

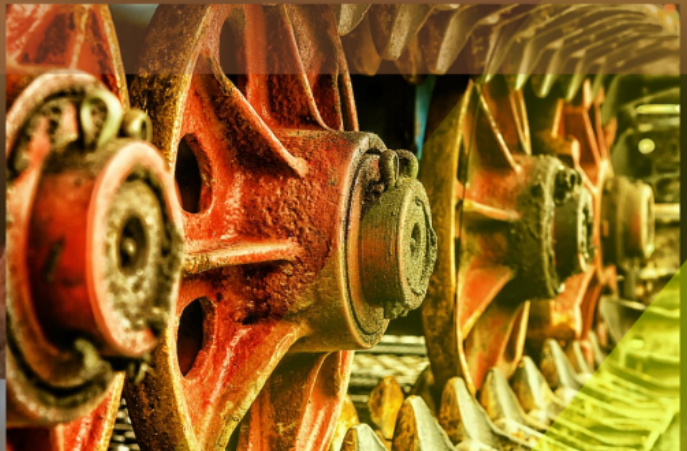
kasta 2

by Kasta Gurning

Submission date: 19-Oct-2022 01:31PM (UTC+0700)
Submission ID: 1929450814
File name: 2._Buku_Korosi_dan_Pencegahannya.pdf (24.37M)
Word count: 38515
Character count: 246646

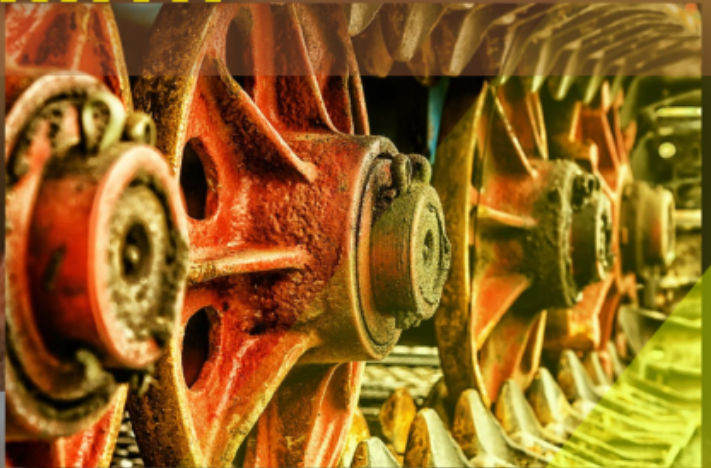


KOROSI & PENCEGAHANNYA



Tiurlina Siregar • Efbertias Sitorus • Yoga Priastomo • Erniati Bachtiar
Parulian Siagian • Erni Mohamad • Kasta Gurning • Ferawati Artauli Hasibuan
Lia Destiarti • Ismail Marzuki • Asri Mulya Setiawan • Yanti

KOROSI & PENCEGAHANNYA



UU 28 tahun 2014 tentang Hak Cipta

Fungsi dan sifat hak cipta Pasal 4

Hak Cipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 3 huruf a merupakan hak eksklusif yang terdiri atas hak moral dan hak ekonomi.

Pembatasan Perlindungan Pasal 26

Ketentuan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 23, Pasal 24, dan Pasal 25 tidak berlaku terhadap:

- a. penggunaan kutipan singkat Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait untuk pelaporan peristiwa aktual yang ditujukan hanya untuk keperluan penyediaan informasi aktual;
- b. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk kepentingan penelitian ilmu pengetahuan;
- c. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk keperluan pengajaran, kecuali pertunjukan dan Fonogram yang telah dilakukan Pengumuman sebagai bahan ajar; dan
- d. penggunaan untuk kepentingan pendidikan dan pengembangan ilmu pengetahuan yang memungkinkan suatu Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait dapat digunakan tanpa izin Pelaku Pertunjukan, Produser Fonogram, atau Lembaga Penyiaran.

Sanksi Pelanggaran Pasal 113

1. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).
2. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf a, huruf b, huruf e, dan/atau huruf g untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 4 (empat) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp1.000.000.000,00 (satu miliar rupiah).

Korosi dan Pencegahannya

Tiurlina Siregar, Efbertias Sitorus, Yoga Priastomo, Erniati Bachtiar
Parulian Siagian, Erni Mohamad, Kasta Gurning
Ferawati Artauli Hasibuan, Lia Destiarti, Ismail Marzuki
Asri Mulya Setiawan, Yanti



Penerbit Yayasan Kita Menulis

Korosi dan Pencegahannya

Copyright © Yayasan Kita Menulis, 2021

Penulis:

Tiurlina Siregar, Efbertias Sitorus, Yoga Priastomo, Erniati Bachtiar
Parulian Siagian, Erni Mohamad, Kasta Gurning
Ferawati Artauli Hasibuan, Lia Destiarti, Ismail Marzuki
Asri Mulya Setiawan, Yanti

Editor: Ronal Watrianthos

Desain Sampul: Devy Dian Pratama, S.Kom.

Penerbit

Yayasan Kita Menulis

Web: kitamenulis.id

e-mail: press@kitamenulis.id

WA: 0821-6453-7176

Anggota IKAPI: 044/SUT/2021

Tiurlina Siregar, dkk.

Korosi dan Pencegahannya

Yayasan Kita Menulis, 2021

xiv, 176 hlm; 16 x 23 cm

ISBN: 978-623-342-041-9

Cetakan 1, April 2021

- I. Korosi dan Pencegahannya
- II. Yayasan Kita Menulis

Katalog Dalam Terbitan

Hak cipta dilindungi undang-undang

Dilarang memperbanyak maupun mengedarkan buku tanpa

Izin tertulis dari penerbit maupun penulis

Kata Pengantar

Terpujilah Tuhan, atas segala berkatNya sehingga buku yang berjudul Korosi dan Pencegahannya dapat diselesaikan tepat waktunya.

Pencegahan Korosi hingga kini belum seperti yang diharapkan, seperti pudarnya warna mengkilap pada perak (Ag), munculnya warna kehijauan pada tembaga (Cu), kerusakan logam besi (Fe) dengan terbentuknya karat oksida, dan lain-lain. Oleh karena itu perlu dikelola dengan baik melalui pencegahan terjadinya korosi. Buku Korosi dan Pencegahannya terdiri atas 12 bab yaitu: Pengertian Korosi, Mekanisme Korosi, Jenis-Jenis Korosi, Pengukuran Korosi, Termodinamika Korosi, Korosi Pada Logam, Pengendalian Korosi, Pelapisan (Coating), Proteksi Anodik, Proteksi Katodik, Inhibitor, Penanggulangan Dan Pencegahan Korosi.

Semoga buku ini bermanfaat bagi pembaca. Seperti pepatah yang menyatakan “tak ada gading yang tak retak, kalau tidak retak bukanlah namanya gading”, maka penulis terbuka dan saran yang membangun demi kesempurnaan buku ini di masa yang akan datang. Sekian dan terima kasih.

Jayapura, Maret 2021

Penulis.

Daftar Isi

Kata Pengantar	v
Daftar Isi	vii
Daftar Gambar	xi
Daftar Tabel.....	xiii

Bab 1 Pengertian Korosi

1.1 Pendahuluan.....	1
1.2 Pengertian Korosi	3
1.3 Proses Korosi	4
1.4 Faktor Penyebab Korosi.....	9
1.5 Penghambat Korosi	12

Bab 2 Mekanisme Korosi

2.1 Pendahuluan.....	15
2.2 Faktor – Faktor Yang Memengaruhi Korosi.....	16
2.2.1 Faktor Gas Terlarut	16
2.2.2 Faktor Temperatur	17
2.2.3 Faktor pH	17
2.2.4 Faktor Mikroba	18
2.2.5 Faktor padatan terlarut	19
2.2.6 Faktor lingkungan	20
2.3 Mekanisme Korosi	21
2.4 Laju Korosi	24

Bab 3 Jenis-Jenis Korosi

3.1 Pendahuluan.....	27
3.2 Korosi Seragam (Uniform Corrosion)	28
3.2.1 Definisi dan Faktor Penyebab	28
3.2.2 Mekanisme Korosi Seragam	29
3.2.3 Pencegahan Korosi Seragam	30
3.3 Korosi Sumur atau Lubang (Pitting Corrosion)	30

3.3.1 Definisi dan Penyebab	30
3.3.2 Mekanisme Korosi Sumur	31
3.3.3 Pencegahan Korosi Sumur	32
3.4 Korosi Erosi (Erosion Corrosion).....	33
3.4.1 Definisi dan Penyebab	33
3.4.2 Mekanisme korosi erosi	33
3.4.3 Pengendalian korosi erosi	34
3.5 Korosi Galvanik (Galvanic Corrosion).....	34
3.5.1 Definisi dan Penyebab	34
3.5.2 Mekanisme korosi galvanic.....	35
3.5.3 Pencegahan Korosi Galvanik.....	36
3.6 Korosi Tegang (Stress Corrosion).....	36
3.6.1 Definisi dan Penyebab	36
3.6.2 Mekanisme Korosi Tegang	37
3.6.3 Pencegahan Korosi Tegang	38
3.7 Korosi Celah (Crevice Corrosion).....	38
3.7.1 Definisi dan Penyebab	38
3.7.2 Mekanisme Korosi Celah	39
3.7.3 Pencegahan Korosi Celah	40
3.8 Korosi Mikrobiologi (Microbial Corrosion)	41
3.8.1 Definisi dan Penyebab	41
3.8.2 Mekanisme Korosi Mikrobiologi	42
3.8.3 Pengendalian Korosi Mikrobiologi.....	43
3.9 Korosi Lelah (Fatigue Corrosion)	44
3.9.1 Definisi dan Penyebab	44
3.9.2 Mekanisme korosi lelah	45
3.9.3 Pencegahan Korosi Lelah.....	45

Bab 4 Pengukuran Korosi

4.1 Pendahuluan.....	47
4.2 Pentingnya Memahami Korosi.....	48
4.3 Pengukuran Laju Korosi	51
4.3.1 Metode Weight Loss (Kehilangan Berat)	52
4.3.2 Metode Elektro Kimia	54

Bab 5 Termodinamika Korosi

5.1 Pendahuluan.....	57
5.2 Persamaan Nernst	59
5.2.1 Kinetika Elektrokimia Korosi	62

5.3 Laju Korosi (Kerapatan Arus)	64
--	----

Bab 6 Korosi pada Logam

6.1 Sumber Logam	69
6.2 Klasifikasi Logam	70
6.3 Faktor yang Mempercepat Terjadinya Korosi	71
6.4 Faktor Penyebab Terjadinya Korosi	73
6.5 Korosi Logam	74
6.5.1 Korosi pada Besi	78
6.5.2 Korosi pada Baja	79

Bab 7 Pengendalian Korosi

7.1 Pendahuluan	81
7.2 Inhibitor Korosi	82
7.2.1 Inhibitor Pasif	87
7.2.2. Inhibitor Katodik	88
7.2.3 Inhibitor Organik	89
7.2.4 Inhibitor Pengendapan (Precipitation)	89
7.2.5 Vapor Phase Inhibitors	90
7.3 Perawatan Permukaan	90
7.4 Coatings dan Sealants	91

Bab 8 Pelapisan (Coating)

8.1 Pendahuluan	93
8.2 Pengertian Pelapisan (Coating)	95
8.3 Teknik Pelapisan (Coating)	97
8.3.1 Pelapisan Electroplating (electrochemical plating)	97
8.3.2 Pelapisan Anodisasi (Anodizing)	105

Bab 9 Proteksi Katodik

9.1 Pendahuluan	111
9.2 Sejarah Penemuan Proteksi Katodik	113
9.3 Panel Galvanis	115
9.4 Sistem Proteksi Katodik	117
9.4.1 Konsep Dasar Proteksi Katodik	117
9.4.2 Mekanisme Proteksi Katodik	118
9.4.3 Jenis-jenis Proteksi Katodik	119
9.5 Pengendalian Korosi Pada Sistem Pipa	120
9.5.1 Pengendalian korosi celah dan sumuran	121

9.5.2 Pengendalian Korosi Retak	123
9.5.3 Pengendalian Korosi Retak Fatik	124
9.6 Aplikasi Proteksi Katodik	126
Bab 10 Proteksi Anodik	
10.1 Pendahuluan	127
10.2 Aspek Dalam Proteksi Anodik	129
10.2.1 Pengertian	129
10.2.2 Sistem Proteksi Anodik	131
10.3 Beberapa Penelitian Proteksi Anodik	135
Bab 11 Inhibitor	
11.1 Pendahuluan	137
11.2 Inhibitor Korosi	138
11.3 Mekanisme Inhibitor	142
11.4 Pencegahan Korosi Dengan Inhibitor	144
11.5 Inhibitor Alami (Organik)	146
Bab 12 Penanggulangan dan Pencegahan Korosi	
12.1 Pendahuluan	149
12.2 Prinsip Pencegahan Korosi	150
12.3 Paduan	151
12.4 Pelapisan permukaan	151
12.4.1 Pelapisan Permukaan dari Logam	152
12.4.2 Pelapisan permukaan bukan logam	154
Daftar Pustaka	157
Biodata Penulis	169

Daftar Gambar

Gambar 1.1: Diagram Evans	8
Gambar 2.1: Mekanisme Korosi	22
Gambar 2.2: Laju Korosi pada Reaksi Korosi.....	23
Gambar 3.1: Korosi seragam pada paku.....	28
Gambar 3.2: Mekanisme proses pembentukan korosi seragam di udara	30
Gambar 3.3: Korosi lubang atau sumur pada baja akibat ion klorida	31
Gambar 3.4: Skema mekanisme korosi sumur atau lubang	32
Gambar 3.5: Korosi erosi pada pipa.....	33
Gambar 3.6: Korosi galvanis pada baja	35
Gambar 3.7: Korosi tegang pada pipa.....	37
Gambar 3.8: Skema mekanisme korosi tegang	38
Gambar 3.9: Korosi celah pada stainless steel dalam air laut.....	39
Gambar 3.10: Korosi mikrobiologi pada pipa	41
Gambar 3.11: Mekanisme pembentukan FeS pada korosi mikrobiologi	42
Gambar 3.12: Korosi lelah	44
Gambar 4.1: Salah satu Jembatan Roboh karena korosi pada tiang penahannya	49
Gambar 4.2: Pabrik Kimia yang terkorosi akibat lingkungan agresif pantai	50
Gambar 4.3: Kebocoran Pipa Logam Akibat Korosi	51
Gambar 6.1: Contoh Korosi pada Logam Besi	75
Gambar 6.2: Reaksi Terbentuknya Korosi pada Besi.....	78
Gambar 7.1: Diagram polarisasi potensiostatik: perilaku elektrokimia logam dalam larutan inhibitor katodik (a), dibandingkan dengan larutan yang sama, tanpa inhibitor (b)	87
Gambar 7.2: Diagram polarisasi potensiostatik teoritis: perilaku elektrokimia logam pada larutan yang mengandung inhibitor katodik dan anodik (a) dibandingkan dengan larutan yang sama tanpa inhibitor organik (b).....	89
Gambar 8.1: Anoda, Katoda, dan Elektrolit	99
Gambar 8.2: Skema Proses Electroplating	101
Gambar 8.3: Proses Anodizing	107

