



TUGAS AKHIR – TL184834

**PENGARUH KADAR TIMAH (Sn) PADA ANODA ALUMINIUM
TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN KARAKTERISTIK
PROTEKSI**

**NANDA RIZKY ANUGERAH IRDANIN PUTRA
NRP. 0251164000020**

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

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



TUGAS AKHIR – TL 184834

**PENGARUH KADAR TIMAH (Sn) PADA ANODA
ALUMINIUM TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN
KARAKTERISTIK PROTEKSI**

NANDA RIZKY ANUGERAH IRDANIN PUTRA
NRP. 0251164000020

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

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

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT – TL 184834

**THE EFFECT OF TIN CONTENT ON ALUMINIUM
ANODE TO THE MICROSTRUCTURE AND
PROTECTION CHARACTERISTIC**

NANDA RIZKY ANUGERAH IRDANIN PUTRA
NRP. 02511640000020

Supervisors

Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA

Tubagus Noor Rohmannudin, S.T., M.Sc.

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

(This page is intentionally left blank)

**PENGARUH KADAR TIMAH (Sn) PADA ANODA
ALUMINIUM TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN
KARAKTERISTIK PROTEKSI**

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

NANDA RIZKY ANUGERAH IRDANIN PUTRA
NRP 0251164000020

Disetujui Oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

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



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

PENGARUH KADAR TIMAH (Sn) PADA ANODA ALUMINIUM TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN KARAKTERISTIK PROTEKSI

Nama : Nanda Rizky Anugerah Irdanin Putra
NRP : 0251164000020
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi
Pembimbing I : Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA
Pembimbing II : Tubagus Noor Rohmannudin, S.T., M.Sc.

Abstrak

Anoda korban aluminium merupakan anoda yang sering digunakan untuk proteksi pada lingkungan air laut. Penambahan Sn pada anoda aluminium berpengaruh terhadap struktur mikro dan karakteristik proteksinya. Oleh karenanya, penelitian ini mengarah kepada analisis pengaruh kadar Sn pada anoda aluminium terhadap struktur mikro dan karakteristik proteksinya. Karakteristik proteksi akan mengarah terkait aspek open circuit potential, laju korosi, laju konsumsi, kapasitas arus, dan efisiensi anoda korban aluminium setelah ditambahkan variasi 0.3, 0.9, dan 1.6 Sn. Metode yang digunakan yaitu pengecoran dengan cetakan permanen. Kemudian dilakukan pengujian XRF, metalografi, tafel, open circuit potential, dan galvanik. Hasil yang didapat yaitu peningkatan penambahan Sn menyebabkan munculnya presipitat Sn pada batas butir matriks α -Al sehingga menimbulkan efek galvanik. Hal itu berpengaruh terhadap peningkatan aktivitas anoda aluminium melalui semakin negatifnya nilai open circuit potential hingga -1.122 V vs Ag/AgCl. Kemudian laju korosi dan laju konsumsi semakin meningkat hingga 0.73279 mpy dan 4.56 Kg/A.y namun kapasitas arus dan efisiensi semakin turun menjadi 1921 A.h/Kg dan 73.27%.

Kata Kunci: *Anoda, Al, Karakteristik, Pengecoran, Sn.*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

THE EFFECT OF TIN CONTENT ON ALUMINIUM ANODE TO THE MICROSTRUCTURE AND PROTECTION CHARACTERISTIC

Student Name : Nanda Rizky Anugerah Irdanin Putra
NRP : 0251164000020
Department : Materials and Metallurgical Engineering
Supervisor : Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA
Co - Supervisor : Tubagus Noor Rohmannudin, S.T., M.Sc.

Abstract

Aluminium anode is an anode that usually uses to protect the structure in sea environment. The protection characteristic of aluminium anode is affected by the content of Sn. Because of that, this research is about analysis the effect of Sn addition into the microstructure and protection characteristic of aluminium anode. The protection characteristic of aluminium anode is include of open circuit potential, corrosion rate, consumption rate, current capacity, and efficiency after the addition of 0.3 Sn, 0.9 Sn, and 1.6 Sn. The method of this research is casting with permanent mold. Then the result is tested by XRF, metallography, tafel, open circuit potential, and galvanic. The result is the addition of Sn cause the appearance of Sn precipitates in the grain boundary of matrix α -Al that causes the galvanic effect. Because of that, the activity of aluminium anode is increase through the value of open circuit potential become more negative into -1.122 V vs Ag/AgCl Then the corrosion and consumption rate increase into 0.73279 mpy and 4.56 Kg/A.y, but the current capacity and efficiency decrease into 1921 A.h/Kg and 73.27%.

Keywords: Anode, Al, Casting, Characteristic, Sn.

(This page is intentionally left blank)

KATA PENGANTAR

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

1. Bapak Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D selaku Kepala Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA dan Bapak Tubagus Noor Rohmannudin, S.T., M.Sc. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir yang telah membimbing, membantu, dan memberika banyak ilmu kepada penulis selama proses pengerjaan Laporan Tugas Akhir.
3. Bapak Dr. Eng. Hosta Ardyananta, S.T., M.Sc selaku Sekretaris Departemen 1
4. Bapak Ir. Moh. Farid, DEA selaku Dosen Wali.

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

Surabaya, 23 Januari 2020
Penulis

Nanda Rizky Anugerah I.P

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xxiii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Korosi	5
2.1.1 Aspek Peninjauan Korosi.....	5
2.1.2 Syarat Terjadinya Korosi.....	22
2.1.3 Bentuk-Bentuk Korosi.....	24
2.2 Pengendalian Korosi	31
2.3 Proteksi Katodik	37
2.3.1 Proteksi Katodik Anoda Korban.....	38
2.3.2 Proteksi Katodik Arus Paksa.....	39
2.4 Potensial Elektrokimia.....	41
2.5 Potensial Proteksi.....	43
2.6 Diagram <i>Pourbaix</i>	44
2.7 Anoda Korban	45
2.7.1 Anoda Korban Aluminium.....	49
2.7.2 Anoda Korban Magnesium	50
2.7.3 Anoda Korban Seng.....	51
2.8 Pengaruh Unsur Paduan terhadap Anoda Korban Aluminium	52
2.8.1 Pengaruh Zn	53

2.8.2	Pengaruh In	54
2.8.3	Pengaruh Fe	56
2.8.4	Pengaruh Cu	57
2.8.5	Pengaruh Si	58
2.8.6	Pengaruh Sn	60
2.9	Korosi Pada Air Laut	61
2.9.1	Salinitas dan Komposisi	62
2.9.2	Kandungan Oksigen	62
2.9.3	Temperatur	64
2.9.4	pH	64
2.10	Pengecoran	65
2.11	<i>Pattern</i>	66
2.12	Cetakan Permanen	68
2.13	Cacat Pengecoran	69
2.14	Diagram Fasa Paduan Al-Sn	70
2.15	Struktur Mikro Paduan Al-Sn	72
2.16	Penelitian Sebelumnya	75
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		
3.1	Diagram Alir	85
3.2	Standar yang digunakan	87
3.3	Alat dan Bahan	87
3.3.1	Alat	87
3.3.2	Bahan	89
3.3.3	Spesifikasi Bahan Penelitian	89
3.4	Prosedur Preparasi Spesimen	90
3.4.1	Preparasi Spesimen Uji Korosi	91
3.4.2	Preparasi Spesimen Uji Metalografi	92
3.5	Pengujian	93
3.5.1	Pengujian Komposisi Unsur	93
3.5.2	Pengujian Metalografi	94
3.5.3	Pengujian Tafel Polarisasi	95
3.5.4	Pengujian <i>Open Circuit Potential</i> (OCP)	96
3.5.5	Pengujian Korosi Galvanik	96
3.6	Rancangan Pengambilan Data	97
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		

4.1	Perencanaan Pengecoran Anoda Aluminium.....	99
4.1.1	Data Pengecoran.....	99
4.1.2	Hasil Coran Anoda Aluminium.....	104
4.1.3	Hasil Coran Anoda Aluminium setelah Proses <i>Machining</i>	105
4.2	Komposisi Kimia Anoda Aluminium.....	106
4.3	Pengujian Metalografi	107
4.4	Pengujian Tafel.....	112
4.5	Pengujian <i>Open Circuit Potential</i>	115
4.6	Pengujian Galvanik.....	117
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		
5.1	Kesimpulan	123
5.2	Saran.....	123
DAFTAR PUSTAKA		125
LAMPIRAN.....		133
UCAPAN TERIMA KASIH.....		143
BIODATA PENULIS		145

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Ilustrasi reaksi elektrokimia seng pada elektrolit asam klorida.....	7
Gambar 2.2	Reaksi reduksi hidrogen selama polarisasi aktivasi.....	11
Gambar 2.3	Reaksi reduksi hidrogen selama polarisasi konsentrasi	11
Gambar 2.4	Laju korosi suatu logam dengan efek pasivitas terhadap fungsi penambahan pengoksidasi.....	13
Gambar 2.5	Pengaruh agitasi terhadap laju korosi.....	15
Gambar 2.6	Pengaruh temperatur terhadap laju korosi	17
Gambar 2.7	Pengaruh konsentrasi terhadap laju korosi.....	18
Gambar 2.8	Ilustrasi pengaruh efek galvanik.....	19
Gambar 2.9	Susunan struktur kristal	20
Gambar 2.10	Ilustrasi keberadaan batas butir	21
Gambar 2.11	Karat pada katup dalam sistem perpipaan	25
Gambar 2.12	<i>Rivet</i> tembaga yang dipasang pada plat baja.....	26
Gambar 2.13	Korosi celah pada pipa baja tahan karat	27
Gambar 2.14	Korosi sumuran pada saluran perpipaan.....	28
Gambar 2.15	Korosi integranular pada paduan aluminium 6xxx.....	29
Gambar 2.16	<i>Dezincification</i> Merata pada Pipa Kuningan.....	29
Gambar 2.17	Korosi erosi pada <i>impeller</i> pompa	30
Gambar 2.18	SCC pada tabung baja tahan karat dari <i>heat exchanger</i>	31
Gambar 2.19	Skema alur untuk pemilihan material, SS : <i>specific strength</i> , SM : <i>specific modulus</i> , CR : <i>corrosion rate</i> , CC : <i>cost category</i>	32
Gambar 2.20	Perbandingan efisiensi inhibitor TSE, PESA, dan PASP terhadap besaran konsentrasi	33

Gambar 2.21	Pengaruh luasan kontak katoda-anoda terhadap arus galvanik.....	34
Gambar 2.22	Ilustrasi sistem proteksi katodik dengan arus paksa dan anoda korban	35
Gambar 2.23	Cacat yang terdapat pada <i>coating</i> akibat proses aplikasi yang kurang baik.....	37
Gambar 2.24	Skema sistem proteksi katodik anoda korban.....	38
Gambar 2.25	Skema sistem proteksi katodik arus paksa.....	40
Gambar 2.26	Diagram <i>pourbaix</i> Fe	44
Gambar 2.27	Diagram <i>pourbaix</i> Al	45
Gambar 2.28	Anoda korban dengan inti baja.....	46
Gambar 2.29	Variasi efisiensi anoda terhadap penambahan seng.....	54
Gambar 2.30	Kondisi makrostruktur sampel	55
Gambar 2.31	Efek perbandingan Mn/Fe terhadap anoda paduan Al-Zn-Mn-In.....	56
Gambar 2.32	Perbandingan kekerasan setelah penambahan Cu	58
Gambar 2.33	Hasil pengujian SEM pada (a) tanpa penambahan Si (b) penambahan 0.1 Si	59
Gambar 2.34	Struktur mikro setelah adanya distribusi presipitat timah dengan penambahan 0.1 Sn	61
Gambar 2.35	Pengaruh salinitas terhadap laju korosi	62
Gambar 2.36	Morfologi korosi baja X80 yang dipengaruhi pH dan oksigen terlarut.....	63
Gambar 2.37	Pengaruh temperatur air laut terhadap laju korosi.....	64
Gambar 2.38	Skema sederhana dasar pengecoran logam.....	65
Gambar 2.39	Ilustrasi efek penambahan <i>shrinkage allowance</i> terhadap dimensi <i>pattern</i> untuk pengecoran aluminium	67

Gambar 2.40	Ilustrasi efek penambahan <i>machining allowance</i> terhadap dimensi <i>pattern</i> untuk pengecoran aluminium67
Gambar 2.41	Ilustrasi efek penambahan <i>draft allowance</i> terhadap dimensi <i>pattern</i> untuk pengecoran aluminium67
Gambar 2.42	Ilustrasi penuangan logam cair ke cetakan permanen.....68
Gambar 2.43	Macam-macam cacat pada benda cor (a) inklusi (b) <i>pinhole</i> (c) <i>blowhole</i> (d) porositas.....69
Gambar 2.44	Diagram fasa paduan Al-Sn70
Gambar 2.45	Diagram fasa parsial paduan Al-Sn.....71
Gambar 2.46	Diagram fasa paduan Al-Sn72
Gambar 2.47	Struktur mikro paduan aluminium yang mengandung Sn perbesaran 100x73
Gambar 2.48	Struktur mikro paduan aluminium dengan penambahan 0.1% timah perbesaran 100x.....73
Gambar 2.49	Hasil SEM pada komposisi (a) Al (b) Al + 5wt%Sn (c) Al + 10wt%Sn (d) Al + 20wt%Sn.....74
Gambar 2.50	Hasil metalografi pada penambahan 0.4wt%Sn.....75
Gambar 2.51	Tampilan permukaan a) Al b) Al-Zn c)Al-Zn-0.2Sn setelah satu hari direndam dalam larutan NaCl 3%76
Gambar 2.52	Kurva polarisasi paduan Al-5.3%, Zn-x%, Mg-5.5-8.5% dalam larutan NaCl 3% pada temperatur ruang.....79
Gambar 2.53	Kurva polarisasi siklis dari (a) Al murni (biru), Al-5Zn (cokelat), Al-5Zn-0.5Cu (hijau), dan Al-5Zn-Cu (merah)80
Gambar 2.54	Struktur mikro paduan Al-Zn-Si.....81

Gambar 2.55	Struktur mikro dengan variasi (1) 0.03 Ti, (2) 0.05Ti, (3) 0.07 Ti, dan (4) 0.1 Ti (Cheng, dkk, 2015)	82
Gambar 2.56	Grafik pengaruh deformasi terhadap laju korosi selama 7 minggu.....	83
Gambar 2.57	Kelarutan Sn untuk 4 komposisi paduan.....	84
Gambar 3.1	Diagram alir	86
Gambar 3.2	<i>Muffle furnace</i>	87
Gambar 3.3	<i>Crucible grafit</i>	88
Gambar 3.4	Rancangan dimensi spesimen pengecoran untuk uji korosi.....	92
Gambar 3.5	Skema pengujian komposisi menggunakan XRF.....	93
Gambar 3.6	Pengujian metalografi	94
Gambar 3.7	Skema pengujian tafel polarisasi	95
Gambar 3.8	Pengujian <i>open circuit potential</i>	96
Gambar 3.9	Pengujian korosi galvanik.....	97
Gambar 4.1	Dimensi benda cor tanpa <i>allowance</i>	99
Gambar 4.2	Dimensi benda cor dengan <i>shrinkage allowance</i>	100
Gambar 4.3	Dimensi benda cor dengan <i>machining allowance</i>	100
Gambar 4.4	Dimensi benda cor dengan <i>draft allowance</i>	101
Gambar 4.5	Cetakan untuk pengecoran.....	102
Gambar 4.6	Material anoda aluminium	102
Gambar 4.7	Skema pengecoran anoda aluminium.....	103
Gambar 4.8	Hasil coran anoda aluminium tanpa proses <i>machining</i> dengan penambahan (a) 0, (b) 0.3 Sn, (c) 0.9 Sn, dan (d) 1.6 Sn.....	104
Gambar 4.9	Hasil coran anoda aluminium setelah proses <i>machining</i> dengan penambahan (a) 0, (b) 0.3 Sn, (c) 0.9 Sn, dan (d) 1.6 Sn.....	105
Gambar 4.10	Struktur Mikro Anoda Aluminium (Al) Perbesaran	108

Gambar 4.11	Struktur mikro anoda aluminium (Al + 0.3 Sn) perbesaran 10x.....	108
Gambar 4.12	Struktur mikro anoda aluminium (Al + 0.9 Sn) perbesaran 10x.....	109
Gambar 4.13	Struktur mikro anoda aluminium (Al + 1.6 Sn) perbesaran 10x.....	109
Gambar 4.14	Kurva Hasil Pengujian Tafel.....	113
Gambar 4.15	Grafik nilai perbandingan nilai <i>open circuit potential</i> anoda aluminium.....	116
Gambar 4.16	Grafik perbandingan nilai laju konsumsi anoda aluminium	117
Gambar 4.17	Grafik perbandingan nilai kapasitas arus anoda aluminium	119
Gambar 4.18	Grafik perbandingan nilai efisiensi anoda aluminium	120

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Deret <i>emf</i> potensial elektroda terhadap elektroda standar hidrogen pada 25°C.....	42
Tabel 2.2	Seri galvanik beberapa logam dan paduan pada air laut.....	43
Tabel 2.3	Potensial proteksi dari logam di air laut (V vs Ag/AgCl/Air Laut).....	47
Tabel 2.4	Potensial anoda dari beberapa paduan untuk proteksi katodik	49
Tabel 2.5	Potensial anoda aluminium yang digunakan untuk proteksi katodik	49
Tabel 2.6	Potensial anoda magnesium yang digunakan untuk proteksi katodik	51
Tabel 2.7	Potensial anoda seng yang digunakan untuk proteksi katodik	52
Tabel 2.8	Performa elektrokimia paduan Al-Zn-In dengan variasi perlakuan panas	55
Tabel 2.9	Performa elektrokimia paduan	59
Tabel 2.10	Perbandingan karakteristik anoda konvensional dan semi solid	81
Tabel 3.1	Komposisi anoda aluminium.....	90
Tabel 3.2	Rancangan pengambilan data.....	97
Tabel 4.1	Komposisi anoda aluminium (Al).....	106
Tabel 4.2	Komposisi anoda aluminium (Al + 0.3 Sn)	106
Tabel 4.3	Komposisi anoda aluminium (Al + 0.9 Sn)	106
Tabel 4.4	Komposisi anoda aluminium (Al + 1.6 Sn)	106
Tabel 4.5	Rekapitulasi nilai E_{corr} , I_{corr} , dan laju korosi anoda aluminium	114

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Korosi merupakan suatu proses alami dimana terjadinya degradasi atau kerusakan suatu material akibat bereaksi dengan lingkungan. Korosi dapat bersifat mudah dideteksi maupaun tidak terdeteksi. Korosi yang mudah dideteksi dapat dengan mudah dicegah dan dikontrol namun bilamana ada satu saja korosi yang tidak terdeteksi dapat menyebabkan kegagalan dan kerusakan yang fatal (Begum dan Kruger, 2016). Sistem perpipaan merupakan salah satu sumber utama lokasi terjadinya korosi yang menyebabkan bencana kerusakan lingkungan terbesar di Amerika Serikat dan diperkirakan pembiayaannya mencapai \$585 juta serta berkemungkinan menjadi naik sekitar 20% (Johnson dan Frosch, 2011). Pada umumnya seluruh logam dan paduannya mengalami korosi baik pada industri bahan kimia, minyak, elektronik, lalu hingga badan kapal yang berada di laut, jembatan, semua hal tersebut tidak terhindarkan (Roberge, 2012).

Oleh karenanya, salah satu metode yang digunakan dalam rangka mengendalikan korosi yaitu dengan prinsip proteksi katodik dengan cara memperlakukan struktur logam yang diproteksi sebagai katoda dengan jalan mengalirkan arus listrik melalui elektrolit menuju logam yang akan diproteksi. Sumber arus listrik ini dapat diperoleh menggunakan dua cara diantaranya metode arus paksa (*impressed current*) dan metode anoda korban (*sacrificial anode*). Material anoda korban aluminium dan seng dapat digunakan sebagai anoda korban karena potensial korosinya lebih elektronegatif daripada baja sehingga secara spontan dapat menyalurkan arus listrik untuk memproteksi baja tersebut karena diperlakukan sebagai katoda (Utami, 2009).

Anoda korban aluminium merupakan salah satu logam yang sering digunakan untuk proteksi pada lingkungan air laut. Namun bilamana dalam keadaan murni akan sangat mudah terbentuk lapisan pasif Al_2O_3 sehingga tidak dapat digunakan sebagai anoda

korban untuk memproteksi baja di lingkungan air laut. Oleh karena hal itu maka untuk membuat aluminium lebih aktif maka akan ditambahkan unsur-unsur paduan. Unsur paduan yang biasanya ditambahkan ke dalam anoda aluminium diantaranya Cu, Mn, Si, Mg, Hg, Zn, In, Ga, dan Sn. Anoda korban aluminium yang paling sering digunakan pada sistem proteksi katodik adalah paduan Al-Zn-Mg, Al-Zn-In, Al-Zn-Sn, dan Al-Sn-In. Dengan penambahan elemen yang tepat seperti Hg, In, Ti, Ga, Zn atau Sn potensial dari Al akan meningkat menjadi bernilai lebih negatif sehingga dapat digunakan sebagai paduan anoda sistem proteksi katodik untuk instalasi bawah air (Khireche, 2014).

Penambahan Sn berpengaruh terhadap meningkatnya aktivitas dari aluminium dimana potensial meningkat menjadi lebih bernilai negatif dimana tingkatnya bergantung pada penambahan variasi kadar Sn tersebut dengan urutan $Al < Al-5Zn < Al-5Zn-0.1Sn < Al-5Zn-0.2Sn < Al-5Zn-0.4Sn$ (Khireche, 2014). Penambahan sedikit Sn mampu cukup berpengaruh dan menguntungkan untuk paduan Al-Zn dimana penambahan Sn meningkatkan aktivasi paduan tersebut dimana potensial korosi menjadi lebih negatif dibandingkan hanya paduan Al-Zn (Khadim, 2012). Penelitian terkait paduan anoda Al-Zn-Mg menunjukkan bahwa efisiensi tidak menunjukkan perubahan signifikan seiring dengan penambahan Zn di paduan, namun ketika Sn ditambahkan terjadi peningkatan efisiensi menjadi maksimum 93% setelah dilakukan penambahan perlakuan panas berupa *aging* (Jithin dkk, 2018). Adanya penambahan unsur paduan In, Hg, Sn dapat meningkatkan karakteristik performa anoda korban bilamana ditambahkan dengan konsentrasi $<0.5\%$ dimana unsur paduan ini disebut sebagai *depassivator* (Asmara, 2016).

Oleh karenanya dengan latar belakang tersebut, penelitian ini akan mengarah kepada analisis dari pengaruh kadar Sn terhadap struktur mikro dan karakteristik proteksi anoda korban aluminium. Karakteristik proteksi pada konteks ini mengarah pada aspek *open circuit potential*, laju korosi, laju konsumsi, kapasitas arus, dan

efisiensi anoda korban aluminium setelah diberikan penambahan tertentu timah (Sn).

Meskipun menurut standar *Mil-Spec 24779B(SH)* anoda korban aluminium telah memiliki standar komposisi tertentu namun penelitian kearah pengaruh kadar unsur tertentu dirasa masih perlu untuk dipelajari lebih dalam karena apabila ditinjau dari standarnya belum menjelaskan secara detail mengenai signifikansi pengaruh penambahan suatu unsur paduan dengan kadar tertentu terhadap struktur mikro dan karakteristik anoda korban. Kemudian mengingat kebutuhan akan riset dan pengembangan anoda korban khususnya anoda aluminium karena sering digunakan sebagai pilihan untuk aplikasi perlindungan struktur logam pada lingkungan air laut akibat kinerjanya yang lebih baik dibandingkan anoda korban seng

1.2 Perumusan Masalah

Pada penelitian ini didapatkan beberapa rumusan masalah. Adapun rumusan masalah tersebut diantaranya :

1. Bagaimana pengaruh kadar timah (Sn) terhadap struktur mikro anoda korban berbasis aluminium ?
2. Bagaimana pengaruh kadar timah (Sn) terhadap *open circuit potential*, laju korosi, laju konsumsi, kapasitas arus, dan efisiensi anoda korban berbasis aluminium ?

1.3 Batasan Masalah

Pada penelitian ini terdapat batasan masalah pada proses yang dilakukan. Adapun batasan masalah tersebut diantaranya :

1. Tekanan dianggap konstan saat melakukan proses peleburan.
2. Temperatur tuang dan lebur dianggap konstan saat melakukan penuangan pada beberapa percobaan.
3. Adanya pengaruh oksigen akibat interaksi dengan lingkungan dianggap tidak ada.
4. Adanya reaksi antara logam cair dengan lingkungannya diabaikan.
5. Pengaruh dari cacat pengecoran diabaikan.
6. Pengaruh kekasaran permukaan anoda diabaikan.

7. Massa jenis anoda aluminium dianggap setara dengan 2.7 gram/cm³.
8. Pengaruh adanya unsur pengotor diabaikan.

1.4 Tujuan Penelitian

Pada penelitian ini memiliki beberapa tujuan. Adapun tujuan dilakukannya penelitian ini diantaranya :

1. Menganalisis pengaruh kadar timah (Sn) terhadap struktur mikro anoda korban berbasis aluminium
2. Menganalisis pengaruh kadar timah (Sn) terhadap *open circuit potential*, laju korosi, laju konsumsi, kapasitas arus, dan efisiensi anoda korban berbasis aluminium..

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian yang dilakukan ini memiliki beberapa manfaat diantaranya :

1. Mempelajari pengaruh kadar tertentu timah (Sn) terhadap struktur mikro, potensial, laju korosi, laju konsumsi, kapasitas arus, dan efisiensi anoda korban aluminium sehingga dapat memperkaya khazanah ilmu pengetahuan terkait bidang korosi serta mendapatkan komposisi yang dapat menghasilkan sifat terbaik anoda korban aluminium.
2. Memberikan pandangan terkait penelitian selanjutnya terhadap anoda korban aluminium.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Korosi

Oleh orang awam korosi diidentikkan sebagai karat yang dimana kata merupakan sebutan yang dikhususkan untuk korosi pada baja. Sedangkan korosi adalah gejala destruktif yang mempengaruhi hampir mayoritas logam. Besi yang merupakan logam yang paling banyak digunakan oleh manusia sehingga wajar bilamana karat dan korosi dianggap suatu istilah yang serupa (Trethewey, 1991).

Korosi juga dapat didefinisikan sebagai kerusakan suatu logam akibat bereaksi secara kimia atau elektrokimia dengan lingkungannya. Korosi menjadi penting karena memiliki dampak yang signifikan terhadap dunia industri. Dalam aspek ekonomi misalnya korosi dapat berdampak secara langsung yang berarti timbulnya biaya akibat penggantian komponen atau struktur yang terkorosi maupun tidak langsung yang berarti timbulnya biaya akibat efisiensi produksi menurun, produk industri dapat terkontaminasi, bahkan hingga proses produksi yang dapat terpaksa dihentikan (Revie, 2008).

Korosi sendiri dapat berlangsung secara cepat ataupun lambat. Baja tahan karat 18Cr-8Ni dalam kondisi sensitasi dapat terkena serangan korosi yang sangat signifikan hanya dalam hitungan jam oleh *asam polythionic*. Jalur kereta api biasanya memperlihatkan permukaan yang berkarat tipis namun hal tersebut tidak cukup untuk mempengaruhi kinerjanya hingga beberapa tahun (Fontana, 1987).

2.1.1 Aspek Peninjauan Korosi

Korosi dapat ditinjau berdasarkan beberapa aspek diantaranya adalah :

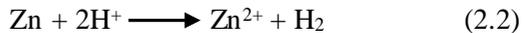
1. Elektrokimia

Fenomena elektrokimia dari korosi dapat diilustrasikan melalui reaksi antara seng dengan asam klorida. Ketika seng ditempatkan pada elektrolit asam klorida terjadi reaksi yang kuat,

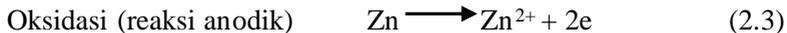
dimana munculnya gas hidrogen dan seng terlarut, sehingga membentuk larutan seng klorida. Persamaan (2.1) berikut merupakan reaksinya :



Kemudian persamaan diatas dapat disederhanakan menjadi bentuk yang lebih sederhana seperti pada Persamaan (2.2) berikut ini :

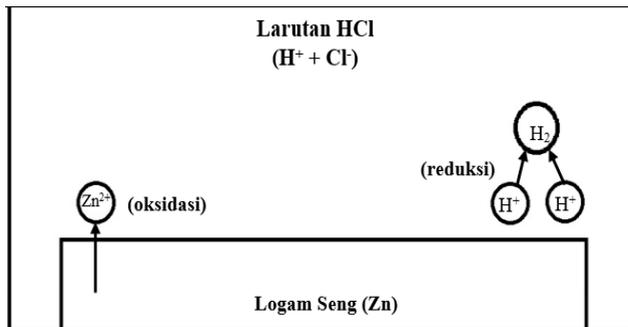


Karenanya, seng bereaksi dengan ion hidrogen dari larutan asam untuk membentuk ion seng dan gas hidrogen. Berdasarkan reaksi tersebut dapat dilihat bahwa selama reaksi berlangsung, seng teroksidasi menjadi ion seng dan ion hidrogen tereduksi menjadi hidrogen. Kemudian pada persamaan tersebut dapat dibagi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



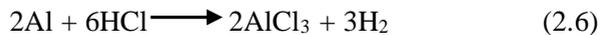
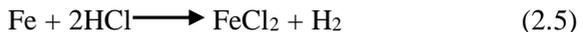
Suatu reaksi oksidasi atau anodik diindikasikan dengan naiknya valensi atau produksi dari elektron. Ketika terjadi penurunan valensi atau konsumsi dari elektron secara signifikan maka disebut sebagai suatu reaksi reduksi atau katodik. Persamaan (2.3) dan (2.4) merupakan reaksi parsial, dimana keduanya terjadi secara spontan dan berada pada laju yang sama pada permukaan logam. Hal ini mengarah pada konsep dasar penting dari korosi dimana selama terjadi proses korosi maka laju reaksi oksidasi sebanding dengan laju reaksi reduksi (pada konsep produksi dan konsumsi elektron).

Konsep diatas seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.1. Pada gambar tersebut atom seng telah bertransformasi menjadi ion seng dan dua elektron. Elektron tersebut yang masih tersisa di logam segera terkonsupsi selama proses reduksi ion hidrogen. Dalam beberapa reaksi korosi, reaksi oksidasi terjadi secara merata diatas permukaan, sedangkan pada beberapa kasus tertentu dapat terjadi secara terlokalisasi atau pada area spesifik tertentu.



Gambar 2.1 Ilustrasi reaksi elektrokimia seng pada elektrolit asam klorida

Pada material lain, seperti aluminium dan besi juga mengalami kondisi yang sama seperti seng yaitu mengalami korosi dengan cepat pada elektrolit asam klorida, Persamaan (2.5) dan (2.6) berikut merupakan reaksinya :



Meskipun secara sekilas terlihat berbeda, bilamana dibandingkan proses reaksi parsial oksidasi dan reduksi pada Persamaan (2.1), (2.5), dan (2.6) terlihat cukup mirip. Ketiga reaksinya melibatkan reaksi reduksi ion hidrogen dan hanya berbeda pada reaksi oksidasi atau anodiknya :



Karenanya, permasalahan korosi akibat asam klorida dapat disederhanakan sejak setiap reaksi katodik adalah terjadinya evolusi dari gas hidrogen menurut Persamaan (2.4). Hal tersebut juga dapat diimplementasikan pada jenis asam yang lain seperti pada H_2SO_4 , H_3PO_4 , dan asam asetat. Pada masing-masing reaksinya hidrogen bersifat aktif sedangkan ion lain seperti fosfat, sulfat, dan asetat tidak terlibat dalam reaksi elektrokimia.

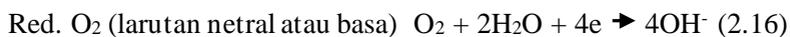
Ketika dilihat dari sudut pandang proses parsial dari reaksi oksidasi dan reduksi, semuanya dapat dibuat sesuatu persamaan yang umum. Reaksi anodic dalam setiap reaksi korosi adalah suatu kondisi dimana logam mengalami oksidasi menjadi ionnya. Hal ini dapat ditulis dalam bentuk umum menurut persamaan berikut :



Beberapa contoh diantaranya :



Dalam tiap kondisi tersebut, tiap elektron yang diproduksi sebanding dengan jumlah valensinya, Kemudian terdapat beberapa reaksi katodik yang seringkali terjadi dalam korosi pada logam. Pada umumnya adalah :





Evolusi hidrogen merupakan suatu reaksi katodik yang umum pada media asam. Reduksi oksigen pada umumnya terjadi ketika larutan mengalami suatu kontak dengan udara. Reduksi ion logam dan deposisi logam merupakan reaksi yang jarang ditemui dan seringkali ditemukan dalam aliran proses kimia. Keseluruhan reaksi diatas dapat dianggap cukup mirip karena memiliki kesamaan yaitu konsumsi terhadap elektron.

