway AS, Hovik.
- [13] V. Kuklik and J. Kudlacek (2016), *Hot-dip galvanizing of steel structures*. Amsterdam: Butterworth-Heinemann.
- [14] Sunarto, Deni Septian. (2015). *Analisa Kebutuhan Anoda Korban Seng Pada Pelat Bottom Kapal di PT. Indonesia Marina Shipyard*. Gresik, Indonesia : Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Gresik.
- [15] Bounoughaz, M., Salhi, E., Benzine, K., Ghali, E., & Dalard, F. (2003). *A comparative study of the electrochemical behaviour of Algerian zinc and zinc from a commercial sacrificial anode*. *Journal of Materials Science*, 38(6), 1139–1145. <https://doi.org/10.1023/A:1022824813564>
- [16] ASTM G31-72 (2004). Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals.
- [17] Benjamin D. Craig. (2006). *Corrosion Prevention and Control : A Program Management Guide for Selecting Materials* by : Advanced Materials, Manufacturing, and Testing Information Analysis Center (AMMTIAC).
- [18] Fontana, Mars G. (1986). *Corrosion Engineering, 3th Edition*, New York : Mc Graw Hill Book Co.
- [19] Peabody, A. (2001). *Control of Pipeline Corrosion, Second Edition*. Texas: NACE Internasional.
- [20] PT. Biro Klasifikasi Indonesia. (2004). *Regulator for the Corrosion and Coating System Edition 2004*. Jakarta: BKI.
- [21] Kaewmaneekul, T., & Lothongkum, G. (2013). *Effect of aluminium on the passivation of zinc-aluminium alloys in artificial seawater at 80°C*. *Corrosion Science*. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2012.09.004>

- [22] Mildland Industries, Inc. (2001). *Zn Alloy Elements*. <URL:<http://www.zincbig.com/default.asp?Body=10&Nav=2>>
- [23] Ansyori, A. (2017). *Perbandingan Kualitas Produk Coran Anoda Seng Menggunakan Cetakan Tembaga dan Cetakan Aluminium Berdasarkan Pengaruh Ukuran Besar Butirnya Terhadap Laju Korosi*. Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Malahayati: Jurnal Rekayasa, Teknologi, dan Sains, 47–58.
- [24] Prosek, T., Hagström, J., Persson, D., Fuertes, N., Lindberg, F., & Thierry, D. (2016). *Effect of the microstructure of Zn-Al and Zn-Al-Mg model alloys on corrosion stability* *Corrosion*, 110, 71–81. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2016.04.022>.
- [25] Porter, F. C. (1994). *Corrosion Resistance of Zinc and Zinc Alloys*. New York: Marcel Dekker, Inc.
- [26] *ASM Metals Handbook 8th Edition Vol. 7 Atlas of Microstructures of Industrial Alloys*
- [27] Zhang, X.G. (1996). *Corrosion and Electrochemistry of Zinc*. Canada: Cominco Ltd.
- [28] Carson, J.A.H. (1960). *Zinc as a Self-Regulating Galvanic Anode For Ship Hulls*. Corrosio-National Association of Corrosion Engineers.
- [29] Pourgharibshahi, M., & Meratian, M. (2014). *Corrosion Morphology of Aluminium Sacrificial Anodes*. *Materials and Corrosion* 2014, 65, No.12.
- [30] ASTM (2013). D1141-98 Standard Practice for the Preparation of Substitute Ocean Water. *Astm* 98, 1–3

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Firman Rama Putra lahir di Banyuwangi, 10 Desember 1994, merupakan anak pertama dari dua bersaudara dari pasangan Heriyanto dan Jumariyah. Penulis mengawali pendidikan formal di TK Muslimat NU 16, Kota Malang dan melanjutkan jenjang pendidikan dasar di SDN Mojolangu 2, Kota Malang pada tahun 2001-2007. Pendidikan menengah penulis diambil di SMPN 6 Kota Malang pada tahun 2007-2010 dan dilanjutkan ke SMAN 1 Kota

Malang pada tahun 2010-2013. Penulis kemudian melanjutkan pendidikan perguruan tinggi pada tahun 2013 di Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Pada masa perkuliahan, penulis banyak aktif di kegiatan organisasi kampus. Mendapat amanah sebagai staf departemen organisasi HMM periode 2014-2015. Kemudian menjadi sekretaris umum HMM periode 2015-2016. Banyak pelajaran hidup yang penulis dapatkan selama berkuliah. Pengalaman menyenangkan dan menantang menempa karakter penulis menjadi manusia yang jauh lebih baik. Selama bergabung di Laboratorium Metalurgi dan Laboratorium Cor, penulis selalu mengikuti kegiatan sebagai asisten praktikum. Penulis berharap tugas akhir ini dapat menjadi kebermanfaatannya bagi banyak orang. *Waladatkan ummuka yabna Adama bakiyan. Wa al-Nas haulaka yadlhakuna sururan. Fajhad linafsika antakuna idza bakau. Fi yaumi mautika dlahika masruran.* Untuk informasi, saran, dan kepentingan sehubungan dengan penelitian, penulis dapat dihubungi melalui surat elektronik: firmanramaputra@gmail.com.