Gambar 8.4: Skema proses Anodizing	108
Gambar 10.1: Hubungan potensial larutan (EH)-pH untuk besi terlarut dalam air	128
Gambar 10.2: Diagram polarisasi potensial.....	130
Gambar 10.3: Diagram EH-pH dalam kaitannya dengan kurva polarisasi AP (Anodic Protection)	131
Gambar 10.4: Diagram alat proteksi anodic	132
Gambar 12.1: Tepi tajam dan ketidak teraturan di permukaan tidak cocok sebagai dasar pelapisan	152
Gambar 12.2: Pistol semprot termal untuk a) penyemprotan busur, b) penyemprotan api dengan kawat, c) penyemprotan plasma, dan d) penyemprotan bahan bakar oksigen kecepatan tinggi (HVOF) (metode paling umum untuk penyemprotan api berkecepatan tinggi).....	153

Daftar Tabel

Tabel 1.1: Tingkat Ketahanan Korosi berdasarkan Laju Korosi.....	12
Tabel 2.1: Tingkat ketahanan korosi berdasarkan laju korosi	24
Tabel 4.1: Nilai Konstanta berdasarkan satuan laju korosi.....	53
Tabel 4.2: Relatife ketahanan korosi	53
Tabel 5.1: Data Korosi untuk beberapa baja.....	65
Tabel 5.2: Sifat Termodinamika Ionik dan Unsur Netral 250C.....	65
Tabel 5.3: Harga energi bebas unsur Fe/senyawanya.....	67
Tabel 6.1: Kandungan Logam Makro dan Mikro pada Lapisan Kerak Bumi	70
Tabel 6.2: Paduan Logam dan Kondisi Lingkungan	76
Tabel 7.1: Beberapa Inhibitor yang digunakan dengan Memperhatikan Tipikal Lingkungan dalam Industri	83
Tabel 7.2: Penghambatan Korosi Khas untuk Logam di Lingkungan Berbeda	85
Tabel 10.1: Bahan Katoda untuk Proteksi Anodik.....	133
Tabel 10.2: Elektroda Referensi untuk Proteksi Anodik Industri	134
Tabel 10.3: Persyaratan Arus Proteksi Anodik	135

Bab 1

Pengertian Korosi

1.1 Pendahuluan

Kehidupan manusia cukup dekat dengan suatu unsur yang disebut logam. Tanpa disadari berbagai benda di sekitar kita juga mengandung logam. Logam digunakan karena memiliki sifat-sifat yang dapat dimanfaatkan dalam kehidupan sehari-hari. Pada umumnya tiap jenis logam memiliki tingkat kekerasan yang berbeda. Kekerasan pada logam dapat ditingkatkan dengan memadukan suatu logam dengan logam lainnya yang dikenal dengan logam paduan atau logam alloy. Selain sifatnya yang kuat, logam juga mudah ditempa dan dapat dibentuk sesuai dengan kebutuhan. Sifat ini dimanfaatkan dalam konstruksi, seperti penggunaan besi dan baja pada alat berat, rel kereta api, jembatan, dan sebagainya. Logam bersifat konduktor atau memiliki kemampuan yang baik dalam menghantarkan listrik dan panas. Dengan sifat ini maka berbagai jenis logam sering digunakan dalam sebagai komponen penyusun alat elektronik, mesin, serta benda lainnya.

Suatu logam berasal dari bijih logam, yang diperoleh melalui aktivitas penambangan. Di Indonesia sendiri, lokasi penambangan dapat dijumpai hampir di seluruh wilayah. Hasil tambang ini merupakan salah satu kekayaan sumber daya alam yang cukup melimpah di Indonesia, namun hasil tambang tersebut merupakan sumber daya alam yang tidak dapat diperbaharui. Aktivitas penambangan yang dilakukan terus-menerus akan memberikan

dampak negatif secara langsung maupun tidak langsung terhadap kehidupan manusia dan juga alam.

Aktivitas penambangan tentu saja dilakukan melalui proses penggalian dan pengerukan, hal ini menimbulkan lubang dan terowongan di dalam tanah yang dapat merusak struktur tanah. Pengerukan juga mengakibatkan berubahnya struktur bumi. Bukit dan gunung yang dikeruk akan berubah menjadi datar, sungai yang tertimbun material galian tanah juga berubah menjadi daratan. Limbah yang ditimbulkan dari penambangan juga akan merusak ekosistem di daerah penambangan. Limbah yang dialirkan ke sungai dapat menjadi bahan pencemar dan berakibat buruk pada kehidupan hewan dan tumbuhan yang ada di sungai. Penambangan yang dilakukan pada habitat hewan dan tumbuhan akan mengurangi tingkat populasi dan keanekaragaman hayati.

Aktivitas penambangan terus meningkat seiring dengan meningkatnya kebutuhan hasil tambang, salah satunya adalah kebutuhan akan berbagai jenis logam. Kebutuhan logam dapat meningkat karena beberapa jenis logam yang sudah ada mengalami kerusakan seiring berjalannya waktu. Secara umum karat adalah istilah yang diberikan terhadap satu logam berjenis besi dan baja. Istilah karat lebih tepat disebut dengan korosi. Korosi diartikan sebagai degradasi atau penurunan kualitas material atau sifat material akibat interaksi dengan lingkungan.

Peristiwa korosi dapat dijumpai dalam kehidupan sehari-hari. Korosi terjadi pada berbagai jenis logam yang digunakan dalam konstruksi bangunan maupun peralatan elektronik yang menggunakan komponen logam. Komponen logam yang biasa digunakan antara lain seng (Zn), tembaga (Cu), besi (Fe), baja, dan sebagainya. Contoh yang paling sering dijumpai adalah seng yang bocor akibat korosi, paku yang mengalami korosi sehingga kekuatannya menurun dan kurang baik untuk digunakan, bahkan korosi pada mesin-mesin yang digunakan di pabrik yang menyebabkan proses produksi terhenti dan mesin tersebut harus segera diganti.

Korosi merupakan salah satu aspek yang diperhitungkan dalam biaya perawatan suatu mesin karena setiap benda yang mengandung logam tentu akan mengalami korosi. Hal ini merupakan Standar Operasional Prosedur (SOP) yang dilakukan secara berkala sebagai bentuk pemeliharaan dan untuk menghindari kerusakan yang lebih parah maupun kecelakaan kerja. Berbagai perusahaan tak terkecuali pemerintah mengalami kerugian akibat korosi karena perlu mengganti benda yang terkorosi secara berkala. Saat ini korosi telah

menjadi permasalahan dalam bidang ¹ekonomi, karena menyangkut masa pakai, penyusutan, serta efisiensi pemakaian suatu bahan maupun peralatan dalam bidang industri maupun konstruksi. Berdasarkan kerugian yang ditimbulkan oleh korosi, perlu adanya kajian mengenai korosi dan langkah-langkah dalam mencegah dan menekan laju korosi.

Korosi merupakan masalah teknis dan ilmiah yang serius, bukan hanya di Indonesia saja, bahkan di berbagai negara maju masalah ini secara ilmiah belum tuntas terjawab hingga saat ini. Selain merupakan masalah ilmu permukaan yang merupakan kajian secara fisika, korosi juga menjadi kajian dalam bidang kimia. Kajian mengenai korosi merupakan hal yang penting bagi kehidupan manusia secara langsung maupun tidak langsung. Pada bagian ini akan dibahas mengenai pengertian korosi, jenis-jenis korosi, faktor penyebab korosi, dan penghambat korosi.

1.2 Pengertian Korosi

¹¹ Kata korosi berasal dari bahasa latin “Corredere” yang artinya perusakan, dalam hal ini adalah perusakan logam atau berkarat. Pada umumnya masyarakat Indonesia mengenal korosi dengan istilah pengkaratan. Korosi adalah sebuah fenomena kimia dari bahan logam pada berbagai kondisi lingkungan.

Berbagai pendapat yang dikemukakan tentang definisi korosi, antara lain:

1. Shaw & Kelly (2006), memberikan definisi korosi yaitu degradasi sifat material karena interaksi dengan lingkungannya, dan korosi pada sebagian besar logam (dan banyak material lainnya) tidak dapat dihindari. Meskipun terutama terkait dengan bahan logam, semua jenis bahan rentan terhadap degradasi.
2. Bardal (2004) menggambarkan korosi sebagai serangan terhadap bahan logam yang menyebabkan degradasi material akibat reaksi elektrokimia material tersebut dengan lingkungannya.
3. Trethewey & Chamberlain (1991) mendefinisikan korosi sebagai penurunan mutu logam akibat reaksi elektrokimia dengan lingkungannya.

4. Jones(1992) menyatakan bahwa korosi merupakan kerusakan material akibat reaksi antara logam atau logam paduan dengan lingkungan atau korosi adalah suatu proses elektrokimia yang melibatkan adanya transfer elektron dari anoda menuju katoda.
5. Ahmad (2006) menyatakan bahwa korosi tidak dapat didefinisikan tanpa mengacu pada lingkungan, karena semua lingkungan bersifat korosif sampai tingkat tertentu. Korosi mencakup semua jenis bahan alami dan buatan manusia, termasuk biomaterial dan nanomaterial, dan tidak terbatas pada logam dan paduan saja.
6. Siregar (2010) mendefinisikan korosi sebagai degradasi (kerusakan atau penurunan kualitas) material akibat interaksi dengan lingkungan di sekelilingnya.
7. Chang (2005) memberikan definisi korosi sebagai reaksi redoks spontan yang mengakibatkan terbentuknya karat dan besi, perak sulfida dan perak, dan patina (tembaga karbonat) dari tembaga.

11

Berdasarkan berbagai pendapat di atas, dapat dirumuskan pengertian korosi adalah penurunan atau degradasi kualitas material akibat interaksi dengan lingkungan. Reaksi yang terjadi pada logam disebut reaksi elektrokimia, sedangkan pada non logam disebut degradasi. Meskipun korosi pada bahan logam tidak dapat dihentikan, namun laju korosi dapat dikendalikan sehingga dapat memperlambat proses terjadinya kerusakan.

1.3 Proses Korosi

Korosi pada awalnya terjadi kerusakan pada material dalam skala yang kecil dan tidak dapat dilihat oleh mata. Proses terjadinya korosi membutuhkan waktu, hingga meluas dan tanpa disadari menimbulkan kerusakan pada benda. Pada bagian ini akan dibahas mengenai fenomena korosi, reaksi yang terjadi dalam proses korosi, dan komponen yang terlibat dalam terjadinya korosi.

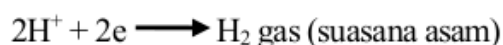
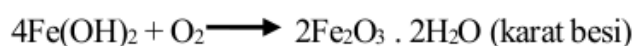
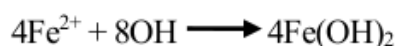
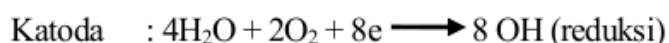
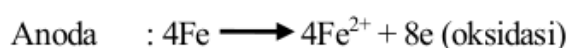
Sebelum mengkaji lebih dalam tentang proses korosi, maka perlu diketahui bahwa korosi merupakan kebalikan dari proses pembentukan logam. Logam diperoleh dari hasil penambangan, di mana hasil tambang tersebut berupa bijih logam yang masih bersenyawa dengan unsur-unsur lainnya seperti tanah, pasir,

dan oksigen. Oksigen tersebut diekstrak (dipisahkan) melalui proses ekstraksi metalurgi sehingga menghasilkan logam, hal ini membutuhkan energi yang besar. Pada proses terjadinya korosi, energi yang dibutuhkan pada proses pembuatan logam akan dilepas kembali, dan logam kembali bersenyawa dengan oksigen. Dengan demikian maka proses korosi bisa dikatakan sebagai suatu proses pengembalian logam ke bentuk alamiahnya yaitu bersenyawa dengan oksigen (Jones, 1992).

Pembentukan sel korosi² sangat penting untuk terjadinya korosi. Sebuah sel korosi pada dasarnya terdiri dari empat komponen yaitu anoda, katoda, elektrolit, dan jalur logam (Ahmad, 2006). Syarat terjadinya korosi adalah adanya keempat elemen tersebut, di mana jika salah satu dari keempat elemen itu tidak ada maka korosi tidak dapat terjadi (Afandi, Y. K., dkk, 2015). Dalam peristiwa korosi, suatu bahan akan bersifat sebagai anoda. Anoda merupakan bagian yang mengalami oksidasi. Reaksi oksidasi mengakibatkan kehilangan elektron, dan senyawa dari ion logam tersebut berubah menjadi ion-ion bebas. Anoda terkorosi dengan melepaskan satu atau lebih elektron dari atom-atom logam netral untuk membentuk ion-ion.

Pada umumnya katoda tidak mengalami korosi, namun mungkin saja dapat terjadi kerusakan dalam kondisi-kondisi tertentu. Reaksi yang terjadi pada katoda berupa reaksi reduksi. Biasanya lingkungan akan bersifat sebagai katoda. Katoda merupakan bagian dari reaksi yang akan mengalami reduksi. Beberapa lingkungan yang bersifat katoda seperti lingkungan air, atmosfer, gas, tanah, dan minyak. Elektrolit merupakan larutan yang sifatnya mampu menghantarkan listrik. Elektrolit mengandung ion-ion yang mampu menghantarkan *electro equivalent force* sehingga memungkinkan berlangsungnya reaksi dan penghantaran listrik. Larutan elektrolit dapat memungkinkan adanya kontak listrik antara anoda dan katoda. Reaksi korosi logam melibatkan reaksi oksidasi pada anoda dan reduksi pada katoda.