Reaksi parsial diatas dapat digunakan untuk interpretasi seluruh permasalahan terkait korosi. Kondisi dimana ketika besi direndam ke dalam air atau air laut yang terekspos atmosfer memiliki Persamaan (2.18) untuk reaksi anodik sebagai berikut :



Oleh karena elektrolit tersebut terekspos atmosfer sehingga mengandung oksigen terlarut. Air tawar dan air laut kondisinya hamper netral, sehingga menghasilkan Persamaan (2.19) sebagai reaksi katodik berikut :



Oleh karena sodium dan klorida tidak ikut bereaksi maka reaksi keseluruhan yang terjadi yaitu sebagai berikut :



Kemudian terbentuk presipitat *ferrous hydroxide* dari larutan, meskipun begitu senyawa ini tidak stabil dan teroksidasi menjadi $Fe(OH)_3$ yang lebih dikenal sebagai karat. Logam terkorosi lebih cepat dalam asam yang tidak murni karena terdapat dua reaksi katodik yaitu evolusi hidrogen dan ion *ferric* menurut Persamaan reaksi berikut :



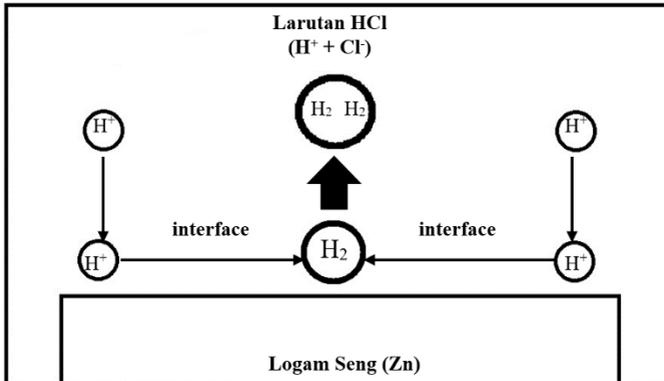
Sejak reaksi anodik dan katodik terjadi selama korosi saling ketergantungan, hal ini memungkinkan menurunnya korosi dengan mengurangi laju salah satu reaksi. Kondisi diatas adalah dalam asam klorida yang tidak murni, dimana dapat dikondisikan untuk tidak terlalu korosif dengan menghilangkan ion *ferric* dan berdampak pada berkurangnya laju reaksi katodik. Reduksi oksigen dapat dihilangkan dengan pencegahan kontak dengan udara atau menghilangkan udara yang sudah terlarut. Besi tidak akan terkorosi dalam air tanpa kandungan udara karena tidak akan terjadi kemungkinan reaksi katodik.

Jika permukaan suatu logam dilapisi dengan cat atau lapisan *film* yang berfungsi sebagai *barrier*, hal tersebut mengakibatkan baik kedua reaksi anodik dan katodik menurun drastic dan korosi menjadi lambat (Fontana, 1987).

a. Polarisasi

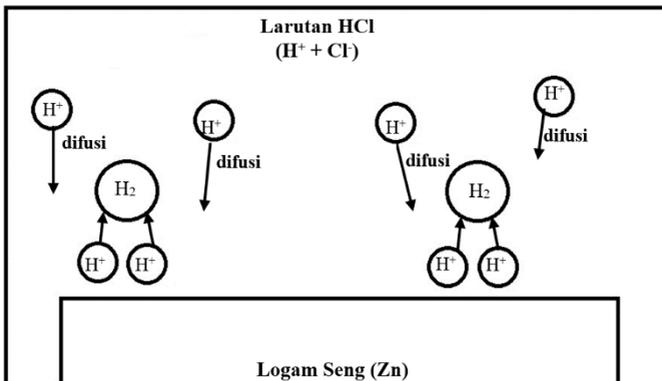
Konsep dari polarisasi menjadi penting karena terkait pemahaman terhadap perilaku korosi dan rekasinya. Laju suatu reaksi elektrokimia dibatasi oleh berbagai faktor baik fisik maupun kimia. Oleh karenanya, reaksi elektrokimia dapat dikatakan terpolarisasi oleh faktor lingkungan. Polarisasi dapat dibagi menjadi dua tipe diantaranya polarisasi aktivasi dan polarisasi konsentrasi.

Polarisasi aktivasi mengarah pada suatu proses elektrokimia yang dikontrol oleh urutan reaksi pada *interface* antara logam dan elektrolit. Polarisasi aktivasi diilustrasikan seperti pada Gambar 2.2 yaitu reaksi evolusi hidrogen pada seng selama terjadi korosi dalam larutan asam. Proses reduksinya meliputi menempelnya atau terserapnya spesi ke permukaan sehingga reaksi dapat berlangsung. Kemudian terjadi transfer elektron yang mengarah pada reduksi dari spesi tersebut. Kemudian dua atom hidrogen menyatu membentuk gelembung gas hidrogen.



Gambar 2.2 Reaksi reduksi hidrogen selama polarisasi aktivasi

Polarisasi konsentrasi mengarah pada reaksi elektrokimia yang dikontrol oleh difusi dalam elektrolit. Hal ini seperti diilustrasikan pada Gambar 2.3 untuk kondisi evolusi hidrogen. Pada kondisi tersebut, jumlah ion hidrogen dalam larutan cukup rendah dan laju reduksinya dikontrol oleh difusi ion hidrogen pada permukaan logam.



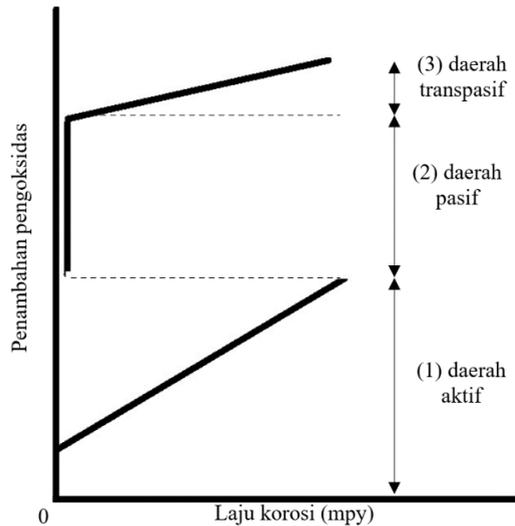
Gambar 2.3 Reaksi reduksi hidrogen selama polarisasi konsentrasi

Polarisasi aktivasi biasanya merupakan faktor yang mengontrol selama korosi dalam media yang memiliki konsentrasi spesi aktif tinggi seperti larutan asam. Sedangkan polarisasi konsentrasi umumnya mendominasi ketika konsentrasi spesi yang direduksi rendah (asam yang diencerkan, larutan garam yang diaerasi). Pada kebanyakan kondisi, polarisasi konsentrasi selama disolusi logam biasanya rendah dan diabaikan, hal tersebut hanya penting selama reaksi reduksi berlangsung.

Urgensitas dalam rangka membedakan antara polarisasi aktivasi dan konsentrasi tidak bisa terlalu ditekankan. Hal tersebut bergantung pada jenis polarisasi yang mengontrol reaksi reduksi, variable lingkungan menghasilkan efek yang berbeda. Sebagai contohnya, suatu perubahan pada sistem yang meningkatkan laju difusi akan menurunkan efek polarisasi konsentrasi dan karenanya meningkatkan laju reaksi. Jadi, meningkatkannya kecepatan atau agitasi dari media korosif akan meningkatkan laju hanya jika proses katodik dikontrol oleh polarisasi konsentrasi. Jika kedua reaksi anodik dan katodik dikontrol oleh polarisasi aktivasi, agitasi tidak akan berpengaruh terhadap laju korosi (Fontana, 1987).

b. Pasivitas

Fenomena pasivitas dapat dibilang sulit untuk didefinisikan oleh karena merupakan suatu fenomena alam yang kompleks dan berada pada kondisi spesifik tertentu. Secara sederhana, pasivitas mengarah pada suatu kondisi dimana hilangnya reaktivitas kimia suatu logam dan paduan pada kondisi lingkungan tertentu. Keadaan tersebut mengarah pada kondisi logam dan paduan menjadi *inert* dan berperilaku seakan seperti logam mulia seperti platina dan emas. Logam yang mengalami fenomena ini diantaranya kromium, titanium, dan nikel. Pada Gambar 2.4 menunjukkan karakteristik logam yang memiliki efek pasivitas.



Gambar 2.4 Laju korosi suatu logam dengan efek pasivitas terhadap fungsi penambahan pengoksidasi

Perilaku pada jenis logam dengan efek pasivitas dapat dibagi menjadi tiga daerah diantaranya daerah aktif, pasif, dan transpasif. Pada daerah aktif, perilaku suatu logam identik dengan kondisi normal logam. Seiring dengan meningkatnya *oxidizing power* dari suatu larutan akan menyebabkan naiknya laju korosi dengan cepat. Jika agen reaksinya ditambahkan menunjukkan fenomena menurunnya laju korosi secara tiba-tiba. Hal tersebut berjubungan dengan permulaan keberadaan daerah pasif. Pada penambahan agen reaksi hingga konsentrasi yang tinggi pada akhirnya menyebabkan laju korosi mulai naik lagi, dimana hal tersebut berhubungan dengan daerah transpasif (Fontana, 1987).

2. Lingkungan Elektrolit

Adapun pengaruh lingkungan terhadap perilaku korosi suatu material dipengaruhi oleh beberapa hal diantaranya :

a. Pengaruh pengoksidasi

Pengaruh pengoksidasi terhadap laju korosi ditunjukkan melalui Gambar 2.4 diatas. Berdasarkan gambar tersebut dibagi menjadi tiga daerah berbeda.

Untuk logam yang memiliki transisi daerah dari aktif ke pasif, pasivitas hanya diperoleh hanya jika terdapat sejumlah penambahan agen pengoksidasi yang cukup atau sejumlah penambahan pengoksidasi yang kuat pada media. Peningkatan laju korosi seiring dengan penambahan konsentrasi pengoksidasi ditunjukkan pada daerah 1, dimana merupakan karakteristik dari monel dan tembaga dalam larutan asam yang mengandung oksigen. Kedua material tersebut tidak mengalami pasivasi. Meskipun besi dapat mengalami pasivasi di dalam air namun kelarutan dari oksigen kondisinya terbatas, sehingga pada mayoritas kasus menjadikan tidak memenuhi untuk menjadi pasif.

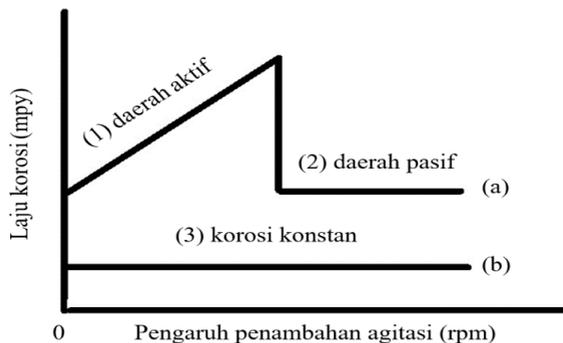
Peningkatan laju korosi yang kemudian diikuti oleh penurunan yang signifikan, lalu laju korosi menjadi tidak bergantung pada konsentrasi pengoksidasi merupakan suatu karakteristik dari paduan baja tahan karat 18Cr-8Ni dan titanium.

Jika suatu logam dengan karakteristik aktif dan pasif, ketika pada daerah pasif saat berada pada media korosif, maka penambahan lebih lanjut agen pengoksidasi tidak akan memberikan efek terhadap laju korosi. Kondisi tersebut pada umumnya terjadi pada logam dengan karakteristik aktif dan pasif ketika berada pada media seperti asam nitrat. Perilaku korosi yang ditunjukkan seperti pada bagian 2 dan 3, dimana ketika suatu logam pada awalnya berada pada keadaan pasif lalu ditambahkan pengoksidasi kuat maka mengakibatkan terjadinya transisi menuju daerah transpasif. Kondisi perilaku tersebut seringkali teramati pada baja tahan karat ketika pengoksidasi kuat seperti kromat ditambahkan kedalam media korosif.

Oleh karenanya dapat dipahami bahwa pengaruh penambahan pengoksidasi atau kehadiran oksifin terhadap laju korosi bergantung pada baik medianya maupun jenis logam yang digunakan. Laju korosi dapat meningkat seiring dengan penambahan pengoksidasi, pengoksidasi juga bisa saja tidak memberikan efek terhadap laju korosi, ataupun fenomena lain yang lebih kompleks bisa saja terjadi. Berdasarkan hal tersebut maka menjadi penting untuk memahami karakteristik dasar dari logam atau paduan dan lingkungan yang terekspos untuk memahami pengaruh penambahan pengoksidasi terhadapnya (Fontana, 1987).

b. Pengaruh agitasi

Pengaruh kecepatan atau agitasi terhadap laju korosi mirip dengan penambahan pengoksidasi, memiliki pengaruh yang kompleks dan bergantung pada karakteristik dari logam dan lingkungan yang terekspos. Pada Gambar 2.5 menunjukkan observasi ketika terjadi penambahan agitasi atau peningkatan terhadap kecepatan. Untuk proses korosi yang dikontrol oleh polarisasi aktivasi, agitasi dan kecepatan tidak memiliki pengaruh terhadap laju korosi seperti yang diilustrasikan pada kurva B.



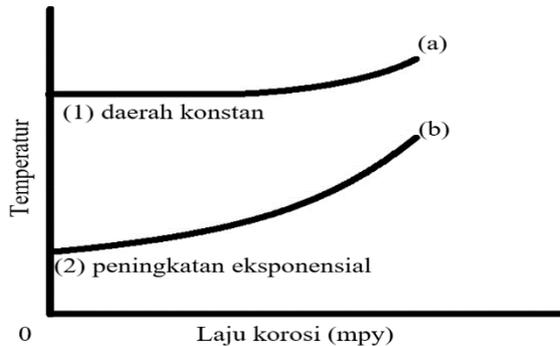
Gambar 2.5 Pengaruh agitasi terhadap laju korosi

Jika proses korosi dikontrol oleh polarisasi konsentrasi dan logam pada kondisi pasif, maka perilaku yang terjadi seperti ditunjukkan pada bagian 1 dan 2. Ketika terjadi penambahan agitasi, logam akan berada pada transisi aktif dan pasif. Material yang mudah untuk menjadi kondisi pasif seperti baja tahan karat dan titanium yang seringkali lebih tahan korosi ketika agitasi terhadap media korosi tinggi.

Beberapa logam memiliki ketahanan korosinya masing-masing dalam media tertentu terhadap pembentukan lapisan film protektif pada permukaannya. Sebagai contohnya adalah baik timbal dan baja dipercaya dapat terlindungi dari serangan asam sulfat dengan adanya keberadaan lapisan film berupa sulfat. Suatu material ketika berada pada kondisi terekspos lingkungan dengan agitasi dan korosifitas tinggi dapat menyebabkan kerusakan atau hilangnya lapisan film. Hal itu pada umumnya disebut sebagai korosi erosi (Fontana, 1987).

c. Pengaruh temperatur

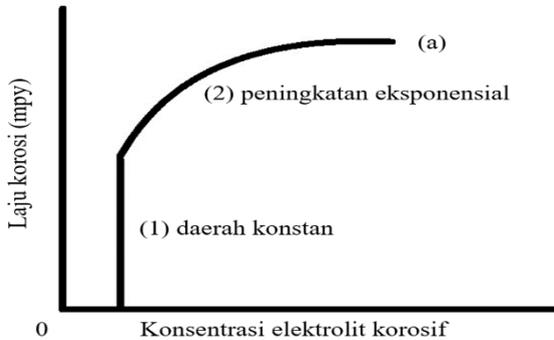
Pengaruh temperatur terjadi hampir pada seluruh reaksi kimia. Pada Gambar 2.6 menunjukkan ilustrasi terhadap observasi pengaruh temperature terhadap laju korosi logam. Kurva B merepresentasikan perilaku dimana seiring peningkatan temperatur maka akan terjadi peningkatan laju korosi dimana memiliki grafik eksponensial. Kemudian pada kurva A menunjukkan bahwa pada awalnya pengaruh temperatur tidak memberikan efek namun kemudian diikuti dengan peningkatan secara tiba-tiba laju korosi pada temperatur yang lebih tinggi. Pada kondisi baja tahan karat 18Cr-8Ni pada lingkungan asam nitrat, dimana peningkatan terhadap temperatur asam nitrat meningkatkan daya pengoksidasinya. Pada temperatur rendah atau sedang, baja tahan karat yang terekspos asam nitrat berada pada kondisi pasif namun sangat dekat dengan daerah transpasif. Oleh karenanya, peningkatan daya pengoksidasi menyebabkan meningkatnya laju korosi dari material. (Fontana, 1987).



Gambar 2.6 Pengaruh temperatur terhadap laju korosi

d. Pengaruh konsentrasi

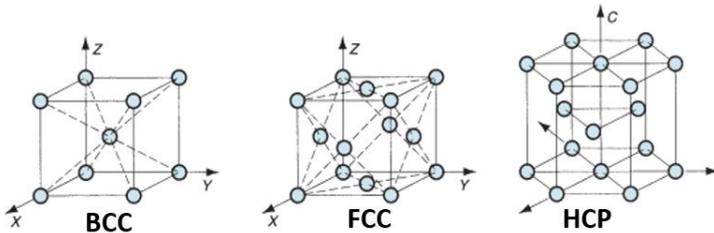
Pada Gambar 2.7 menunjukkan efek konsentrasi media korosif terhadap laju korosi. Terlihat pada kurva A memiliki dua bagian, 1 dan 2. Banyak diantara material yang menunjukkan efek pasivitas sehingga seakan pengaruh konsentrasi media korosif diabaikan seperti pada kurva A bagian 1. Material lain menunjukkan perilaku yang mirip kecuali pada konsentrasi media korosif yang sangat tinggi, ketika laju korosi tiba-tiba meningkat signifikan seperti pada kurva A bagian 1 dan 2. Timbal merupakan material yang menunjukkan perilaku tersebut dan dipercaya bahwa hal itu disebabkan karena keberadaan timbal sulfat yang membentuk lapisan protektif film pada asam sulfat dengan konsentrasi rendah, namun kemudian larut dalam asam sulfat berkonsentrasi tinggi (Fontana, 1987).



Gambar 2.7 Pengaruh konsentrasi terhadap laju korosi

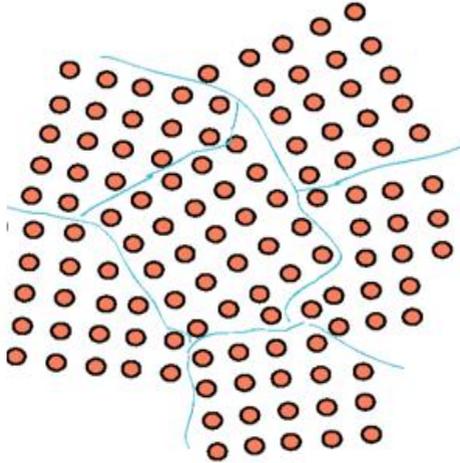
e. Pengaruh efek galvanik

Pada banyak aplikasi di dunia industri, adanya kontak antara dua logam yang berbeda jenis tidak bisa dihindari. Dalam proses yang kompleks dan sistem perpipaan, logam dan paduan yang berbeda seringkali mengalami kontak satu sama lain dan berada pada lingkungan korosif. Pengaruh efek galvanik sebagai contoh yaitu pada sepotong besi yang direndam pada asam klorida dan berkontak dengan logam mulia seperti platinum seperti pada Gambar 2.8. Oleh karena platinum memiliki karakteristik inert pada medium tersebut, sehingga memberikan kecenderungan pembentukan evolusi hidrogen pada permukaannya. Lebih lanjut, evolusi hidrogen terjadi lebih dominan pada permukaan platina daripada seng. Kedua faktor tersebut mengakibatkan meningkatnya reaksi katodik dan menjadikan laju korosi dari seng meningkat. Perlu dicatat bahwa pengaruh efek galvanik dapat diidentifikasi secara langsung melalui penambahan pengoksidasi ke dalam larutan korosif. Pada kondisi tersebut, ketika laju konsumsi elektron meningkat maka akan mengakibatkan laju disolusi logam juga meningkat. Penting untuk diketahui bahwa efek galvanik tidak selalu memberikan pengaruh terhadap meningkatkan laju korosi



Gambar 2.9 Susunan struktur kristal (Groover, 2010)

Ketika logam mengalami solidifikasi selama proses pengecoran, atom-atomnya terdistribusi secara acak di dalam fasa cair, kemudian mengatur dirinya sendiri menuju susunan yang kristalin. Namun, penyusunan tersebut biasanya mulai pada banyak titik dalam kondisi cair, dan ketika antar titik inisiasi yang membentuk butir bertemu maka akan terbentuk ketidakteraturan pada bagian batas-batasnya. Ketika logam telah mengalami solidifikasi sepenuhnya dan dalam keadaan dingin, maka akan terdapat banyak daerah ketidakteraturan diantara tiap butirnya. Daerah tersebut disebut dengan batas butir. Pada Gambar 2.10 menunjukkan representasi dua dimensi dari batas butir. Batas butir merupakan suatu daerah dengan tingkat energi yang tinggi dan paling aktif secara kimia. Oleh karenanya, pada umumnya batas butir lebih cepat terserang korosi dibandingkan bagian muka butir ketika tereskpos media korosif. Pada proses metalografi, beberapa kondisi tertentu bergantung pada perbedaan reaktivitas kimia untuk memunculkan kontras antar butirnya. Batas butir tampak lebih gelap karena lebih mudah terserang korosi daripada bagian butir.



Gambar 2.10 Ilustrasi keberadaan batas butir (Aditya, 2016)

Paduan merupakan campuran dari dua atau lebih logam atau unsur. Terdapat dua jenis paduan yaitu paduan homogen dan heterogen. Paduan homogen disebut sebagai larutan padat, dimana komponen-komponennya larut sempurna satu sama lain sehingga hanya memiliki satu fasa. Salah satu contoh paduan homogen atau larutan padat adalah pada baja tahan karat 18Cr-8Ni. Besi, nikel, kromium, dan karbon larut secara sempurna dan memiliki komposisi yang merata. Sedangkan paduan heterogen adalah campuran dari dua atau lebih fasa yang terpisah. Komponen paduannya tidak larut dan muncul sebagai sesuatu yang terpisah. Masing-masing dari tipe paduan memiliki keuntungan dan kekurangannya masing-masing. Paduan larutan padat pada umumnya lebih ulet dan memiliki kekuatan yang lebih rendah daripada paduan heterogen. Pilihan diantara kedua jenis paduan tersebut bergantung pada sifat mekanik yang diharapkan. Paduan larutan padat biasanya memiliki ketahanan terhadap korosi yang lebih baik dibandingkan paduan heterogen, hal tersebut dikarenakan tidak terpengaruh oleh adanya efek galvanik.

Beberapa zat dapat terlarut dan beberapa diantaranya tidak dapat dilarutkan. Kelarutan biasanya meningkat drastis seiring dengan adanya kenaikan temperatur. Sebagai contoh, karbida besi dapat larut sempurna pada besi di temperatur tinggi. Oleh karenanya baja menjadi suatu larutan padat ketika dipanaskan menuju temperatur yang tinggi. Presipitasi dari suatu fasa dapat terjadi pada larutan padat yang jenuh. Seperti yang dijelaskan sebelumnya bahwa batas butir merupakan daerah dengan tingkat energi yang tinggi sehingga presipitat seringkali muncul pada daerah tersebut.

Perbedaan lain dalam suatu logam dapat berupa kimia, metalurgi, ataupun mekanik di alam. Sebagai contoh seperti oksida dan inklusi lain, kerak, orientasi butir, dislokasi, tegangan terlokalisasi, dan goresan. Logam dalam keadaan sangat murni lebih baik dalam ketahanan terhadap korosi dibandingkan dengan logam komersial. Sebagai contoh, seng murni tidak akan terkorosi dalam larutan asam klorida murni, namun dapat berlaku sebaliknya bila yang digunakan merupakan bahan seng komersial. Namun, logam murni memiliki harga yang sangat mahal dan biasanya sifat mekaniknya kurang baik (Fontana, 1987).

2.1.2 Syarat Terjadinya Korosi

Berdasarkan reaksi elektrokimia, reaksi korosi dapat dianggap sebagai dua reaksi simultan : reaksi oksidasi pada logam di anoda (terkorosi dan melepaskan elektron) dan reaksi reduksi pada logam di katoda (terproteksi dan menerima elektron). Suatu reaksi korosi dapat berlangsung bilamana terdapat kondisi berikut yang harus ada, diantaranya adalah :

1. Adanya beda potensial antara lokasi yang berdekatan dengan permukaan logam (atau antara paduan dengan komposisi yang berbeda)
2. Adanya elektrolit untuk menyediakan konduktivitas dan sebagai sumber material direduksi pada katoda.
3. Kontak metalik yang harus ada sebagai media aliran elektron.

Reaksi korosi dapat diilustrasikan sebagaimana reaksi elektrokimia yang terjadi ketika terjadi kontak antara besi dengan air, dimana alur reaksinya adalah sebagai berikut :

1. Air terdisosiasi menjadi ion hidrogen (H^+) dan ion hidroksil (OH^-), menurut Persamaan reaksi (2.22) berikut :



2. Kemudian ketika logam kontak dengan air maka terjadi ionisasi pada permukaan oleh karena beda muatan listrik pada interfasa zat padat dengan cair. Sebagai contoh, besi terlarut di air dalam bentuk ion positif (Fe^{2+}), dimana Persamaan pada (2.23) reaksinya :



3. Secara elektrokimia, suatu zat kimia teroksidasi ketika melepaskan elektron. Elektroda dimana tempat terjadi reaksi oksidasi disebut anoda. Sedangkan suatu zat kimia tereduksi ketika menerima elektron. Elektroda dimana tempat terjadi reaksi reduksi disebut katoda. Reaksi oksidasi menghasilkan pembentukan ion positif ferrous pada anoda. Ion ferrous bergerak menjauhi permukaan logam teroksidasi lebih lanjut menjadi (Fe^{3+}), menurut Persamaan reaksi (2.24) berikut :



4. Ion positif ferrous berikatan dengan ion negatif hidroksil dan membentuk produk korosi $Fe(OH)$. Karat terdiri dari ion besi hidroksida atau besi oksida hidrat dalam berbagai wujud, bergantung pada derajat dari oksidasi dan dehidrasi. menurut Persamaan (2.50) reaksi :



5. Reaksi reduksi pada katoda tanpa kehadiran udara atau oksigen, ion hidrogen dapat direduksi oleh kelebihan elektron pada permukaan katoda, menurut Persamaan reaksi (2.26) :



6. Jika hidrogen tidak dihilangkan dari permukaan katoda, reaksi katoda menurun, dan kemudian laju korosi menurun. Dengan adanya kehadiran udara, reaksi yang terjadi ialah reduksi dari oksigen. Berikut adalah dua kemungkinan Persamaan reaksi yang akan terjadi :



Evolusi hidrogen, reduksi oksigen dengan pembentukan air, biasanya terjadi di lingkungan asam. Disisi lain, reduksi oksigen dengan pembentukan ion hidroksil lebih dominan terjadi pada lingkungan netral atau basa (Lansing, 1982).

2.1.3 Bentuk-Bentuk Korosi

Klasifikasi dari korosi mudah dikenali melalui kenampakan dari permukaan logam yang terkorosi, tiap bentuknya dapat diidentifikasi melalui observasi visual dengan mata namun dengan kaca pembesar akan mempermudah proses pengamatan. Informasi terkait permasalahan korosi dapat diperoleh melalui observasi pada spesimen yang terkorosi. Pemeriksaan sebelum melakukan pembersihan diperlukan. Jenis-jenis korosi terdiri dari delapan bentuk diantaranya :

1. Korosi Universal (*Uniform Corrosion*)

Korosi jenis ini merupakan korosi yang paling umum ditemukan pada logam, dimana terjadinya akibat reaksi kimia atau elektrokimia yang mengekspos ke permukaan logam secara merata pada area yang luas. Sebagai contoh yaitu saat sepotong baja

direndam kedalam larutan asam sulfat maka logam tersebut akan mengalami korosi secara merata pada seluruh permukaannya. Pada umumnya jenis korosi ini dapat dicegah melalui beberapa cara diantaranya pemilihan material yang tepat termasuk pemberian pelapisan, penggunaan inhibitor, atau proteksi katodik bahkan kombinasi dari beberapa cara tersebut (Fontana, 1987). Pada Gambar 2.11 menunjukkan terjadinya korosi yang merata pada permukaan tangki yang terbuat dari bahan baja dimana material yang terbuat dari baja bilamana tidak dirawat akan terserang korosi.



Gambar 2. 11 Karat pada katup dalam sistem perpipaan
(Tait, 2018)

2. Korosi Galvanik (*Galvanic Corrosion*)

Pada dua buah logam yang berbeda saat tercelup kedalam larutan elektrolit akan menimbulkan suatu beda potensial dan bilamana diberikan kontak maka akan mengalir arus dan terjadi transfer elektron pada rangkaian tersebut. Pada kondisi tersebut arus mengalir dari katoda ke anoda dan elektron mengalir dari anoda ke katoda karena anoda memiliki nilai potensial yang lebih negatif daripada katoda. Oleh karena itu logam yang bertindak sebagai anoda mengalami korosi sedangkan logam yang bertindak sebagai katoda tidak mengalami korosi. Fenomena tersebut disebut sebagai bentuk korosi galvanik ketika melibatkan dua logam yang berbeda terjadi suatu kontak. Pencegahan jenis korosi ini dapat

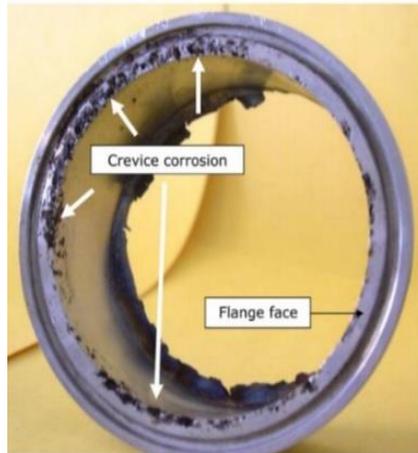
dilakukan dengan beberapa cara diantaranya menggunakan pemilihan material yang kompatibel (letaknya dekat dalam deret galvanik) bilamana mengharuskan terjadi kontak antar kedua logam tersebut, aplikasi coating, dan memasang insulasi diantara kedua logam tersebut (Fontana, 1987). Pada Gambar 2.12 terlihat bahwa *rivet* terbuat dari tembaga dipasang pada pelat yang terbuat dari baja, oleh karena tembaga lebih mulia daripada baja sehingga menyebabkan pelat baja yang mengalami korosi.



Gambar 2.12 *Rivet* tembaga yang dipasang pada plat baja
(Tait,2018)

3. Korosi Celah (*Crevice Corrosion*)

Korosi ini merupakan jenis korosi yang terlokalisasi dimana terjadi pada area yang sulit dijangkau seperti pada celah-celah dimana hal ini terjadi karena pada lokasi tersebut terjadi stagnansi larutan elektrolit. Oleh karenanya disebut sebagai korosi celah. Pencegahan korosi celah dapat dilakukan dengan beberapa cara diantaranya pembersihan berkala bilamana terdapat deposit yang menyebabkan stagnansi cairan, menggunakan desain yang terdapat sarana pengeringan, menggunakan teflon *gasket*, dan menghilangkan celah menggunakan metode pengelasan (Fontana, 1987).



Gambar 2.13 Korosi celah pada pipa baja tahan karat
(Tait, 2018)

4. Korosi Sumuran (*Pitting Corrosion*)

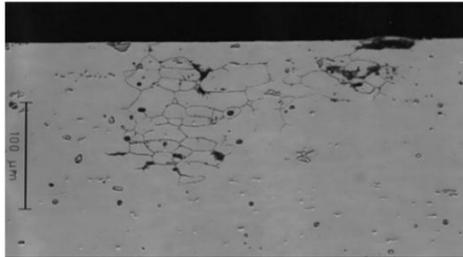
Korosi sumuran merupakan korosi terlokalisasi yang berdampak sangat signifikan terhadap logam dimana menghasilkan lubang-lubang baik dalam ukuran yang relatif kecil maupun besar diameternya. Namun, kasus korosi sumuran pada umumnya menjadikan permukaan logam banyak lubang-lubang yang ukurannya kecil serta seringkali tidak kasat mata. Korosi jenis ini sulit untuk dideteksi berikut jumlah dan kedalamannya yang bervariasi karena ukurannya yang kecil dan biasa tertutup oleh produk korosi. Pencegahan jenis korosi ini dapat dilakukan dengan menggunakan material yang tendensi untuk terjadi korosi sumuran rendah *Hastelloy F*, *Hastelloy C*, hingga titanium bergantung pada aplikasinya (Fontana, 1987). Pada Gambar 2.14 merupakan fenomena korosi sumuran yang terjadi pada baja tahan karat akibat larutan asam klorida.



Gambar 2.14 Korosi sumuran pada saluran perpipaan
(Tait, 2018)

5. Korosi Batas Butir (*Intergranular Corrosion*)

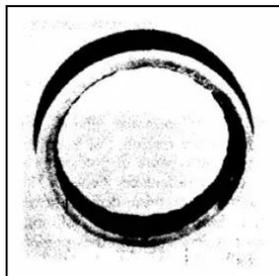
Korosi terlokalisasi yang menyerang daerah batas butir suatu logam disebut sebagai korosi batas butir dimana korosi ini menyebabkan logam kehilangan kekuatannya akibat disintegrasi batas butir. Korosi jenis ini disebabkan karena impuritas yang terdapat pada batas butir, sebagai contoh sejumlah komposisi kecil besi pada aluminium dimana kelarutan besi rendah menjadikan segregasi pada batas butir sehingga menyebabkan korosi batas butir begitupun dengan fenomena ketika krom pada baja tahan karat hilang pada daerah disekitar batas butir. Kontrol atau minimalisir jenis korosi ini bergantung pada jenis logamnya, sebagai contoh pada baja tahan karat tipe 304 pencegahan dilakukan dengan melakukan perlakuan panas *quench-annealing* atau *solution-quenching*, menambahkan unsur paduan penstabil karbida, dan mengurangi kadar karbon hingga dibawah 0.03% (Fontana, 1987). Gambar 2.15 menunjukkan terjadinya korosi batas butir pada daerah lasan baja tahan karat tipe 304.