Menurut Afandi (2015) reaksi korosi yang akan terjadi adalah:

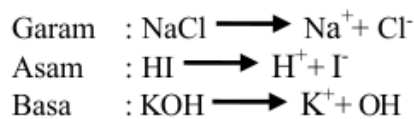


Elektrolisis merupakan peristiwa perubahan kimia, atau reaksi dekomposisi dalam oleh arus listrik yang terjadi pada elektrolit. Energi listrik digunakan untuk mendorong reaksi redoks yang non spontan bisa terjadi (Chang, 2005). Elektrolit akan terurai menjadi ion-ion positif dan ion-ion negatif dan larut dalam pelarut polar. Ion negatif (anion) melalui larutan tertarik menuju muatan positif pada anoda. Ion positif bergerak menuju muatan negatif (katoda) melalui larutan. Korosi memiliki tiga fenomena utama yaitu reaksi elektrokimia, polarisasi, dan pasivasi (Siregar, 2010), yang akan dijelaskan sebagai berikut:

Reaksi Elektrokimia

Korosi dapat dijelaskan melalui kajian sistem elektrokimia, di mana korosi merupakan reaksi kimia antara logam dengan zat-zat yang ada di sekitarnya atau dengan partikel-partikel lain yang ada di dalam logam itu sendiri. Elektrokimia merupakan cabang ilmu kimia yang berhubungan dengan interkonversi energi listrik dan energi kimia. Proses elektrokimia adalah reaksi redoks (oksidasi-reduksi). Dalam reaksi redoks energi yang dilepas oleh reaksi spontan diubah menjadi listrik, atau reaksi yang non spontan terjadi dengan menggunakan energi listrik (Chang, 2005).

Menurut Siregar (2010), umumnya reaksi korosi logam adalah reaksi elektrokimia karena pengaruh air, uap air atau elektrolit lainnya. Yang dimaksud elektrolit lainnya ialah garam, asam, dan basa yang akan larut dalam air, kemudian dalam air akan terjadi ionisasi.



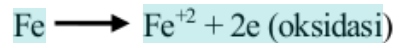
Reaksi ini disebut reaksi elektrokimia karena terjadi muatan listrik dan elektron.

7

Dalam proses korosi terjadi transfer elektron dari logam ke lingkungannya. Logam berlaku sebagai anoda, yaitu sel yang memberikan elektron. Lingkungannya berlaku sebagai katoda atau penerima elektron. Reaksi yang terjadi pada logam yang mengalami korosi adalah reaksi oksidasi, sedangkan dari katoda terjadi reaksi reduksi. Dalam reaksi oksidasi atom-atom logam larut ke lingkungan menjadi ion-ion dengan melepas elektron pada logam tersebut, sedangkan dalam reaksi reduksi ion-ion dari lingkungan mendekati logam dan menangkap elektron-elektron yang ada pada logam.

Djunaidi (2007) menjelaskan secara umum mekanisme korosi jika ditinjau dari aspek elektrokimia dapat digambarkan dalam reaksi sebagai berikut:

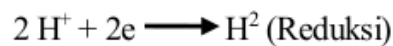
Reaksi Oksidasi



Dalam mekanisme korosi reaksi oksidasi disebut reaksi anodik. Atom Fe berubah menjadi ion Fe dan melepaskan 2 elektron. Pada peristiwa korosi reaksi anodik secara umum dapat digambarkan berikut:



Reaksi Reduksi



Reaksi reduksi disebut reaksi katodik. 2 elektron yang dihasilkan dalam reaksi anodik dipergunakan untuk reaksi reduksi (katodik) untuk mendapatkan gas hidrogen. Kedua reaksi tersebut berlangsung secara simultan dengan kecepatan reaksi sama.

Polarisasi

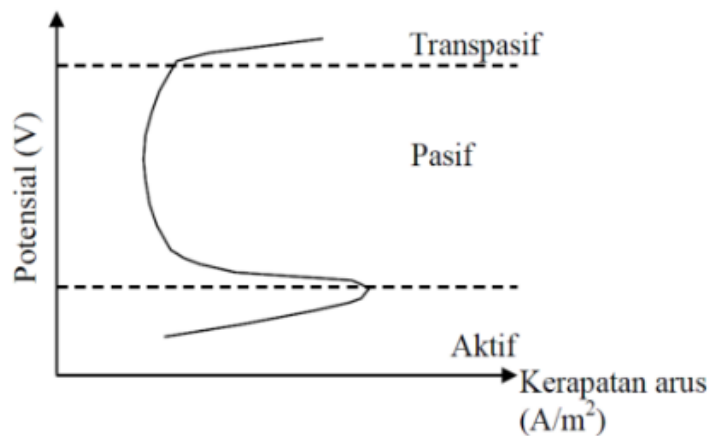
Polarisasi merupakan gejala pembentukan kutub (polar). Polarisasi adalah perbedaan antara potensial elektroda dengan potensial korosi bebas, ketika suatu logam tidak berada dalam kesetimbangan larutan. Pada proses ini anoda semakin positif karena memberi elektron, sedangkan katoda menjadi semakin negatif karena menerima elektron. Polarisasi merupakan salah satu bentuk dari reaksi korosi yang menjadi penyebab kerusakan pada logam. Secara definitif polarisasi merupakan proses pengutuban ion hidrogen secara kimia listrik dengan bantuan pengikatan elektron hasil proses degradasi logam, sehingga membentuk gas hidrogen.

Polarisasi yang terjadi dalam peristiwa korosi mengacu pada pergeseran potensial dari potensial rangkaian terbuka atau potensial korosi bebas dari sistem korosi itu sendiri. Jika potensial bergeser ke arah positif hal itu disebut polarisasi anodik, sedangkan jika potensial bergeser ke arah negatif hal itu disebut polarisasi katodik.

Pasivasi

Pasivasi disebabkan pembentukan lapisan produk korosi yang tipis (lapisan film), protektif dan biasanya berbentuk oksida-terhidrasi. Pembentukan lapisan oksida ini yang menyebabkan polarisasi anoda tidak mengikuti kelinieran

diagram Tafel, sehingga gejala polarisasi anoda diketahui dari diagram Evans. Diagram ini menjadi dasar perlindungan anodik. Sifat pasivasi dari suatu logam sangat berperan dalam pengendalian korosi karena lapisan ini bersifat non konduktif dan menghalangi terjadinya korosi lebih lanjut. Hal ini dapat dilihat dari aliran arus yang pada daerah pasivasi pada gambar 1:



Gambar 1.1: Diagram Evans (Siregar, 2010)

Berdasarkan media terjadinya reaksi, korosi dapat dibedakan menjadi dua jenis yaitu korosi kering (dry corrosion) dan korosi basah (wet corrosion). Korosi kering terjadi sebagai akibat dari reaksi antara logam dan gas seperti besi dengan oksigen (O_2) atau besi dengan belerang dioksida (SO_2). Reaksi oksidasi kimia terjadi ketika logam diubah dari bentuk atom unsumnya menjadi bentuk ionik senyawanya. Hilangnya elektron dalam logam ini terjadi setiap kali ia membentuk senyawa dengan oksidasi kimiawi.

Korosi kering tidak menggunakan larutan sebagai media transfer ion-ionnya, dan terjadi pada suhu yang tinggi. Korosi basah terjadi melalui transfer ion dari katoda ke anoda. Jenis korosi basah terjadi di mana terdapat cairan, biasanya air (Timings, R. L, 1991). Agar korosi terjadi, kontaminan padat, cair atau gas harus dilarutkan dalam air untuk membentuk elektrolit karena korosi basah merupakan reaksi elektrokimia.

1.4 Faktor Penyebab Korosi

Korosi dapat terjadi karena adanya beberapa faktor yang memengaruhi. Menurut H.H. Uhlig., & W.R. Revie (2000), faktor yang menyebabkan terjadinya korosi adalah faktor dari beton itu sendiri dan faktor lingkungan. Sedangkan menurut Putra, R., Muhammad., & Rahman, A (2018) terdapat beberapa faktor yang dapat memengaruhi korosi, seperti temperatur, perbedaan potensial, erosi, kondisi permukaan, waktu, tegangan, tekanan, oksigen, uap air, pH, larutan garam, kontak dengan elektrolit dan mikroba:

Temperatur berpengaruh terhadap meningkatnya laju korosi. Temperatur memengaruhi kecepatan reaksi redoks pada peristiwa korosi. Semakin tinggi temperatur suatu logam maka logam tersebut berpeluang menjadi anodik, sebaliknya logam yang memiliki temperatur yang lebih rendah dibanding bagian yang lainnya, maka bagian tersebut akan menjadi katodik. Penyebabnya adalah energi kinetik partikel akan meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur, sehingga kemungkinan terjadinya tumbukan efektif pada reaksi redoks semakin besar dan laju korosi pada logam semakin meningkat.

Pada logam yang telah diberikan inhibitor, temperatur yang tinggi dapat menyebabkan adsorpsi dari inhibitor yang telah teradsorpsi pada permukaan logam, sehingga nilai efisiensi inhibisi menurun dan laju korosi meningkat (Mardhani, 2013). Menurut Speller dalam (Febrianto., Sriyono., & Puradwi, 2000), pada dasarnya laju korosi meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur media. Sebaliknya, kelarutan oksigen akan berkurang dengan naiknya temperatur.

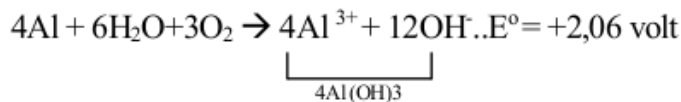
Penelitian yang dilakukan oleh Uhlig pada baja karbon menyimpulkan bahwa rasio laju korosi menjadi dua kali lebih besar dengan naiknya temperatur sebesar 20°C.

1. Perbedaan potensial

Dalam kenyataannya, logam sulit dibuat betul-betul homogen (dalam segi fasa), akibatnya akan ada perbedaan potensial yang dapat menimbulkan korosi galvanis di antara butir-butir dalam logam yang sama sehingga kalau ada elektrolit seperti uap air yang mengembun dari udara, ditunjukkan pada reaksi:

Anoda: $\text{Al} \rightarrow \text{Al}^{3+} + 3\text{e}^- \times 4 \dots E^0 = +1,66 \text{ volt}$

Katoda: $(2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-) \times 3 \dots E^0 = +0,40 \text{ volt} +$



Film oksida $4\text{Al(OH)}_3 + \text{H}_2\text{O} + 1/2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{Al}_2\text{O}_3$ (produk korosi).

2. Erosi

Proses erosi bukan merupakan peristiwa korosi, tetapi lapisan korosi dapat dihilangkan dari permukaan logam dengan bahan abrasi. Korosi merupakan suatu lapisan, sehingga dengan menghilangkan lapisan tersebut sama halnya dengan mengekspos logam terhadap proses korosi yang baru sehingga dapat mempercepat laju korosi.

3. Kondisi permukaan

Inisiasi dan kecepatan korosi dipengaruhi oleh kondisi suatu permukaan. Permukaan bahan yang tidak rata akan berpotensi membentuk kutub-kutub muatan, yang akhirnya akan berperan sebagai anoda dan katoda. Permukaan logam bersih akan menyebabkan korosi sulit terjadi.

4. Waktu

Jumlah produk korosi biasanya bertambah seiring dengan bertambahnya waktu.

5. Tegangan

Kecepatan korosi dapat meningkat apabila beban yang diberikan mendekati batas mulur logam, sehingga logam yang mengalami pembebanan biasanya terkorosi lebih cepat.

6. Tekanan

Tekanan dapat memengaruhi reaksi proses kimia dan proses oksidasi.

7. Oksigen

Udara yang banyak mengandung gas oksigen akan menimbulkan korosi. Korosi pada permukaan logam merupakan proses yang melibatkan reaksi redoks. Korosi pada besi merupakan contoh korosi yang terjadi karena adanya oksigen (O_2) dan air (H_2O). Oksigen yang larut dalam air akan mengalami reduksi, di mana air berfungsi

sebagai media berlangsungnya reaksi redoks pada peristiwa korosi. Korosi cenderung terjadi pada kondisi di mana banyak jumlah oksigen dan air yang mengalami kontak dengan permukaan logam.

8. Uap air

Air merupakan salah satu faktor penting dalam proses korosi. Udara yang lembab dan mengandung banyak uap air akan mempercepat proses korosi.

9. pH

Korosi rentan terjadi pada kondisi asam, yaitu pada kondisi pH kurang dari tujuh. Pada kondisi asam akan terjadi reaksi reduksi tambahan yang berlangsung pada katoda yang menyebabkan atom logam yang teroksidasi semakin banyak. Hal inilah yang mempercepat laju korosi pada permukaan logam.

10. Larutan garam

Elektrolit baik asam maupun garam merupakan media yang baik dalam proses transfer muatan. Akibatnya Oksigen lebih mudah mengikat elektron di udara. Air hujan dan air laut merupakan korosi yang utama karena air hujan mengandung asam dan air laut mengandung garam.

11. Garam yang terdapat di laut dapat mempercepat laju korosi logam karena larutan garamnya lebih konduktif. Sama halnya dengan kecepatan alir dari air laut yang sebanding dengan peningkatan laju korosi, akibatnya terjadi gesekan, tegangan dan temperatur yang memicu terjadinya korosi.

12. Kontak dengan elektrolit

Adanya elektrolit seperti garam dalam air laut mampu mempercepat laju korosi dengan terjadinya reaksi tambahan, selain itu konsentrasi elektrolit yang besar dapat meningkatkan laju aliran elektron yang memicu laju korosi.

13. Mikroba

Adanya aktivitas mikroba pada permukaan logam dapat menyebabkan korosi pada logam. Mikroba mampu mendegradasi logam melalui reaksi reduksi-oksidasi untuk memperoleh energi

untuk kelangsungan hidupnya. Korosi sering terjadi karena asam organik yang dikeluarkan oleh mikroorganisme seperti bakteri, dan terutama jamur (Vargel, 2020). Mikroba yang dapat menyebabkan korosi, antara lain bakteri besi mangan oksida, bakteri pereduksi sulfat, bakteri oksidasi sulfur-sulfida, dan protozoa.

1.5 Penghambat Korosi

Sebelum masuk pada pembahasan mengenai penghambat korosi, perlu diketahui bahwa proses korosi tidak dapat dihentikan, namun bisa diperlambat atau dilakukan cara-cara untuk menghambat. Laju korosi merupakan kecepatan penurunan kualitas bahan atau material terhadap waktu (Afandi, Y. K., dkk, 2015). Laju korosi juga didefinisikan sebagai peristiwa merambatnya proses korosi yang terjadi pada suatu material (Priyantoro, 2012). Pada beberapa pengujian korosi sebagian besar yang diukur adalah laju korosi. Laju korosi merupakan parameter yang digunakan untuk mengukur ketahanan suatu material terhadap korosi sehingga dapat diperkirakan kapan material tersebut dinyatakan layak dan kapan tidak layak. Satuan yang digunakan untuk laju korosi adalah mpy (mils per year).

Menurut Pattireuw, K. J., dkk (2013), laju korosi pada umumnya dapat diukur dengan menggunakan dua metode yaitu metode kehilangan berat dan metode elektrokimia. Metode kehilangan berat adalah menghitung kehilangan berat akibat korosi yang terjadi. Metode elektrokimia adalah metode dalam pengukuran laju korosi dengan mengukur beda potensial objek sehingga memperoleh laju korosi yang terjadi. Tabel 1 menunjukkan penggolongan tingkat ketahanan material berdasarkan laju korosinya (Fontana, 1987):

Tabel 1.1: Tingkat Ketahanan Korosi berdasarkan Laju Korosi

Relative Corrosion resistance	Approximate Metric Equivalent				
	Mpy	mm/year	µm/yr	nm/yr	pm/sec
Outstanding	< 1	< 0.02	<25	<2	< 1
Excellent	1 – 5	0.02 - 0.1	25 – 100	2 – 10	1 - 5

Good	5 – 20	0.1 - 0.5	100 – 500	10 – 50	5 - 20
Fair	20 – 50	0.5 – 1	500 – 1000	50 – 100	20 - 50
Poor	50 - 200	42125	1000 - 5000	150 – 500	50 - 200
Unacceptable	200+	5+	5000+	500+	200+

Menurut Rajendran, dkk, (2020) metode tradisional untuk perlindungan logam meliputi berbagai teknik, seperti pelapis, inhibitor, metode elektrokimia (perlindungan anodik dan katodik), desain metalurgi.

Bab 2

Mekanisme Korosi

2.1 Pendahuluan

Korosi berasal dari bahasa Latin "corrosus" yang berarti menggerogoti. Korosi didefinisikan sebagai berkurangnya kualitas suatu material (biasanya berupa logam atau campuran logam) sebagai akibat adanya interaksi dengan lingkungannya yang berlangsung secara berangsur-angsur yang dapat terjadi akibat interaksi secara fisika, kimia atau adanya pengaruh makhluk hidup (mikroorganisme) (Bundjali, 2000). Korosi secara awam lebih dikenal dengan istilah pengarat yang merupakan fenomena kimia bahan-bahan logam di berbagai macam kondisi lingkungan. Penyelidikan tentang sistem elektrokimia telah banyak membantu menjelaskan mengenai korosi ini, yaitu reaksi kimia antara logam dengan zat-zat yang ada di sekitarnya atau dengan partikel-partikel lain yang ada di dalam logam itu sendiri. Jadi dilihat dari sudut pandang kimia, korosi pada dasarnya merupakan reaksi logam menjadi ion pada permukaan logam yang kontak langsung dengan lingkungan yang berair dan beroksigen (Chodijah, 2008).

Pada umumnya korosi pada logam disebabkan oleh proses elektrokimia yang terjadi pada permukaan logam dan atau pada antarmuka logam/larutan. Karenanya reaksi korosi merupakan reaksi heterogen yang sering kali dikendalikan oleh proses difusi. Kondisi yang memungkinkan korosi berlangsung secara elektrokimia adalah bila pada waktu bersamaan terdapat

(Bundjali, 2005). Beda potensial (antara anoda, tempat berlangsungnya reaksi oksidasi, dan katoda, tempat berlangsungnya reaksi reduksi), mekanisme perpindahan muatan antara penghantar elektronik dan penghantar elektrolit, dan sirkuit hantaran listrik yang sinambung antara anoda dan katoda (Sudiarti, 2014).

2.2 Faktor – Faktor Yang Memengaruhi Korosi

2

Faktor yang Memengaruhi Korosi Faktor yang berpengaruh terhadap korosi dapat dibedakan menjadi dua, yaitu yang berasal dari bahan itu sendiri dan dari lingkungan. Faktor dari bahan meliputi kemurnian bahan, struktur bahan, bentuk kristal, unsur-unsur yang ada dalam bahan, teknik pencampuran bahan, dan sebagainya. Faktor dari lingkungan meliputi tingkat pencemaran udara, suhu, kelembaban, keberadaan zat-zat kimia yang bersifat korosif, mikroba, dan sebagainya. Menurut (Halimatuddahlia, 2003) penguapan dan pelepasan bahan-bahan korosif ke udara dapat mempercepat proses korosi, yaitu:

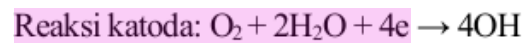
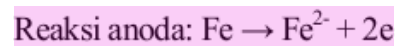
2.2.1 Faktor Gas Terlarut

Laju korosi sangat dipengaruhi oleh gas yang dapat larut dalam air yang menyebabkan terjadinya korosi. Gas terlarut yang dapat menyebabkan terjadinya korosi adalah sebagai berikut:

Oksigen (O₂)

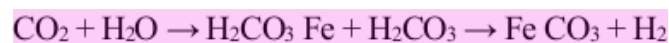
Adanya oksigen yang terlarut akan menyebabkan korosi pada metal seperti laju korosi pada *mild steel alloys* akan bertambah dengan meningkatnya kandungan oksigen. Kelarutan oksigen dalam air merupakan fungsi dari tekanan, temperatur, dan kandungan klorida. Untuk tekanan 1 atm dan temperatur kamar, kelarutan oksigen adalah 10 ppm dan kelarutannya akan berkurang dengan bertambahnya temperatur dan konsentrasi garam. Sedangkan kandungan oksigen dalam kandungan minyak-air yang dapat menghambat timbulnya korosi adalah 0,05 ppm atau kurang.

Reaksi korosi secara umum pada besi karena adanya kelarutan oksigen berikut:



Karbon dioksida (CO₂)

Jika karbon dioksida dilarutkan dalam air maka akan terbentuk asam karbonat (H₂CO₃) yang dapat menurunkan pH air dan meningkatkan korosifitas, biasanya bentuk korosinya berupa *pitting* yang secara umum reaksinya adalah:



2.2.2 Faktor Temperatur

Kenaikan temperatur pada umumnya dapat menambah laju korosi walaupun kenyataannya kelarutan oksigen berkurang dengan meningkatnya temperatur. Apabila metal pada temperatur yang tidak seragam, maka akan besar kemungkinan terbentuk korosi.

2.2.3 Faktor pH

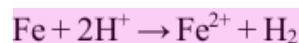
Besi dan baja akan terkorosi dalam suasana asam, tetapi sedikit terkorosi dalam suasana basa. Sifat ini dapat dijelaskan dengan rangkaian GGL (gaya gerak listrik) yang tersusun dari elemen-elemen di mana akan terjadi pengurangan potensial pada elektroda negatif jika elemen tersebut tercelup larutan asam. Potensi saat logam mulai terkorosi dapat dihitung dengan persamaan Nernst:

$$E = E^0 - 0,059 \text{ pH}$$

Adapun korosi dalam lingkungan asam, basa, dan garam adalah sebagai berikut:

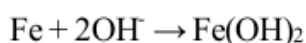
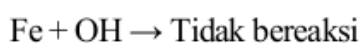
1. Asam

Korosi logam dalam asam biasanya menghasilkan gas hidrogen.



2. Basa

Basa adalah senyawa yang dapat menghasilkan ion OH_{ion} . OH tidak bereaksi langsung dengan logam. Reaksi akan terjadi setelah logam mengalami oksidasi.



2.2.4 Faktor Mikroba

Korosi yang dipengaruhi oleh mikroba merupakan suatu akibat dari aktivitas mikroba. Mikroba yang memengaruhi korosi antara lain bakteri, jamur, alga, dan protozoa. Fenomena korosi yang terjadi dapat disebabkan adanya keberadaan dari bakteri tertentu.

Menurut Habibiwildan (2010) Jenis-jenis bakteri tersebut adalah:

1. Bakteri Reduksi Sulfat (SRB)

Bakteri ini merupakan bakteri jenis anaerob yang membutuhkan lingkungan bebas oksigen atau lingkungan reduksi, bakteri ini bersirkulasi di dalam air aerasi termasuk larutan klorin dan pengoksidasi lainnya, hingga mencapai kondisi ideal untuk mendukung metabolisme. Bakteri ini tumbuh pada oksigen rendah. Bakteri ini tumbuh pada daerah-daerah kanal, pelabuhan, dan daerah air tenang yang tergantung pada lingkungannya. Bakteri ini mereduksi sulfat menjadi sulfit, biasanya terlihat dari meningkatnya kadar H_2S atau besi sulfida. Bakteri jenis ini berisi enzim hidrogenasi yang dapat mengonsumsi hidrogen. Contohnya: *Thiobacillus thiooxidans*.

2. Bakteri Oksidasi Sulfur-Sulfida

Bakteri jenis ini merupakan bakteri aerob yang mendapatkan energi dari oksida sulfid atau sulfur. Beberapa tipe bakteri aerob dapat mengoksidasi sulfur menjadi asam sulfurik dan nilai pH menjadi 1. Contohnya: Genus *Desulfovibrio* atau *Desulfotomaculum*.

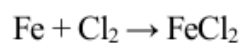
2

2.2.5 Faktor padatan terlarut

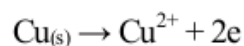
Selain gas terlarut, faktor lain yang dapat menyebabkan terjadinya reaksi korosi adalah faktor padatan terlarut. Padatan terlarut tersebut adalah:

1. **Klorida (Cl)**

Klorida menyerang lapisan *mild steel* dan lapisan stainless steel. Padatan ini menyebabkan terjadinya *pitting*, *crevice corrosion*, dan juga menyebabkan pecahnya *alloys*. Klorida biasanya ditemukan pada campuran minyak-air dalam konsentrasi tinggi yang akan menyebabkan proses korosi. Proses korosi juga dapat disebabkan oleh kenaikan konduktivitas larutan garam, di mana larutan garam yang lebih konduktif dapat menyebabkan laju korosinya menjadi lebih tinggi. Kandungan Klor dalam garam akan menyebabkan terjadinya korosi pada logam. Reaksi yang terjadi pada besi:



Sedangkan untuk tembaga reaksi yang terjadi:



2. **Karbonat (CO₃)**

Kalsium karbonat sering digunakan sebagai pengontrol korosi di mana film karbonat diendapkan sebagai lapisan pelindung permukaan metal, tetapi dalam produksi minyak hal ini cenderung menimbulkan masalah *scale*.

3. **Sulfat (SO₄)**

Ion sulfat ini biasanya terdapat dalam minyak. Dalam air, ion sulfat juga ditemukan dalam konsentrasi yang cukup tinggi dan bersifat kontaminan, dan oleh bakteri SRB sulfat diubah menjadi sulfida yang korosif.

2.2.6 Faktor lingkungan

Faktor lingkungan yang dapat memengaruhi proses korosi secara umum antara lain, yaitu:

1. Suhu

Kenaikan suhu akan menyebabkan bertambahnya kecepatan reaksi korosi. Hal ini terjadi karena semakin tinggi suhu maka energi kinetik dari partikel-partikel yang bereaksi akan meningkat sehingga melampaui besarnya harga energi aktivasi dan akibatnya laju kecepatan reaksi (korosi) juga akan semakin cepat, begitu juga sebaliknya (Fogler, 1992).

2. Kecepatan Alir Fluida Atau Kecepatan

Pengadukan Laju korosi cenderung bertambah jika laju atau kecepatan aliran fluida bertambah besar. Hal ini karena kontak antara zat pereaksi dan logam akan semakin besar sehingga ion-ion logam akan semakin banyak yang lepas sehingga logam akan mengalami kerapuhan (korosi) (Othmer, 1965).

3. Konsentrasi Bahan Korosif

Hal ini berhubungan dengan pH atau keasaman dan kebasaan suatu larutan. Larutan yang bersifat asam sangat korosif terhadap logam di mana logam yang berada di dalam media larutan asam akan lebih cepat terkorosi karena merupakan reaksi anoda. Sedangkan larutan yang bersifat basa dapat menyebabkan korosi pada reaksi katodanya karena reaksi katoda selalu serentak dengan reaksi anoda (Djaprie, 1995).

4. Oksigen

Adanya oksigen yang terdapat di dalam udara dapat bersentuhan dengan permukaan logam yang lembab. Sehingga kemungkinan menjadi korosi lebih besar. Di dalam air (lingkungan terbuka), adanya oksigen menyebabkan korosi (Djaprie, 1995).

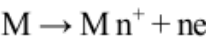
5. Waktu Kontak

Korosi basah terjadi di lingkungan yang mengandung oksigen dan uap air. Korosi logam pada lingkungan basah lebih umum terjadi dibandingkan dengan korosi kering. Korosi pada besi 113 adalah

permulaan dari proses pembentukan karat yang membuat besi sebagai material struktur menjadi tidak berguna, kecuali kalau dilakukan upaya pencegahan. Karat yang terbentuk pada permukaan besi tidak melekat pada permukaan logam dan menyerap uap air, Korosi basah terjadi di lingkungan yang mengandung oksigen dan uap air. Korosi logam pada lingkungan basah lebih umum terjadi dibandingkan dengan korosi kering. Korosi pada besi 113 adalah permulaan dari proses pembentukan karat yang membuat besi sebagai material struktur menjadi tidak berguna, kecuali kalau dilakukan upaya pencegahan. Karat yang terbentuk pada permukaan besi tidak melekat pada permukaan logam dan menyerap uap air (Revie, 2011).

2.3 Mekanisme Korosi

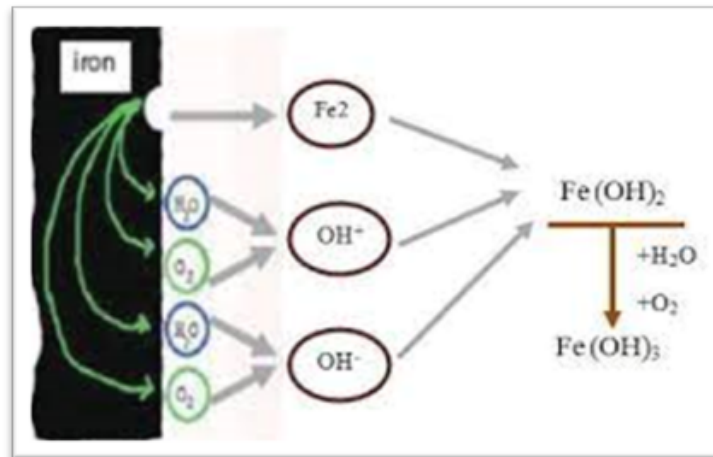
Mekanisme korosi tidak terlepas dari reaksi elektrokimia. Reaksi elektrokimia melibatkan perpindahan elektron-elektron. Perpindahan elektron merupakan hasil reaksi redoks (reduksi-oksidasi). Mekanisme korosi melalui reaksi elektrokimia melibatkan reaksi anodik. Reaksi anodik (oksidasi) diindikasikan melalui peningkatan valensi atau produk elektron-elektron. Reaksi anodik yang terjadi pada proses korosi logam yaitu:



Pada korosi dari logam M adalah proses oksidasi logam menjadi satu ion (n+) dalam pelepasan n elektron. Harga dari n tergantung dari sifat logam sebagai contoh besi:



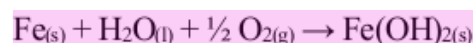
2 Reaksi katodik juga berlangsung di proses korosi. Reaksi katodik diindikasikan melalui penurunan nilai valensi atau konsumsi elektron-elektron yang dihasilkan dari reaksi anodik. Reaksi katodik di mana oksigen dari udara akan larut dalam larutan terbuka.