Gambar 2.15 Korosi integranular pada paduan aluminium 6xxx (Colvin, 2001)

6. *Selective Leaching*

Jenis korosi ini didefinisikan sebagai hilangnya satu unsur dari suatu paduan oleh karena terjadinya korosi. Salah satu contoh korosi jenis ini yang paling umum yaitu hilangnya seng pada paduan kuningan (*dezincification*). Proses yang serupa juga bisa terjadi pada jenis paduan yang lain dimana aluminium, besi, cobalt, krom, dan unsur paduan lain hilang. Pada fenomena *dezincification* terjadi perubahan warna kemerahan pada warna dasar kuningan sehingga mudah diamati dengan mata. Salah satu metode mencegah fenomena tersebut adalah dengan menggunakan proteksi katodik. Pada Gambar 2.16 menunjukkan terjadinya fenomena *dezincification* secara merata pada pipa yang terbuat dari kuningan (Fontana, 1987).



Gambar 2.16 *Dezincification* Merata pada Pipa Kuningan (Fontana, 1987)

7. Korosi Erosi (*Erosion Corrosion*)

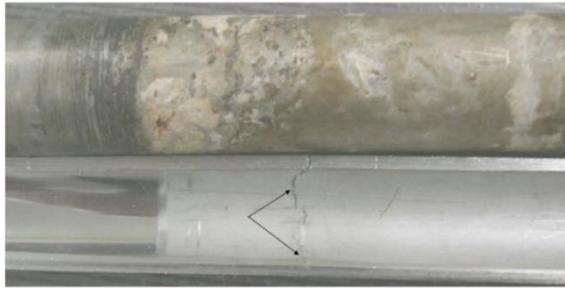
Korosi erosi didefinisikan sebagai tingginya laju degradasi yang terjadi pada suatu logam akibat gerak relatif yang terjadi antara fluida korosif dan permukaan logam, dalam artian permukaan logam dihantam fluida korosif dengan laju yang cukup tinggi sehingga menyebabkan korosi yang signifikan (abrasi). Salah satu fenomena tersebut terjadi pada *elbow* dari pipa seperti pada gambar 2.17. Cara pencegahan korosi erosi diantaranya terkait pemilihan material dan desain yang sesuai. Pada gambar 2.7 potensi korosi erosi dapat diminimalisir dengan memperbesar diameter pipa pada daerah *elbow* untuk mengurangi kecepatan aliran fluida (Fontana, 1987).



Gambar 2.17 Korosi erosi pada *impeller* pompa (Tait, 2018)

8. Korosi Tegangan (*Stress Corrosion*)

Stress Corrosion Cracking (SCC) berkaitan dengan retakan yang diakibatkan oleh keberadaan tegangan tarik dan media korosif tertentu. Pada umumnya korosi yang diakibatkan oleh tegangan terdiri dari dua tipe yaitu *Stress Corrosion Cracking* (SCC) dan *Hydrogen Embrittlement*. Metode pencegahan terjadinya jenis korosi ini yaitu diantaranya dengan menurunkan tegangan dibawah batas minimumnya, menghilangkan faktor kritis lingkungan penyebab korosi, aplikasi proteksi katodik, aplikasi inhibitor, dan aplikasi *coating* (Fontana, 1987). Gambar 2.18 menunjukkan adanya fenomena *Stress Corrosion Cracking* (SCC) pada baja tahan karat ketika diambil sampel *cross section* dan diamati dengan perbesaran 500x.



Gambar 2.18 SCC pada tabung baja tahan karat dari *heat exchanger* (Tait, 2018)

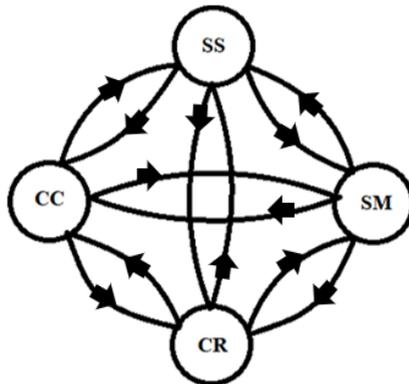
2.2 Pengendalian Korosi

Dalam melakukan pencegahan dan pengendalian korosi dapat dilakukan menggunakan 5 prinsip utama diantaranya :

1. Pemilihan material yang tepat

Dalam melakukan pemilihan suatu material, tiap komponen harus didasarkan atas pertimbangan desain, manufaktur, dan pengaruhnya terhadap geometri totalnya. Disamping itu hal lain yang juga penting adalah kompatibilitas dari material-material yang digunakan. Bila dihubungkan dengan korosi, kompatibel maksudnya efek galvanik antar material harus dihindari. Bukan hanya pada struktur utama, namun juga baik insulasi maupun struktur penopang juga dihindarkan dari potensi korosi galvanik. Ketepatan dalam melakukan suatu pemilihan material bergantung pada pengetahuan akan bagaimana kondisi praktek aktual yang akan mempengaruhi kondisi material tersebut. Dalam rangka memastikan aspek-aspek penting tidak ada yang kurang, data hal-hal apa saja yang digunakan, sekiranya mana saja yang berpotensi terpengaruh korosi, kondisi relevan yang akan mempengaruhinya, kemungkinan perubahan sifat yang terjadi akibat korosi, kemungkinan proteksi pencegahan korosi pada material tersebut, akses untuk perawatan, kondisi lingkungan, beban, dan kondisi khusus yang mungkin terjadi selama digunakan (Bardal, 2003).

Adapun dalam rangka penyelesaian permasalahan yang berhubungan dengan pemilihan material, maka ada beberapa aspek pertimbangan yang dapat dijadikan acuan diantaranya kekuatan spesifik (*specific strength*) dimana berhubungan dengan kebutuhan kekuatan material (MPa) dalam aplikasinya, kekuatan modulus (*specific modulus*) dimana berhubungan dengan kebutuhan kekakuan material (GPa) dalam aplikasinya, ketahanan terhadap korosi (*corrosion resistance*) dimana berhubungan dengan kemampuan suatu material untuk tahan terhadap serangan korosi, dan kategori harga (*cost category*) dimana berhubungan dengan harga yang diperlukan untuk memperoleh material dengan karakteristik unggul sesuai dengan kebutuhan sehingga pembiayaan atau pengeluaran lebih efektif dan efisien (Athawale dan Chakraborty, 2012).



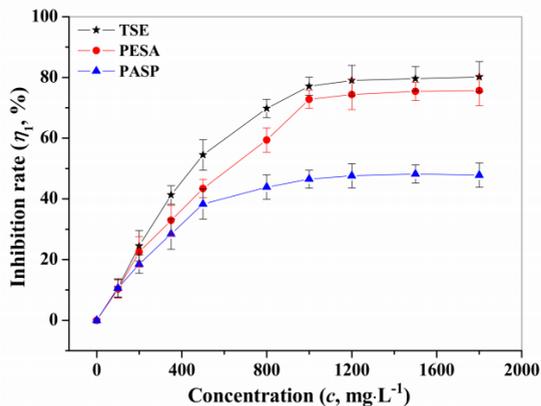
Gambar 2.19 Skema alur untuk pemilihan material, SS : *specific strength*, SM : *specific modulus*, CR : *corrosion rate*, CC : *cost category*

2. Merubah kondisi lingkungan

Dalam rangka mengurangi laju korosi yang terjadi maka merubah kondisi lingkungan dapat dilakukan dengan beberapa metode diantaranya mengurangi temperatur, mengurangi laju

aliran, mengurangi kandungan oksigen atau zat agresif, dan menambahkan inhibitor (Bardal, 2003).

Salah satu penggunaan inhibitor yaitu diantaranya berasal dari ekstrak tembakau (TSE), *polyepocysuccinic acid* (PESA), dan *polyaspartic acid* (PASP) serta digunakan pada penelitian terhadap baja karbon rendah (1020) dan menghasilkan grafik efisiensi terhadap konsentrasi seperti pada Gambar 2.20 berikut (Chen dkk, 2019).



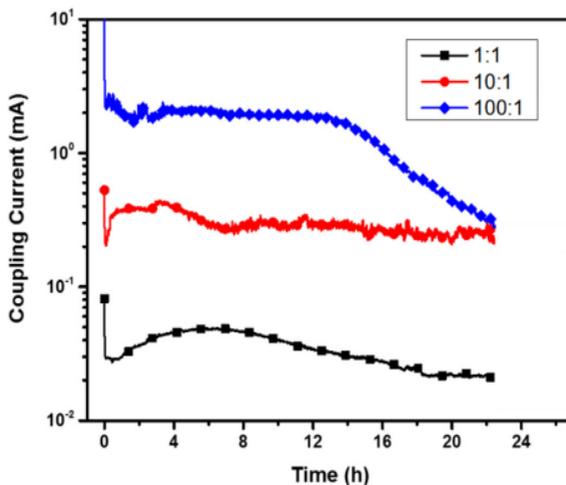
Gambar 2.20 Perbandingan efisiensi inhibitor TSE, PESA, dan PASP terhadap besaran konsentrasi (Chen dkk, 2019)

3. Desain yang sesuai

Desain berhubungan erat dengan aspek pemilihan material yang tepat. Aspek-aspek yang perlu dijadikan konsiderasi meliputi umur konstruksi, manufaktur, penyimpanan, instalasi, operasi, dan perawatan. Bentuk korosi yang umum dipengaruhi oleh bentuk geometri diantaranya korosi galvanik, korosi celah, korosi erosi, korosi kavitasi, *fretting*, SSC, dan *fatigue corrosion*. Oleh karena hal tersebut, pedoman umum yang perlu digunakan diantaranya desain dibuat dengan toleransi terjadinya korosi, desain untuk komponen yang mudah terserang korosi dibuat mudah untuk diganti, desain dibuat mudah untuk diinspeksi dan dibersihkan,

menggunakan sambungan yang tidak menyebabkan korosi galvanik, menggunakan coating atau pelapis sebelum melakukan penyambungan dua jenis logam yang berbeda, dan menggunakan gasket untuk mencegah penetrasi cairan kedalam celah (Bardal, 2003).

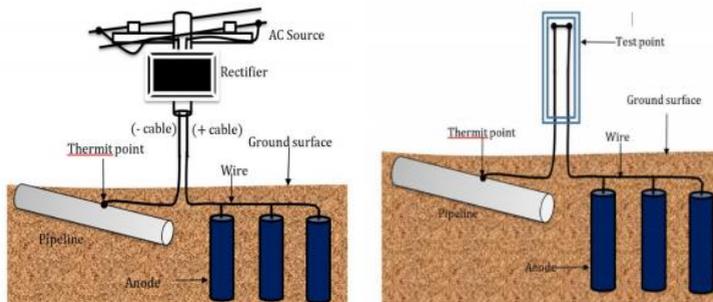
Kondisi khusus kurang tepatnya desain sehingga menyebabkan korosi berupa korosi galvanik yaitu pada penggunaan mur jenis ASTM A352 yang dipasang pada jembatan material baja A1010 menghasilkan laju korosi galvanik yang lebih tinggi dibandingkan pada baja A588. Dalam rangka mengurangi laju korosi galvanik tersebut maka dapat dilakukan beberapa metode seperti pengecatan pada daerah kontak dimana akan mengurangi rasio area katoda terhadap anoda. Pada Gambar 2.21 menunjukkan pengaruh luasan kontak katoda-anoda terhadap arus galvanik dalam larutan NaCl 3.5% (Zhang dkk, 2019)



Gambar 2.21 Pengaruh luasan kontak katoda-anoda terhadap arus galvanik (Zhang dkk, 2019)

4. Proteksi katoda dan anoda

Prinsip utama penggunaan sistem proteksi katodik adalah untuk menghantarkan arus dari eksternal pada suatu material sehingga menjadi gaya dorong untuk menurunkan potensial menuju area yang imun atau untuk memproteksi dari terjadinya korosi lokal dibawah potensial proteksi. Arus eksternal dapat diproduksi melalui dua cara yaitu menggunakan material yang bersifat aktif yang berperan sebagai anoda korban yang dihubungkan dengan kontak metalik terhadap struktur yang diproteksi dan menggunakan sumber arus eksternal yang biasanya menggunakan *rectifier* serta elektroda referens yang digunakan untuk mengontrol *rectifier* secara potensiostatik (Bardal, 2003). Ilustrasi sistem proteksi katodik menggunakan arus paksa dan anoda korban seperti pada Gambar 2.22 berikut.



Gambar 2.22 Ilustrasi sistem proteksi katodik dengan arus paksa dan anoda korban (Ameh, dkk, 2017)

Pada sistem proteksi anodik, material dipolarisasi arah anoda sehingga potensial naik mengarah ke daerah pasif. Proteksi anodik digunakan untuk objek seperti tangki baja yang digunakan untuk menyimpan dan menyalurkan asam sulfur, dimana tangki biasanya terbuat dari *stainless steel* dan titanium yang digunakan untuk lingkungan asam dan garam. Metode ini tidak dapat digunakan untuk cairan agresif yang mampu mengakibatkan korosi lokal atau densitas arus pasif yang tinggi. Pada umumnya digunakan pada

18/8 CrNi baja tahan karat pada lingkungan 30% H₂SO₄ + 1% NaCl dan untuk titanium pada lingkungan asam hidroklorik (Bardal, 2003).

5. Aplikasi *coating*

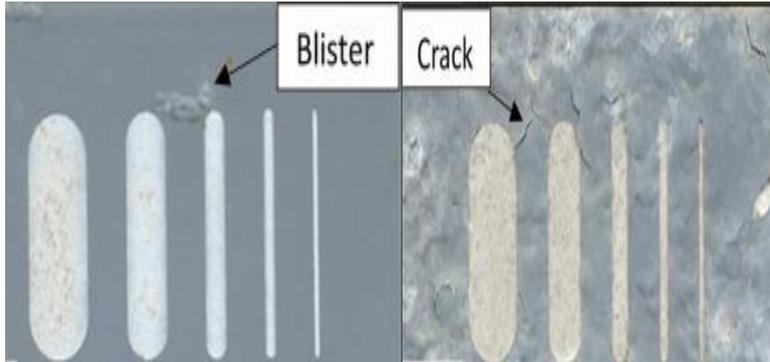
Coating menjadi salah satu metode untuk mencegah terjadinya korosi melalui 3 mekanisme berikut ini atau kombinasi dari dua tersebut diantaranya sebagai pemberi efek penghalang dimana mencegah terjadinya kontak antara media korosif dengan material logam, sebagai proteksi katodik dimana material *coating* bekerja seperti anoda korban, dan sebagai inhibitor (Bardal, 2003).

Ketika bekerja sebagai inhibitor, *coating* memiliki 3 mekanisme untuk bekerja melindungi substrat yaitu diantaranya pertama melalui penyebaran inhibitor terhadap larutan yang kemudian mengalami kontak dengan substrat. Kemudian mekanisme kedua melalui aplikasi secara langsung terhadap substrat melalui *metallic coating* dan *conversion coating*. Mekanisme terakhir yaitu melalui penggabungan ke dalam pelapisan komposit dimana inhibitor tertanam seperti suatu partikel dalam matriks polimer organik atau anorganik.

Ketika bekerja sebagai seperti anoda korban atau proteksi galvanik. Mekanisme yang terjadi mayoritas akibat adanya beda potensial antara partikel anoda dan substrat dibandingkan dengan reaksi antara anoda terhadap lingkungannya. Dalam kondisi tersebut, tujuan utamanya adalah menjaga stabilitas dari potensial agar tidak menyebabkan *overpotential* yang dapat merusak substrat.

Ketika bekerja sebagai *barrier* atau penghalang, *coating* bekerja baik dalam rangka mencegah penetrasi ion maupun penetrasi dalam bentuk fisik. Pencegahan kontak antara substrat dan elektrolit menyebabkan pembentukan sel reaksi korosi dapat dicegah. Peran sebagai penghalang harus didukung dengan daya adhesi yang baik antara substrat dan lapisan *coating*, ketebalan yang cukup, porositas rendah, sifat hidrofobik, dan laju degradasi yang rendah ketika terekspos lingkungan. Pada Gambar 2.23

menunjukkan beberapa contoh kondisi *coating* yang terdapat cacat berupa *blister* dan retak akibat proses aplikasi yang kurang baik (McMahon, dkk, 2019).



Gambar 2.23 Cacat yang terdapat pada *coating* akibat proses aplikasi yang kurang baik (McMahon, dkk, 2019)

2.3 Proteksi Katodik

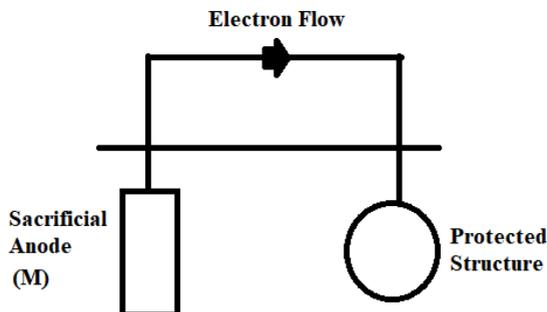
Suatu sistem proteksi katodik adalah sebuah metode yang digunakan untuk mengontrol korosi yang terjadi terhadap suatu permukaan logam dengan menjadikan logam tersebut sebagai katoda dari suatu sel elektrokimia. Secara sederhana metode proteksi katodik dilakukan dengan menghubungkan dengan kontak metalik antara logam yang akan diproteksi bertindak sebagai katoda dengan logam yang akan dikorbankan bertindak sebagai anoda yang akan memproteksi katoda. Sistem proteksi katodik digunakan untuk melakukan proteksi terhadap struktur pada berbagai kondisi lingkungan. Aplikasi umum terkait proteksi katodik yaitu pada pipa saluran minyak dan tangki penyimpanan air. Pada dasarnya proteksi katodik bekerja menggunakan dua prinsip dasar yaitu :

1. Dengan membuat kontak langsung antara logam yang akan dikorbankan sehingga bertindak sebagai anoda guna memproteksi katoda.

2. Dengan menyuplai arus searah (DC) terhadap sistem rangkaian proteksi katodik sehingga struktur menjadi terproteksi (Bahadori, 2014).

2.3.1 Proteksi Katodik Anoda Korban

Sistem proteksi katodik anoda korban pada prinsipnya bekerja dengan cara menciptakan sel elektrokimia galvanik dimana terdapat dua logam berbeda dihubungkan dengan kontak metalik dan terletak pada suatu media elektrolit sehingga timbul beda potensial antara kedua logam tersebut. Logam dengan nilai potensial lebih positif akan bertindak sebagai katoda sedangkan logam dengan nilai potensial lebih negatif akan bertindak sebagai anoda. Oleh karenanya selama reaksi elektrokimia terjadi logam yang bertindak sebagai anoda akan terkonsumsi sementara logam yang bertindak sebagai katoda akan terproteksi. Adapun kondisi spesifik saat akan melakukan aplikasi proteksi katodik menggunakan sistem anoda korban diantaranya ketika tidak terdapat sumber listrik, kebutuhan struktur yang diproteksi tidak luas, kebutuhan akan proteksi struktur yang tidak dilapisi *coating*, dan suplemen dari sistem proteksi arus tanding. Salah satu dari jenis metode proteksi katodik menggunakan sistem anoda korban ditunjukkan oleh Gambar 2.24 (Bahadori, 2014).



Gambar 2.24 Skema sistem proteksi katodik anoda korban (Ashworth, 1986)

Anoda yang mengalami konsumsi atau terkorosi selama berada pada suatu sistem proteksi katodik, nilai laju korosinya direpresentasikan dalam bentuk konstanta laju korosi yang dikalikan dengan jumlah kehilangan berat dalam satuan milligram, yang kemudian dibagi dengan luas anoda yang tercelup kedalam elektrolit dalam satuan cm^2 , durasi tercelup elektrolit dalam satuan jam, serta densitas anoda dalam satuan gr/cm^3 . Dimana persamaan tersebut dapat dituliskan sebagai berikut seperti pada (2.29) (Anggono, J, 2000).

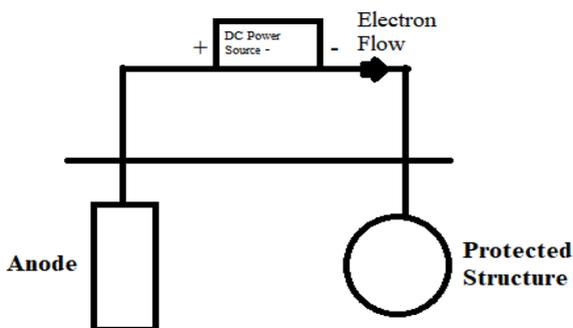
$$\text{Laju korosi} = \frac{K \times W}{D \times A \times T} \quad (2.29)$$

Proteksi katodik menggunakan sistem anoda korban memiliki baik kelebihan maupun kekurangan. Kelebihan sistem proteksi katodik anoda korban diantaranya tidak memerlukan sumber arus dari luar, pemasangan sederhana, perawatan mudah, dan biaya instalasi lebih rendah daripada system arus paksa. Kemudian untuk kekurangannya yaitu *driving voltage* lebih rendah daripada system arus paksa sehingga tidak bias memproteksi struktur yang relatif besar (Peabody, 2001).

2.3.2 Proteksi Katodik Arus Paksa

Pada sistem proteksi arus paksa, sumber arus listrik berasal dari luar dimana biasanya dilengkapi dengan penyearah arus (*rectifier*) dimana kutub negatif dihubungkan dengan struktur yang dilindungi sedangkan kutub positif dihubungkan dengan anoda. Arus yang terdapat pada sistem mengalir dari anoda melalui elektrolit menuju struktur yang diproteksi lalu kembali lagi ke *rectifier*. Oleh karenanya struktur tersebut menjadi terproteksi. Arus keluaran dapat diatur menggunakan *rectifier* sehingga dapat digunakan untuk memastikan struktur tersebut telah terproteksi. Bilamana keluaran arus diperbesar tentu laju konsumsi anoda akan tinggi sehingga pada sistem proteksi katodik arus paksa digunakan anoda yang memiliki laju konsumsi sangat rendah seperti platina atau grafit. Sistem proteksi ini pada umumnya digunakan untuk menerapkan proteksi terhadap struktur yang luas serta bisa

diaplikasikan pada struktur yang terlapisi *coating* maupun yang tidak terlapisi *coating*. Namun, disini lain sistem proteksi ini juga memiliki keterbatasan diantaranya biaya instalasi yang mahal dan berpotensi menimbulkan efek interferensi. Salah satu dari jenis metode proteksi katodik dimana menggunakan sistem arus paksa ditunjukkan oleh Gambar 2.25.



Gambar 2.25 Skema sistem proteksi katodik arus paksa
(Ashworth,1986)

Gambar 2.25 memberikan ilustrasi terkait penggunaan sumber daya eksternal untuk mensuplai arus proteksi terhadap struktur yang akan dilindungi. Sumber daya menyalurkan arus positif dari elektroda arus paksa melalui media korosif dan menuju ke struktur. Struktur kemudian potensialnya menjadi lebih rendah dan arus positif kembali melalui sirkuit menuju ke sumber daya. Dalam rangka memperoleh proteksi katodik menggunakan metode arus paksa maka elektroda dan struktur yang akan diproteksi harus berada pada media elektrolit dan dihubungkan melalui suatu sirkuit. Sumber daya yang digunakan biasanya berupa rectifier yang merubah AC menjadi DC. Pada umumnya keluaran DC akan berada pada rentang 15-100V dan 5-100A meskipun satuan 200V/200A tidak diketahui (Ashworth,1986).

Proteksi katodik menggunakan sistem arus paksa memiliki baik kelebihan maupun kekurangan Adapun kelebihan tersebut

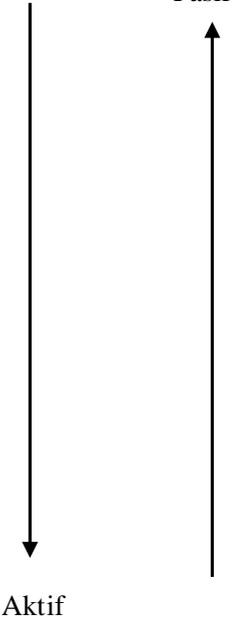
diantaranya dapat didesain untuk aplikasi yang memiliki tingkat fleksibilitas tinggi, dalam artian kebutuhan arus dapat diatur sedemikian rupa sesuai kebutuhan sehingga seringkali diaplikasikan untuk skala industry lingkup yang besar. Kemudian terkait kekurangannya yaitu memerlukan biaya instalasi yang tinggi dan ketergantungan terhadap adanya pasokan energi (*rectifier*) sehingga bila terdapat sedikit kerusakan dapat berakibat fatal serta berpotensi terjadi efek interferensi arus terhadap struktur yang ada disekitarnya (Peabody, 2001).

2.4 Potensial Elektrokimia

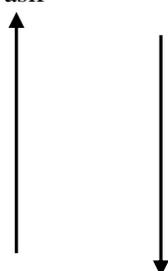
Pada dasarnya potensial logam yang terekspos oleh larutan mengandung sekitar satu gram berat atom dari ionnya yang diukur pada temperatur kosntan. Pada Tabel 2.1 menunjukkan nilai deret potensial elektrokimia (emf). Dalam rangka penyederhanaan, maka tiap potensial logam tersebut direferensikan terhadap potensial standa hidrogen yang bernilai nol.

Dalam aplikasi industri seorang insinyur lebih sering untuk menggunakan logam paduan dimana gabungan dari dua jenis atau lebih logam. Sehingga untuk menjawab kondisi tersebut terdapat deret galvanik yang representasinya lebih akurat daripada deret emf. Namun terkait pemahamannya tetap sama yaitu semakin diatas kedudukannya maka sifatnya akan semakin katodik atau pasif sedangkan disisi lain semakin dibawah kedudukannya maka sifatnya akan semakin anodik atau aktif seperti ditunjukkan pada Tabel 2.2 (Fontana, 1987).

Tabel 2.1 Deret emf potensial elektroda vs elektroda standar hidrogen pada 25°C 2 (Fontana, 1987)

Ion-Ion Logam	Potensial Elektroda vs SHE, Volt	Kecenderungan
Au-Au ⁺³	+1.498	
Pt-Pt ⁺²	+1.2	
Pd-Pd ⁺²	+0.987	
Ag-Ag ⁺	+0.799	
Hg-Hg ₂ ⁺	+0.788	
Cu-Cu ⁺²	+0.337	
H ₂ -H ⁺	0.000	
Pb-Pb ⁺²	-0.126	
Sn-Sn ⁺³	-0.136	
Ni-Ni ⁺²	-0.250	
Co-Co ⁺²	-0.277	
Cd-Cd ⁺²	-0.403	
Fe-Fe ⁺²	-0.440	
Cr-Cr ⁺³	-0.744	
Zn-Zn ⁺²	-0.763	
Al-Al ⁺³	-1.662	
Mg-Mg ⁺²	-2.363	
Na-Na ⁺	-2.714	
K-K ⁺	-2.714	

Tabel 2.2 Seri galvanik beberapa logam dan paduan pada air laut (Fontana, 1987)

Jenis Logam	Kecenderungan	
Platina	Pasif	
Emas		
Titanium		
Baja tahan karat 18Cr-8Ni		
Nikel		
Timbal		
Baja		
Seng		
Aluminium		
Magnesium		Aktif

2.5 Potensial Proteksi

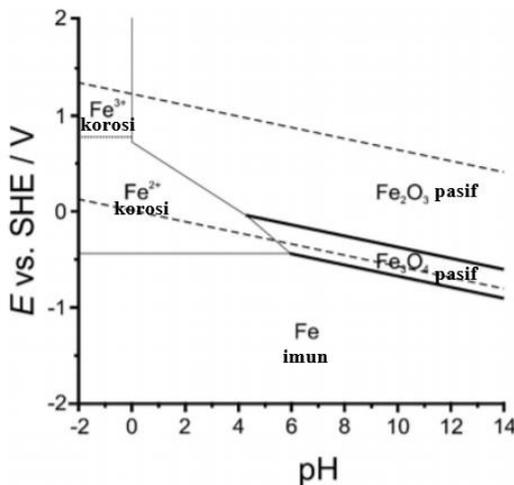
Kriteria potensial proteksi katodik sebesar -850 mV dahulu masih belum menjadi suatu ketentuan yang pasti. Kriteria tersebut seringkali berubah hingga pada akhirnya NACE merilis NACE SP 0169 tahun 2007 dimana berdasarkan standard tersebut terdapat 3 nilai kriteria potensial proteksi katodik. Kemudian untuk potensial proteksi sebesar -850 mV pertama kali diperkenalkan pada tahun 1993 oleh Robert J. Kuhn berdasarkan pengalamannya terkait instalasi proteksi katodik untuk pipa air di Amerika Serikat. Nilai dari -850 mV tersebut bergantung pada nilai pH pada lingkungan tempat aplikasi proteksi katodik dimana sesuai pada diagram porubaix berdasarkan persamaan Nerst terkait hubungan antara pH dan potensial proteksi katodik (Zaki, 2006).

Menurut dokumen standar DNV GL RP-B401 dimana pada umumnya nilai penerimaan potensial proteksi terhadap suatu struktur baja karbon dan baja paduan rendah yakni -0.8 V vs Ag/AgCl lingkungan air laut. Kemudian bilamana pada lingkungan anaerob potensial proteksi sekitar -0.9 V vs Ag/AgCl. Terkait dengan proteksi katodik berbasis anoda korban potensial proteksinya yaitu -0.90 – -1.05 V dan ketika masa pakainya sudah

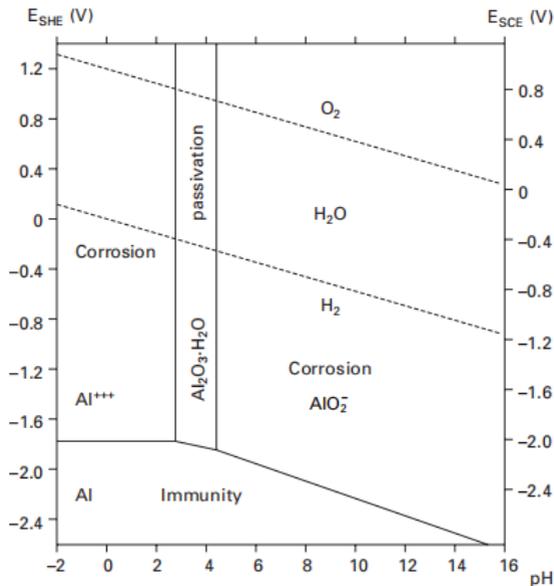
hamper habis maka potensial bisa lebih positif hingga menjadi -0.80 V. Suatu struktur dikatakan mengalami proteksi berlebih saat nilainya lebih negatif -1.15 V. Untuk anoda korban berbasis aluminium dan seng, nilai potensial proteksi berada pada rentang -0.80 – -1.10 V vs Ag/AgCl pada lingkungan air laut (DNV GL RP B-401, 2017).

2.6 Diagram Pourbaix

Diagram pourbaix merupakan suatu diagram yang menggambarkan fenomena dan hubungan antara potensial logam dan pH dimana lingkungan logam tersebut diekspos. Diagram tersebut memungkinkan untuk memetakan daerah dimana logam berada pada kondisi terkorosi, pasif, maupun imun. Salah satu kegunaan utama dari diagram ini adalah apabila terdapat suatu sistem proteksi katodik maupun anodik dengan keberadaan diagram ini dapat diketahui kinerja sistem proteksi tersebut dalam melindungi suatu struktur dimana diagram tersebut divisualisasikan seperti pada Gambar 2.26 dan 2.27 (Harsisto dkk, 2001).



Gambar 2.26 Diagram *pourbaix* Fe (Perry, 2019)



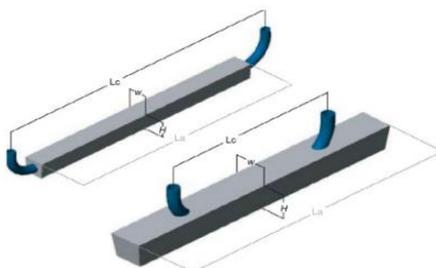
Gambar 2.27 Diagram *pourbaix* Al (Nisancioglu, 2007)

Berdasarkan diagram *pourbaix* pada dasarnya logam dapat dihindarkan dari serangan korosi pada suatu lingkungan tertentu dengan beberapa cara yaitu menurunkan potensial sistem menggunakan sumber arus searah (proteksi katodik), meningkatkan potensial sistem menggunakan sumber arus searah (proteksi anodic), dan menambahkan inhibitor yang bersifat basa untuk meningkatkan pH lingkungan (proteksi alkalisasi) (Harsisto dkk, 2001).

2.7 Anoda Korban

Pada dasarnya ketika terdapat dua logam terendam pada satu larutan yang sama maka keduanya biasanya akan menghasilkan nilai potensial yang berbeda dan bilamana kedua logam tersebut dihubungkan dengan kontak metalik maka akan ada kecenderungan untuk terjadi polarisasi dimana ion mengalir dari logam yang sifatnya lebih negatif (anoda) menuju logam yang

sifatnya lebih positif (katoda) dan untuk elektron akan mengalir dari katoda ke anoda melalui kontak metalik. Oleh karena itu katoda akan menjadi terproteksi namun disisi lain anoda akan terkonsumsi sehingga disebut anoda korban. Untuk dapat memproteksi suatu katoda, anoda harus memiliki nilai potensial yang lebih negatif daripada katoda. Persoalan berapa lama katoda bisa terproteksi, hal tersebut bergantung pada potensial proteksi yang dihasilkan dimana hal tersebut bergantung pada komposisi anoda dan kondisi lingkungannya.