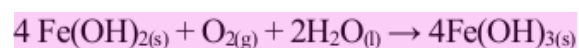
Gambar 2.1: Mekanisme Korosi (Haryono et al., 2010)

4

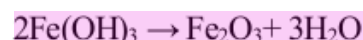
Dalam mekanisme korosi reaksi oksidasi disebut juga reaksi anodik, sedangkan reaksi reduksi disebut reaksi katodik. Reaksi diatas berlangsung secara simultan dengan kecepatan reaksi sama. Disini atom Fe berubah menjadi ion Fe dan melepaskan 2 elektron, kemudian dari elektron yang dihasilkan ini digunakan untuk reaksi reduksi/ katodik untuk mendapatkan gas hidrogen. Gambar 2.1 menunjukkan mekanisme korosi pada permukaan logam. Menurut (Haryono et al., 2010) mekanisme korosi yang terjadi pada logam besi (Fe) dituliskan sebagai berikut:



Fero hidroksida $[\text{Fe}(\text{OH})_2]$ yang terjadi merupakan hasil sementara yang dapat teroksidasi secara alami oleh air dan udara menjadi feri hidroksida $[\text{Fe}(\text{OH})_3]$, sehingga mekanisme reaksi selanjutnya adalah:



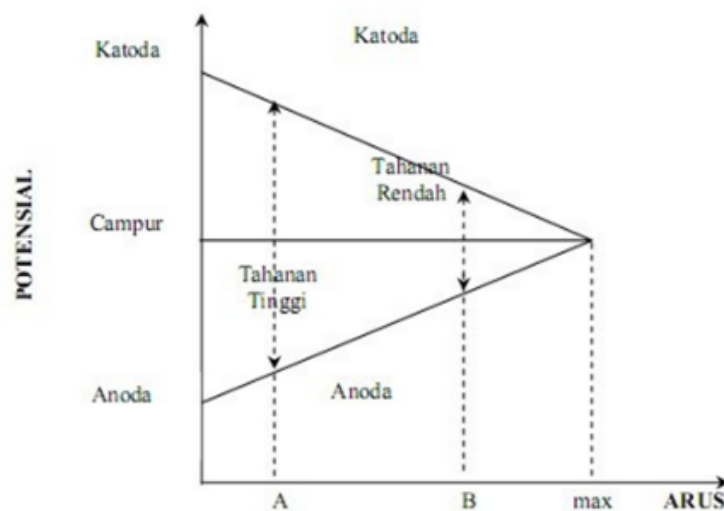
Feri hidroksida yang terbentuk akan berubah menjadi Fe_2O_3 yang berwarna merah kecoklatan yang biasa kita sebut karat. Menurut (Vogel, 1979) Reaksinya adalah:



Secara umum mekanisme korosi yang terjadi di dalam suatu larutan berawal dari logam yang teroksidasi di dalam larutan, dan melepaskan elektron untuk membentuk ion logam yang bermuatan positif. Larutan akan bertindak sebagai katoda dengan reaksi yang umum terjadi adalah pelepasan H_2 dan reduksi O_2 ,

akibat ion H^+ dan H_2O yang tereduksi. Reaksi ini terjadi di permukaan logam yang akan menyebabkan pengelupasan akibat pelarutan logam ke dalam larutan secara berulang-ulang.

Pada reaksi korosi yang terpenting sebenarnya adalah laju reaksinya/laju korosi (faktor kinetik) walau dapat/tidaknya terjadi reaksi adalah persoalan termodinamik pula. Laju korosi ditentukan terutama oleh perilaku polarisasi sel. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2



Gambar 2.2: Laju Korosi pada Reaksi Korosi (Hartomo and Kaneko, 1992)

Polarisasi cenderung memperkecil daya gerak, sesuai dengan rapat arusnya. Saat kedua garis berpotongan menentukan laju korosi maksimum yang mungkin terjadi. Berbagai faktor penghambat tercapainya maksimum teoritik, misalnya tahanan elektrolit. Bila besar (garis A), banyak beda potensialnya dipakai untuk mengatasi tahanan, dan arus korosinya kecil. Bila tahanan elektrolit kecil (garis B) laju korosi besar sesuai rapat arus di B. Polarisasi pada anoda tak selalu sama efektif dengan yang ada pada katoda. Bila katoda luas dan anoda sempit, kebanyakan polarisasi terjadi pada anoda dan kurva polarisasi katodik nya akan agak datar (Wiraraja, 2012).

2.4 Laju Korosi

Laju korosi adalah kecepatan rambatan atau kecepatan penurunan kualitas bahan terhadap waktu. Dalam perhitungan laju korosi, satuan yang biasa digunakan adalah mm/th (standar internasional) atau mill/year (mpy, standar British). Tingkat ketahanan suatu material terhadap korosi umumnya memiliki nilai laju korosi antara 1 – 200 mpy. Tabel di bawah ini adalah penggolongan tingkat ketahanan material berdasarkan laju korosinya (Fontana, 2005).

Tabel 2.1: Tingkat ketahanan korosi berdasarkan laju korosi (sumber: (Fontana, 1987))

Relative Corrosion resistance	Approximate Metric Equivalent				
	mpy	mm/year	µ m/yr	nm/yr	pm/sec
Outstanding	< 1	<0.02	< 25	< 2	< 1
Excellent	1 - 5	0.02 - 0.1	25 - 100	2 - 10	1 - 5
Good	5 – 20	0.1 - 0.5	100 - 500	10 - 50	5 - 20
Fair	20 - 50	0.5 - 1	500 - 1000	50 - 100	20 - 50
Poor	50 - 200	42125	1000 - 5000	150 - 500	50 -200
Unacceptable	200+	5+	5000+	500+	200+

Metode elektrokimia adalah metode mengukur laju korosi dengan mengukur beda potensial objek hingga didapat laju korosi yang terjadi, metode ini mengukur laju korosi pada saat diukur saja di mana memperkirakan laju tersebut dengan waktu yang panjang. Kelebihan metode ini adalah kita langsung dapat mengetahui laju korosi pada saat diukur, hingga waktu pengukuran tidak memakan waktu yang lama. Pengujian laju korosi dengan metode elektrokimia dengan polarisasi dari potensial korosi bebasnya dapat dihitung dengan menggunakan rumus yang didasari pada Hukum Faraday seperti di bawah ini (Afandi, Arief and Amiadji, 2015):

$$CPR = K \frac{a.i}{n.D} \text{ mmpy}$$

Di mana:

K = Konstanta (0,129 untuk mpy, 0,00327 untuk mmpy)

a = Berat atom logam terkorosi (gram)

i = Kerapatan arus (μ A/cm²)

n = Jumlah elektron valensi logam terkorosi

D = Densitas logam terkorosi (gram/cm³)

Bab 3

Jenis-Jenis Korosi

3.1 Pendahuluan

Lingkungan menjadi peran utama dalam penyebab terjadinya korosi. Faktor geografis menjadi salah satu faktor yang menyebabkan tingkat keparahan korosi berbeda dari satu tempat dengan tempat lain. Sebagai contoh laju korosi logam yang terjadi di daerah gurun akan berbeda dengan laju korosi logam yang terjadi di daerah lautan. Geografis lautan menjadi tempat yang dinilai paling korosif. Variasi tingkat keparahan korosi yang disebabkan oleh faktor geografis dipengaruhi oleh kelembaban, suhu dan zat yang terbawa oleh udara di atmosfer (Ahmad, 2006).

Jenis korosi yang terjadi akibat perbedaan lingkungan geografis sangat penting diketahui oleh seorang *engineer*/teknisi. Teknisi harus mengetahui dan paham jenis korosi yang terjadi di mesin atau perangkat keras. Hal ini memberikan keuntungan bagi teknisi untuk memahami metode yang tepat untuk mencegah, melindungi dan mengurangi perangkat keras atau mesin dari serangan korosi. Oleh sebab itu, pada bab ini akan dibahas mengenai jenis-jenis korosi yang umum terjadi di lingkungan dengan mempelajari definisi, faktor penyebab, mekanisme dan metode pencegahan. Hal tersebut bertujuan untuk agar *engineer* atau teknisi membiasakan dirinya untuk paham dengan jenis korosi yang umum terjadi khususnya di lingkungan industri sehingga mampu mengidentifikasi masalah penyebab dan pencegahan serta perbaikannya.

Adapun jenis-jenis korosi yang umum terjadi di lingkungan yaitu korosi seragam (uniform corrosion), korosi sumur (pitting corrosion), korosi erosi (erosion corrosion), korosi galvanik (galvanic corrosion), korosi tegang (stress corrosion), korosi celah (crevice corrosion), korosi mikrobiologi (microbial corrosion) dan korosi lelah (fatigue corrosion).

3.2 Korosi Seragam (Uniform Corrosion)

3.2.1 Definisi dan Faktor Penyebab

Adalah korosi yang terjadi tersebar merata di seluruh permukaan sehingga menyebabkan pengurangan ketebalan permukaan yang relatif seragam. Korosi seragam merupakan korosi yang umum terjadi di lingkungan dan menyebabkan sebagian besar kehilangan material. Logam yang sangat umum terkena serangan korosi seragam adalah logam besi (Gambar 3.1). Kondisi lingkungan yang dapat memengaruhi terjadi serangan korosi logam yaitu kelembaban (humidity), kontaminasi asam, polutan udara, kontaminasi hidrogen sulfida dalam air, air garam, atmosfer industri dan hidrokarbon yang mengandung hidrogen sulfida (Ahmad, 2006).



Gambar 3.1: Korosi seragam pada paku (Pedferri and Lazzari, 2018)

3.2.2 Mekanisme Korosi Seragam

Korosi seragam akan terbentuk pada bagian permukaan logam yang terpapar langsung oleh udara. Sebagai contoh korosi seragam pada besi. Pada area anoda akan terjadi reaksi oksidasi pembentukan ion Fe^{2+} .



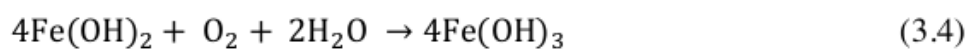
Sementara pada area anoda, oksigen pada udara akan mengalami reduksi membentuk anion hidroksida



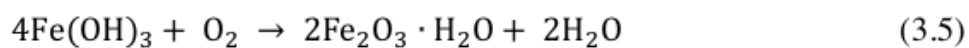
anion hidroksida tersebut akan bereaksi dengan ion Fe^{2+} membentuk besi hidroksida ($\text{Fe}(\text{OH})_2$)



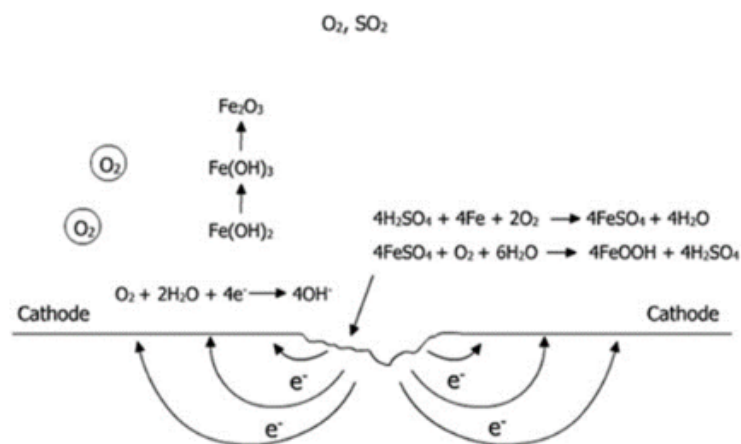
dengan adanya oksigen berlebih di udara, besi hidroksida tersebut akan mengalami oksidasi membentuk besi(III) hidroksida ($\text{Fe}(\text{OH})_3$)



besi(III) hidroksida tersebut akan mengalami reaksi lebih lanjut dengan oksigen di udara membentuk karat $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$



Adanya polutan sulfur di udara dapat menyebabkan laju korosi semakin tinggi. Hal ini disebabkan karena SO_2 akan membentuk ion sulfat (SO_4^{2-}) dan akan bereaksi dengan besi membentuk besi sulfat. Kemudian, besi sulfat akan mengalami oksidasi membentuk FeOOH . Keseluruhan proses terjadinya korosi seragam khususnya pada besi dapat digambarkan pada Gambar 3.2 (Ahmad, 2006)



Gambar 3.2: Mekanisme proses pembentukan korosi seragam di udara (Ahmad, 2006)

3.2.3 Pencegahan Korosi Seragam

Pencegahan yang dapat dilakukan agar korosi seragam adalah menggunakan bahan yang tebal, pengecatan atau pelapisan dengan metode *plating*, *galvanizing* dan *anodizing* menggunakan bahan anti korosif. Dapat juga dilakukan dengan menggunakan bahan inhibitor dan mengubah kondisi lingkungan agar tidak terlalu korosif. Selain itu dapat dilakukan dengan melakukan perlindungan katodik dan anodik (Ahmad, 2006).

3.3 Korosi Sumur atau Lubang (Pitting Corrosion)

3.3.1 Definisi dan Penyebab

Korosi lubang atau sumur adalah korosi yang disebabkan karena komposisi logam yang tidak homogen yang di mana pada daerah batas timbul korosi yang berbentuk sumur atau lubang. Jenis korosi ini adalah salah satu jenis korosi yang banyak terjadi pada logam baja dan aluminium (Gambar 3.3). Korosi sumur atau lubang merupakan korosi yang paling menyusahkan dikarenakan terjadi hampir pada seluruh media dengan pH netral yang terkontaminasi oleh anion klorida dan sulfat. Adapun faktor-faktor yang

menyebabkan terjadi korosi sumur atau lubang, yakni kerusakan lapisan permukaan yang terjadi akibat kurangnya homogenitas lapisan pada permukaan logam, keberadaan ion halogen seperti Cl^- , Br^- , I^- dan SO_4^{2-} serta kondisi stagnan penggunaan alat (Cicek dan Al-Numan, 2011).

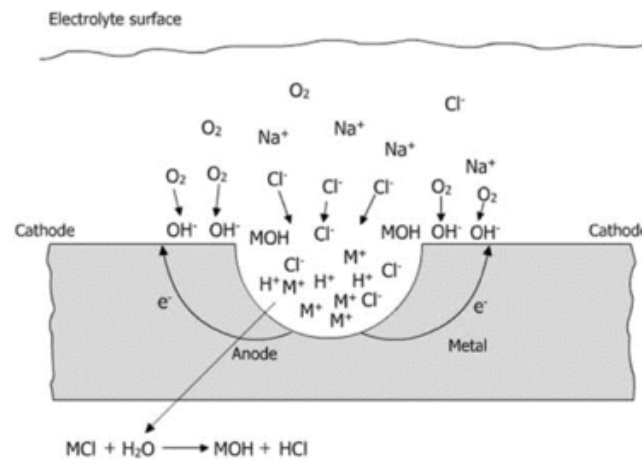
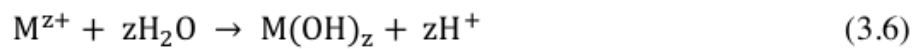


Gambar 3.3: Korosi lubang atau sumur pada baja akibat ion klorida (Peddeferri and Lazzari, 2018)

3.3.2 Mekanisme Korosi Sumur

Korosi lubang terjadi melalui 2 tahap yaitu:

1. Tahap inisiasi. Tahap ini merupakan tahap terjadinya kerusakan pada lapisan *inert* logam. Kerusakan ini ditimbulkan akibat adanya absorpsi anion halida yang ada di lingkungan oleh lapisan *inert* logam. Hal tersebut akan menghasilkan lapisan oksida. Absorpsi halida tersebut menyebabkan kenaikan konduktivitas ion pada lapisan oksida sehingga ion logam mengalami migrasi melalui lapisan tersebut sehingga terjadi kerusakan.
2. Tahap propagasi. Pada tahap ini terjadi aliran arus antara anoda (lapisan *inert* logam yang rusak dan logam larut) dan katoda (lapisan yang masih *inert*) (Gambar 3.4). Pada tahap ini terjadi reaksi hidrolisis ion logam (Persamaan 3.6) yang menyebabkan peningkatan keasaman dan penurunan drastis pH menjadi lebih rendah (Peddeferri and Lazzari, 2018).



Gambar 3.4: Skema mekanisme korosi sumur atau lubang (Ahmad, 2006)

3.3.3 Pencegahan Korosi Sumur

Ada berbagai cara dalam mencegah terjadinya tipe korosi sumur dapat dilakukan dengan cara:

1. Pemilihan bahan yang tepat. Sebagai contoh selain aluminium, bahan seperti magnesium dan atau mangan yang memiliki kualitas kemurnian tinggi (high analytical grade) menjadi material yang paling bagus terutama untuk lingkungan air laut atau air yang mengandung anion dan kation tinggi.
2. Perlindungan katodik. Penerapan perlindungan katodik dengan polarisasi yang kuat (strong polarization cathodic) tidak disarankan untuk diaplikasikan. Hal ini disebabkan karena akan meningkatkan pH di sekitar lingkungan logam yang dapat menyebabkan korosi alkali. Pemilihan Zn dan Al alloy katodik menjadi tipe katodik yang paling aman digunakan.
3. Perubahan lingkungan. Kondisi lingkungan perlu diubah agar korosi jenis sumur dapat dicegah. Misalnya korosi sumur pada tembaga dapat dicegah dengan menaikkan pH menjadi lebih alkali dan

menaikkan suhu air menjadi lebih hangat atau panas (Peddeferri and Lazzari, 2018).

3.4 Korosi Erosi (Erosion Corrosion)

3.4.1 Definisi dan Penyebab

Korosi erosi adalah korosi yang terjadi akibat pergerakan relatif antara fluida korosif dan bahan logam yang membenamkan dalam fluida. Fluida yang sangat deras dan dapat mengikis lapisan pelindung pada logam (Gambar 3.5). Korosi ini terjadi karena keausan dan menimbulkan bagian-bagian yang tajam dan kasar. Bagian –bagian inilah yang akan mudah terjadi korosi (Cicek dan Al-Numan, 2011). Faktor-faktor penyebab terjadinya korosi erosi adalah jumlah udara, adanya partikel debu, suhu, media korosif, pemilihan bahan yang kurang tepat dan kondisi operasi (Ahmad, 2006).



Gambar 3.5: Korosi erosi pada pipa (Nicklin, 2017)

3.4.2 Mekanisme korosi erosi

Sampai saat ini tidak diketahui secara jelas mekanisme terjadinya korosi erosi. Hanya saja mekanisme terjadinya korosi dapat dijelaskan melalui faktor penyebabnya (Sharma, 2016) yaitu:

1. Aliran turbulen

Aliran turbulen menyebabkan pergolakan cairan dalam logam yang menyebabkan seringnya terjadi kontak antara logam dengan fluida cairan. Fluida cairan tersebut seiring waktu akan mengikis permukaan logam yang berakibat terjadinya korosi.

2. Pengaruh partikel padatan

Padatan partikel dapat masuk ke dalam laju alir fluida cairan. Beberapa jenis partikel padatan mampu mengikis permukaan logam seiring dengan laju aliran fluida. Pengikisan tersebut yang menyebabkan logam khususnya permukaan logam yang kontak langsung terhadap partikel tersebut mengalami korosi.

3.4.3 Pengendalian korosi erosi

Korosi erosi dapat dicegah dengan cara:

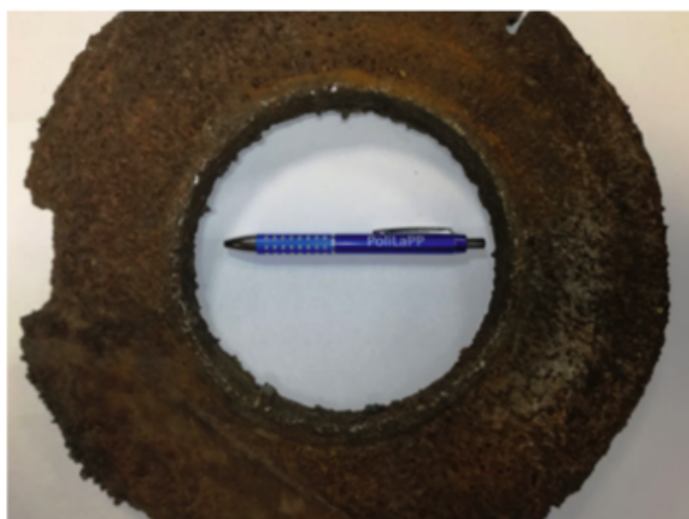
1. Pemilihan material atau bahan yang tepat.
2. Pembuatan desain yang tepat terutama mengenai dengan sistem laju alir
3. Perubahan lingkungan atmosfer sangat diperlukan di antaranya menyaring atau mengendapkan partikel padatan dalam media, mengurangi kadar uap air dalam udara, gas atau uap
4. Penggunaan bahan pelindung seperti logam, logam-keramik dan keramik dengan cara pengelasan, *thermal spraying* atau pelapisan dengan polimer.
5. Perlindungan katodik (Ahmad, 2006).

3.5 Korosi Galvanik (Galvanic Corrosion)

3.5.1 Definisi dan Penyebab

Korosi galvanik terjadi ketika adanya kontak antara logam yang lebih mulia dengan logam yang kurang mulia dalam kondisi elektrolit. Sebagai contoh tembaga (+0,344 V) dengan besi (-0,444 V), maka galvanis sel akan terbentuk.

Galvanis sel merupakan sel di mana terjadi perubahan kimia sebagai sumber energi. Korosi galvanik adalah salah satu masalah korosi praktis utama dari aluminium dan paduan aluminium, karena aluminium secara dinamis lebih aktif daripada kebanyakan bahan struktural umum lainnya dan oksida pasif, yang melindungi aluminium, dapat dengan mudah rusak secara lokal (Gambar 3.6). Ketika potensi dimunculkan karena kontak dengan bahan yang lebih mulia. Hal ini terutama terjadi ketika aluminium dan paduannya diekspos di perairan yang mengandung klorida atau spesies agresif lainnya. Faktor yang memengaruhi terjadinya korosi galvanis adalah posisi logam pada rangkaian galvanis, faktor lingkungan seperti kelembaban, suhu, udara dan pengaruh luas, jarak dan geometri (Ahmad, 2006).



Gambar 3.6: Korosi galvanis pada baja (Pedeferrri and Lazzari, 2018)

3.5.2 Mekanisme korosi galvanik

Mekanisme terjadinya korosi galvanik dapat dijelaskan melalui model sistem galvanis sel dari besi dan tembaga. Di dalam sistem galvanis ada 4 komponen utama yaitu katoda, anoda, elektrolit dan jalur aliran elektron. Pada model ini tembaga akan bertindak sebagai katoda dikarenakan memiliki potensial elektron positif (+0,344 V) sementara besi sebagai anoda yang memiliki potensial negatif (-0,444 V). Sesuai dengan prinsip dasar sel galvanis yaitu logam yang lebih mulia akan bertindak sebagai katoda sementara logam yang kurang mulia bertindak sebagai anoda. Kelembaban akan berperan sebagai media elektrolit dan permukaan logam sebagai jalur aliran elektron.

Ion besi akan mengalir dari kutub anoda (besi) ke kutub katoda (tembaga) dengan adanya media elektrolit yaitu air. Ion hidrogen akan tereduksi pada kutub katoda tembaga menghasilkan molekul gas hidrogen. Ion besi akan mengalir ke kutub katoda dan anion hidroksida akan mengalir ke anoda. Keduanya akan bertemu dan membentuk endapan besi hidroksida yang merupakan senyawa penyebab korosi.

Muatan positif mengalir dari kutub katoda ke anoda melalui jalur logam luar. Sementara, di dalam larutan elektrolit, elektron mengalir dari anoda ke katoda dengan membawa muatan positif yaitu kation. Sementara itu, dari anoda ke katoda akan dibawa muatan negatif yaitu anion. Di jalur luar logam, muatan dibawa oleh elektron dari anoda ke katoda. Elektron yang dihasilkan dari kutub anoda besi, akan membentuk endapan tembaga pada proses reduksi (Ahmad, 2006).

3.5.3 Pencegahan Korosi Galvanik

Korosi galvanis dapat dicegah dengan cara:

1. Pemilihan material atau bahan yang tepat
2. Penggunaan area yang cukup memadai antara logam mulia dengan logam yang kurang mulia
3. Penggunaan agen pelindung logam (coating metal)
4. Penggunaan inhibitor
5. Perlindungan katodik
6. Pengurangan kelembaban pada daerah kontak
7. Penggunaan material non logam untuk perangkat pemisah sel galvanis (Ahmad, 2006).

3.6 Korosi Tegang (Stress Corrosion)

3.6.1 Definisi dan Penyebab

Korosi tegang adalah korosi logam akibat aksi tegang (stress) dan serangan kimiawi. Fenomena tersebut terkait dengan kombinasi tegangan tarik statis, lingkungan dan dalam beberapa sistem, kondisi metalurgi yang menyebabkan kegagalan komponen karena inisiasi dan propagasi retakan rasio aspek tinggi. Tegangan tarik dapat berasal dari beban eksternal, gaya sentrifugal, perubahan

suhu atau tegangan internal yang disebabkan oleh perlakuan dingin, pengelasan atau perlakuan panas. Retakan umumnya terbentuk pada bidang yang normal terhadap tegangan tarik, dan retakan tersebut bersifat *intergranular* atau *transgranular* dan dapat bercabang (Cicek dan Al-Numan, 2011). Faktor-faktor yang memengaruhi korosi tegangan adalah kerentanan logam, lingkungan, dan tegangan tarik (Ahmad, 2006).

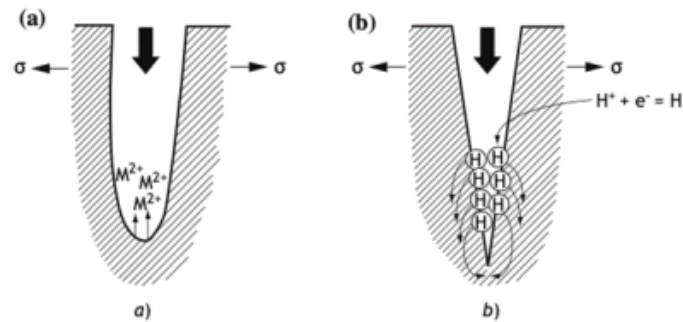


Gambar 3.7: Korosi tegang pada pipa (Pedefferri and Lazzari, 2018)

3.6.2 Mekanisme Korosi Tegang

Terdapat dua dasar mekanisme terjadinya korosi tegang yaitu anodik dan katodik (Pedefferri and Lazzari, 2018). Berdasarkan hal tersebut maka dapat dijelaskan bahwa:

1. Pembentukan retakan ujung. Retakan ini mulai terjadi pada anodik logam akibat terjadi peregangan pada anodik logam yang membentuk retakan kecil yang terlihat pada permukaan (Gambar 3.8 a)
2. Retakan ujung tersebut mengalami perpecahan akibat adanya atom hidrogen yang masuk ke dalam retakan logam dan terakumulasi pada ujung retakan yang menyebabkan korosi terjadi (Gambar 3.8 b)



Gambar 3.8: Skema mekanisme korosi tegang (Pedefferri and Lazzari, 2018)

3.6.3 Pencegahan Korosi Tegang

Korosi tegang atau *stress corrosion* dapat dicegah dengan pemberian perlakuan seperti:

1. Pemilihan material atau bahan yang tepat. Beberapa jenis bahan yang tepat untuk digunakan dalam pencegahan korosi tegang adalah *stainless steel*, *nikel* dan *titanium alloy*
2. Pengurangan tekanan dan intensitas tekanan di bawah ambang batas
3. Perubahan lingkungan atmosfer rendah korosif dengan cara mengurangi kadar oksigen
4. Penggunaan perlindungan katodik
5. Penggunaan inhibitor terutama inhibitor dalam media rendah korosif (Ahmad, 2006),

3.7 Korosi Celah (Crevice Corrosion)

3.7.1 Definisi dan Penyebab

Korosi celah adalah korosi lokal yang terkonsentrasi di celah-celah di mana celah cukup lebar untuk cairan menembus ke celah tetapi terlalu sempit untuk mengalirkan cairan. Korosi celah terjadi di bawah endapan dan di celah sempit yang menghalangi suplai oksigen. Korosi celah juga terjadi pada logam yang berdempetan dengan logam lain di antaranya ada celah yang dapat menahan kotoran dan air sehingga konsentrasi O_2 pada mulut kaya dibanding pada

bagian dalam, sehingga bagian dalam lebih anodik dan bagian mulut menjadi katodik (Gambar 3.9) (Cicek dan Al-Numan, 2011). Adapun faktor-faktor yang memengaruhi terjadinya korosi celah (Ahmad, 2006) di antaranya adalah:

1. Adanya celah yang berdekatan antara logam atau non-logam dengan komponen logam
2. Adanya celah, retakan atau kerusakan lain pada logam
3. Deposit barnacles, organisme biofouling dan organisme sejenis lainnya serta endapan lumpur, kotoran dan endapan lainnya yang menempel pada permukaan logam



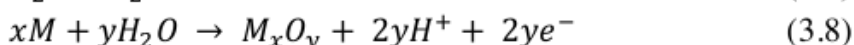
Gambar 3.9: Korosi celah pada *stainless steel* dalam air laut (Pedferri and Lazzari, 2018)

3.7.2 Mekanisme Korosi Celah

Berdasarkan mekanismenya, korosi celah dapat terjadi melalui tiga tahap (Pedferri and Lazzari, 2018), yaitu:

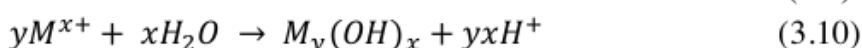
1. Tahap inkubasi atau penipisan oksigen.
Deposit oksigen yang ada dalam celah akan mengalami penipisan akibat reaksi korosi yang disebut dengan reduksi oksigen dan

pembentukan film atau lapisan pasif. Reaksi yang terjadi dapat digambarkan pada persamaan berikut:



2. Tahap kedua merupakan tahap di mana kehilangan oksigen secara total pada celah.

Hilangnya oksigen pada celah menyebabkan logam menjadi aktif dengan ditandai adanya perubahan potensial. Ada dua proses yang terjadi pada tahap ini yaitu dalam celah, logam berubah menjadi ion logam dengan konsentrasi hingga 1 M yang kemudian mengalami hidrolisis dan pH mengalami penurunan drastis menjadi sangat rendah. Persamaan reaksi yang terjadi dapat digambarkan sebagai berikut:



3. Tahap ketiga adalah aliran arus makro sel terjadi.

Ketika makro sel terbentuk maka akan muncul medan elektrik pada permukaan logam di mana terjadi aliran arus dari anoda ke katoda. Adanya distribusi arus sangat penting karena arus yang bertanggung jawab atas peristiwa korosi terjadi.