Gambar 2.28 Anoda korban dengan inti baja (Singh,R ,2014)

Pada dasarnya terdapat beberapa istilah penting yang menjadi dasar pemahaman terkait anoda korban diantaranya potensial saat beroperasi, potensial proteksi, tegangan yang dihasilkan, kapasitas anoda, dan efisiensi anoda. Potensial saat beroperasi merupakan suatu potensial yang dihasilkan ketika anoda telah terangkai atau tersambung dengan katoda melalui suatu kontak langsung maupun melalui suatu konduktor. Disamping potensial saat beroperasi setiap anoda juga memiliki nilai potensial sebelum dihubungkan oleh suatu sirkuit dengan katoda. Kemudian terkait potensial proteksi didefinisikan sebagai suatu potensial dimana menunjukkan katoda terproteksi atau tidak mengalami korosi. Nilai dari suatu potensial proteksi ini berbeda-beda pada tiap jenis logam dan kondisi lingkungannya, pada Tabel 2.3 menunjukkan nilai potensial proteksi di lingkungan air laut. (Sherwood, 1994).

Tabel 2.3 Potensial proteksi dari logam di air laut (V vs Ag/AgCl/Air Laut) (Sherwood, 1994)

Material	Potensial Proteksi
Baja di lingkungan ada kandungan oksigen	-0.8
Baja di lingkungan tanpa kandungan oksigen	-0.9
Timbal	-0.55
Paduan tembaga	-0.45 hingga -0.60

Driving voltage yang dihasilkan merupakan selisih antara tegangan saat beroperasi dan potensial dari struktur yang terpolarisasi saat disambungkan. Secara sederhana didefinisikan sebagai selisih antara tegangan anoda saat beroperasi dan potensial proteksi yang dibutuhkan untuk memproteksi struktur tersebut. Kapasitas anoda merupakan total muatan yang dihasilkan oleh tiap unit massa dari anoda sebagai hasil dari reaksi elektrokimia. Hal ini biasanya diekspresikan dalam satuan jam/kg. Kemudian untuk kapasitas anoda secara teoritis dapat dihitung dengan menggunakan hukum faraday. Oleh karenanya, untuk 1 kg aluminium dapat mengakomodir sebesar 2981 Ah. Namun, dalam aplikasinya kapasitas praktek selalu kurang dari kapasitas teoritik di lapangan. Oleh karenanya berdasarkan perbedaan tersebut muncul istilah efisiensi anoda dimana perhitungannya yaitu dengan membandingkan nilai kapasitas teoritis dibagi kapasitas praktikal dan kemudian dikalikan 100% menurut Persamaan (2.30) dan (2.31) berikut.

$$\text{Kapasitas} = \frac{i \cdot t}{w} \quad (2.30)$$

$$\text{Efisiensi} = \frac{\text{kapasitas aktual}}{\text{kapasitas teoritis}} \times 100\% \quad (2.31)$$

Dalam aplikasinya untuk dunia industri anoda korban memiliki spesifikasi atau kriteria sifat yang harus dipenuhi supaya dapat menjalankan kegunaannya dengan maksimal diantaranya anoda korban harus menyediakan tegangan dorong yang cukup supaya bisa menghasilkan potensial proteksi yang cukup untuk memproteksi suatu struktur oleh karenanya anoda harus memiliki nilai potensial operasi lebih negatif daripada struktur yang akan diproteksi. Kemudian anoda korban harus memiliki keluaran arus yang stabil dalam artian harus tahan terhadap potensi polarisasi ketika arus mengalir dan karakteristik polarisasi harus dapat diprediksi. Material anoda harus memiliki kapasitas yang tinggi dalam artian saat berperan sebagai anoda, anoda mampu menghantarkan secara stabil dan mampu memenuhi kebutuhan struktur serta idealnya anoda korban tidak membentuk lapisan pasif saat terpapar suatu lingkungan. Terakhir terkait manufaktur anoda korban untuk produksi dengan jumlah besar terkait bentuk, ukuran, dan sifat mekaniknya sebaiknya mudah untuk dipraktikan dan ekonomis (Sherwood, 1994).

Proteksi katodik menggunakan sistem anoda korban paling sering dijumpai adalah digunakan untuk memproteksi baja karbon pada lingkungan alami (air, tanah, dan pasir). Pada dasarnya anoda korban memang harus lebih elektronegatif daripada struktur yang akan diproteksi sehingga hanya magnesium, aluminium, dan seng yang sering digunakan sebagai anoda korban. Pada penerapannya logam yang digunakan tidak bisa dalam keadaan murni, hal ini karena logam murni tidak mampu menyediakan kriteria yang telah dijelaskan sebelumnya sehingga harus ditambah dengan unsur paduan. Keberadaan unsur paduan ini adalah untuk meningkatkan performa dari anoda korban. Berikut pada Tabel 2.4 terdapat beberapa contoh paduan anoda korban, potensial, dan kapasitas arus maksimalnya (Sherwood, 1994).

Tabel 2.4 Potensial anoda dari beberapa paduan untuk proteksi katodik (Sherwood, 1994)

Paduan	Potensial	Kapasitas Arus Maksimum
Al-Zn-Hg	-1.0 hingga -1.5	2830
Al-Zn-Sn	-1.0 hingga -1.1	2600
Al-Zn-In	-1.0 hingga -1.15	2700
Zn-Al-Cd	-1.05	780
Mg-Mn	-1.7	1230
Mg-Al-Zn	-1.5	1230

2.7.1 Anoda Korban Aluminium

Anoda korban berbasis aluminium memiliki aspek lebih dibanding jenis anoda yang lain yaitu terkait kapasitas arusnya yang tinggi dimana besarnya mencapai tiga kali daripada seng. Pada umumnya jenis anoda aluminium terdiri dari tiga tipe yaitu Al-Zn-In, Al-Zn-Hg, dan Al-Zn-Sn. Untuk aplikasi pada lingkungan air laut, jenis anoda korban berbasis aluminium yang sering digunakan adalah jenis Al-Zn-In dan Al-Zn-Hg. Pada lingkungan air laut anoda aluminium memiliki efisiensi dan daya dorong arus lebih baik daripada seng namun berlaku sebaliknya bila di air tawar. Kemudian anoda ini tidak dapat diaplikasikan di tanah karena cenderung pasif. Perbedaan dari segi potensial dan kapasitas arus maksimum ketiga jenis anoda korban berbasis aluminium ditunjukkan pada Tabel 2.5 (Sherwood, 1994)

Tabel 2.5 Potensial anoda aluminium yang digunakan untuk proteksi katodik (Sherwood, 1994)

Paduan	Potensial (vs Ag/AgCl/Air Laut)	Kapasitas Arus Maksimum (Ah/kg)
Al-Zn-Hg	-1.0 hingga -1.5	2830
Al-Zn-Sn	-1.0 hingga -1.1	2600
Al-Zn-In	-1.0 hingga -1.15	2700

2.7.2 Anoda Korban Magnesium

Anoda korban magnesium memiliki sifat pasivasi yang lebih rendah daripada seng dan aluminium dan memiliki nilai *driving voltage* yang paling tinggi. Oleh karena karakteristik tersebut dan mempunyai kapasitas arus yang tinggi magnesium dirasa cocok untuk menjadi anoda korban yang diaplikasikan pada daerah dengan resistivitas tinggi 1500 – 6000 ohm.cm seperti di tanah untuk proteksi sistem perpipaan. Anoda aluminium tidak dapat digunakan pada lingkungan air laut karena akan merusak sistem pelapisan pada baja ataupun aluminium. Kandungan kapasitas arus dari magnesium murni nilainya lebih rendah daripada kapasitas teoritisnya. Hal tersebut dipengaruhi oleh kandungan pengotor yang ada di dalamnya, kondisi korosinya berupa *uniform* atau *pitting*, dan elektrolit.

Anoda korban magnesium biasanya terdiri dari penambahan Al, Zn, dan Mn. Kandungan konten dari Ni, Fe, dan Cu harus dijaga agar sangat rendah karena menyebabkan fenomena *self corrosion*. Kandungan Ni tidak boleh diatas 0.001% karena akan menurunkan karakteristik anoda. Terkait pengaruh dari Cu masih belum jelas. Cu menyebabkan peningkatan fenomena *self corrosion* akan tetapi dengan komposisi diatas 0.05% tidak menyebabkan hal tersebut. Jika kandungan Mn lebih dari 0.3% dan kandungan Fe sekitar 0.01% hal tersebut tidak akan menyebabkan fenomena *self corrosion*. Hal tersebut dikarenakan penambahan Mn menyebabkan terbentuk presipitat Fe yang terbentuk ketika proses solidifikasi terlapsi oleh Mn. Penambahan Zn mengarah kepada terjadinya korosi yang merata. Disamping itu, penambahan Zn dapat menekan pengaruh dari pengotor lainnya. Kemudian total kandungan dari Sb, As, Pb, Cr, dan Ni tidak boleh melebihi 0.1% dan kandungan dari Cd, Hg, dan Se harus kurang dari 0.01%. Salah satu jenis anoda aluminium yang umum dipakai adalah AZ63. Anoda korban magnesium digunakan pada kasus dimana resistivitas elektrolit dan densitas arus proteksi tinggi. Objek yang diproteksi seperti baja, strutur pada air tawar, tangki, dan *boiler* (Bohnes, H., & Franke, G, 1997).

Tabel 2.6 Potensial anoda magnesium yang digunakan untuk proteksi katodik (Sherwood, 1994)

Paduan	Potensial (vs Ag/AgCl/Air Laut)	Kapasitas Arus Maksimum (Ah/kg)
Mg-Mn No.1	-1.7	1230
Mg-Mn No.2	-1.7	1230
Mg-Al-Zn	-1.5	1230

2.7.3 Anoda Korban Seng

Anoda korban seng sudah digunakan untuk memproteksi pada lingkungan air laut sejak tahun 1824. Pada mulanya penggunaan material seng tersedia dari aplikasi pelapisan *hot dip galvanizing*, namun hal tersebut dirasa kurang sesuai karena memiliki kecenderungan menjadi pasif. Pasivasi tidak terjadi dengan tingkat kemurnian seng yang tinggi. Anoda seng dengan *grade* tinggi terdiri atas 99.995% Zn dan kurang dari 0.0014%Fe tanpa penambahan lain, terspesifikasi dari *German Navy*. Seng dengan *grade* tinggi mayoritas memiliki butir yang kasar, struktur kristal *columnar*, dan kecenderungan untuk terkorosi secara tidak merata. Penambahan unsur paduan hingga 0.15% Cd dan 0.5% Al berfungsi sebagai penghalus butir dan mencegah dampak merugikan dari keberadaan kandungan Fe hingga 0.005%. Anoda korban seng yang digunakan pada lingkungan elektrolit kaya garam tidak memerlukan penambahan aktivasi unsur. Penambahan unsur Hg digunakan sebagai pelapis untuk mencegah difusi minyak pada tangka namun tidak secara signifikan berdampak sesuai. Hal tersebut menjadikan penambahan Hg pada anoda korban seng tidak lagi digunakan. Laju korosi dari anoda korban seng relatif rendah dimana nilainya lebih tinggi pada lingkungan air laut daripada air tawar. Disamping itu pada kondisi air mengalir, laju korosi meningkat lebih signifikan, akan tetapi anoda korban seng tidak spesifik digunakan untuk air hangat karena kecenderungannya untuk menjadi pasif.

Untuk proteksi eksternal dari perpipaan dalam air laut anoda korban seng yang digunakan berada dalam bentuk menyerupai

gelang dimana pemasangannya menggunakan metode pengelasan terhadap pipa. Pada kondisi dimana tingkat salinitas yang tinggi pada elektrolit seperti pada lokasi pengeboran minyak atau pertambangan, penggunaan anoda seng pada lingkungan air sangat terbatas karena kecenderungannya untuk menjadi pasif. Kemudian anoda korban seng juga terbatas pada aplikasi lingkungan tanah untuk resistivitas kurang dari 10 m. Dalam rangka upaya mengurangi kecenderungan pasivasi dan mengurangi resistansi tanah, anoda korban seng harus dibungkus dengan material *backfill* (Bohnes, H., & Franke, G, 1997).

Tabel 2.7 Potensial anoda seng yang digunakan untuk proteksi katodik (Sherwood, 1994)

Jenis	Potensial (vs Ag/AgCl/Air Laut)	Kapasitas Arus Maksimum (Ah/kg)
ASTM B 418-88 Tipe I	-1.05	780
ASTM B 418-88 Tipe I	-1.05	780
US Mil <i>Spec A</i> 18001 J	-1.05	780
<i>DnV Recomm for elevated temp</i>	-1.05	780

2.8 Pengaruh Unsur Paduan terhadap Anoda Korban Aluminium

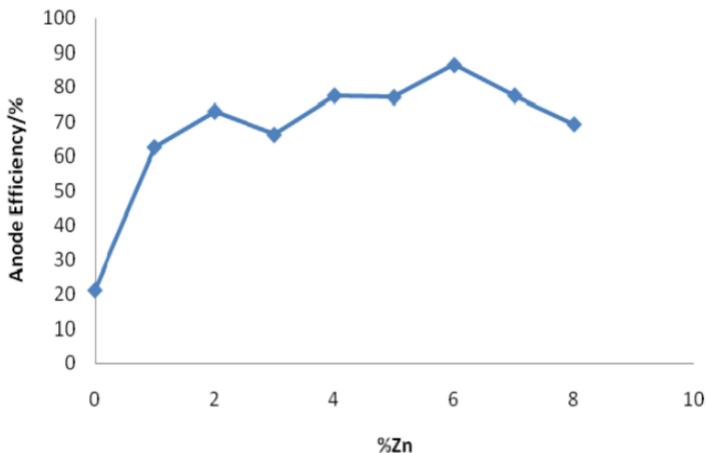
Unsur paduan ditambahkan kedalam anoda korban dengan tujuan untuk meningkatkan performa anoda korban. Namun hal yang penting yaitu untuk mengontrol kadar pengotor pada komposisi akhir anoda oleh sebab hal itu dapat mempengaruhi performa anoda. Oleh sebab itu, penting untuk melakukan kontrol bahan baku yang digunakan dan juga proses manufaktur dalam pembuatan anoda korban.

Pada umumnya formulasi komposisi anoda telah ditetapkan dalam standar dan dipatenkan dimana melalui diyakini dapat menghasilkan anoda korban yang dapat bekerja secara efektif. Namun bilamana berbicara komposisi sangatlah jarang dijelaskan terkait tujuan dari penambahan unsur paduan tersebut. Aluminium pada keadaan murni cenderung untuk membentuk lapisan pasif sehingga menjadi tahan terhadap korosi dan tidak dapat digunakan sebagai anoda korban untuk memproteksi baja. Adanya penambahan sedikit Hg, In, atau Sn berpengaruh terhadap menurunkan potensial aluminium menjadi lebih negatif dimana unsur paduan tersebut disebut sebagai aktivator (*depassivator*). Kemudian penambahan komposisi Zn hingga 5% menurunkan potensial operasi anoda, namun bilamana lebih dari batas tersebut tidak memiliki efek signifikan. Disisi lain dibawah penambahan 0.9% Zn hanya sedikit memiliki pengaruh terhadap anoda aluminium. Penambahan Zn dan Hg menghasilkan nilai kapasitas terbaik saat berada pada lingkungan air laut. Penggunaan anoda aluminium jenis paduan Al-Zn-In menghasilkan nilai 20% lebih tinggi terhadap *driving voltage* dan kemungkinan tingginya arus keluaran. Pada dasarnya tiap paduan tersebut memang memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing sebagai contoh keberadaan unsur Hg pada anoda korban tersebut memiliki pengaruh yang berbahaya terhadap lingkungan karena sifatnya beracun (Sherwood, 1994).

2.8.1 Pengaruh Zn

Pada awalnya efisiensi paduan Al-Zn menunjukkan nilai yang rendah diakibatkan karena terbentuknya lapisan pasif stabil pada permukaan. Akan tetapi setelah waktu ekspos dilanjutkan berpengaruh terhadap rusaknya lapisan pasif stabil tersebut sehingga tidak dapat mencegah terjadinya korosi pada paduan tersebut. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi tersebut dikarenakan terbentuknya fasa kedua yang bertindak sebagai *depassivator* terhadap aluminium. Partikel fasa kedua tersebut ditemukan dalam bentuk paduan Al-Zn berupa fase beta. Fasa

partikel ini yang kemudian menginisiasi terjadinya kerusakan pada lapisan pasif Al_2O_3 yang mulanya terbentuk pada permukaan aluminium sehingga kemudian efisiensi paduan tersebut meningkat dan menurunnya ketahanan terhadap korosi dari paduan tersebut. Nilai efisiensi tertinggi didapatkan pada komposisi Al-6%Zn (Muazu, 2011). Nilai efisiensi tersebut terkapitulasi seperti pada Gambar 2.29 berikut.



Gambar 2.29 Variasi efisiensi anoda terhadap penambahan seng (Muazu, 2011)

2.8.2 Pengaruh In

Studi terkait performa elektrokimia dari paduan Al-Zn-In menggunakan metode aging dan solution treatment untuk mengubah ukuran, morfologi dan distribusi dari presipitat. Hasil menunjukkan bahwa anoda dengan presipitat berbentuk bola di matriksnya memiliki efisiensi arus tinggi, sedangkan presipitat yang menyerupai batang lebih mudah terkorosi sepanjang batas butir yang menjadikan efisiensi arus rendah. Pada penelitian tersebut menggunakan beberapa paduan diantaranya T12 (diberikan perlakuan *aging* pada 120°C selama 24 jam), T16 (diberikan perlakuan *aging* pada 120°C selama 24 jam dan

dilakukan *aging* kembali pada 160°C selama 30 jam, T25 (diberikan perlakuan *aging* pada 120°C selama 24 jam dan dilakukan *aging* kembali pada 250°C selama 30 jam), dan T30 (diberikan perlakuan *aging* pada 120°C selama 24 jam dan dilakukan *aging* kembali pada 300°C selama 30 jam). Pada Tabel 2.8 berikut terakumulasi performa elektrokimia dari beberapa paduan tersebut, sedangkan pada Gambar 2.30 merupakan kondisi makro korosinya setelah dicelup pada air laut buatan selama 10 hari. (Junguang He, 2011).

Tabel 2.8 Performa elektrokimia paduan Al-Zn-In dengan variasi perlakuan panas (Junguang He, 2011)

Sampel	OCP (V vs SCE)	Kapasitas (A h kg ⁻¹)	Efisiensi (%)
T12	-0.8960	2615	91.3
T16	-0.8915	2434	84.9
T25	-0.8990	2515	87.8
T30	-1.0832	2746	95.8



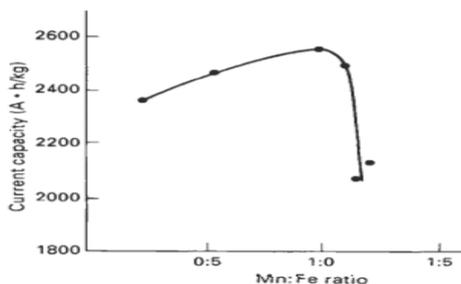
Gambar 2.30 Kondisi makrostruktur sampel (Junguang He, 2011).

Penambahan komposisi indium memiliki pengaruh yang signifikan terhadap reaktivitas anoda korban berbasis aluminium di lingkungan air laut alami sehingga menjadikan anoda korban memiliki efisiensi yang lebih baik saat aplikasi proteksi katodik pada instalasi struktur yang terendam. Hasil tersebut diperoleh menggunakan kurva tafel (Zazoua, 2007).

Sebuah penelitian mengembangkan riset tentang anoda paduan aluminium dengan penambahan indium yang memiliki komposisi (Al + 5% Zn + 0.03% In) dan menghasilkan efisiensi anoda yang tinggi yaitu 80%. Ketika indium telah larut, hal tersebut mengaktivasi paduan aluminium. Peneliti juga menemukan bahwa keberadaan ion klorida di larutan memiliki peranan penting agar indium dapat mengaktivasi paduan aluminium (Munoz, 2002).

2.8.3 Pengaruh Fe

Pada setiap jenis umum dari anoda korban keberadaan dari unsur besi dianggap sebagai sesuatu yang harus dihilangkan atau setidaknya ditekan seminim mungkin. Hal ini karena keberadaan unsur besi akan berpengaruh pada menurunnya kapasitas dari anoda. Lebih lanjut lagi keberadaan dari besi akan membuat potensial dari anoda lebih positif sehingga sehingga potensial saat beroperasi terbatas dan mengarah ke pasivasi. Oleh karena gaya dorong yang semula tersedia pada anoda menurun atau bahkan sepenuhnya rusak. Besi yang terkandung pada anoda korban akan membentuk fasa kedua (*insoluble*) pada paduan sehingga bertindak sebagai katoda. Pada anoda korban berbasis aluminium untuk meminimalisir efek dari keberadaan besi dalam paduan maka dilakukan penambahan mangan. Gambar 2.31 berikut merupakan Fe/Mn ratio terkait pengaruhnya terhadap anoda aluminium (Sherwood, 1998).



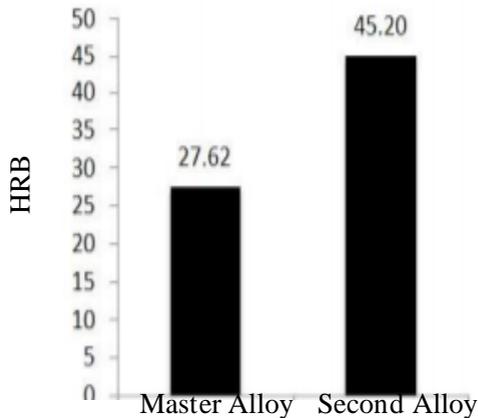
Gambar 2.31 Efek perbandingan Mn/Fe terhadap anoda paduan Al-Zn-Mn-In (Sherwood, 1998)

Dengan seiring bertambahnya kandungan dari besi, baik potensial saat operasi maupun potensial saat belum beroperasi akan naik menjadi lebih positif. Disamping itu nilai dari kapasitas aktual dan efisiensi arus juga turun dengan penambahan besi melebihi komposisi 0.1wt%. Oleh karena itu performa elektrokimia dari anoda menjadi semakin buruk. Disisi lain, FeAl_3 dan Fe_2SiAl_6 bertindak sebagai fasa presipitasi katodik dimana meningkatkan kecenderungan terjadi evolusi hidrogen dengan paduan aluminium sebagai akibat dari *low hydrogen over-potential* dan beda potensial dengan matriks. Hal ini mengakibatkan paduan aluminium tidak seragam (Shusen, 2014).

2.8.4 Pengaruh Cu

Pengaruh penambahan tembaga ke suatu paduan aluminium berpengaruh terhadap efek kemampuan melarutkan dan penguatan melalui metode aging yang berpengaruh terhadap karakteristik paduan aluminium. Disamping itu juga berpengaruh terhadap sifat mampu cor dan ketahanan terhadap *stress corrosion*. Sifatnya yang beracun untuk mikroorganisme membuatnya baik untuk paduan aluminium yang diaplikasikan di lingkungan air laut karena mikroorganisme diketahui dapat mempengaruhi potensial dari logam (Davis, 1999).

Penambahan komposisi Cu berpengaruh terhadap penurunan temperatur solidifikasi. Keberadaan Cu menyebabkan meningkatnya zona *mushy*, pembentukan dendrite, dan segregasi butir. Disamping itu juga meningkatkan nilai kekerasannya melalui proses pengerasan-presipitat. Dimana penambahan Cu hingga 8.46% (*second alloy*) memiliki nilai kekerasan lebih tinggi daripada komposisi Cu 3.5% (*master alloy*) setelah proses tersebut seperti pada Gambar 2.32 berikut (Ashrafi, dkk, 2013).



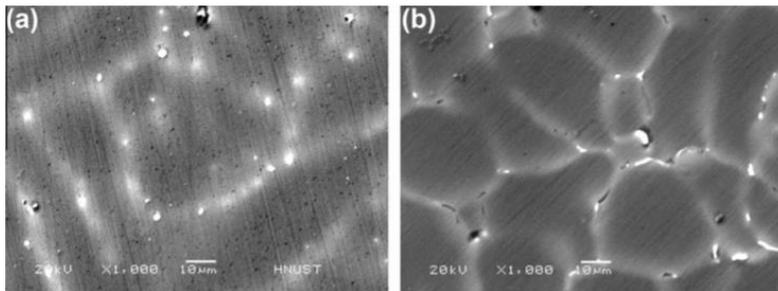
Gambar 2.32 Perbandingan kekerasan setelah penambahan Cu (Ashrafi, dkk, 2013)

2.8.5 Pengaruh Si

Studi pengaruh penambahan silikon terhadap perilaku dari anoda korban Al-5Zn-0.03In-1Mg-0.05Ti (wt%). Adanya penurunan densitas, koefisien ekspansi termal, peningkatan kekerasan, temperatur kering, sifat mekanik, ketahanan aus, dan mampu tuang menjadi akibat penambahan Si terhadap paduan aluminium menjadi dasar utama penelitian ini. Hasil penelitian mengarah pada struktur mikro, karakteristik elektrokimia, dan keseragaman korosi meningkat secara signifikan setelah penambahan 0.1 wt % Si. Pada Tabel 2.9 berikut terakumulasi performa elektrokimia dari paduan tanpa penambahan Si dan 0.1 Si. Kemudian pada Gambar 2.33 merupakan hasil pengujian SEM terhadap kedua paduan tersebut (Jiuba Wen , 2011).

Tabel 2.9 Performa elektrokimia paduan (Jiuba Wen, 2011)

Paduan	OCP (V vs SCE)	CCP (V vs SCE)	Kapasitas (A h kg ⁻¹)	Efisiensi (%)
I (0 Si)	-1.223	-1.079- 1.089	2406	84.0
II (0.1 Si)	-1.0730	-1.063- 1.071	2701	94.3



Gambar 2.33 Hasil pengujian SEM pada (a) tanpa penambahan Si (b) penambahan 0.1 Si (Jiuba Wen , 2011)

2.8.6 Pengaruh Ni

Keberadaan nikel pada suatu anoda aluminium menyebabkan peningkatan karakteristik mekaniknya yaitu berupa ketahanan dalam mempertahankan nilai kekerasan pada temperatur tinggi khususnya paduan yang dibuat melalui pengecoran maupun proses *forging*. Karakteristik tersebut berada pada kondisi optimum ketika terdapat distribusi yang merata dari paduan nikel-aluminide Al₃Ni, lebih lanjut jika penambahannya hingga lebih dari jumlah eutektiknya (Rajesh, 2014).

2.8.7 Pengaruh Ti

Pada anoda aluminium titanium memiliki peran yang cukup penting dimana penambahan unsur tersebut mencegah atau mengatasi terjadinya fenomena penggetasan hidrogen hanya dengan sedikit penambahan. Namun, belum terdefinisi secara jelas

peran titanium dalam pencegahan tersebut atau hanya sebatas menghaluskan butir dan meningkatkan luasan daerah batas butir untuk menghilangkan efek penggetasan (Sherwood, 1994).

2.8.8 Pengaruh Sn

Keberadaan timah berperan dalam penurunan ketahanan lapisan oksida film pada paduan Al-Sn. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kapasitas anoda bergantung pada variasi komposisi timah pada anoda korban berbasis aluminium. Terdapat beberapa perbedaan sudut pandang terkait pengaruh dari timah, namun secara umum telah menerima bahwa penambahan timah pada kondisi Sn⁴⁺ memiliki pengaruh terhadap peningkatan sifat proteksi katodiknya. Kondisi yang jelas menunjukkan bahwa penurunan energi bebas permukaan terjadi dengan adanya penambahan timah ke paduan (Al + 5% Zn) dan setelah pemberian perlakuan panas adalah penyebab terjadinya peningkatan sifat proteksi katodik dari paduan tersebut (Keir, 1972).

Anoda korban berbasis aluminium dengan penambahan 0.1% Sn terserang korosi lokal yang lebih rendah oleh karena distribusi presipitat timah yang terdapat dari matriks anoda. Perhitungan efisiensi dari anoda korban berbasis aluminium dengan komposisi penambahan timah sebesar 0%, 0.01%, 0.05%, dan 0.1% menunjukkan hasil 2713 A-hr/Kg, 2775 A-hr/Kg, 2684 A-hr/Kg and 2589 A-hr/Kg berurutan. Spesifikasi pengujian berdasarkan standar NACE dan DNV menunjukkan bahwa anoda aluminium harus memiliki kapasitas arus antara 2300 and 2700 A-hr/Kg. Berdasarkan penelitian tersebut anoda korban dengan komposisi penambahan timah 0.05% dan 0.1% memenuhi rentang standar tersebut. Hal ini mengindikasikan bahwa serangan lokal terhadap anoda korban berbasis paduan aluminium dengan sedikit penambahan timah mendasari rendahnya efisiensi anoda. Seiring dengan penambahan komposisi timah, korosi yang terjadi akan semakin merata yang mungkin disebabkan karena distribusi dari presipitat timah yang memaksa degradasi terjadi secara merata terhadap jaringan lapisan film pasif pada permukaan anoda korban

berbasis aluminium (Umoru, 2007). Distribusi presipitat timah seperti pada Gambar 2.34 berikut.



Gambar 2.34 Struktur mikro setelah adanya distribusi presipitat timah dengan penambahan 0.1 Sn (Umoru, 2007)

2.8.9 Pengaruh Pengotor

Keberadaan unsur pengotor yang memiliki kecenderungan susah untuk larut dan cenderung untuk membentuk senyawa intermetalik sehingga menjadi katoda. Keberadaannya akan berakibat pada kapasitas anoda yang kemudian menurun. Disamping itu, keberadaan material katodik akan membuat potensial operasi anoda menjadi semakin negatif sehingga mengarah ke kondisi pasif.

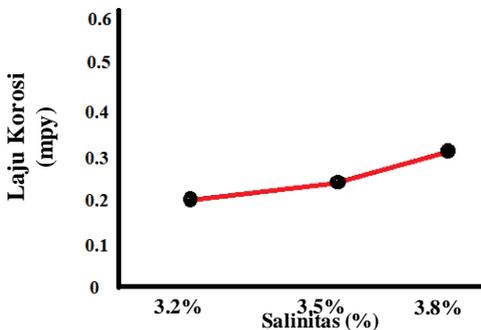
2.9 Korosi Pada Air Laut

Dalam menentukan kadungan suatu unsur atau senyawa dalam air laut maka cari yang umum dilakukan adalah dengan menentukan salinitasnya, salinitas didefinisikan sebagai berat keseluruhan garam non organik dalam 1 kg air laut bilamana unsur bromida dan iodida digantikan dengan jumlah yang sesuai oleh unsur klorida dan seluruh unsur karbonat digantikan dengan jumlah unsur oksida yang sesuai. Salinitas air laut dinyatakan dengan satuan per seribu dimana nilainya bervariasi mulai dari 32.5 hingga 37 (Juliana, 1999). Keberadaan media korosif adalah salah satu faktor utama penyebab korosi dimana salah satunya adalah air

laut. Beberapa faktor yang mempengaruhi korosi pada media air laut :

2.9.1 Salinitas dan Komposisi

Pada lautan luas (seperti samudera Atlantic dan Pasific) memiliki salinitas antara 32 sampai 37,5 gram garam terlarut per liter. Pada umumnya korosi pada air laut disebabkan adanya ion Klorida (Cl^-), Yaitu sekitar 19 gram/liter ion klorida pada Natrium Klorida dan Magnesium klorida (Vargel, 2004). Ion Klorida sendiri cenderung meyebabkan pecah lapisan pasif pada logam seperti pada baja tahan karat dan aluminium. Cara kerja ion klorida ini adalah ion Cl^- melakukan penetrasi melalui lapisan film pasif, kemudian pitting akan terbentuk pada daerah anodik, sehingga korosi berlangsung dengan sendirinya atau disebut autokatalitik (L. Laque, 1975). Hal tersebut menyebabkan meningkatnya nilai laju korosi seiring dengan meningkatnya salinitas seperti pada Gambar 2.35.



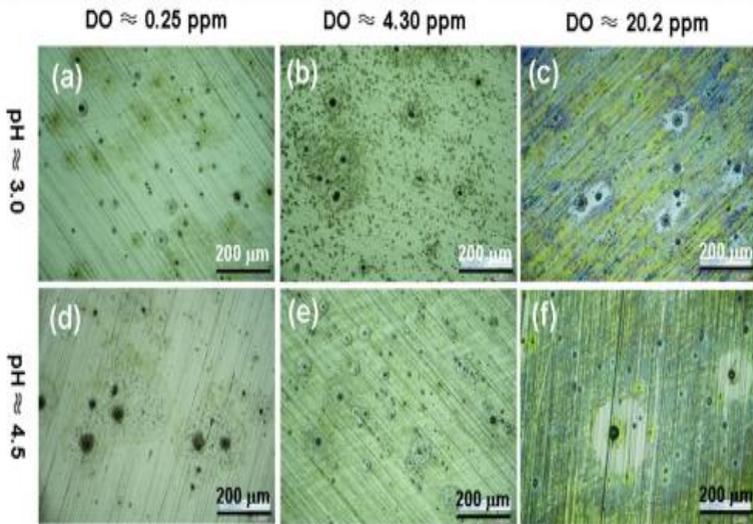
Gambar 2.35 Pengaruh salinitas terhadap laju korosi (Nova, 2012)

2.9.2 Kandungan Oksigen

Air laut mengandung 6-8 mg/liter (ppm) oksigen terlarut. Kandungan oksigen berbeda-beda tergantung dari kedalaman lautnya. Peran oksigen terhadap tahan korosi Aluminium sama antara air laut maupun air tawar. Keberadaannya mempercepat laju korosi dengan cara mendepolarisasikan katoda dan berkontribusi

pada pembentukan lapisan oksida untuk melindungi logam (Christian,2004).

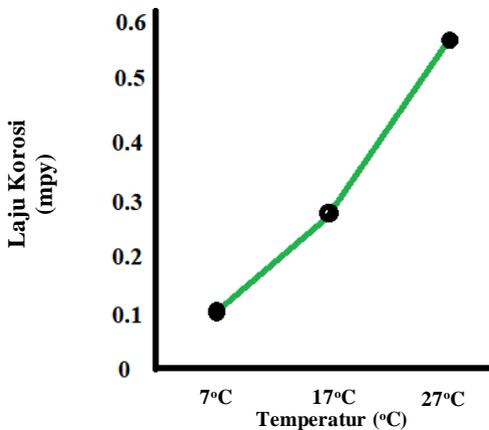
Pada konsentrasi dari oksigen terlarut yang rendah menunjukkan fenomena morfologi korosi terlokalisasi seperti pada Gambar 2.36 berikut dimana pada baja X80 di lingkungan pH berkisar 3 dan 4.5 menunjukkan jumlah dan ukuran *pitting* yang dipengaruhi oleh pH bukan konsentrasi oksigen terlarut. Namun, dalam lingkungan pH yang sama, adanya peningkatan oksigen terlarut akan mengakibatkan fenomena korosi yang terjadi menjadi semakin parah. Pada gambar (a) merupakan fenomena korosi pada pH =3 dan DO = 0.25 ppm dimana terdapat *pitting* dengan ukuran yang kecil namun tersebar. Pada gambar (b) dan (c) tidak menunjukkan signifikansi perubahan ukuran dan jumlah *pitting*. Kemudian pada kondisi pH = 4.5 dan DO = 0.25 ppm terjadi peningkatan ukuran *pitting*, begitupun pada gambar (f). Sedangkan gambar (e) menunjukkan anomaly ukuran *pitting* (Wang, dkk, 2019).



Gambar 2.36 Morfologi korosi baja X80 yang dipengaruhi pH dan oksigen terlarut (Wang, dkk, 2019)

2.9.3 Temperatur

Ketahanan korosi pada laut tropis lebih rendah dari pada laut arktik. Hal ini disebabkan karena meningkatnya temperatur sehingga korosi melambat akibat kandungan oksigen menjadi berkurang, aktivitas biologis meningkat dan adanya pengendapan kalsium karbonat seiring meningkatnya temperatur sehingga membentuk suatu lapisan pelindung. (Christian,2004). Namun, pada baja umumnya peningkatan temperatur menyebabkan terjadinya peningkatan laju korosi dan sebanding dengan kenaikan nilai salinitas air lautnya (Nova, 2012).



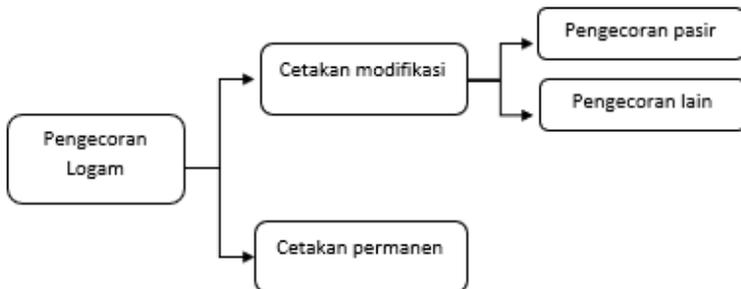
Gambar 2.37 Pengaruh temperature air laut terhadap laju korosi (Nova, 2012)

2.9.4 pH

pH di lokasi yang mendekati permukaan air laut memiliki nilai yang sangat stabil yaitu pada sekitar 8,2, hal ini tergantung pada aktivitas plankton dan alga laut pada daerah tersebut serta juga bergantung pada kedalaman. Nilai pH yang stabil menyebabkan terbentuknya lapisan oksida pada aluminium. Hal ini kemudian pada akhirnya menyebabkan ketahanan korosi logam aluminium menjadi baik di air laut (Christian,2004).

2.10 Pengecoran

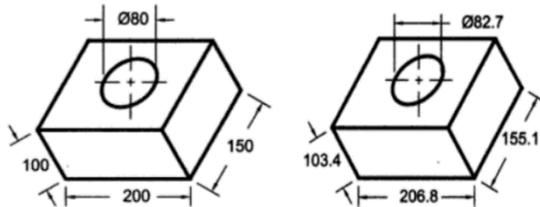
Pengecoran logam adalah salah satu metode pembentukan logam yang unik dimana hal ini didasari atas proses pembuatan cetakan dan penuangan logam cair sehingga mampu untuk digunakan dalam produksi komponen dengan geometri yang kompleks dengan ukuran yang kecil hingga sangat besar. Berdasarkan statistik diperkirakan bahwa 90% proses manufaktur produk logam dalam dunia industri menggunakan metode pengecoran dimana proses tersebut terdiri dari berbagai macam metode diantaranya pengecoran pasir, pengecoran dengan cetakan permanen, pengecoran dengan cetakan yang vakum, *investment casting*, pengecoran dengan cetakan yang mampu menguap, dan pengecoran sentrifugal. Proses manufaktur menggunakan metode pengecoran memiliki beberapa kelebihan diantaranya metodenya mudah diterapkan dan bentuk akhir dari produk bisa semirip mungkin dengan produk utamanya, tampilan yang optimal karena tidak memerlukan sambungan, dapat menyesuaikan dengan mudah antara bentuk dengan kegunaannya, dan dapat membentuk produk dengan geometri yang rumit (*ASM Handbook Vol. 15, 1988*).



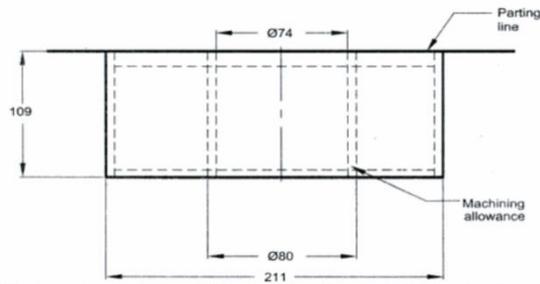
Gambar 2.38 Skema sederhana dasar pengecoran logam
(Groover, 2010)

2.11 *Pattern*

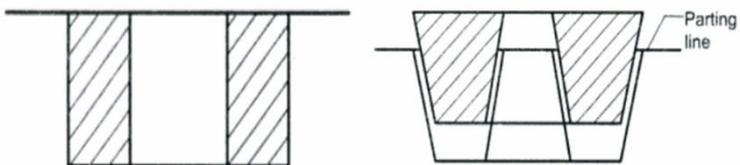
Pattern didefinisikan sebagai suatu bentuk tiruan dari produk yang akan dibuat menggunakan metode pengecoran dan ditambahkan beberapa modifikasi berupa *allowance* pada dimensi, penambahan inti, dan penghilangan bagian sulit yang tidak dapat dihasilkan dengan metode pengecoran. Pada umumnya terdapat 3 jenis *allowance* yang sering digunakan dalam proses pengecoran pasir yaitu *shrinkage*, *machining*, dan *draft*. *Shrinkage Allowance* ditambahkan guna mengantisipasi terjadinya penyusutan oleh logam saat solidifikasi baik berupa penyusutan cair maupun padat. Penyusutan cair yaitu ketika logam mengalami perubahan wujud dari cair menjadi padat sedangkan penyusutan padat yaitu ketika logam mengalami penurunan temperatur saat sudah dalam kondisi padat. Pada dasarnya tiap logam memiliki nilai *shrinkage allowance* masing-masing dimana untuk logam berbasis aluminium memiliki nilai 13mm/m. Kemudian besaran nilai tersebut dikalikan oleh tiap dimensi yang ada pada *pattern*. *Machining allowance* digunakan agar ketika memberikan pengerjaan lanjut terhadap produk hasil pengecoran dimensi yang dihasilkan dapat tetap sesuai dengan yang direncanakan disamping itu pengerjaan lanjut atau *machining* memang perlu untuk dilakukan karena produk hasil pengecoran seringkali memiliki permukaan yang tidak rata sesuai target dimensinya. Pada dasarnya penambahan nilai *machining allowance* terbagi menjadi 3 jenis yaitu untuk besi cor, baja cor, dan *non-ferrous* dimana penambahan dimensi diterapkan baik pada daerah inti, tepi, maupun permukaan pada *pattern*. Pada bagian permukaan *non-ferrous* sebesar 1.5 mm. Setelah melakukan perhitungan kedua *allowance* tersebut supaya memudahkan dalam pengambilan *pattern* dan tidak merusak rongga cetak pasir maka perlu untuk ditambahkan *draft allowance* pada *pattern* tersebut. Nilai dari *draft* yang ditambahkan baik pada bagian eksternal maupun internal bergantung pada jenis material dan dimensi ketinggiannya, pada material logam dan plastic untuk dimensi hingga 20 mm menggunakan sudut eksternal 1.5° dan internal 3°(Rao, 2013).



Gambar 2.39 Ilustrasi efek penambahan *shrinkage allowance* terhadap dimensi *pattern* untuk pengecoran aluminium (Rao, 2013)



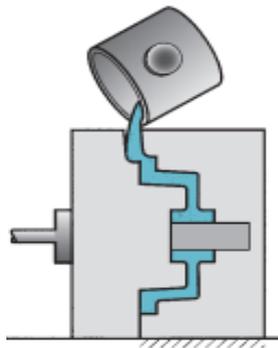
Gambar 2.40 Ilustrasi efek penambahan *machining allowance* terhadap dimensi *pattern* untuk pengecoran aluminium (Rao, 2013)



Gambar 2.41 Ilustrasi efek penambahan *draft allowance* terhadap dimensi *pattern* untuk pengecoran aluminium (Rao, 2013)

2.12 Cetakan Permanen

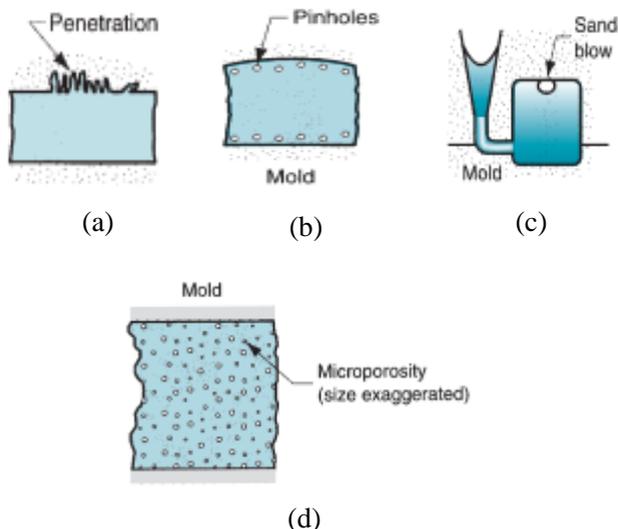
Cetakan permanen yang digunakan biasanya berupa baja atau besi cor, penggunaan cetakan permanen diharapkan supaya mempermudah untuk menghasilkan dimensi dan permukaan yang cukup baik dimana ilustrasinya seperti pada Gambar 2.42. Pada umumnya logam yang dicor menggunakan cetakan permanen diantaranya aluminium, magnesium, paduan tembaga, dan besi cor. Metode penerapan pengecoran menggunakan cetakan permanen ini meliputi pemanasan cetakan, pemberian pelapis pada cetakan untuk mempermudah mengambil hasil pengecoran, dan kemudian menuangkan logam yang cair ke dalam cetakan dimana cetakan yang digunakan berupa cetakan terbuka sehingga solidifikasi lebih cepat terjadi. Kelebihan dari cetakan permanen diantaranya permukaan dan dimensi yang cukup baik mendekati perencanaan, struktur mikro yang lebih halus. Namun kekurangannya diantaranya terbatas pada temperatur leleh yang tidak dapat terlalu tinggi, hanya dapat digunakan untuk dimensi sederhana dibandingkan pengecoran pasir, dan mahal dalam pembuatan cetakannya (Groover, 2010).



Gambar 2.42 Ilustrasi penuangan logam cair ke cetakan permanen (Groover, 2010).

2.13 Cacat Pengecoran

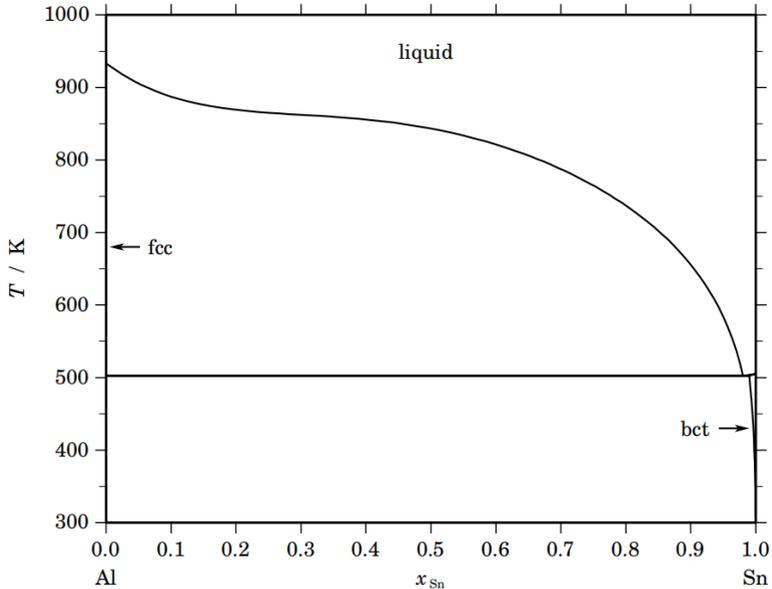
Pengecoran merupakan suatu proses yang rawan terdapat cacat atau kegagalan pada produknya. Hal tersebut seringkali berhubungan parameter pengecoran yang digunakan. Oleh karena itu untuk mendapatkan parameter yang tepat, maka perlu untuk mengetahui jenis-jenis cacat dan penyebab timbulnya cacat tersebut. Cacat-cacat seperti pada Gambar 2.43 beberapa diantaranya yaitu *blow hole*, *pin hole*, *porosity* dimana ketiganya diakibatkan oleh adanya gas yang terjebak di dalam logam cair karena temperatur tuang yang terlalu rendah dan akibat *slag*. Kemudian *inclusion* dimana terdapatnya benda asing yang terjebak di dalam benda cor, hal tersebut kemungkinan dikarenakan kurang bersihnya cetakan pengecoran. Terakhir yaitu ketidak sesuaian dimensi dan kekasaran permukaan diakibatkan oleh kondisi dari cetakan yang digunakan dalam pengecoran (Rajesh, R dan Khan, J.G, 2014).



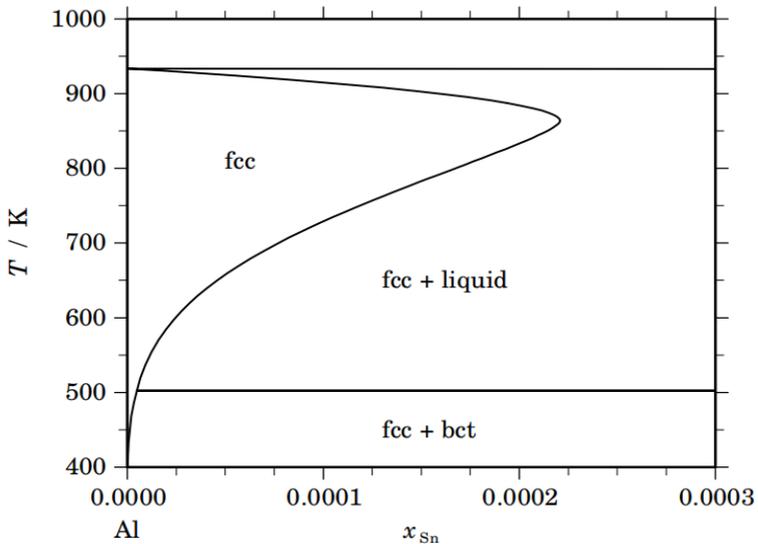
Gambar 2.43 Macam-macam cacat pada benda cor (a) inklusi (b) *pinhole* (c) *blowhole* (d) porositas (Groover, 2010)

2.14 Diagram Fasa Paduan Al-Sn

Adapun berikut merupakan diagram fasa dari paduan Aluminium – Timah (Al-Sn) (ASM Handbook Vol.3, 2003).



Gambar 2.44 Diagram fasa paduan Al-Sn
(ASM Handbook Vol.3, 2003)

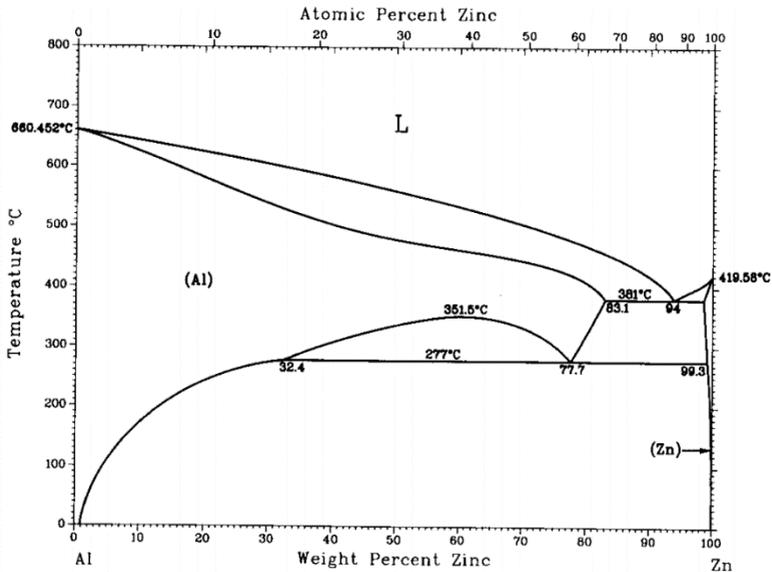


Gambar 2.45 Diagram fasa parsial paduan Al-Sn
(ASM Handbook Vol.3, 2003)

Berdasarkan diagram fasa dari paduan aluminium – timah, didapatkan bahwa timah memiliki kelarutan yang sangat terbatas dalam matriks aluminium. Berdasarkan pengamatan, timah memiliki kelarutan sekitar 0.012 wt% di matriks aluminium pada temperature leleh sekitar 231.9 °C. Kemudian kelarutan tersebut naik sekitar 0.12 wt% pada temperatur diatas 600°C (Polmear, 1995).

2.15 Diagram Fasa Paduan Al-Zn

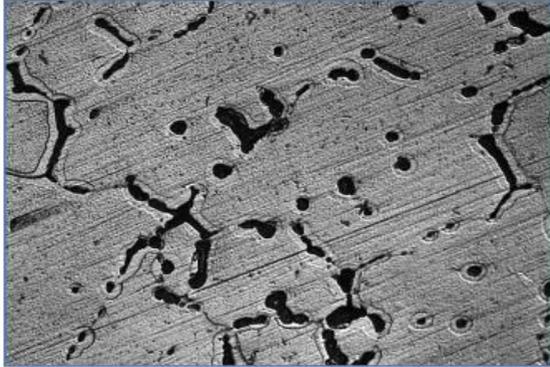
Adapun berikut merupakan diagram fasa dari paduan Aluminium – Timah (Al-Sn) (ASM Handbook Vol.3, 2003).



Gambar 2.46 Diagram fasa paduan Al-Zn
(ASM Handbook Vol.3, 2003)

2.16 Struktur Mikro Paduan Al-Sn

Struktur mikro yang dihasilkan dari paduan aluminium yang diberikan penambahan timah (Sn) menyebabkan terdapatnya titik-titik hitam pada matriks aluminium, segregasi pada sepanjang batas butir, dan ukuran butir yang tidak teratur. Hal tersebut seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.47 berikut (Daud dkk, 2013)



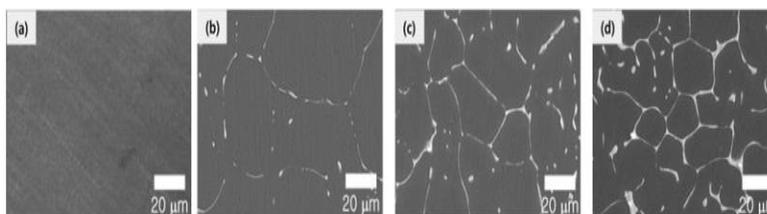
Gambar 2.47 Struktur mikro paduan aluminium yang mengandung Sn perbesaran 100x (Daud dkk, 2013)

Struktur mikro dengan penambahan komposisi timah sebesar 0.1% menghasilkan struktur mikro seperti pada Gambar 2.48 dimana terdapat segregasi disepanjang batas butirnya dan ukuran butir yang tidak teratur. Ukuran butir yang tidak teratur dan hamper hexagonal diakibatkan oleh distribusi dari presipitat timah (Sn) (Umoru, L, 2007).



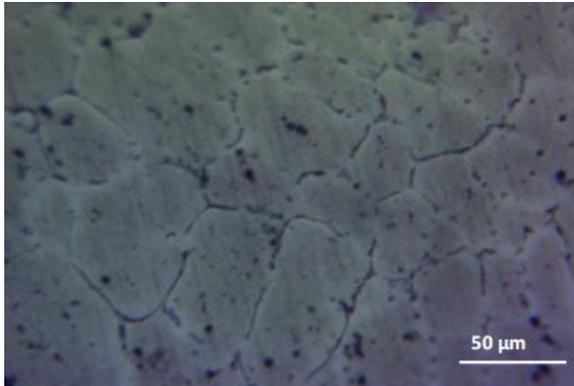
Gambar 2.48 Struktur mikro paduan aluminium dengan penambahan 0.1% timah perbesaran 100x (Umoru, L, 2007)

Identifikasi struktur mikro paduan Al-Sn seperti pada Gambar 2.49 dengan variasi penambahan timah (Sn) 5wt% - 20wt% menggunakan SEM menghasilkan fenomena dimana fase Sn terdapat pada sepanjang batas butir matriks aluminium. Seiring dengan naiknya komposisi penambahan timah (Sn) menghasilkan fase Sn pada batas butir yang semakin tebal terlihat pada gambar (a) saat tanpa penambahan Sn, kemudian seiring peningkatan penambahan Sn seperti pada gambar (b) hingga (d) terjadi signifikansi perubahan.. Disamping itu seiring dengan naiknya komposisi penambahan timah (Sn) menyebabkan butir matriks aluminium semakin kecil (Yoo, H dkk, 2014).



Gambar 2.49 Hasil SEM pada komposisi (a) Al (b) Al + 5wt%Sn (c) Al + 10wt%Sn (d) Al + 20wt%Sn (Yoo, H dkk, 2014)

Pengujian metalografi juga dilakukan pada paduan aluminium dengan 0.4wt%Sn dimana menghasilkan struktur mikro seperti pada Gambar 2.50. Pada matriks α -aluminium terdapat presipitat Sn dan segregasi disepanjang batas butir yang menyebabkan ukuran butir semakin kecil seiring dengan naiknya penambahan komposisi timah (Khireche, S, 2014).



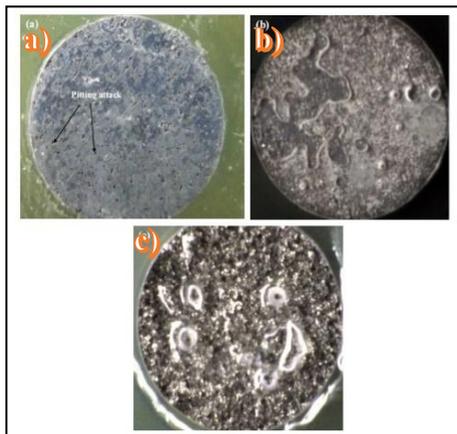
Gambar 2.50 Hasil metalografi pada penambahan 0.4wt% Sn (Khireche, S, 2014)

2.17 Penelitian Sebelumnya

Pada tahun 2018 Jithin A.S. dkk, dari Vidya Academy Science and Technology melakukan penelitian yang bertujuan untuk meningkatkan performa karakteristik anoda korban dengan komposisi paduan Al-Mg-Zn yang digunakan untuk aplikasi pada lingkungan air laut. Penelitian tersebut mengarah pada manufaktur anoda korban dengan variasi komposisi dan kemudian diberikan perlakuan panas dengan periode waktu yang berbeda. Kemudian sampel yang telah dibuat efisiensinya masing-masing dihitung sehingga didapatkan hasil dengan efisiensi terbaik. Penelitian tersebut menggunakan 6 buah sampel berbeda komposisi dimana 3 sampel pertama hanya memiliki variasi terhadap komposisi Zn lalu pada sampel ke-4 ditambahkan sedikit Sn untuk mengetahui pengaruhnya. Kemudian pada sampel ke-5 dan ke-6 ditambahkan komposisi Sn sebanyak 1% dan 2% untuk mencari tahu efeknya terhadap efisiensi anoda. Proses pembuatan anoda menggunakan metode *die casting* dimana menggunakan temperatur leleh sekitar 680-700°C. Perlakuan panas yang diberikan pada paduan tersebut menggunakan dua macam waktu *aging* yaitu 8 jam dan 16 jam. Setelah itu seluruh spesimen dilakukan pengujian efisiensi dan

menghasilkan data bahwa adanya penambahan Zn tidak berpengaruh signifikan terhadap efisiensi anoda namun adanya penambahan Sn meningkatkan efisiensi anoda seiring naiknya komposisi Sn yang ditambahkan pada paduan. Efisiensi dari anoda meningkat hingga 93% setelah dilakukan perlakuan panas dengan waktu *aging* 8 jam namun dengan waktu *aging* 16 jam efisiensi kemudian menurun.

Pada tahun 2014, S. Khireche dkk, dari Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou Algeria melakukan penelitian terkait mekanisme korosi dari paduan Al, Al-Zn, dan Al-Zn-Sn dalam media larutan NaCl 3%. Perilaku korosi dari paduan tersebut diselidiki dengan menggunakan potensial sirkuit terbuka, tafel, dan *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS). Kemudian juga dilakukan karakterisasi terhadap mikrostruktur menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) dan *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDX). Berdasarkan penelitian tersebut aktivasi aluminium meningkat dengan urutan $\text{Al} < \text{Al-5Zn} < \text{Al-5Zn-0.1Sn} < \text{Al-5Zn-0.2Sn} < \text{Al-5Zn-0.4Sn}$.



Gambar 2.51 Tampilan permukaan a) Al b) Al-Zn c) Al-Zn-0.2Sn setelah satu hari direndam dalam larutan NaCl 3%

Pada tahun 2012, Khadim F. Al-Sulthani dari *University of Babylon Iraq* melakukan penelitian terkait efek pengaruh Sn pada anoda korban aluminium untuk proteksi pipa bawah tanah pada kawasan mahawil. Pada penelitian tersebut digunakan tiga macam komposisi paduan yaitu Al-4%Zn, Al-4%Zn-0.2%Sn, dan Al-4%Zn-0.4%Sn. Anoda korban tersebut dibuat menggunakan metode *die casting* dan tempatur leleh sekitar 700°C. Banyak pertimbangan yang dilakukan baik dari segi karakteristik struktur mikro maupun elektrokimia dimana keluaran arus, potensial proteksi, kapasitas, dan masa pakai anoda. Data hasil pengujian tafel polarisasi anoda korban menunjukkan bahwa potensial korosi pada paduan Al-4%Zn sebesar -652.4mV dan *icorr* sebesar 1.51µA/cm. Meskipun begitu perlu digaris bawahi bahwa potensial korosinya masih rendah. Kemudian untuk paduan Al-4%Zn-0.2%Sn menunjukkan nilai potensial korosi sebesar -805.0.1mV dan *icorr* sebesar 6.15µA/cm². Sedangkan untuk komposisi Al-4%Zn-0.4%Sn menunjukkan nilai potensial korosi sebesar -840.4mV dan *icorr* sebesar 7.13µA/cm². Nilai potensial korosi dan *icorr* naik seiring dengan penambahan komposisi Sn dalam paduan tersebut.

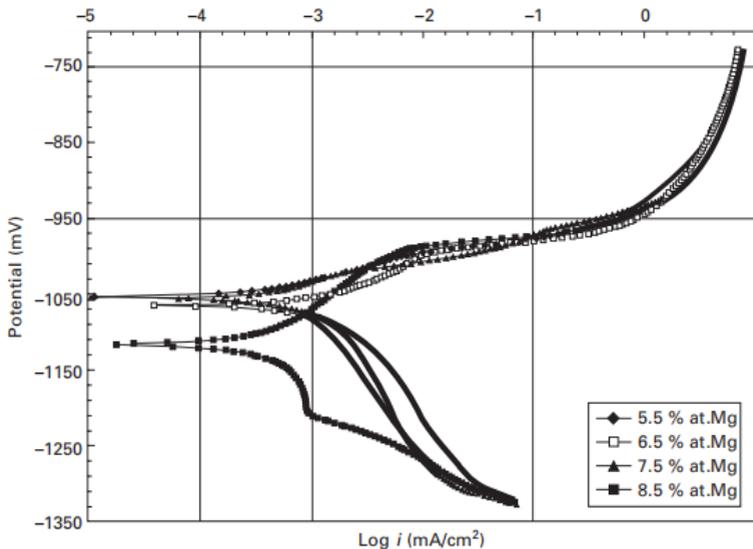
Pada tahun 2015, Derek Egan dari *Southampton University* melakukan penelitian pada perilaku anodik paduan Al-Sn yang dipengaruhi oleh struktur mikro, konsentrasi, dan elektrokimia dari timah dimana timah harus berupa larutan padat dengan aluminium. Kondisi tersebut diperoleh melalui perlakuan panas dengan pemanasan pada 600°C selama 2 jam kemudian di *quench* dengan media air pada temperature 22 °C. Komposisi timah hingga maksimum 0.12wt% memiliki pengaruh yang paling signifikan terhadap perilaku anodik dimana menghasilkan efisiensi paling tinggi paduan Al-Sn karena komposisi tersebut merupakan batas kelarutan maksimum larutan padat yang dapat diakomodir dalam matriks aluminium. Sedangkan konsentrasi penambahan timah kurang dari 0.12wt% hanya menghasilkan sedikit deposit yang terbentuk.

Pada tahun 2007, L.E. Umoru dan O.O. Ige dari *Departemen of Material Science & Engineering, Obafemi Awolowo University* melakukan penelitian terkait pengaruh penambahan timah terhadap paduan Al-Zn-Mg sebagai anoda korban di lingkungan air laut. Penelitian tersebut bertujuan untuk mendapatkan komposisi penambahan timah sehingga menghasilkan efisiensi optimal anoda aluminium. Penambahan komposisi timah terdapat variasi yaitu 0%, 0.01%, 0.05%, dan 0.1%. Kemudian berdasarkan penelitian tersebut penambahan komposisi 0.1%Sn menghasilkan efisiensi terbaik dan menunjukkan adanya distribusi dari presipitat timah yang kemudian menghancurkan jaringan lapisan pasif pada permukaan anoda aluminium sehingga efisiensinya meningkat.

Pada tahun 2013, Muhammad Daud dan Zaifol Shamsu dari *Malaysian Nuclear Agency*, melakukan penelitian terkait pengaruh penambahan unsur depasivator terhadap performa anoda aluminium. Penelitian tersebut mengarah kepada pembuatan anoda aluminium menggunakan bahan ingot yang terdiri dari Al, Mg, Zn, dan Sn. Kemudian dilakukan variasi komposisi penambahan Sn pada anoda aluminium untuk selanjutnya divalidasi efeknya terhadap nilai *open circuit potential* dan kapasitas arus. Berdasarkan hasil penelitiannya didapatkan penambahan Sn menyebabkan nilai *open circuit potential* menjadi semakin negatif yaitu pada -1.140 V vs SCE dan kapasitas arus pada rentang 2300-2700 A.h/Kg sesuai dengan parameter yang ditetapkan oleh NACE dan DNV.

Pada tahun 2004, R. Orozco Cruz, J. Genesca, dan J.A. Juarez-Islas dari *Universidad Veracruzana* dan *Universidad Nacional Autonomia*, melakukan penelitian dalam rangka mencari substitusi dari anoda aluminium berbasis Al-Zn-In dan Al-Zn-Hg menggunakan komposisi Al-IIB-IIA supaya dapat mencegah timbulnya polusi terhadap ekosistem air laut akibat keberadaan unsur Hg, namun tanpa mengurangi performa anoda aluminium terkait efisiensi yang dihasilkan dan kapasitas arusnya. Penelitian ini menggunakan komposisi variasi komposisi Al-Zn-Mg dan didapatkan bahwa penambahan Mg membantu meningkatkan

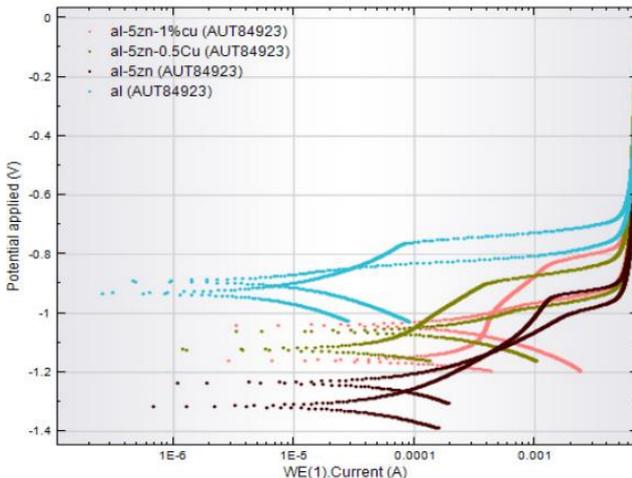
kapasitas arus ketika ditambahkan hingga 8.5% serta menghasilkan kurva tafel polarisasi lebih kearah katodik dimana terjadi perusakan lapisan oksida oleh Cl^- sehingga nilai potensialnya menjadi semakin negatif seperti pada Gambar 2.44 berikut.