3.7.3 Pencegahan Korosi Celah

Korosi celah dapat dilakukan pencegahan agar tidak terjadi (Ahmad, 2006). Beberapa cara yang dapat ditempuh untuk mencegah terjadinya korosi jenis ini adalah:

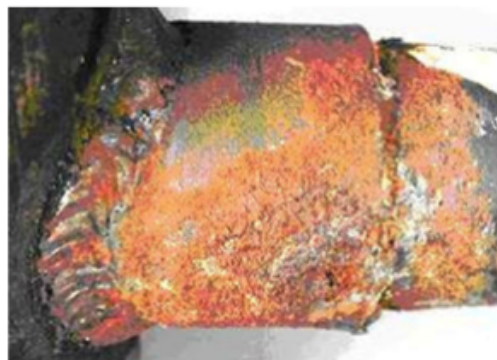
1. Pemilihan material atau bahan yang tepat. Beberapa contoh bahan yaitu: stainless steel dengan kristalinitas tinggi. Stainless steel alloy dengan kadar kromium 10,5 hingga 30% yang disebut dengan ferritic stainless steel. Stainless steel alloy austenitic yang mana stainless steel yang mengandung gamma besi. Jenis stainless steel alloy dengan kandungan molybdenum tinggi sangat cocok digunakan di dalam air laut atau air dengan kandungan klorin tinggi.

2. Desain perangkat yang tepat. Sebagai contoh desain yang dapat mencegah terjadinya penumpukan material korosif
3. Perlindungan katodik
4. Pengukuran untuk mencegah terjadi deposit antara lain:
 - a. Pengecekan secara berkala
 - b. Pemisahan material padat dari aliran media
 - c. Pengisian batu kecil atau kerikil di sekitar pipa

3.8 Korosi Mikrobiologi (Microbial Corrosion)

3.8.1 Definisi dan Penyebab

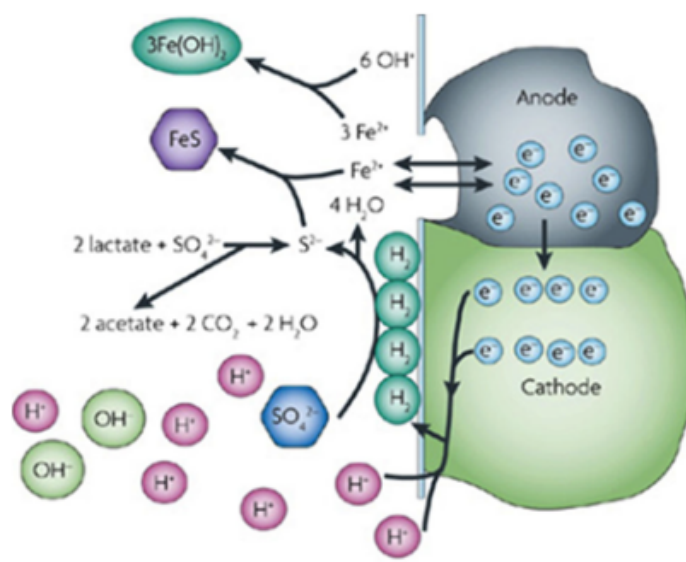
Korosi yang disebabkan oleh aktivitas mikroba seperti bakteri, jamur, protozoa dan alga yang dapat memproduksi aliran elektron, mendepositkan material asam anorganik dan organik sehingga menjadikan lingkungan normal menjadi lingkungan yang korosif (Cicek dan Al-Numan, 2011). Produksi material asam anorganik akan mengarah pada pembentukan ion hidrogen yang mana ion hidrogen pada permukaan logam akan menyebabkan kerapuhan logam (Gambar 3.10). Faktor-faktor penyebab terjadinya korosi mikrobiologi khususnya di industri di antaranya adalah buruknya sistem buka dan tutup pada proses pendinginan, buruknya jalur injeksi air, sistem penanganan residu air yang kurang memadai, perbedaan jenis pipa (Videla, 2002).



Gambar 3.10: Korosi mikrobiologi pada pipa (Loto, 2017)

3.8.2 Mekanisme Korosi Mikrobiologi

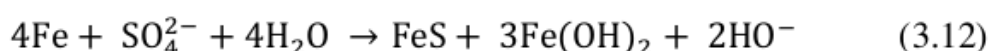
Korosi mikrobiologi paling utama disebabkan oleh adanya pertumbuhan bakteri jenis *Sulfate-Reducing Bacteria* (SRB). Ada dua spesies bakteri SRB yang umum sebagai penyebab korosi mikrobiologi yaitu *Desulfovibrio africanus* dan *Desulfotomaculum nigrificans* (Loto, 2017). Bakteri SRB mampu bertahan hidup dan mengalami pertumbuhan dengan memperoleh makanan atau sumber karbon dari molekul laktat dan fumarat. Hasil perombakan asam laktat akan dihasilkan asam asetat, karbon dioksida dan air. Adanya molekul asam asetat ini maka akan menyumbangkan ion hidrogen dan karbon dioksida yang membuat lingkungan menjadi bersifat anaerob (Videla, 2002).



Gambar 3.11: Mekanisme pembentukan FeS pada korosi mikrobiologi (Loto, 2017)

Pada sisi katoda, ion hidrogen akan mengalami reduksi menjadi molekul gas hidrogen. Adanya molekul gas hidrogen ini maka ion sulfat akan direduksi membentuk ion sulfida dan molekul air (Gambar 3.11). Selain itu bakteri SRB juga akan mendegradasi ion sulfat membentuk ion sulfida dan oksigen di mana reaksi ini terjadi secara anaerob. Reaksi pembentukan ion sulfida dan oksigen hasil degradasi ion sulfat oleh bakteri SRB dapat digambarkan pada reaksi 3.11. Ion sulfida hasil dari reaksi degradasi ion sulfat baik dari bakteri SRB dan reaksi reduksi hidrogen pada sisi katoda akan membentuk besi sulfida (FeS)

sebagai bentuk dari korosi mikrobiologi (Al-Darbi dkk., 2010). Secara keseluruhan reaksi yang terjadi dapat digambarkan sebagai berikut:



3.8.3 Pengendalian Korosi Mikrobiologi

Terdapat dua konsep dasar yang dapat diimplementasikan dalam mencegah dan mengendalikan korosi mikrobiologi, di antaranya:

1. Penghambatan pertumbuhan dan aktivitas metabolisme dari mikroorganisme
2. Modifikasi atmosfer lingkungan di mana korosi terjadi dengan mencegah agar mikroorganisme bisa beradaptasi dengan kondisi atmosfer tersebut.

Berdasarkan konsep dasar tersebut ada beberapa metode yang bisa diterapkan untuk mencegah dan mengendalikan korosi mikrobiologi, yaitu:

1. Pembersihan secara berkala

Pembersihan ini difokuskan pada dua jenis kotoran yang dihasilkan dari sekresi metabolisme mikroorganisme yaitu kerak dan sedimen lendir. Kerak disini paling umum diketahui sebagai deposit garam kalsium karbonat. Pengendapan garam kalsium karbonat dapat dihilangkan dengan cara penggunaan campuran asam anorganik dengan beberapa senyawa kimia aktif seperti *polimer anorganik fosfat*, *garam pirofosfat*, *tripolifosfat*, *heksa metafosfat*, *nitrilotris-metilen-asam fosfonat (AMP)*, dan *1-hidroksi- etiliden-1,1-asam bifosfonat (HEDP)*. Selain itu polimer organik juga dapat menyerap dan mencegah pembentukan deposit kalsium karbonat yaitu *poliakrilat*, *poli metaakrilat* dan sejenis ko-polimernya.

Deposit lendir terbentuk akibat adanya aktivitas mikroorganisme yang dapat memproduksi lumpur, lendir bakteri, oksida logam yang menempel pada permukaan logam. Treatment yang dapat dilakukan

untuk menghilangkan deposit lendir tersebut adalah dengan pembersihan secara kimiawi menggunakan besi fosfat.

2. Biosida

Biosida merupakan substansi yang dapat membunuh mikroorganisme di mana di dalamnya termasuk pestisida, fungisida dan herbisida. Penggunaan biosida merupakan salah satu cara pengendalian korosi dengan menggunakan bahan kimia. Senyawa aktif biosida yang banyak diaplikasikan yaitu *klorin*, *ozon*, *bromin*, *isothiazolone*, senyawa golongan *ammonium kuarterner* dan senyawa golongan *aldehida* yaitu *glutaraldehida* dan *akrolein*.

3. Pelapisan (coating)

Penggunaan *coating* sebagai agen pencegah dan pengendali korosi disarankan menggunakan bahan coating yang tidak beracun. Beberapa bahan yang aman digunakan sebagai *coating* adalah silikon, epoksi resin dan senyawa terfluorinasi (Videla, 2002)

3.9 Korosi Lelah (Fatigue Corrosion)

3.9.1 Definisi dan Penyebab

Korosi ini terjadi karena logam mendapatkan beban siklus yang terus berulang sehingga semakin lama logam akan mengalami patah karena terjadi kelelahan logam (gambar 3.12). Korosi ini biasanya terjadi pada turbin uap, pengeboran minyak dan *propeller* kapal (Utomo, 2009).



Gambar 3.12: Korosi lelah (Utomo, 2009)

3.9.2 Mekanisme korosi lelah

Pada korosi lelah, sejatinya terdapat tiga tipe mekanisme yang dapat digunakan untuk menjelaskan terjadinya korosi lelah. Salah satu mekanisme tersebut adalah adanya proses absorpsi dan adsorpsi partikel dari lingkungan. Pada korosi lelah, terjadi proses absorpsi dan adsorpsi suatu spesies dari lingkungan termasuk di dalamnya absorpsi hidrogen. Adanya peristiwa absorpsi hidrogen, hal tersebut menyebabkan terjadinya reaksi reduksi pada permukaan logam. Reaksi reduksi tersebut menginisiasi terjadinya pembentukan dan pertumbuhan retakan pada daerah korosi yang telah mendapatkan beban siklus terus menerus (Ahmad, 2006).

3.9.3 Pencegahan Korosi Lelah

Korosi lelah dapat dicegah dengan perlakuan sebagai berikut:

1. Perlindungan katodik. Penggunaan katodik polarisasi menengah (moderate polarization cathodic) sangat disarankan sebagai pencegah terjadi korosi lelah
2. Pengurangan tekanan daya tarik
3. Pelapisan area anodik dengan bahan anti korosif pada daerah yang rentan terhadap serangan korosi lelah. Contoh bahan pelapisan yang dapat digunakan adalah Zn dan bahan organik
4. Penggunaan dan pemakaian bahan atau material yang tepat
5. Perubahan lingkungan menjadi rendah korosif dengan melakukan *deaeration* atau menggunakan inhibitor media (Ahmad, 2006).

Bab 4

Pengukuran Korosi

4.1 Pendahuluan

Korosi adalah terjadinya kerusakan suatu logam karena dengan adanya reaksi kimia atau elektrokimia dengan lingkungannya. Logam yang rusak karena disebabkan fisik tidak disebut korosi, namun dinyatakan sebagai erosi, lecet, atau keausan (Revie and Uhlig, 2008). Dalam beberapa kasus, serangan kimiawi menyertai kerusakan fisik, seperti yang dijelaskan oleh istilah-istilah korosi - erosi, keausan korosif, atau korosi *fretting*. Non logam tidak termasuk dalam definisi korosi ini. Plastik bisa membengkak atau retak, kayu bisa pecah atau membusuk, granit bisa terkikis, dan semen Portland bisa lepas, tapi istilah korosi.

Pada bab ini pengukuran korosi, terbatas pada serangan kimiawi logam. “Karat” valid untuk korosi besi atau paduan dasar besi dengan pembentukan produk korosi yang sebagian besar terdiri dari oksida besi hidro. Oleh karena itu, logam non *ferrous* menimbulkan korosi, tetapi tidak berkarat (Revie and Uhlig, 2008). Suatu reaksi atau proses elektrokimia secara alamiah dan berjalan secara spontan disebut korosi. Korosi tidak bisa dihentikan ataupun dicegah, namun korosi hanya dapat diperlambat atau dikendalikan lajunya agar mengulur waktu proses kerusakan dari suatu logam (Rumah Belajar, 2009).

Pengetahuan korosi melibatkan perubahan kimiawi, jadi untuk memahami reaksi korosi harus menguasai prinsip-prinsip kimia. Proses korosi sebagian besar bersifat elektrokimia sehingga penting juga pemahaman tentang elektrokimia. Selain itu, karena struktur dan komposisi logam sering kali menentukan perilaku korosi maka anda harus memahami dasar-dasar metalurgi fisik. Ilmuwan korosi mempelajari mekanisme korosi untuk meningkatkan cara untuk mencegah atau setidaknya meminimalkan kerusakan yang disebabkan oleh korosi dan pemahaman tentang penyebab korosi.

Ada beberapa faktor yang menyebabkan korosi yakni air dan kelembaban udara, elektrolit, permukaan logam yang tidak rata, terbentuknya sel elektrokimia. Insinyur korosi, di sisi lain, menerapkan pengetahuan ilmiah untuk mengendalikan korosi. Misalnya, insinyur korosi menggunakan perlindungan katodik dalam skala besar untuk mencegah korosi pada pipa yang terkubur, menguji dan mengembangkan cat baru dan lebih baik, menentukan dosis inhibitor korosi yang tepat, atau merekomendasikan pelapisan yang benar. Ilmuwan korosi, pada gilirannya, mengembangkan kriteria perlindungan katodik yang lebih baik, menguraikan struktur molekul senyawa kimia yang berperilaku paling baik sebagai inhibitor, sintesis paduan tahan korosi, dan merekomendasikan perlakuan panas dan variasi komposisi paduan yang akan meningkatkan kinerjanya. Baik sudut pandang ilmiah dan teknik saling melengkapi dalam diagnosis kerusakan korosi dan dalam cara mengatasinya.