Gambar 2.52 Kurva polarisasi paduan Al-5.3%, Zn-x%, Mg-5.5-8.5% dalam larutan NaCl 3% pada temperatur ruang (Cruz, dkk, 2007)

Pada tahun 2017, Deni Ferdian, Yudha Pratesa, Inez Togina, dan Irda Adelia dari Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia melakukan penelitian tentang pengembangan anoda aluminium yang memiliki tegangan rendah. Hal ini disebabkan karena anoda aluminium memiliki potensi untuk menyebabkan over proteksi dan menjadi rawan terhadap SCC. Oleh karenanya penelitian ini membuat paduan anoda berbasis Al-Zn-Cu dengan bahan ingot 99.99% dengan komposisi Al-5Zn, Al-5Zn-0.5Cu, dan AK-5Zn-1Cu dengan metode pengecoran. Kemudian dilakukan pengujian untuk karakterisasi komposisi kimia, struktur mikro,

polarisasi, dan EIS. Berdasarkan pengujian tersebut didapatkan bahwa penambahan Zn akan menyebabkan potensial menjadi semakin negatif namun adanya penambah Cu akan menyebabkan potensial naik menjadi lebih positif seperti pada Gambar 2.45.



Gambar 2.53 Kurva polarisasi siklis dari (a) Al murni (biru), Al-5Zn (cokelat), Al-5Zn-0.5Cu (hijau), dan Al-5Zn-Cu (merah) (Ferdian, dkk, 2017)

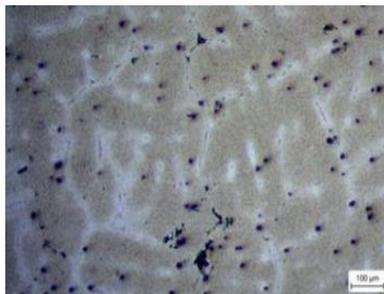
Pada tahun 2017, Chanika P, Nuchthana P, dan Napachat T dari *King Mongkut's University of Technology Thonburi* melakukan penelitian terhadap perilaku korosi anoda aluminium berbasis Al-Zn-In yang dihasilkan melalui metode pengecoran konvensional dan semi solid. Paduan yang digunakan memiliki komposisi Al-5Zn-0.02In. Perilaku korosi yang diteliti mencakup potensial anoda, kapasitas arus, laju konsumsi, dan efisiensi anoda dalam larutan NaCl 3.5% selama 14 hari. Berdasarkan penelitian tersebut didapatkan bahwa hasil proses pengecoran konvensional menyebabkan butir yang terbentuk kasar dan terjadi fenomena *pitting* dan keadaan sebaliknya terjadi pada semi solid dimana menghasilkan butir yang halus. Namun, efisiensi dari anoda yang

dihasilkan melalui metode pengecoran memiliki nilai yang lebih tinggi 10% dibandingkan metode *semi solid* yang terakumulasi pada Tabel 2.10 berikut.

Tabel 2.10 Perbandingan karakteristik anoda konvensional dan *semi solid* (Puridetvorakul, 2017)

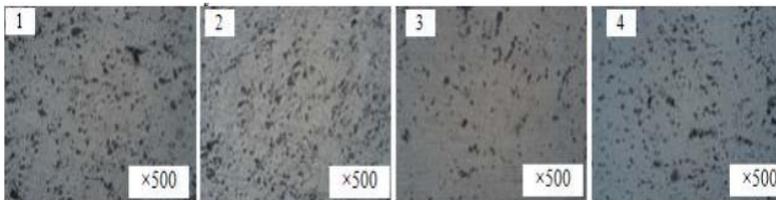
Karakteristik	Konvensional	<i>Semi Solid</i>
Kapasitas arus (Ah/kg)	1812.75	1524.21
Laju konsumsi (g/Ah)	0.55	0.66
Efisiensi anoda	60.80	51.12

Pada tahun 2017, Deni Ferdian, Yudha Pratesa, dan Inez Togina, dari Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia melakukan penelitian terkait pengaruh silikon pada paduan Al-5Zn sebagai kandidat anoda korban bertegangan rendah. Komposisi yang digunakan yaitu Al-5Zn, Al-5Zn-0.5Si dan Al-5Zn-Si yang proses pembuatannya menggunakan metode pengecoran. Kemudian dilakukan pengujian terhadap polarisasi siklik dan metalografi. Berdasarkan pengujian tersebut didapatkan hasil struktur mikro seperti pada Gambar 2.46 berikut dan hasil potensial sebesar -0.94 vs SCE untuk Al-5Zn, -0.88 vs SCE untuk Al-5Zn-0.5Si, dan -0.872 vs SCE untuk Al-5Zn-Si.



Gambar 2.54 Struktur mikro paduan Al-Zn-Si (Pratesa,2017)

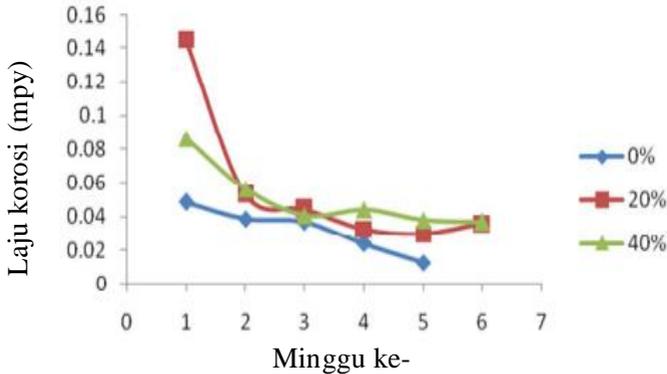
Pada tahun 2015 Cheng, Liu, Xie, Duan, dan Zhang melakukan penelitian terkait pengaruh penambahan titanium pada anoda Al-Zn-In-Si terhadap struktur mikro dan karakteristiknya. Komposisi paduan yang digunakan dibuat menggunakan metode pengecoran dengan temperatur 750°C dengan variasi komposisi titanium 0.03, 0.05, 0.07, dan 0.1. Kemudian dilakukan pengujian metalografi dan polarisasi serta EIS dalam larutan NaCl 3 %. Berdasarkan pengujian metalografi didapatkan bahwa seiring penambahan titanium menyebabkan presipitat Zn menurun, menghilangkan segregasi, dan mengurangi potensi korosi intergranular. Namun ketika penambahannya melebihi batas kelarutan maka titanium juga akan membentuk presipitat. Hasil struktur mikro seperti pada Gambar 2.47 berikut. Kemudian untuk pengujian karakteristik elektrokimia menghasilkan nilai potensial dengan kecenderungan menuju ke lebih positif nilainya.



Gambar 2.55 Struktur mikro dengan variasi (1) 0.03 Ti, (2) 0.05Ti, (3) 0.07 Ti, dan (4) 0.1 Ti (Cheng, dkk, 2015)

Pada tahun 2016, Asmara, Siregar, Tezara, dan Chang dari *Universiti Malaysia Pahang* melakukan penelitian terhadap meningkatkan efisiensi dari anoda korban aluminium menggunakan proses pengerjaan dingin. Variabel yang digunakan pada penelitian tersebut merupakan derajat deformasi dimana terdapat 0%, 20% , dan 40%. Kemudian dilakukan pengujian terhadap terhadap performanya melalui percobaan anoda korban selama 8 minggu untuk diketahui jumlah kehilangan berat dan untuk mengetahui laju korosi dilakukan menggunakan pengujian dengan potensiostat. Berdasarkan penelitian tersebut didapatkan bahwa

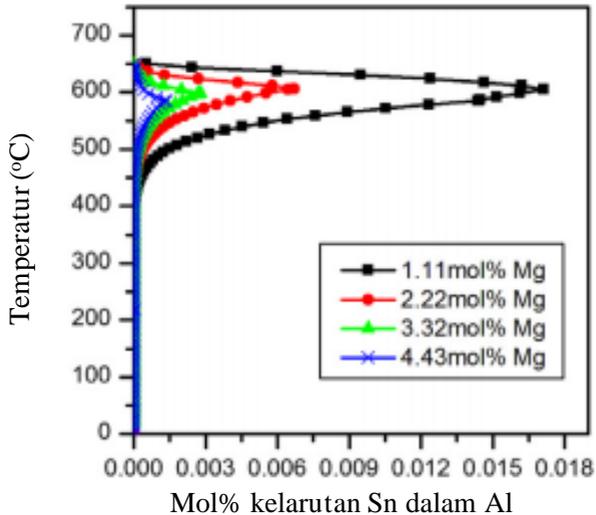
derajat deformasi menyebabkan menurunnya laju korosi sehingga efisiensi menjadi semakin meningkat. Hasil data laju korosi seperti pada Gambar 2.48 berikut.



Gambar 2.56 Grafik pengaruh deformasi terhadap laju korosi selama 7 minggu (Asmara, 2016)

Pada tahun 2010, Anshuman, Dane, dan Ray dari *University of Wisconsin* melakukan penelitian dalam rangka memahami mekanisme unsur dapat meningkatkan aktivitas anoda aluminium dan diketahui bahwa penambahan timah (Sn) dapat meningkatkan aktivitas tersebut namun harus dalam bentuk larutan padat sedangkan kelarutannya terbatas. Oleh karenanya dilakukan pemodelan ekspansi ruang kisi aluminium dengan variasi penambahan gallium, magnesium, dan bismuth untuk diketahui bagaimana mekanisme ekspansi kisi aluminium sehingga dapat menampung lebih banyak timah (Sn) sehingga membentuk suatu larutan padat dengan kelarutan yang lebih tinggi. Variabel yang digunakan yaitu variasi penambahan Mg sebanyak 1.11 mol, 2.22 mol, 3.32 mol, dan 4.43 mol. Berdasarkan pemodelan dengan

variable tersebut didapatkan hasil seperti pada Gambar 2.49 berikut.

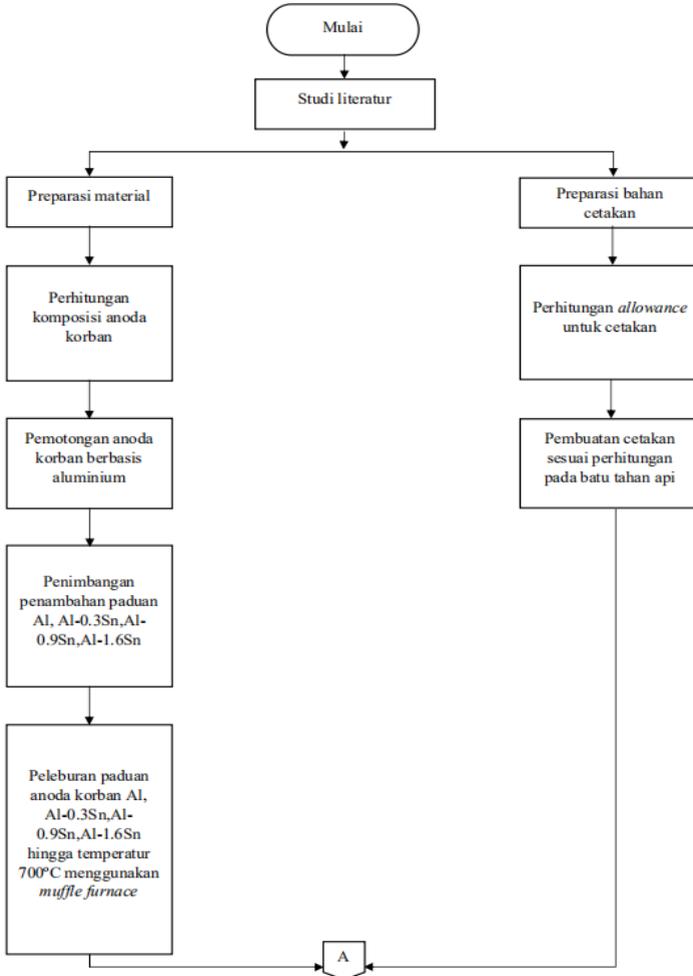


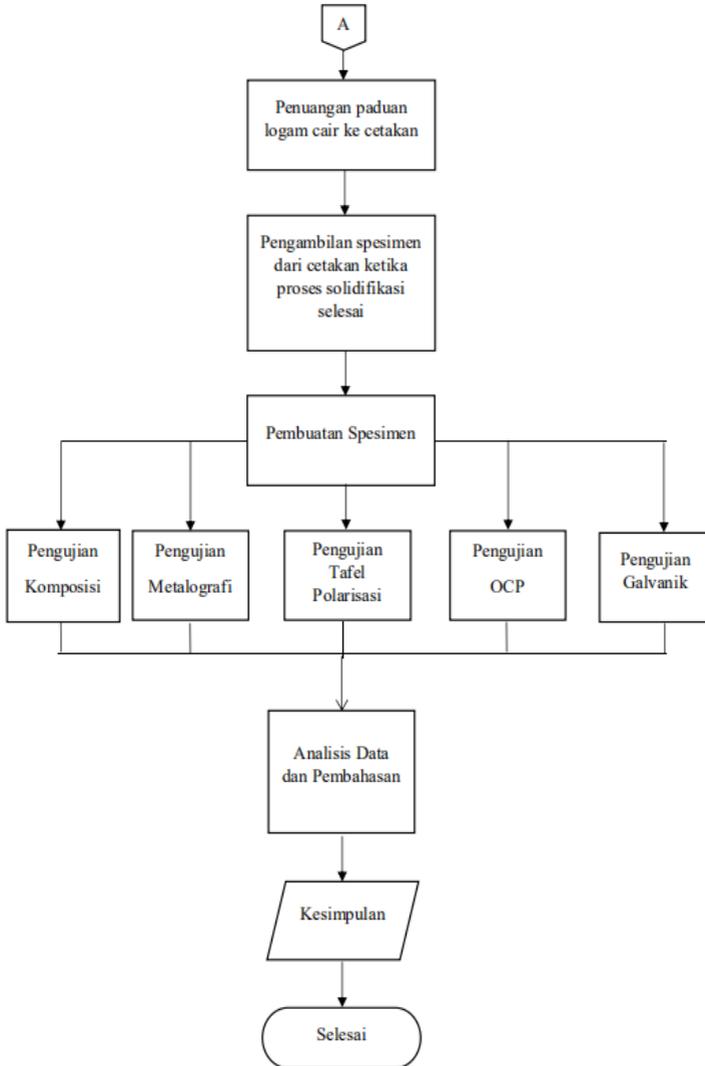
Gambar 2.57 Kelarutan Sn untuk 4 komposisi paduan
(Sharma dkk, 2011)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir

Penelitian yang dilakukan ini memiliki alur pengerjaan sebagai berikut seperti pada Gambar 3.1.



**Gambar 3.1** Diagram alir

3.1.1 Standar yang digunakan

Adapun standar yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. ASTM E 407-07 (standar larutan etsa)
2. ASTM E 3 -11 (standar pengujian metalografi)
3. ASTM G71 - 81 (standar pengujian korosi galvanik)
4. ASTM G5 (standar pengujian tafel polarisasi)

3.2 Alat dan Bahan

Dalam melakukan penelitian ini digunakan alat dan bahan beserta kegunaannya masing-masing, sebagai berikut ini :

3.2.1 Alat

Adapun alat yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. *Furnace*

Alat ini berupa *muffle furnace* berbentuk kubus dengan ukuran sekitar 50 x 50 x 50 cm. Ketebalan *furnace* tersebut sekitar 10 cm. *Furnace* tersebut menggunakan bahan bakar berupa sumber listrik.



Gambar 3.2 *Muffle furnace*

2. *Crucible* Grafit

Alat ini berbentuk tabung berdiameter 5 cm dan tinggi 13 cm yang digunakan sebagai wadah paduan aluminium dipanaskan hingga berfasa cair.



Gambar 3.3 *Crucible* grafit

3. Neraca Digital

Alat ini digunakan untuk melakukan penimbangan massa material yang berhubungan dengan penelitian.

4. Pipa 1 dm

Alat ini digunakan sebagai cetakan yang akan diisi dengan resin (*mounting*) untuk spesimen pengujian kekerasan dan metalografi sehingga mempermudah proses preparasi spesimen lanjut.

5. Mikroskop Optik

Alat ini digunakan untuk mengamati struktur mikro anoda korban.

6. XRF

Serangkaian peralatan ini digunakan untuk melakukan pengujian kandungan komposisi anoda korban dan baja.

7. Peralatan Uji Tafel

Serangkaian peralatan ini digunakan untuk melakukan pengujian tafel polarisasi.

8. Multimeter

Alat ini digunakan untuk mengukur tegangan pada saat proses pengujian *open circuit potential* dan mengukur arus pada saat pengujian korosi galvanik.

3.2.2 Bahan

Adapun bahan yang digunakan pada penelitian kali ini adalah sebagai berikut:

1. Anoda korban berbasis aluminium
2. Serbuk Sn 99.99%
3. Larutan etsa (*keller*)
4. Aquades
5. Pasta Al_2O_3
6. Larutan NaCl
7. Resin polyester
8. Baja karbon AISI 1040
9. Batu tahan api / *Mullite brick* ($Al_2O_3.SiO_2$)

3.2.3 Spesifikasi Bahan Penelitian

1. Anoda korban aluminium

Spesifikasi anoda korban berbasis aluminium yang digunakan dalam penelitian ini yang diperoleh dari hasil pengujian memiliki komposisi kandungan unsur yang terakumulasi pada Tabel 3.1 berikut ini:

Tabel 3.1 Komposisi anoda aluminium

Unsur	Komposisi (%)
Al	81.45
P	0.78
Ca	0.84
Ti	0.045
Fe	0.3835
Co	0.01
Ni	0.023
Cu	0.165
Zn	16.31

2. Baja karbon

Spesifikasi baja karbon AISI 1040 yang digunakan dalam penelitian ini yang diperoleh dari hasil pengujian memiliki komposisi kandungan unsur yang terakumulasi pada bagian lampiran.

3. Larutan NaCl

Spesifikasi larutan NaCl yang digunakan dalam penelitian memiliki kadar salinitas 3.5% dimana dalam pembuatannya menggunakan 35 gram NaCl yang dilarutkan ke dalam 100 mL aquades dan kemudian dihomogenkan. Komposisi tersebut digunakan untuk pengujian tafel polarisasi. Kemudian untuk pengujian korosi galvanik menggunakan gram NaCl yang dilarutkan ke dalam mL aquades dan dihomogenkan.

3.3 Prosedur Preparasi Spesimen

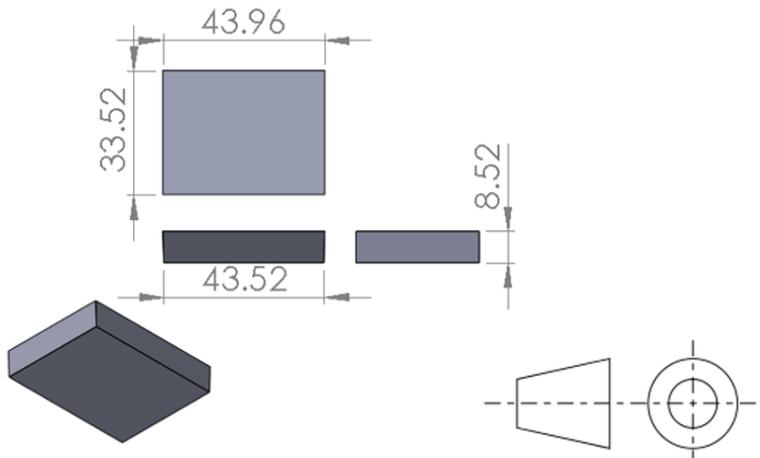
Adapun prosedur yang digunakan untuk melakukan preparasi spesimen adalah sebagai berikut :

3.3.1 Preparasi Spesimen Uji Korosi

Preparasi spesimen dilakukan berdasarkan prosedur sebagai berikut:

1. Melakukan perhitungan *mass balance* untuk mengetahui komposisi dari paduan aluminium dan serbuk timah (Sn) yang dibutuhkan.
2. Memotong anoda korban aluminium sesuai dengan perhitungan, kemudian menimbanginya menggunakan timbangan digital.
3. Menimbang serbuk timah (Sn) sesuai dengan perhitungan yang telah dilakukan
4. Menghitung *allowance* pada pengecoran yang akan dilakukan.
5. Membuat cetakan sesuai perhitungan *allowance* pada batu tahan api.
6. Meletakkan anoda korban aluminium dan serbuk Sn ke dalam *crucible* grafit.
7. Melelehkan paduan tersebut menggunakan *furnace* dengan temperatur sekitar 700°C
8. Menjepit *crucible* grafit berisi lelehan paduan tersebut, kemudian menuangkannya ke cetakan dengan temperatur tuang sekitar 700°C.
9. Menunggu beberapa saat hingga proses solidifikasi selesai, kemudian mengambil hasil pengecoran.
10. Melakukan *machining* terhadap benda coran untuk memperhalus permukaan dan mengatur kesesuaian dimensinya terhadap kebutuhan spesimen uji galvanik.

Adapun untuk dimensi spesimen uji korosi direncanakan berdasarkan perhitungan cetakan dengan penambahan *allowance* seperti pada Gambar 3.2 berikut.



Gambar 3.4 Rancangan dimensi spesimen pengecoran untuk uji korosi

3.3.2 Preparasi Spesimen Uji Metalografi

Adapun preparasi spesimen uji untuk melakukan pengujian metalografi dilakukan menurut tahapan berikut :

1. Memotong spesimen hasil pengecoran dengan dimensi 10x10x10 mm
2. Memotong pipa berdiameter 1 dm sepanjang 50 mm.
3. Mengoleskan vaseline ke bagian dalam pipa yang sudah dipotong tersebut.
4. Meletakkan spesimen di bagian bawah diameter pipa menggunakan selotip agar spesimen tidak berpindah tempat.
5. Menyiapkan campuran resin dan katalis sesuai komposisi.
6. Menuangkan campuran resin dan katalis kedalam pipa yang berisi spesimen dan tunggu hingga kondisinya sudah menjadi keras.
7. Menghaluskan permukaan spesimen dengan kertas gosok hingga grit 5000.
8. Melakukan *polishing* pada permukaan spesimen.

9. Memberikan perlakuan etsa terhadap permukaan spesimen yang akan diamati struktur mikronya.

3.4 Pengujian

Pengujian ini dilakukan untuk menganalisis komposisi anoda korban berbasis aluminium setelah dilakukan penambahan unsur timah (Sn) dan pengaruhnya terhadap karakteristik yang mencakup struktur mikro, laju korosi, potensial, dan efisiensi. Oleh karenanya pada penelitian ini akan dilakukan empat pengujian, diantaranya:

3.4.1 Pengujian Komposisi Unsur

Pengujian komposisi unsur dilakukan menggunakan metode XRF (*X-Ray Fluorescence*), dimana prinsip kerjanya berdasarkan identifikasi dan pembauran karakteristik sinar-X ketika peristiwa efek fotolistrik. Fenomena tersebut terjadi karena elektron yang ada di dalam atom spesimen terkena pancaran energi tinggi (sinar-X). Pengujian komposisi unsur menggunakan XRF memanfaatkan sinar-X yang dipancarkan oleh spesimen uji yang kemudian ditangkap oleh *detector* untuk dianalisis komposisinya. Pengujian ini dilakukan dalam rangka validasi penggunaan bahan dan kesesuaian hasil produk pengecoran.



Gambar 3.5 Skema pengujian komposisi menggunakan XRF
(Brouwer, P, 2010)

3.4.2 Pengujian Metalografi

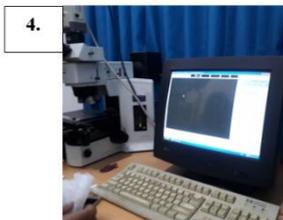
Pengujian metalografi dilakukan untuk mengetahui pengaruh penambahan variasi komposisi timah (Sn) terhadap struktur mikro dari anoda korban berbasis aluminium. Spesimen anoda korban yang telah dilakukan proses *mounting* dan dihaluskan dengan kertas amplas hingga grade 5000 lalu dilakukan *polishing* menggunakan autosol yang berisi pasta Al_2O_3 sehingga permukaan spesimen terlihat mengkilat. Setelah itu menyiapkan larutan etsa sesuai dengan standar ASTM E 407 - 07 dimana didapatkan larutan tertentu untuk jenis paduan aluminium beserta metode pengetsaannya. Kemudian meletakkan spesimen tersebut dibawah lensa mikroskop optik menggunakan perbesaran yang sesuai agar struktur mikro terlihat.



1. *Grinding hingga grade 5000*



2. *Polishing*



4. *Pengamatan*

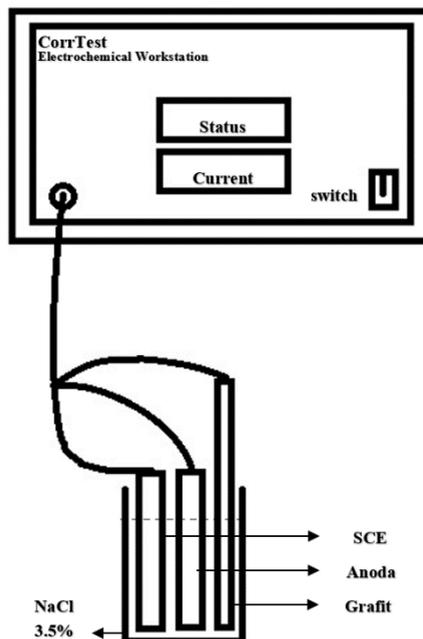


3. *Etching*

Gambar 3.6 Pengujian metalografi

3.4.3 Pengujian Tafel Polarisasi

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh penambahan variasi komposisi timah (Sn) terhadap laju korosi anoda korban dengan menggunakan alat uji CorrTest dengan software CS Studio5. Peralatan yang dipakai diantaranya terdiri dari elektrodan referens, elektroda kerja, dan elektroda bantu yang digunakan untuk mengetahui laju korosi pada larutan NaCl 3.5%. Pengujian ini dilakukan sesuai dengan standar ASTM G-5. Pengujian ini dilakukan dengan menyiapkan dan memasang rangkaian pengujian beserta komponen-komponennya. Kemudian memasang elektroda pada rangkaian polarisasi tersebut dan menyalakan alat uji polarisasi. Memasukkan parameter yang digunakan dan mengaktifkan program CR Studio5.



Gambar 3.7 Skema pengujian tafel polarisasi

3.4.4 Pengujian *Open Circuit Potential* (OCP)

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi penambahan komposisi timah (Sn) terhadap nilai *open circuit potential* anoda aluminium. Pengujian ini dilakukan dengan menghubungkan rangkaian seperti pada Gambar 3.8 menurut ASTM G71-81, namun menggunakan katoda berupa elektroda standar Ag/AgCl sehingga pada Voltmeter akan terbaca nilai potensial anoda aluminium vs Ag/AgCl.



Gambar 3.8 Pengujian *open circuit potential*

3.4.5 Pengujian Korosi Galvanik

Pengujian korosi dilakukan untuk mengetahui pengaruh penambahan variasi komposisi timah (Sn) terhadap laju konsumsi, kapasitas arus, dan efisiensi dari anoda korban berbasis aluminium. Pengujian dilakukan dengan menghubungkan anoda korban berbentuk plat dengan baja karbon berbentuk plat menggunakan kabel yang dihubungkan ke avometer serta kondisi anoda dan katoda tersebut dalam keadaan tercelup sebagian ke dalam elektrolit sesuai dengan standar ASTM G71 - 81 dan pengujian untuk tiap spesimen dilakukan selama 240 jam (10 hari). Anoda yang digunakan berupa paduan aluminium dengan variasi

komposisi sesuai rancangan dan katoda yang digunakan berupa pelat baja dengan dimensi yang sama dengan anoda Berikut merupakan skema uji korosi galvanik seperti pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9 Pengujian korosi galvanik

3.5 Rancangan Pengambilan Data

Dalam rangka memudahkan dalam melaksanakan penelitian khususnya saat melakukan pengujian dan analisis. Oleh karena itu diperlukan pengambilan data yang sistematis yang dimuat dalam rancangan pengambilan data sebagai berikut :

Tabel 3.2 Rancangan pengambilan data

Spesimen	Jenis Pengujian				
	K	M	T	O	G
Al	√	√	√	√	√
Al + 0.3Sn	√	√	√	√	√
Al + 0.9Sn	√	√	√	√	√
Al + 1.6 Sn	√	√	√	√	√

Keterangan :

- K = Pengujian Komposisi
- M = Pengujian Metalografi
- T = Pengujian Tafel Polarisasi
- O = Pengujian *Open Circuit Potential*
- G = Pengujian Galvanik

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Perencanaan Pengecoran Anoda Aluminium

Adapun berikut merupakan serangkaian perencanaan dalam rangka pengecoran spesimen anoda aluminium dengan variasi kadar timah (Sn) :

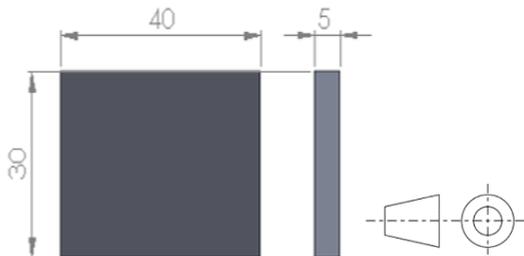
4.1.1 Data Pengecoran

Data yang diambil adalah data yang akan berpengaruh terhadap proses pengecoran anoda aluminium. Adapun data tersebut meliputi dimensi benda cor, material benda cor, temperatur pemanasan, dan temperatur penuangan. Data awal yang dibutuhkan meliputi :

1. Dimensi benda cor

Benda yang akan dicor adalah anoda aluminium yang direncanakan memiliki dimensi akhir :

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



Gambar 4.1 Dimensi benda cor tanpa *allowance*

Dalam rangka mendapatkan spesifikasi dimensi tersebut, maka perlu dilakukan perhitungan *allowance* diantaranya *shrinkage*, *draft*, dan *machining*. *Shrinkage allowance* digunakan sebagai sarana mengatasi terjadinya fenomena penyusutan baik

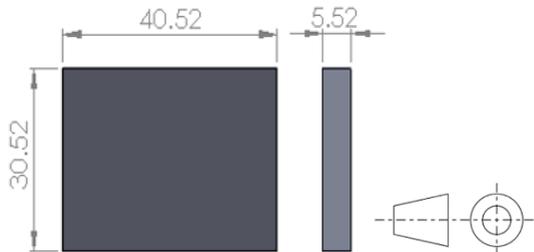
padat maupun cair. *Draft allowance* digunakan untuk memudahkan mengambil benda cor dari cetakan. *Machining allowance* digunakan untuk memperoleh dimensi yang diinginkan setelah dilakukan proses machining terhadap benda cor tersebut. Adapun perhitungan *allowance* adalah sebagai berikut :

- Perhitungan *Shrinkage Allowance* :

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

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

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



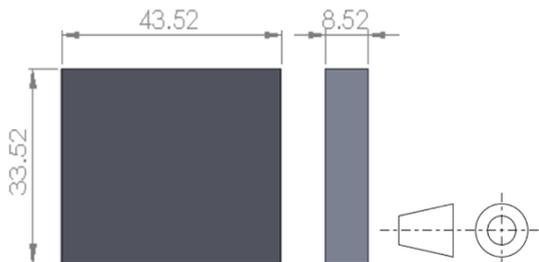
Gambar 4.2 Dimensi benda cor dengan *shrinkage allowance*

- Perhitungan *Machining Allowance* :

$$\text{Panjang} : 40.52 \text{ mm} + (1.5 \times 2) = 43.52 \text{ mm}$$

$$\text{Lebar} : 30.52 \text{ mm} + (1.5 \times 2) = 33.52 \text{ mm}$$

$$\text{Tebal} : 5.52 \text{ mm} + (1.5 \times 2) = 8.52 \text{ mm}$$

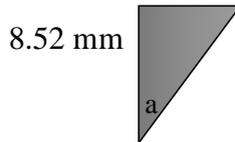


Gambar 4.3 Dimensi benda cor dengan *machining allowance*

- Perhitungan *Draft Allowance* :

$\tan a = x/8.52$ mm, sehingga :

$a = 1.5^\circ$ (P.N Rao, 2013)



$$x = 0.026 \times 8.52 \text{ mm} = 0.22152 \text{ mm}$$

Oleh karena penambahan “x” diberikan terhadap kedua ujung sisi maka :

$$2x = 2 \times 0.22152 \text{ mm} = 0.44304 \text{ mm}$$

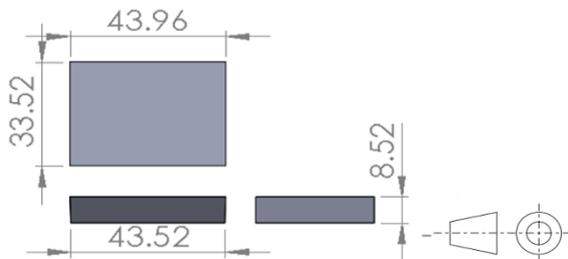
Penambahan *draft allowance* mengakibatkan adanya penambahan panjang pada salah satu dimensi panjang benda coran sehingga dimensi benda menjadi :

Panjang (1) : $43.52 \text{ mm} + 0.44304 \text{ mm} = 43.96 \text{ mm}$

Panjang (2) : $43.52 \text{ mm} + 0 = 43.52 \text{ mm}$

Lebar : $33.52 \text{ mm} + 0 = 33.52 \text{ mm}$

Tebal : $8.52 \text{ mm} + 0 = 8.52 \text{ mm}$



Gambar 4.4 Dimensi benda cor dengan *draft allowance*

2. Cetakan

Cetakan dibuat sesuai dengan dimensi benda cor yang telah ditambahkan keseluruhan *allowance*. Material cetakan berupa

material refraktori. Namun, dikarenakan sifat fisik material refraktori yang cukup susah untuk dibentuk sehingga hasil akhir dimensi tidak presisi berkesesuaian dengan target perhitungan. Gambar 4.5 berikut menunjukkan cetakan yang digunakan untuk pengecoran. Material refraktori yang digunakan sebagai cetakan pengecoran didapatkan dari Laboratorium Pengolahan Material dan Mineral Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.



Gambar 4.5 Cetakan untuk pengecoran

3. Material Benda Cor

Material yang digunakan adalah anoda aluminium dengan komposisi seperti pada Tabel 4.1, dengan massa jenis sebesar 2.7 gram/cm³.



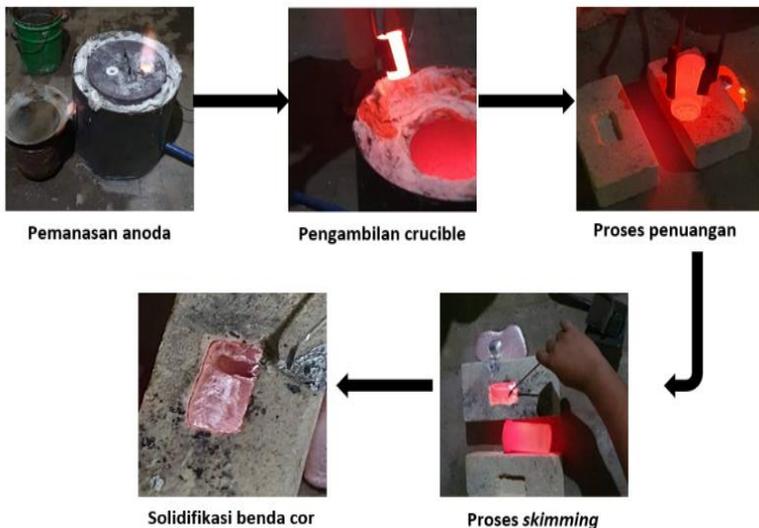
Gambar 4.6 Material anoda aluminium

4. Temperatur

Pengecoran ini menggunakan temperatur penuangan 700°C. Penggunaan temperatur tersebut mengacu pada literatur bahwa

penggunaan temperatur pemanasan diharuskan dibawah 770°C agar terhindar dari kontaminasi hidrogen penyebab porositas. Temperatur penuangan 700°C digunakan agar hasil benda coran bebas dari internal defek. Parameter temperatur tersebut mengacu pada penelitian dari B.Ndaliman dan P.Pius.

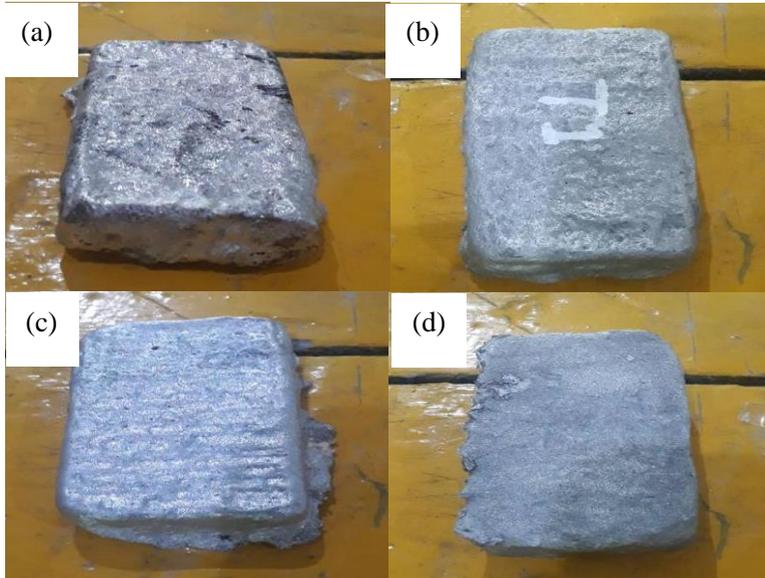
Setelah data secara keseluruhan yang diperlukan untuk melakukan proses pengecoran telah didapatkan. Maka berikutnya merupakan tahapan pelaksanaan serangkaian metode dan proses pengecoran yang dilakukan menurut skema yang terakumulasi pada Gambar 4.7 berikut.



Gambar 4.7 Skema pengecoran anoda aluminium

4.1.2 Hasil Coran Anoda Aluminium

Adapun pada Gambar 4.8 terakumulasi hasil pengecoran anoda aluminium :



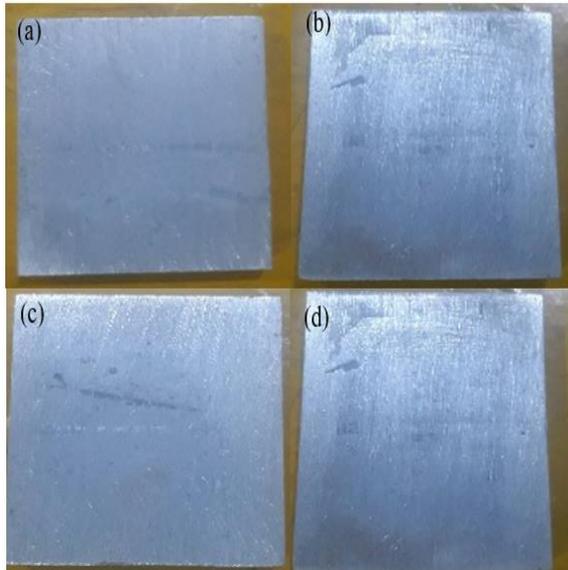
Gambar 4.8 Hasil coran anoda aluminium tanpa proses *machining* dengan penambahan (a) 0, (b) 0.3 Sn, (c) 0.9 Sn, dan (d) 1.6 Sn

Berdasarkan hasil pengamatan secara visual terhadap hasil coran anoda aluminium tersebut didapatkan bahwa terdapat cacat berupa inklusi. Kemudian permukaan benda coran yang dihasilkan kasar dan terdapat ketidaksesuaian dimensi hasil perhitungan dengan aktual. Ketidaksesuaian dimensi diakibatkan karena menggunakan cetakan untuk pengecoran dari batu tahan api, dimana sulit untuk mendapatkan dimensi yang akurat sesuai dengan perhitungan karena sifat fisik batu tahan api. Kemudian untuk cacat berupa inklusi diakibatkan karena serbuk sisa dari batu tahan api tersebut masih belum sepenuhnya bersih akibat hasil dari

proses pembuatan cetakan. Permukaan yang kasar penyebab utamanya adalah hasil dari kontur cetakan batu tahan api tersebut.

4.1.3 Hasil Coran Anoda Aluminium setelah Proses *Machining*

Adapun berikut pada Gambar 4.9 terakumulasi hasil benda coran anoda aluminium setelah melalui proses *machining* :



Gambar 4.9 Hasil coran anoda aluminium setelah proses *machining* dengan penambahan (a) 0, (b) 0.3 Sn, (c) 0.9 Sn, dan (d) 1.6 Sn

Hasil pengecoran tersebut merupakan kondisi anoda aluminium setelah dilakukan *machining* untuk mendapatkan dimensi yang dibutuhkan. Berdasarkan pengamatan secara visual, hasil pengecoran tersebut secara makro bebas dari internal defek, retakan, dan porositas pada bagian dalam seperti yang ditunjukkan pada gambar (a), (b), (c), dan (d). Hal tersebut sesuai dengan penelitian dari B. Ndaliman dan P.Pius, terkait penggunaan

temperatur tuang 700°C agar didapatkan hasil coran yang bebas dari internal defek. Kemudian untuk variasi penambahan timah menurut perhitungan terbukti berhasil berdasarkan hasil pengujian menggunakan XRF dan metalografi.

4.2 Komposisi Kimia Anoda Aluminium

Pengujian komposisi kimia anoda aluminium hasil pengecoran dilakukan dengan menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF). Pada hasil uji XRF yang dilakukan di Lembaga Pusat Penelitian Mahasiswa ITS (LPPM ITS), dimana berdasarkan pengujian tersebut didapatkan perbandingan hasil target komposisi hasil perhitungan dengan hasil pengujian dalam Tabel 4.2-4.4.

Tabel 4.1 Komposisi anoda aluminium (Al)

Komposisi	Al	P	Ca	Ti	Fe	Co	Ni	Cu	Zn
Hasil Pengujian	81.45	0.78	0.84	0.045	0.3835	0.01	0.023	0.165	16.31

Tabel 4.2 Komposisi anoda aluminium (Al + 0.3 Sn)

Komposisi	Al	P	Ca	Ti	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Sn
Target	81,45	0,78	0,84	0,045	0,3835	0,01	0,023	0,165	16	0,3
Hasil Pengujian	76.2	1.6	1.2	0.1	0.519	0.01	0.031	0.11	19.95	0.3

Tabel 4.3 Komposisi anoda aluminium (Al + 0.9 Sn)

Komposisi	Al	P	Ca	Ti	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Sn
Target	81,45	0,78	0,84	0,045	0,3835	0,01	0,023	0,165	15.4	0.9
Hasil Pengujian	76.55	2.5	1.4	0.06	0.31	0.015	0.045	0.125	18.1	0.865

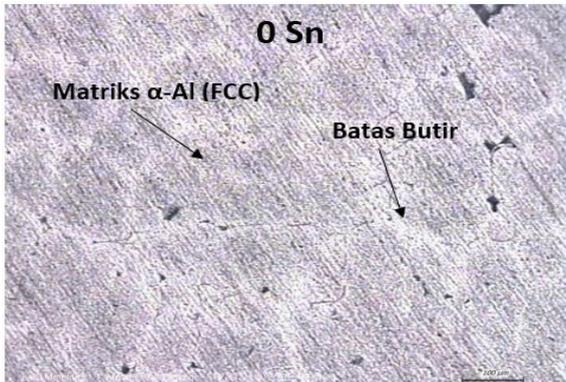
Tabel 4.4 Komposisi anoda aluminium (Al + 1.6 Sn)

Komposisi	Al	P	Ca	Ti	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Sn
Target	81,45	0,78	0,84	0,045	0,3835	0,01	0,023	0,165	14.7	1.6
Hasil Pengujian	78.85	0.56	0.55	0.056	0.35	0.01	0.023	0.075	17.93	1.6

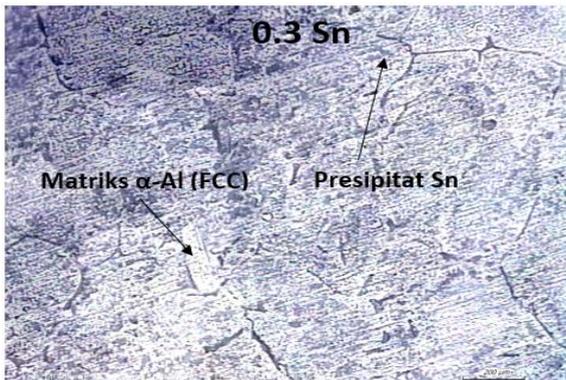
Komposisi target tersebut direncanakan sesuai dengan variabel yang dipilih yaitu 0.3, 0.6, dan 0.9 Sn. Pemilihan variabel tersebut mengarah pada menganalisis lebih lanjut pengaruh penambahan timah (Sn) dengan variasi melebihi batas kelarutan timah dalam matriks aluminium. Kemudian dilakukan perhitungan kebutuhan anoda aluminium dan timah supaya menghasilkan sesuai dengan target. Berdasarkan hasil pengujian komposisi tersebut dapat diketahui bahwa target variasi penambahan timah (Sn) cukup sesuai namun terjadi fluktuasi dari komposisi anoda aluminium dimana hal tersebut berasal dari adanya interaksi dengan lingkungan ketika pengecoran dengan cetakan terbuka.

4.3 Pengujian Metalografi

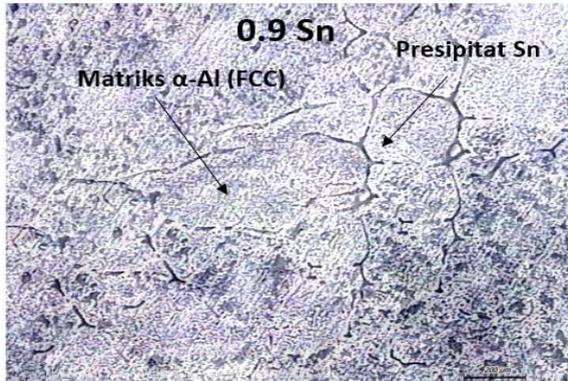
Pengujian metalografi dilakukan menggunakan standar ASTM E 407-07. Pengujian ini dilakukan di Laboratorium Metalurgi Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS. Larutan etsa yang digunakan adalah larutan etsa Keller yang memiliki komposisi terdiri atas : 2 mL HF, 3 mL HCl, 5 mL HNO₃, dan 190 mL Aquades. Pengujian ini dilakukan sebagai identifikasi hasil variasi penambahan timah (Sn) terhadap anoda aluminium. Identifikasi dilakukan dengan membandingkan struktur mikro yang didapatkan dari anoda aluminium tanpa penambahan timah (Sn) terhadap anoda aluminium dengan penambahan timah (Sn) sebesar 0.3, 0.9, dan 1.6. Berdasarkan pengujian tersebut didapatkan hasil struktur mikro berikut :



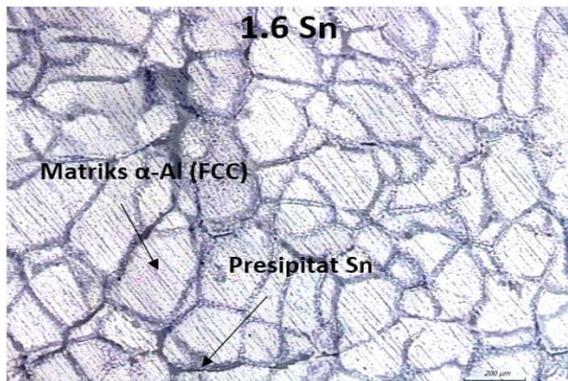
Gambar 4.10 Struktur Mikro Anoda Aluminium (Al) Perbesaran 10x



Gambar 4.11 Struktur mikro anoda aluminium (Al + 0.3 Sn) perbesaran 10x



Gambar 4.12 Struktur mikro anoda aluminium (Al + 0.9 Sn) perbesaran 10x



Gambar 4.13 Struktur mikro anoda aluminium (Al + 1.6 Sn) perbesaran 10x

Pada pengamatan terhadap struktur mikro anoda aluminium, terlihat bahwa pengaruh penambahan timah (Sn) memiliki pengaruh yang cukup signifikan. Pada Gambar 4.10 tentang struktur mikro anoda aluminium tanpa penambahan timah (Sn) tampak bahwa batas butirnya terlihat jelas pada bagian yang tampak lebih terang di matriks. Kemudian pada pengamatan visual

struktur mikro anoda aluminium dengan penambahan 0.3wt% timah (Sn) seperti pada Gambar 4.11 mulai tampak perbedaan kondisi matriks dimana mulai muncul penebalan tipis pada batas butir yang memiliki warna kehitaman. Kemudian pada struktur mikro anoda aluminium dengan penambahan 0.9wt% dan 1.6 wt% seperti pada Gambar 4.12 dan 4.13 menunjukkan peningkatan kuantitas penebalan pada batas butir yang memiliki warna kehitaman serta memiliki intensitas ketebalan yang semakin meningkat seiring dengan naiknya penambahan timah (Sn) pada anoda aluminium. Namun, setiap penebalan yang terbentuk seiring penambahan timah (Sn) belum menyeluruh ke semua bagian matriks α -aluminium.

Paduan logam umumnya ketika dikombinasikan dapat membentuk suatu larutan padat baik *substitutional* maupun *interstisial* dimana masing-masing memiliki syarat tertentu yang harus dipenuhi. Dalam rangka membentuk suatu larutan padat *substitutional*, adapun ada beberapa syarat yang harus terpenuhi diantaranya memiliki struktur kristal yang sama, memiliki diameter atau jari-jari atom dengan perbedaan maksimum 15%, memiliki afinitas yang rendah dimana berada pada lokasi yang dekat dalam suatu tabel periodik unsur, dan memiliki nilai valensi yang lebih rendah dimana ketika suatu logam memiliki valensi yang lebih tinggi maka kemampuan untuk melarutkan logam dengan valensi lebih rendah menjadi terbatas serta sebaliknya. Kemudian dalam rangka membentuk larutan padat *interstisial*, maka syaratnya yaitu memiliki jari-jari atom kurang dari 1 Angstrom supaya dapat menyisip masuk diantara susunan kristal logam lain. Adapun unsur dengan kriteria *interstisial* diantaranya hidrogen (0.46 Å), boron (0.97 Å), nitrogen (0.71), dan oksigen (0.60).

Pada kondisi paduan aluminium yang diberikan penambahan timah (Sn), oleh karena timah (Sn) memiliki nilai jari-jari atom yang besar yaitu 1.45 Å sehingga fenomena paduannya tidak dapat dikategorikan membentuk larutan padat *interstisial*. Namun, baik aluminium maupun timah, keduanya memiliki struktur kristal yang

sama yaitu *face centered cubic* (fcc) dan diantara keduanya memiliki afinitas yang rendah akibat letak golongan pada tabel periodik unsur berdekatan sehingga memenuhi syarat utama untuk terjadi fenomena larutan padat *substitutional*. Ketika meninjau jari-jari atom, aluminium memiliki nilai sebesar 1.18 Å sehingga jika dikorelasikan dengan jari-jari atom timah sebesar 1.45 Å didapatkan bahwa terdapat perbedaan sebesar 18.6% melebihi syarat maksimum 15% sehingga menjadikan kelarutan timah dalam aluminium menjadi terbatas.

Kemudian meninjau lebih lanjut pembahasan diatas, dimana berkesesuaian juga ketika menganalisis diagram fasa Al-Sn pada ASM Handbook Vol. 3, timah (Sn) hanya memiliki kelarutan terbatas di dalam matriks aluminium kurang dari 0.01wt% pada temperatur leleh sekitar 231.9°C dan juga diketahui bahwa timah (Sn) memiliki kelarutan lebih tinggi sekitar 0.12wt% pada temperatur 600°C keatas (Polmear, 1995). Hal tersebut berarti bahwa penambahan komposisi timah (Sn) melebihi batas kelarutan tersebut akan menyebabkan munculnya presipitat timah (Sn) pada batas butir matriks aluminium oleh karena matriks aluminium tidak mampu melarutkan sejumlah komposisi tersebut untuk menjadi larutan padat.

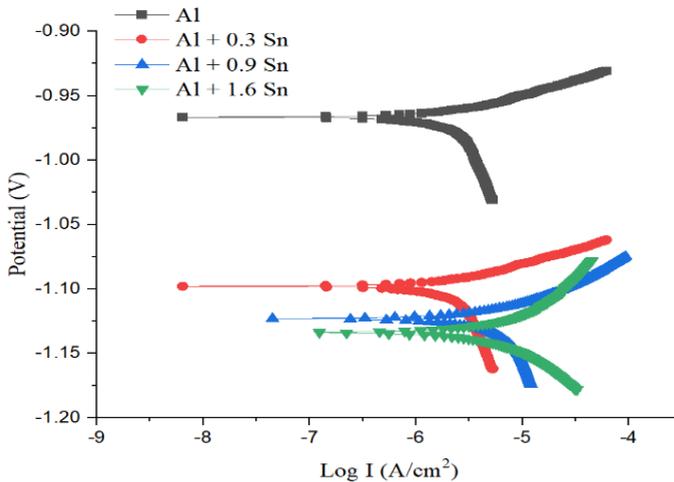
Disamping itu, beberapa penelitian berikut juga menjelaskan aspek serupa terkait pengaruh penambahan komposisi timah (Sn) terhadap struktur mikro matriks aluminium. Menurut penelitian Muhammad Daud dan Zhaifol Shamsu (2013), penambahan timah (Sn) pada paduan Al-Zn-Mg menyebabkan terbentuknya segregasi pada sepanjang batas butir, dan ketidakteraturan ukuran butir. Menurut penelitian Donggyu Kim (2009), penambahan (Sn) menyebabkan segregasi pada batas butir yang intensitas penebalannya semakin tinggi seiring dengan tingginya penambahan komposisi timah (Sn). Menurut penelitian L.E Umoru dan O.O. Ige (2007), penambahan timah (Sn) menghasilkan struktur mikro yang memiliki bentuk yang tidak teratur dan hampir berbentuk heksagonal diakibatkan karena keberadaan presipitat pada butir. Menurut penelitian S. Khireche, (2014), terjadi

penurunan ukuran butir seiring dengan penambahan komposisi timah (Sn) diikuti dengan distribusi presipitat Sn yang menyebabkan terjadinya efek galvanik.

Berdasarkan beberapa literatur tersebut dapat diketahui bahwa struktur mikro yang didapatkan dari hasil penambahan variasi komposisi timah (Sn) terhadap anoda aluminium telah berkesesuaian. Pada struktur mikro anoda aluminium tanpa penambahan timah seperti pada Gambar 4.10 batas butir terlihat jelas dan tidak ada penebalan segregasi dibandingkan dengan struktur mikro anoda aluminium dengan variasi penambahan timah (Sn) seperti pada Gambar 4.11, 4.12, dan 4.13. Keberadaan segregasi berwarna kehitaman disepanjang batas butir dapat divalidasi muncul akibat dari presipitat timah (Sn) karena tidak mampu dilarutkan oleh matriks α -aluminium untuk membentuk larutan padat. Hal tersebut menyebabkan efek menyerupai korosi galvanik karena pada matriks terdapat dua jenis logam yang berbeda (Fontana, 1987), sehingga meningkatkan aktivitas dari anoda aluminium menjadi lebih aktif seiring dengan penambahan komposisi timah (Sn) dibuktikan lebih lanjut dengan hasil pengujian tafel polarisasi.

4.4 Pengujian Tafel

Pengujian tafel ini dilakukan untuk mendapatkan nilai laju korosi dari anoda aluminium dibandingkan dengan anoda aluminium yang diberikan penambahan variasi komposisi timah (Sn) melalui proses pengecoran. Pengujian ini dilakukan di Laboratorium Korosi dan Analisa Kegagalan Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS. Pengujian ini menggunakan standar ASTM G5. Kurva hasil pengujian tafel dari anoda aluminium dan anoda aluminium yang diberi variasi penambahan timah (Sn) 0.3, 0.9, dan 1.6 ditunjukkan pada Gambar 4.14.



Gambar 4.14 Kurva Hasil Pengujian Tafel

Kurva polarisasi tafel tersebut menggunakan representasi skala logaritmik. Setiap kurva yang dihasilkan oleh pengujian tafel polarisasi terdiri atas dua buah kurva yaitu kurva anodik dan katodik, dimana kurva anodik berada dibagian atas dan kurva katodik berada dibagian bawah. Kurva anodik merepresentasikan fenomena reaksi oksidasi yang terjadi selama pengujian. Sedangkan kurva katodik merepresentasikan fenomena reaksi reduksi yang terjadi selama pengujian. Berangkat dari kurva anodik dan katodik tersebut kemudian ditarik garis lurus yang menyinggung bagian dalam masing-masing dari kurva tersebut sehingga dengan menggunakan metode ekstrapolasi didapatkan suatu titik perpotongan kedua garis tersebut untuk mendapatkan nilai E_{corr} dan I_{corr} dari masing-masing spesimen.

Berdasarkan kurva tersebut dapat diketahui bahwa terjadi peningkatan aktivitas anoda aluminium ke daerah yang lebih aktif seiring dengan penambahan timah (Sn). Peningkatan aktivitas tersebut ditandai dengan adanya transisi nilai I_{corr} ke arah yang semakin tinggi seiring dengan penambahan komposisi timah (Sn). Kurva anoda aluminium tanpa penambahan timah (Sn)

menunjukkan nilai I_{corr} sebesar $3.3219\text{E-}06$ A/cm². Ketika diberikan penambahan timah (Sn) sebesar 0.3%wt terjadi perubahan nilai I_{corr} menjadi lebih tinggi yaitu sebesar $1.5424\text{E-}05$ A/cm². Kemudian setelah penambahan timah (Sn) menjadi 0.9%wt terjadi perubahan nilai I_{corr} menjadi lebih tinggi dibandingkan ketika penambahan komposisi timah (Sn) hanya 0.3%wt yaitu sebesar $1.9552\text{E-}05$ A/cm². Pada penambahan terakhir sebesar 1.6%wt timah (Sn) menghasilkan perubahan nilai I_{corr} yang lebih tinggi dibandingkan penambahan komposisi timah (Sn) 0.9%wt yaitu sebesar $2.1682\text{E-}05$ A/cm².

Rekapitulasi hasil pengujian tafel akibat pengaruh penambahan timah (Sn) terdapat pada Tabel 4.5 berikut. Menurut Stefan Krakowiak (2017), nilai I_{corr} merupakan nilai kinetik sedangkan nilai E_{corr} merupakan nilai termodinamik, sehingga laju korosi memiliki hubungan sebanding dengan kenaikan I_{corr} sedangkan E_{corr} hanya menunjukkan kecenderungan untuk mengalami korosi namun bukan sebanding dengan laju korosi. Kemudian pada standar ASTM G-102 tentang perhitungan laju korosi dan pengukuran elektrokimia melalui persamaan perhitungan laju korosi – hukum faraday menunjukkan bahwa ketika nilai I_{corr} semakin tinggi akan menghasilkan output nilai laju korosi yang semakin tinggi akibat persamaan yang saling berbanding lurus.

Tabel 4.5 Rekapitulasi nilai E_{corr} , I_{corr} , dan laju korosi anoda aluminium

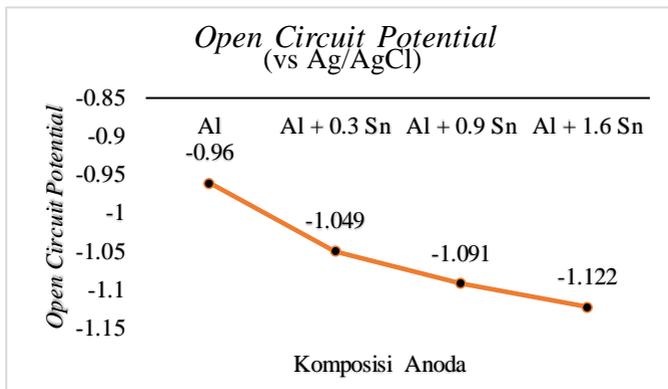
Komposisi	E_{corr} (V)	I_{corr} (A/cm ²)	Laju Korosi (mpy)
Al	-0.9667	$3.3219\text{E-}06$	0.11227
Al + 0.3 Sn	-1.1105	$1.5424\text{E-}05$	0.52129
Al + 0.9 Sn	-1.1264	$1.9552\text{E-}05$	0.66082
Al + 1.6 Sn	-1.1302	$2.1682\text{E-}05$	0.73279

Berdasarkan Tabel 4.5 maka dapat diketahui bahwa seiring dengan penambahan timah (Sn) menyebabkan terjadinya transisi

nilai I_{corr} kearah yang lebih tinggi sehingga memiliki implikasi bahwa anoda aluminium kondisinya menjadi semakin aktif. Hal tersebut ditunjukkan dengan laju korosi yang meningkat dari 0.11227 mpy hingga menjadi 0.73279 mpy. Fenomena tersebut diakibatkan karena keberadaan timah (Sn) yang tidak larut sempurna dalam matriks α -aluminium sehingga menyebabkan munculnya presipitat. Ketika penambahan komposisi timah (Sn) semakin banyak, hal itu menyebabkan kuantitas presipitat pada matriks aluminium juga semakin banyak sehingga menyebabkan terjadinya peningkatan laju degradasi lapisan pasif yang dibentuk oleh aluminium seperti fenomena terjadinya korosi galvanik (L.E Umoru dan O.O Ige, 2007). Kondisi tersebut menyebabkan laju korosi menjadi semakin tinggi.

4.5 Pengujian *Open Circuit Potential*

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui dan membandingkan nilai *open circuit potential* (OCP) pada anoda aluminium tanpa penambahan komposisi timah (Sn) dan setelah variasi penambahan timah (Sn) sebelum digunakan untuk memproteksi suatu struktur pada lingkungan air laut. Pengujian ini dilakukan dengan menghubungkan rangkaian anoda aluminium dan elektroda Ag/AgCl pada voltmeter dimana anoda aluminium dan elektroda Ag/AgCl dalam keadaan setengah tercelup larutan NaCl 3.5% dan untuk ketentuan-ketentuannya mengikuti standar ASTM G71-81. Berdasarkan pengujian tersebut didapatkan hasil seperti pada Gambar 4.15 berikut :



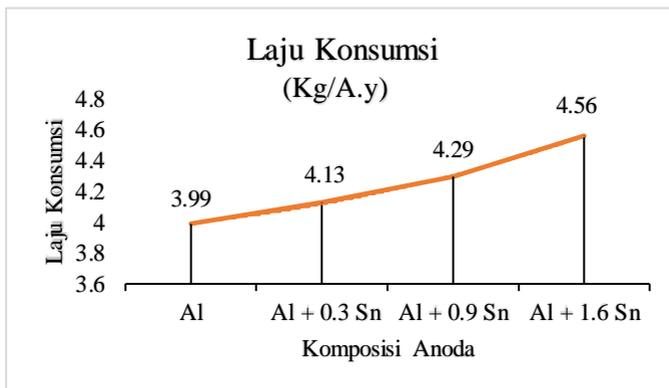
Gambar 4.15 Grafik nilai perbandingan nilai *open circuit potential* anoda aluminium

Berdasarkan grafik tersebut didapatkan bahwa nilai *open circuit potential* anoda aluminium akan semakin negatif seiring dengan meningkatnya variasi penambahan timah (Sn). Pada anoda aluminium tanpa penambahan timah (Sn) didapatkan nilai *open circuit potential* sebesar -0.96 V vs Ag/AgCl. Sedangkan setelah terdapat variasi penambahan timah sebesar 0.3, 0.9, dan 1.6 menghasilkan nilai *open circuit potential* menjadi -1.049 V, -1.091 V, dan -1.122 V vs Ag/AgCl. Hal tersebut terjadi karena berangkat dari hasil pengujian metalografi dimana ketika adanya penambahan timah (Sn) melebihi batas kemampuan aluminium dalam melarutkannya yaitu pada 0.12wt% sehingga tidak terbentuk larutan padat sempurna namun timah (Sn) yang tidak dapat dilarutkan muncul sebagai segregasi dan titik-titik hitam pada batas butir sehingga menyebabkan munculnya dua fasa yang berbeda pada struktur mikro. Ketika penambahan timah (Sn) semakin tinggi menyebabkan keberadaan presipitat timah (Sn) semakin banyak sehingga beda potensial pada batas butir semakin tinggi. Ketika beda potensial semakin tinggi maka kecenderungan untuk terkorosi menjadi semakin tinggi. Interpretasi kecenderungan untuk terkorosi diterjemahkan dalam bentuk nilai *open circuit potential* dimana seiring meningkatnya penambahan timah akan

menyebabkan efek galvanik sehingga meningkatkan aktivitas (potensial menjadi semakin negatif) anoda aluminium (Khireche, S, 2014). Hal tersebut berkesesuaian dengan penelitian yang dihasilkan oleh Khireche (2014) dimana nilai *open circuit potential* semakin negatif seiring dengan meningkatnya penambahan timah (Sn).

4.6 Pengujian Galvanik

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui dan membandingkan nilai laju konsumsi, kapasitas arus, dan efisiensi dari anoda aluminium tanpa penambahan timah (Sn) dan setelah variasi penambahan timah (Sn). Pengujian ini dilakukan menggunakan standar ASTM G71-81 dimana menghubungkan anoda aluminium sebagai anoda dengan baja sebagai katoda pada suatu rangkaian yang dihubungkan ke avometer. Kemudian dari dilakukannya pengujian ini akan menghasilkan data berupa keluaran arus dalam mA dan pengurangan massa anoda aluminium gram. Kemudian hasil tersebut dimasukkan ke rumus perhitungan sesuai yang terdapat pada tinjauan pustaka. Berdasarkan pengujian ini didapatkan hasil seperti pada Gambar 4.16-4.18 berikut :

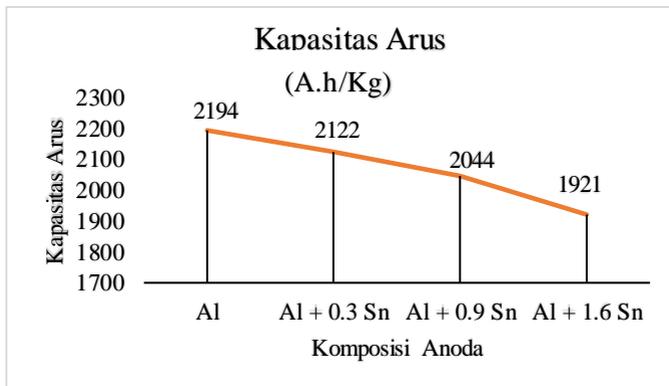


Gambar 4.16 Grafik perbandingan nilai laju konsumsi anoda aluminium

Berdasarkan grafik tersebut dapat diketahui bahwa nilai laju konsumsi anoda korban aluminium meningkat seiring dengan meningkatnya penambahan timah (Sn). Anoda korban aluminium tanpa penambahan timah memiliki laju konsumsi sebesar 3.99 Kg./A.y. Setelah penambahan timah dengan variasi 0.3, 0.9, dan 1.6 menghasilkan nilai laju konsumsi menjadi 4.13 Kg/A.y, 4.29 Kg/A.y, dan 4.56 Kg/A.y. Nilai laju konsumsi tersebut didapatkan dari perhitungan pengurangan massa anoda dibagi dengan arus dan waktu celup. Pada awalnya secara runtut adanya pengujian metalografi bertujuan untuk mengetahui keberadaan timah (Sn) pada struktur mikro dalam rangka mengetahui pengaruhnya. Pada umumnya timah memiliki struktur kristal FCC sama dengan aluminium sehingga mampu mengarah untuk menjadi larutan padat namun karena diameter atom dari timah (Sn) 18% lebih tinggi dari pada aluminium sehingga kelarutannya terbatas. Batas kemampuan aluminium melarutkan timah hanya sebesar 0.12 wt% pada temperatur di atas 600°C sehingga menyebabkan penambahan timah (Sn) yang melewati batas tersebut menjadi berupa presipitat dalam bentuk segregasi dan titik-titik hitam pada matriks α -aluminium. Pada hasil pengujian metalografi dimana menunjukkan keberadaan presipitat timah (Sn) yang semakin meningkat seiring penambahan timah (Sn) berpengaruh pada terjadinya fenomena korosi pada struktur mikro akibat keberadaan fasa ganda sehingga menimbulkan beda potensial. Berdasarkan beda potensial yang semakin besar seiring dengan konsentrasi presipitat timah (Sn) yang semakin besar maka menyebabkan laju korosi yang semakin besar. Kondisi dimana laju korosi yang semakin besar berakibat pada jumlah pengurangan massa yang besar dan peningkatan arus yang semakin besar sehingga menyebabkan nilai laju konsumsi atau pengausan menjadi semakin tinggi. Ketika laju konsumsi semakin tinggi maka akan berkorelasi dengan nilai kapasitas arus yang semakin rendah karena keluaran arus tiap satuan kilogramnya tidak optimum. Dalam artian untuk memproteksi suatu luasan struktur anoda aluminium memiliki laju konsumsi yang tinggi namun seiring tingginya laju konsumsi tersebut tidak diiringi

dengan keluaran arus proteksi yang juga optimum. Hal tersebut seperti yang tervisualisasikan pada Gambar 4.17. Oleh karena, nilai kapasitas arus semakin berkurang hal tersebut mengakibatkan efisiensi penggunaan anoda aluminium juga semakin menurun. Efisiensi dalam hal ini didefinisikan sebagai kemampuan anoda untuk memproteksi suatu luasan struktur menggunakan kapasitas arus tertentu dalam tiap kilogram massanya. Persoalan efisiensi tertuang pada Gambar 4.18

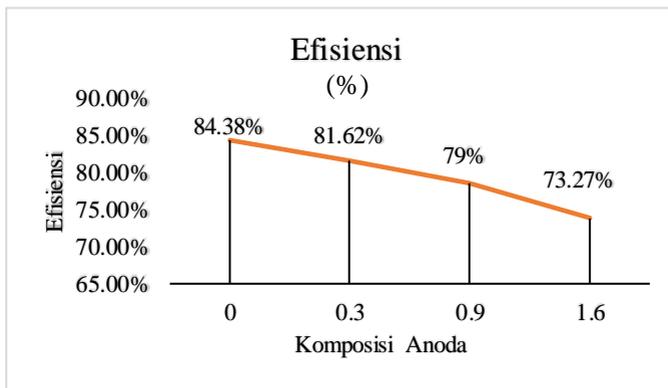
Hal tersebut berkesuaian dengan literatur terkait penambahan komposisi timah akan meningkatkan aktivitas anoda dimana nilai I_{corr} meningkat (Khireche, S, 2014) akibat adanya efek galvanic yang terjadi. Nilai I_{corr} sebanding dengan kinetika korosi (Stefan Krakowiak, 2017). Kemudian berdasarkan dokumen standar ASTM G-102, nilai I_{corr} yang semakin tinggi menyebabkan laju korosi semakin tinggi. Ketika pengurangan massa anoda (laju korosi) semakin besar, maka akan dihasilkan laju konsumsi yang semakin besar karena cenderung cepat habis.



Gambar 4.17 Grafik perbandingan nilai kapasitas arus anoda aluminium

Berdasarkan grafik tersebut dapat diketahui bahwa nilai kapasitas arus aktual anoda korban aluminium menurun seiring dengan penambahan timah (Sn). Anoda korban aluminium tanpa

penambahan timah memiliki nilai kapasitas arus aktual sebesar 2194 A.h/Kg. Setelah penambahan timah dengan variasi 0.3, 0.9, dan 1.6 menghasilkan nilai kapasitas arus menjadi 2122 A.h/Kg, 2044 A.h/Kg, dan 1921 A.h/Kg. Nilai kapasitas arus tersebut didapatkan dari perhitungan arus dikalikan dengan waktu celup dibagi pengurangan massa anoda aluminium. Bilamana dibandingkan dengan kapasitas arus teori anoda aluminium (Al-Zn-Sn) yaitu sebesar 2600 A.h/Kg (L.Sherwood, 1994), maka nilai hasil pengujian ini tidak dapat mencapai nilai kapasitas teoritis tersebut. Hasil pengujian ini telah berkesesuaian dengan literatur dimana ketika I_{corr} meningkat maka laju korosi anoda korban aluminium akan berbanding lurus dengan kenaikan tersebut (Stefan Krakowiak, 2017). Ketika laju korosi semakin tinggi, maka laju konsumsi anoda korban aluminium pada tiap 1 kilogram dalam kurun waktu tertentu. Hal itu disebabkan karena terjadinya keluaran arus anoda korban aluminium yang semakin banyak pada tiap kilogram massanya. Oleh karenanya ketika membutuhkan kebutuhan arus tertentu dan cukup besar akan menyebabkan anoda korban aluminium menjadi cepat habis dan membutuhkan massa anoda yang besar untuk proteksi yang lebih lama.



Gambar 4.18 Grafik perbandingan nilai efisiensi anoda aluminium

Berdasarkan grafik tersebut dapat diketahui bahwa nilai efisiensi anoda korban aluminium akan menurun seiring dengan penambahan timah (Sn). Anoda korban aluminium tanpa penambahan timah memiliki nilai efisiensi sebesar 84.38%. Setelah penambahan timah dengan variasi 0.3, 0.9, dan 1.6 menghasilkan nilai kapasitas arus menjadi 81.62%, 79%, dan 73.27%. Nilai efisiensi tersebut didapatkan dari perhitungan nilai kapasitas arus aktual dibagi dengan kapasitas arus teoritis seperti persamaan pada tinjauan pustaka. Anoda korban aluminium paduan Al-Zn-Sn memiliki nilai kapasitas arus teoritis sebesar 2600 A.h/Kg (L.Sherwood). Karakteristik anoda korban aluminium yang semakin aktif seiring dengan penambahan timah (Sn) menjadikan laju konsumsi anoda aluminium semakin besar. Ketika nilai laju konsumsi anoda aluminium semakin besar maka akan memiliki kecenderungan untuk semakin cepat habis dalam masa pakainya sehingga nilai efisiensinya semakin menurun, oleh karenanya agar efisiensi semakin naik maka diperlukan nilai pengurangan massa anoda yang semakin rendah dalam kurun waktu tertentu atau dalam artian laju korosinya tidak terlalu tinggi. (Jithin, 2018).

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang dapat ditarik berdasarkan penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Penambahan timah (Sn) berpengaruh pada struktur mikro anoda korban aluminium dimana seiring peningkatan penambahan timah menyebabkan semakin banyaknya segregasi pada batas butir matriks α -aluminium, munculnya titik-titik hitam, dan ukuran butir tidak teratur. Hal tersebut karena distribusi timah (Sn) yang menjadi presipitat sehingga menyebabkan efek galvanik.
2. Penambahan timah (Sn) berpengaruh terhadap adanya peningkatan aktivitas anoda aluminium akibat efek galvanik pada struktur mikro, sehingga seiring peningkatan komposisi timah (Sn) yang menyebabkan nilai *open circuit potential* menjadi semakin negatif yaitu dari -0.96 V vs Ag/AgCl menjadi -1.122 V vs Ag/AgCl, laju korosi semakin tinggi dari 0.11227 mpy menjadi 0.73279 mpy, laju konsumsi semakin tinggi dari 3.99 Kg./A.y menjadi 4.56 Kg/A.y, kapasitas arus semakin rendah dari 2194 A.h/Kg menjadi 1921 A.h/Kg, dan efisiensi semakin rendah dari 84.38% menjadi 73.27%.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya antara lain :

1. Melakukan penelitian anoda aluminium menggunakan bahan Al ingot lalu tetap dipadukan dengan Sn ingot untuk melihat komparasinya dengan penelitian ini.
2. Melakukan penelitian terhadap karakteristik mekanik anoda aluminium akibat penambahan komposisi Sn.
3. Melakukan penelitian pemodelan aplikasi anoda aluminium dengan variasi komposisi Sn pada suatu struktur *offshore* atau *hull* kapal laut.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Sultani, A. P. 2012. "Effects of Tin on Aluminum – Zinc Alloy as Sacrificial Anode to Protect Underground Pipeline in Al-Mahawil Regional". **Advanced Material Research**, 468-471.
- Ameh, E., Ikpeseni, S. C., & Lawal, L. 2017. "A Review of Field Corrosion Control and Monitoring Techniques of the Upstream Oil and Gas Pipelines". **Journal of Technological Development**, 14(2), 67-73.
- American Standard for Testing Material. 2002. **ASTM G5 - 87 : Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements**. Columbus: ASTM .
- American Standard for Testing Material. 2015. **ASTM E407-07:Standard Practice for Microetching Metals and Alloys**. ASTM.
- American Standard for Testing Material. 2017. **ASTM E3-11:Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens**. ASTM.
- American Standard for Testing Material. 2019. **ASTM G71-81:Standard Guide for Conducting and Evaluating Galvanic Corrosion Tests in Electrolytes**. ASTM.
- Anggono, J. 2000. "Studi Perbandingan Kinerja Anoda Korban Paduan Aluminium dengan Paduan Seng dalam Lingkungan Air Laut". **Jurnal Teknik Mesin**, 89-99.
- Ashrafi, E. A., Hasan, A., & Rashed, H. M. 2013. "Effect of Cu in Al-Si Alloys with Phase Modelling". **International Journal on Mechanical, Industrial, and Materials Engineering**, 583-588.
- Ashworth, V. 1986. **The Theory of Cathodic Protection and Its Relation to the Electrochemical Theory of Corrosion in Cathodic Protection: Theory and Practice**. Chicester: Ellis Horwood Ltd.

-
- ASM Handbook Volume 15 : Casting.** 1988. Ohio: ASM International.
- ASM Handbook Volume 3 : Alloy Phase Diagram.** 2003. Ohio: ASM International.
- Asmara, Y. 2016. "Improving Efficiency of Aluminium Sacrificial Anode Using Cold Work Process". **Material Science and Engineering**, 1-6.
- Athawale, M., & Chakraborty, S. 2012. "Material Selection using Multi-Criteria Decision-Making Methods: A Comparative Study". **Journal of Materials: Design and Applications**, 266-285.
- B. Akinwolemiwa. 2015. "Redox Electrolytes in Capacitors". **Electrochemical Society**, A5054-A5059.
- Bahadori. 2014. "Principle of Electrochemical Corrosion and Cathodic Protection". Dalam **Cathodic Corrosion Protection System** (hal. 1-34). Elsevier Inc.
- Bardal, E. 2003. **Corrosion and Protection.** *The Norwegian University of Science and Technology.* Trondheim, Norway: The Norwegian University of Science and Technology.
- Begum, & Kruger. 2016. **Corrosion of Metals: Overview.** Elsevier Ltd.
- Bohnes, H., & Franke, G. 1997. "Galvanic (Sacrificial) Anodes". Dalam W. v. Baeckmann, H. Bohnes, G. Franke, D. Funk, C. Gey, H. Gräfen, . . . W. Schwenk, **Handbook of Cathodic Corrosion Protection** (hal. 568). Elsevier. Inc.
- Brouwer, P. 2003. **Theory of XRF.** Almelo: PANalytical BV.
- Chen, Y., Xing, W., Wang, L., & Chen, L. 2019. "Experimental and Electrochemical Research of an Efficient Corrosion and Scale Inhibitor". **Journal of Materials**, 1-12.
- Cheng, Liu, Xie, Duan, & Zhang. 2015. "Effect of Ti on Microstructure and Properties of Aluminum Sacrificial Anode Containing Rare Earth Elements". **International Conference on Materials Engineering and Information Technology Applications** (hal. 941-944). Atlantis Press.
-

-
- Christian, V. 2004. **Corrosion of Aluminium**. Netherlands: Elsevier Ltd.
- Colvin, E. 2001. "Aluminium Alloys : Corrosion". Dalam K. J. Buschow, **Encyclopedia of Materials: Science and Technology** (hal. 107-110). Elsevier Ltd.
- Cruz, O., J. Genesca, & Islas, J. J. 2007. "Electrochemical Behavior of New Ternary Aluminum Alloys as Sacrificial Anodes". Dalam D. Feron, **Corrosion Behaviour and Protection of Copper and Aluminium Alloys in Seawater** (hal. 159-172). Woodhead.
- Daud, Kamarudin, S. M., Samsu, Z., Ripin, M. S., Sattar, M. S., & Rejab, R. 2013. "The Influence of Depassivating Element on The Performance of Aluminium Anode". **Journal of Nuclear and Related Technologies**, 10(2), 16-20.
- Davis, J. 1999. **Corrosion of Aluminium and Aluminium Alloys**. Ohio: ASM International.
- DNV GL. 2017. **Cathodic Protection Design DNV Recommended Practice RP-B401**. AS: Hovik Det Norske Veritas Industry.
- Egan, D. 2015. **Development and Characterization of Lightweight** , Alkaline Aluminium-Air Cell. 18-39.
- Ferdian, D., Pratesa, Y., Togina, I., & Adelia, I. 2017. "Development of Al-Zn-Cu Alloy for Low Voltage Aluminum Sacrificial Anode". **Advances in Material & Processing Technologies Conference** (hal. 418-422). Elsevier Ltd.
- Fontana. 1987. **Corrosion Engineering**. Ohio: Department of Metallurgical Engineering Ohio University.
- Frosch, & Johnson. 2011. **Rancor Grows Over Planned Oil Pipeline from Canada**. New York: New York Times.
- Groover, M. P. 2010. **Fundamentals of Modern Manufacturing**. USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Harsisto, Ginting, I., & Eddy. 2001. "Kinerja Proteksi Anodik Baja ASTM A516-60 dan JIS G3131-SPHC dalam Asam Sulfat
-

-
- Pekat". **Indonesian Journal of Material Science**, 2(3), 19-25.
- Jithin. 2018. "Improvement of Sacrificial Anode Characteristics of Al-Mg-Zn Alloy Material". **Material Science**, 76-78.
- Jiuba Wen Janguang He, X. L. 2011. "Influence of Silicon on the Corrosion Behavior of Al - Zn - In - Mg - Ti ". **Elsevier Journal of Corrosion Science**, 3861-3865.
- Janguang He, J. W. 2011. "Effects of Precipitates on the Electrochemical Performance of Al Sacrificial Anode". **Elsevier Journal of Corrosion Science**, 1948-1953.
- Keir D.S, R. M. 1972. "Galvanic Corrosion Characteristics of Aluminium Alloyed with Group IV Metals". **Journal Electrochemistry** , 777-782.
- Khireche, S. 2014. "Corrosion mechanism of Al, Al-Zn and Al-Zn-Sn alloys in 3 wt.% NaCl Solution". **Corrosion Science**, 504-516.
- Kim, D. 2009. "Microstructural Control of Al-Sn Metal Bearing Alloy with Heat Treatment". **Journal of Material Science and Engineering**, 29(1), 45-51.
- Lansing, T. C. 1982. **Review of Corrosion Causes and Corrosion Control In a Technical Facility**. *DSN Engineering Section*, 145-156.
- Laque, F. L. 1975. **Marine Corrosion Causes and Prevention**. Canada: John Wiley & Sons, Inc.
- Mcmahon, M. E., Santucci, R. J., Glover, C. F., Kannan, B., Walsh, Z. R., & Scully, J. R. 2019. "A Review of Modern Assessment Methods for Metal and Metal-Oxide Based Primers for Substrate Corrosion Protection". **Journal of Materials**, 1-24.
- Muazu, A. 2011. "Effects of Zinc Addition on the Performance of Aluminium as Sacrificial Anode in Seawater". **Journal of Minerals and Materials and Characterization Engineering**, 185-198.
-

-
- Munoz, A. S. 2002. "Corrosion of an Al – Zn – In Alloy in Chloride Media". **Elsevier Journal of Corrosion Science**, 2171-2182.
- Nisancioglu, K. 2007. "Corrosion and Protection of Aluminum Alloys in Seawater". Dalam D. Feron, **Electrochemical Behavior of New Ternary Aluminum Alloys as Sacrificial Anodes** (hal. 145-155). Woodhead.
- Nova, S., & Misbah, M. N. 2012. "Analisis Pengaruh Salinitas dan Suhu Air Laut Terhadap Laju Korosi Baja A36". **Jurnal Teknik ITS**, 75-77.
- Peabody, A. 2001. **Control of Pipeline Corrosion** (2 ed.). Texas: NACE International.
- Perry, S., Gateman, S., Stephens, L., R.Lacasse, R.Schulz, & Mauzeroll, J. 2019. "Pourbaix Diagrams as a Simple Route to First Principles Corrosion". **Journal of The Electrochemical Society**, 3186-3192.
- Polmear, I. (1995). **Light Alloys : Metallurgy of the Light Metals** (3 ed.). London: Arnold.
- Pratesa, Y., Ferdian, D., & Togina, I. 2017. "Effect of Copper and Silicon on Al-5%Zn Alloy as a Candidate Low Voltage Sacrificial Anode". **5th International Conference on Nanomaterials and Materials Engineering** (hal. 1-4). IOP .
- Puridetvorakul, C., Poolthong, N., & Tareelap, N. 2017. "Corrosion Behavior of Al-Zn-In Sacrificial Anode Alloys Produced by Conventional Casting and Semi-Solid Metal Casting Processes". **Journal of Materials Engineering**, 101-106.
- Rajesh, R., & J.G, K. 2014. "Defects, Causes and Their Remedies in Casting Process: A Review". **International Journal of Research in Advent Technology**, 2(3), 375-383.
- Rao, P. N. 2013. **Manufacturing Technology Volume 1**. Tata McGraw-Hill Education.
- Revie, H. H. 2008. **An Introduction to Corrosion Science and Engineering**. New Jersey: A John Wiley & Sons, Inc.
-

-
- Roberge. 2012. **Handbook of Corrosion Engineering** (2 ed.). McGraw Hill.
- Shahria, S. 2017. "Optimization of Molding Sand Composition for Casting Al Alloy". **International Journal of Mechanical Engineering and Applications**, 155-161.
- Sharma, A., Zhang, C., Chang, A., Knoepfel, R., & Morgan, D. 2011. "Ab Initio and Thermodynamic Modelling of Alloying Effects on Activity of Sacrificial Aluminium Anodes". **Corrosion Science**, 1724-1731.
- Sherwood, L. 1994. "Sacrificial Anode". Dalam L. Sheir, R. Jarman, & G. Burstein, **Corrosion Control** (3 ed., hal. 29-54). Boston: Butterworth-Heinemann.
- Shusen Wang, C. L. 2014. "Effects of Fe Content on the Corrosion Behaviour of Al-Zn-In-Mg-Ti-Si Sacrificial Anode". **Applied Mechanics and Materials** , 543-547.
- Singh, R. 2014. **Corrosion Control for Offshore Structures**. Gulf Professional Publishing.
- Tait, W. S. 2018. "Controlling Corrosion of Chemical Processing Equipment". Dalam M. Kutz, **Handbook of Environmental Degradation of Materials** (hal. 583-600). Elsevier Inc.
- Trthewey, K. 1991. **Korosi untuk Mahasiswa dan Rekayasa**. Jakarta: PT. Gramedia Pustaka.
- Umoru, L. 2007. "Effects of Tin on Aluminum – Zinc – Magnesium Alloy as Sacrificial Anode in Seawater". **Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering**, 105-113.
- Utami, I. 2009. "Proteksi Katodik dengan Anoda Tumbal sebagai Pengendali Laju Korosi Baja dalam Lingkungan Aqueous". **Jurnal Teknik Kimia**, 3(2), 240-245.
- Wang, S., Yin, X., Zhang, H., Liu, D., & Du, N. 2019. "Coupling Effects of pH and Dissolved Oxygen on the Corrosion Behavior and Mechanism of X80 Steel in Acidic Soil Simulated Solution". **Journal of Materials**, 1-11.
-

-
- Yoo, H., Yun, K.-S., S.Kalubarme, R., Park, C.-N., & Park, C.-J. 2014. "Hydrogen Generation Using the Corrosion of Al-Sn and Al-Si Alloys in an Alkaline Solution". **Metals and Materials International**, 20(4), 619-627.
- Zaki, A. 2006. **Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control**. Saudi Arabia: Elsevier Science and Technology.
- Zazoua, A. A. 2008. "An Investigation on the Use of Indium to Increase Dissolution of Al-Zn Anodes in Seawater". **Elsevier Journal of Materials and Design**, 806-810.
- Zhang, J., Ebrahimi, N., & Lai, D. 2019. "Galvanic Corrosion Risk of Using Galvanized A325 Bolts in Corrosion-Resistant Steel Bridged". **Journal of Bridge Engineering**, 1-7.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

1. Lampiran 1

KEMENTERIAN RISET TEKNOLOGI DAN PENDIDIKAN TINGGI
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
UNIT LAYANAN BISNIS, JASA & PRODUKSI
 JL. TEKNIK KIMIA, KAMPUS ITS SUKOLILLO SURABAYA 60111
 TELP. (031) 5947186 – 5999444 FAX. (031) 5999444 e-mail: pusaka-ppns@ppns.ac.id

LAMPIRAN HASIL PENGUJIAN
 ATTACHMENT OF THE TEST RESULT

Nomor : **0999** /PL.19/BJP/2019
 Number :

No. SPK. 18-VIII/PL.19/BJP/2019

F.08-L.118-PPNS

PENGUJIAN KOMPOSISI KIMIA / CHEMICAL COMPOSITION TEST									
No.	KOMPOSISI (%)								
	Unsur	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
1	Nilai	97.0	0.403	0.255	1.02	0.0134	0.0016	0.985	0.0076
	Unsur	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W
	Nilai	0.0289	0.0285	0.0027	< 0.0010	0.0229	0.0042	0.0091	< 0.0010
	Unsur	Ph	Sn	B	Ca	Zr	Zn	Bi	As
	Nilai	< 0.0010	< 0.0005	0.0008	0.0008	0.0080	0.0014	0.0043	0.0026
	Unsur	N	Se	Sb	Ta				
	Nilai	0.132	0.0033	0.0231	0.0044				

Surabaya, 28 Agustus 2019
 Diuji oleh,  Diverifikasi oleh, 



POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM UJI BAHAN

OPTICAL EMISSION SPECTROSCOPY RESULT

Tanggal : 8/28/2019 Penandaan : -
No. SPK : 18-VIII/PL19/BJP/2019 Material : BAJA KARBON
Pelanggan : ONENG AULIA Dimensi : DIA. 19 x 23
Kepala Lab. : M. THORIQ W., ST., MM. Heat No. : -
Program : FE_100 Keterangan : -

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
1	97.0	0.400	0.251	1.01	0.0124	0.0014	0.981	0.0078
2	96.9	0.403	0.252	1.03	0.0127	0.0005	0.991	0.0073
3	97.0	0.407	0.263	1.02	0.0152	0.0029	0.983	0.0077
Ave	97.0	0.403	0.255	1.02	0.0134	0.0016	0.985	0.0076

	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W
1	0.0296	0.0258	0.0029	0.0012	0.0293	0.0039	0.0120	< 0.0010
2	0.0281	0.0253	0.0028	< 0.0010	0.0271	0.0039	0.0088	< 0.0010
3	0.0291	0.0283	0.0024	< 0.0010	0.0123	0.0047	0.0065	< 0.0010
Ave	0.0289	0.0265	0.0027	< 0.0010	0.0229	0.0042	0.0091	< 0.0010

	Pb	Sn	B	Ca	Zr	Zn	Bi	As
1	< 0.0010	< 0.0005	0.0007	0.0007	0.0076	0.0006	0.0049	0.0019
2	< 0.0010	0.0013	0.0009	0.0008	0.0082	0.0025	0.0031	0.0013
3	0.0013	< 0.0005	0.0009	0.0008	0.0081	0.0013	0.0048	0.0046
Ave	< 0.0010	< 0.0005	0.0008	0.0008	0.0080	0.0014	0.0043	0.0026

	N	Se	Sb	Ta
1	0.106	0.0026	0.0376	< 0.0040
2	0.151	0.0018	0.0319	< 0.0040
3	0.139	0.0056	< 0.0010	0.0132
Ave	0.132	0.0033	0.0231	0.0044

Diuji oleh,

MULHARAH

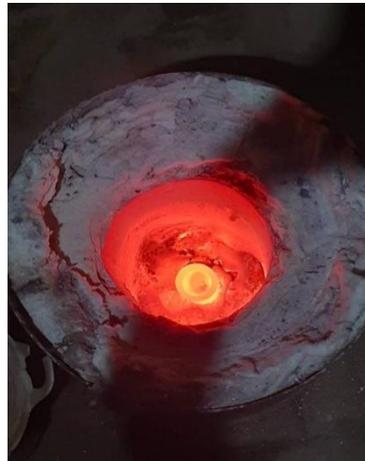


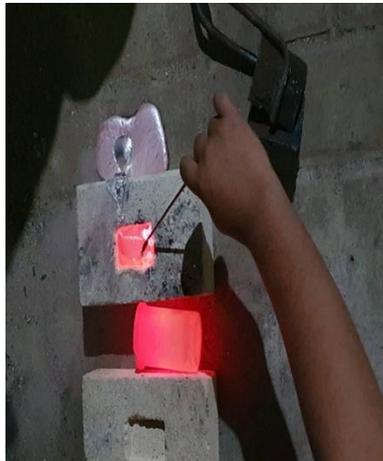
Jl. Teknik Kimia, Kampus ITS Sukolilo Surabaya (Indonesia)
Tel. +62 31 5999444 Fax. +62 31 5999444

2. *Lampiran 2*











3. Lampiran 3

Volume anoda setelah penambahan *allowance* : 12.5 cm^3

Asumsi massa jenis : 2.7 gram/cm^3

Massa target : 33.75 gram

b. Komposisi target I

Unsur	Keterangan	Target (%)	Total (%)
Al	Anoda Aluminium	81.45	99.695
P		0.78	
Ca		0.84	
Ti		0.045	
Fe		0.3835	
Co		0.01	
Ni		0.023	
Cu		0.165	
Zn		16	
Sn		99.9%	

Maka : Anoda yang dibutuhkan :

$$(99.695/100) \times 33.75 = 33.65 \text{ gram}$$

Timah yang dibutuhkan :
33.75 gram – 33.65 gram = 0.1 gram

c. Komposisi target II

Unsur	Keterangan	Target (%)	Total (%)
Al	Anoda Aluminium	81.45	99.0965
P		0.78	
Ca		0.84	
Ti		0.045	
Fe		0.3835	
Co		0.01	
Ni		0.023	
Cu		0.165	
Zn		15.4	
Sn		99.9%	

Maka : Anoda yang dibutuhkan :

$$(99.0965/100) \times 33.75 = 33.44 \text{ gram}$$

Timah yang dibutuhkan :

$$33.75 \text{ gram} - 33.44 \text{ gram} = 0.31 \text{ gram}$$

d. Komposisi target III

Unsur	Keterangan	Target (%)	Total (%)
Al	Anoda Aluminium	81.45	98.3965
P		0.78	
Ca		0.84	
Ti		0.045	
Fe		0.3835	
Co		0.01	
Ni		0.023	
Cu		0.165	
Zn		14.7	
Sn		99.9%	

Maka : Anoda yang dibutuhkan :

$$(98.3965/100) \times 33.75 = 33.2 \text{ gram}$$

Timah yang dibutuhkan :

$$33.75 \text{ gram} - 33.2 \text{ gram} = 0.55 \text{ gram}$$

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

UCAPAN TERIMA KASIH

Selama menjalani dinamika perkuliahan di Surabaya dari menjadi mahasiswa baru hingga penyelesaian Tugas Akhir ini. Pada kesempatan ini penulis ingin memberikan ucapan terimakasih pada :

1. Kurnia Indah Putri Emzar selaku kekasih penulis yang selalu memberikan dukungan dari awal kebersamaan di ITS hingga sekarang.
2. Sobat kontrakan C5 dan Tiensquad : Nopal, Agoy, Mahesa, Ari, Gary, Fajar, Ucup, dan Bayu.
3. Teman-teman dan mas mba HARMONIKA BEM FTI-ITS 2017/2018 staf dan cabinet. Khususnya teman-teman departemen dalam negeri Mas Maul, Mas Yoga, Mba Retno, Haggi, Iqbal, Ucup, Fandi, Dinda, Ardita, Luckyta, Bagas, dan Favian yang telah banyak memberikan pembelajaran berarti.
4. Teman seperjuangan keluarga INTERAKSI BEM FTI-ITS 2018/2019. Khususnya kabinet-kabinet terhebatku Ucup, Lucky, Favian, Ari, Alif, Yanne, Yordan, Rafa, Adrian, Handis, Sarah, Lina, Cho, Ivan, Qori, Fafa, Lila, Mahalli, Zizi, Geta, Ria, Putri, Ardita, Septi, Iqbal, dan Gefin atas perjuangan ikhlasnya selama lebih dari 400 hari Bersama menggerakkan rumah ini kearah yang lebih baik.
5. Adik-adik keluarga SIGMA BEM FTI-ITS 2019/2020 yang telah memberikan penulis dukungan serta mau mengemban amanah sebagai penghuni rumah pengembangan selanjutnya.
6. Sobat pemandu FTI-ITS dan forkom LKMM TM FTI-FBMT.
7. Sobat fasilitator acara GERIGI 2017 dan konseptor acara GERIGI 2018 khususnya sobat closing Arum, Uyab, Glo, dan Aufa.
8. Sobat pemandu silver HMMT FTI ITS MT17, MT18, dan MT20.

9. Sobat lab pengolahan Satrio, Erick, Henokh, Kepin, Sumantri, Mahanaim, serta Arif Rahman selaku partner Tugas Akhir yang membantu menghadapi lika-liku per TA an.
10. Mas dan Mba MT15, MT16 dan MT17 yang selama kaderisasi sudah mendidik lewat serangkaian prosesnya.
11. Teman-teman MT19 dan MT20 selaku generasi penerus HMMT 19/20 yang telah memberikan dukungan penulis.
12. Seluruh pihak yang terlibat selama keberjalanan penulis berkuliah di ITS hingga mampu menyelesaikan Tugas Akhir ini.

BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Nanda Rizky Anugerah Irdanin Putra. Penulis merupakan anak ke-2 dari pasangan Irwanto dan Endang Wahyuningsih dimana lahir pada 24 November 1998 di Kota Mojokerto. Penulis menempuh Pendidikan dasar di SDN Wates V pada tahun 2004-2010. Pada jenjang menengah di SMPN 1 Kota Mojokerto pada tahun 2010-2013. Pada jenjang atas penulis menempuhnya di SMAN 1 Sooko Kabupaten Mojokerto pada 2013-2016. Kemudian penulis melanjutkan studinya ke jenjang perkuliahan di Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.

Selama menempuh jenjang perkuliahan penulis aktif mengikuti berbagai kegiatan pelatihan, diantaranya LKMM Pra-TD, LKMM TD, dan LKMM TM. Penulis juga aktif dalam mengikuti kepanitiaan seperti ITS Expo, GERIGI ITS, dan lain-lain. Disamping itu, penulis juga mengikuti organisasi tingkat fakultas yaitu BEM FTI-ITS sebagai Staff Departemen Dalam Negeri pada periode 2017/2018, Sekretaris Jendral II pada periode 2018/2019, dan PLT Ketua BEM FTI-ITS pada periode 2018/2019. Diluar aspek manajerial penulis juga pernah mengikuti kegiatan keprofesian, diantaranya pernah melakukan kerja praktek di PT.Dirgantara Indonesia selama 1 bulan di bagian Teknologi Material dan Proses, menjadi finalis pada kompetisi pengecoran yang diadakan di Politeknik Manufaktur Bandung tahun 2019.

Di Departemen Teknik Material dan Metalurgi penulis melakukan penelitian Tugas Akhir pada bidang Korosi dan Analisa Kegagalan dengan judul “Pengaruh Kadar Timah (Sn) pada Anoda Aluminium terhadap Struktur Mikro dan Karakteristik Proteksi”. Penulis memiliki email yang dapat dihubungi yaitu nandarizky030@gmail.com dan nomor telepon 082140797340.