4.2 Pentingnya Memahami Korosi

Tiga alasan utama pentingnya korosi adalah: ekonomi, keamanan, dan konservasi. Untuk mengurangi dampak ekonomi korosi, insinyur korosi, dengan dukungan ilmuwan korosi, bertujuan untuk mengurangi kerugian material, serta kerugian ekonomi yang menyertainya, yang diakibatkan oleh korosi pada pipa, tangki, komponen logam mesin, kapal, jembatan, struktur laut, dan sebagainya. Korosi dapat membahayakan keselamatan peralatan operasi dengan menyebabkan kegagalan (dengan konsekuensi bencana), misalnya, bejana tekan, ketel uap, wadah logam untuk bahan kimia beracun, bilah turbin dan rotor, jembatan, komponen pesawat, dan mekanisme kemudi otomotif.

Keselamatan merupakan pertimbangan kritis dalam desain peralatan untuk pembangkit listrik tenaga nuklir dan pembuangan limbah nuklir. Kehilangan logam oleh korosi tidak hanya menyia-nyiakan logam, tetapi juga energi, air, dan upaya manusia yang digunakan untuk memproduksi dan membuat struktur logam sejak awal. Selain itu, membangun kembali peralatan yang terkorosi membutuhkan investasi lebih lanjut dari semua sumber daya ini - logam, energi, air, dan manusia.

Kerugian ekonomi dibagi menjadi (1) kerugian langsung dan (2) kerugian tidak langsung. Kerugian langsung termasuk biaya penggantian struktur dan mesin yang berkarat atau komponennya, seperti tabung kondensor, *muffler*, jaringan pipa, dan atap logam, termasuk tenaga kerja yang diperlukan. Contoh lainnya adalah (a) pengecatan ulang struktur di mana pencegahan karat adalah tujuan utamanya dan (b) biaya modal ditambah pemeliharaan sistem proteksi katodik untuk jaringan pipa bawah tanah.



Gambar 4.1: Salah satu Jembatan Roboh karena korosi pada tiang penahannya (Rumah Belajar, 2009)

Kerugian langsung yang cukup besar diilustrasikan oleh kebutuhan untuk mengganti beberapa juta tangki air panas rumah tangga setiap tahun karena kegagalan oleh korosi dan kebutuhan untuk mengganti jutaan knalpot mobil yang berkarat. Kerugian langsung termasuk biaya tambahan untuk menggunakan logam dan paduan tahan korosi sebagai pengganti baja karbon di mana yang terakhir memiliki sifat mekanik yang memadai tetapi tidak

memiliki ketahanan korosi yang memadai; ada juga biaya galvanisasi atau pelapisan nikel pada baja, penambahan inhibitor korosi ke air, dan ruang penyimpanan dehumidifikasi untuk peralatan logam.

Kerusakan korosi pada logam memberikan dampak kerugian yang banyak. Ada banyak penelitian sebelumnya di antaranya hasil penelitian yang dilakukan pada tahun 2002 di Amerika Serikat bahwa akibat korosi diperkirakan kerugian yang banyak terserang pada infrastruktur, permesinan industri sampai perangkat transportasi di negara adidaya. Di mana kerugian akibat korosi tersebut mencapai 276 miliar dolar AS (Rumah Belajar, 2009). Salah satu kerugian infrastruktur dengan robohnya jembatan yang disebabkan tiang penahannya terjadi korosi sebagaimana pada Gambar 4.1 di atas.



Gambar 4.2: Pabrik Kimia yang terkorosi akibat lingkungan agresif pantai (Cakbentra, 2015)

Kerusakan akibat korosi pada mesin industri 'pabrik kimia sebagaimana pada Gambar 4.2. Di mana, yang sangat menarik perhatian adalah pabrik kimia banyak menentukan tempat di tepi laut. Alasan mereka adalah tepi laut secara *general* memberikan kemudahan logistik seperti akses bahan baku dan segi pemasaran. Di samping itu, adapun alasan lainnya adalah bahwa daerah tepi laut memiliki penduduk yang kurang sehingga memberikan dampak lingkungan cukup kecil dibandingkan dengan lokasi yang sangat padat penduduknya.

Namun hal ini, mereka tidak menyadari bahwa keadaan tepi laut yang memiliki lingkungan korosif dan udara lembab yang menyebabkan sangat tidak bersahabat dan mengkhawatirkan logam-logam yang dipakai akan terjadi korosi dalam proses pabrik kimia tersebut. Dengan mengetahui lokasi dan lingkungan, maka perlu penggunaan dan pemilihan logam disesuaikan dan *maintenance* yang baik pada alat-alat pabrik kimia yang dipergunakan agar dapat memperpanjang masa pemakaian dan *safety* pada saat operasi pabrik.



Gambar 4.3: Kebocoran Pipa Logam Akibat Korosi (Rumah Belajar, 2009)

Korosi memberikan dampak kerugian baik langsung maupun kerugian tidak langsung. Adapun contoh kerugian langsung yakni kerusakan terjadi pada permesinan, peralatan dan struktur bangunan. Adapun contoh kerugian tidak langsung yakni aktivitas produksi terhenti akibat terjadinya korosi pada peralatan sehingga membutuhkan waktu penggantian alat pada peralatan/permesinan sebagaimana pada Gambar 4.2. Selain itu kerugian tidak langsung bisa terjadi karena adanya korban jiwa yang disebabkan terjadinya kerobohan suatu konstruksi jembatan akibat korosi pada tiang penahannya sebagaimana pada Gambar 4.1, dan akibat korosi pada kebocoran pipa sebagaimana pada Gambar 4.3

4.3 Pengukuran Laju Korosi

Pengukuran korosi dilakukan untuk mengetahui prediksi berapa lama dan kapan suatu struktur itu bisa bertahan terhadap terjerangan korosi. Pengukuran dalam mengetahui prediksi ²sebut disebut *corrosion monitoring* (Permatasari, 2019). Mengetahui laju korosi adalah salah satu aktivitas dari *corrosion monitoring*. Laju korosi merupakan pengukuran korosi yang perlu

dilakukan untuk mengetahui prediksi berapa lama dan kapan suatu konstruksi atau material dapat bertahan. Dengan mengetahui laju korosi suatu material logam, maka dapat diketahui kualitas dari material logam tersebut.

Logam yang memiliki ketahanan korosi yang rendah akan mengalami laju korosi yang tinggi begitu pun sebaliknya, logam yang memiliki ketahanan korosi yang tinggi akan mengalami laju korosi yang rendah. Kecepatan penurunan atau kecepatan rambatan kualitas bahan terhadap waktu disebut laju korosi. Umumnya, ada dua metode yang digunakan dalam menghitung laju korosi yakni Metode kinetika (kehilangan berat) dan Metode Elektrokimia.

4.3.1 Metode Weight Loss (Kehilangan Berat)

Salah satu metode pengukuran laju korosi dengan cara mengukur berat logam akibat korosi disebut metode kehilangan berat (Weight Loss). Prinsip weight loss adalah menghitung berapa banyak material yang hilang selepas pengujian dilakukan. Pengujian Weight Loss menggunakan standar (ASTM G31-72, 2004). Metode ini dilakukan dengan cara menghitung berapa kekurangan berat akibat korosi yang terjadi dalam jangka waktu tertentu yang ditentukan. Metode kehilangan berat ini memanfaatkan jangka waktu sampai diperoleh jumlah kekurangan berat akibat korosi yang terjadi pada logam tersebut.

Perhitungan dilakukan dengan cara jumlah massa logam yang telah dibersihkan dari oksida dan jumlah massa tersebut dikategorikan sebagai massa awal, kemudian dihitung jumlah massa logam pada suatu lingkungan yang korosif seperti dilingkungan asam selama waktu tertentu. Untuk menghitung laju korosi dengan metode kehilangan berat akibat korosi digunakan Rumus 4.1 (Fontana, 1987). Nilai konstanta tergantung daripada satuan yang dipergunakan. Adapun nilai konstanta yang dipergunakan dapat dilihat pada Tabel 4.1.

CR (mpy) = (W x K) / (D x A x T) (4.1)

Di mana

- CR = Laju Korosi (Corrosion rate) (mpy)
- W = Weight Loss (Kehilangan Berat) (gram)
- K = Konstanta
- D = Densitas sampel (g/cm3)

- As = Luas permukaan (Surface Area) (cm²)
- T = waktu terpapar (Eksposur Time) (jam).

Laju korosi tergantung dari kualitas suatu material. Semakin kecil laju korosi maka semakin lambat material tersebut terkorosi, begitu pun sebaliknya semakin cepat material tersebut terkorosi maka semakin besar laju korosi. Kualitas dari ketahanan pada suatu material bisa dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.1: Nilai Konstanta berdasarkan satuan laju korosi (Fontana, 1987)

No.	Satuan Laju Korosi (Corrosion Rate)	Kontanta
1	Mils per year (mpy)	3,45 x 10 ⁶
2	Inches per year (ipy)	3,45 x 10 ³
3	Milimeters per year (mm/y)	8,76 x 10 ⁴
4	Micrometers per year (μm/y)	8,76 x 10 ⁷

Tabel 4.2: Relatife ketahanan korosi (Fontana, 1987)

Relative corrosion resistance	Mpy	mm/yr	μm/yr	nm/yr	pm/s
Outstanding	< 1	< 0,02	< 25	< 2	< 1
Excellent	1 – 5	0,02 – 0,1	25 – 100	2 – 10	1 – 5
Good	5 – 20	0,1 – 0,5	100 – 500	10 – 50	20 – 50
Fair	20 – 50	0,5 – 1	500 – 1000	20 - 150	20 – 50
Poor	50 – 200	1 – 5	1000 – 5000	150 – 500	50 – 200
unacceptable	200+	5+	5000+	500+	200+

Metode kehilangan berat paling sering dipergunakan baik pada skala laboratorium maupun skala industri. Ini disebabkan metode ini menggunakan peralatan sederhana dan hasilnya akurat. Akan tetapi metode kehilangan berat ini juga memiliki kekurangan yaitu tidak bisa mengecek sece²ra cepat jika terjadi perubahan saat proses korosi, korosi yang terjadi secara **lokalisasi tidak** bisa **dilihat** secara **langsung tanpa** adanya **pemindahan** spesimen dari lokasi **pengujian**, perhitungan tidak bisa diprediksi secara langsung dari peralatan yang digunakan, dan bentuk korosi yang tidak bisa dideteksi secara langsung (Supiyanti, 2021; Agus, 2013).

Contoh perhitungan laju korosi dengan metode Weight Loss

Suatu balok baja karbon rendah dengan ukuran 0,3 x 0,1 x 0,04 m. Balok tersebut dipaparkan di lingkungan industri kimia selama 2 minggu. Setelah itu dilakukan pengecekan ternyata balok tersebut terjadi korosi. Selanjutnya korosi dihilangkan pada balok baja tersebut sampai balok tersebut kehilangan

beratnya sebesar 0,0012 kg. Hitunglah berapa besar laju korosi dari balok tersebut?

Penyelesaian:

Diketahui Dimensi spesimen: 0,3 x 0,1 x 0,004
 W = 0,0012 kg = 1,2 gram
 T = 2 minggu = 336 jam
 D = 7,86 g/cm³
 As = 2 (p x l + p x t + l x t)
 As = 2 (0,3 x 0,1 + 0,3 x 0,04 + 0,1 x 0,04)
 As = 0,092 m² = 920 cm²

Ditanyakan CR = ?

Maka

$$CR (mpy) = \frac{1,2 \times 8,76 \cdot 10^4}{7.86 \cdot 920 \cdot 336} = 0.0433 mpy$$

4.3.2 Metode Elektro Kimia

Metode pengukuran laju korosi dengan cara mengukur beda potensial spesimen hingga didapat laju korosi yang terjadi disebut metode elektrokimia. Metode elektrokimia ini merupakan metode untuk pengukuran laju korosi di mana pada waktu pengukuran saja dengan memperkirakan laju tersebut dengan waktu yang panjang. Dalam artian bahwa laju korosi diprediksi walaupun hasil yang terjadi antara satu waktu dengan waktu lainnya berbeda. Kekurangan metode ini yakni tidak bisa menunjukkan secara pasti laju korosi secara akurat yang terjadi, ini disebabkan karena dapat mengukur laju korosi hanya pada waktu tertentu saja, sehingga secara umum penggunaan maupun sikon untuk bisa di *treatment* tidak bisa diketahui. Kelebihan metode elektrokimia yakni dapat secara langsung diketahui laju korosi pada saat diukur, sehingga waktu mengukur laju korosi tidak menghabiskan waktu yang lama (Supiyanti, 2021; Agus, 2013).

Metode elektrokimia ini menggunakan rumus yang didasari pada Hukum Faraday yaitu menggunakan rumus sebagaimana pada Rumus 4.2 (Fontana, 1987).

$$CR \text{ (mpy)} = K \frac{ai}{nD} \dots \dots \dots (4.2)$$

Di mana,

CR = Corrosion rate (laju korosi)

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

a = atomic weight of metal (berat atom)

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

n = number of electron lost (jumlah kehilangan elektron)

D = Massa Jenis (Density) (g/cm^3)

Contoh perhitungan laju korosi dengan metode Elektrokimia:

Sepotong baja yang berada dalam larutan HCl (air-free) mengalami korosi dengan densitas arus $1 \mu\text{A/cm}^2$. Berapa laju korosi dalam mpy untuk baja tersebut ?

Penyelesaian

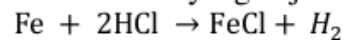
Diketahui: Sepotong baja berada dalam larutan HCl (*air-free*)

Densitas arus, $i = 1 \mu\text{A/cm}^2$

Massa atom Fe, $a = 55,8$

Masaa jenis Fe, $D = 7,86 \text{ g/cm}^3$

Reaksi kimia yang terjadi adalah:



$\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ (*Oksidasi baja*), maka $n = 2$

Jadi

$$CR \text{ (mpy)} = 0,129 \frac{55,8 \times 1}{2 \times 7,86} = 0,46 \text{ mpy}$$

Metode kinetika (kehilangan berat) dan Metode Elektrokimia masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangan dalam menghitung laju korosi pada suatu material logam. Sehingga dalam menghitung laju korosi kedua metode tersebut dapat digunakan dengan catatan pertimbangan kelebihan dan kekurangan dari kedua metode tersebut.

Bab 5

Termodinamika Korosi

5.1 Pendahuluan

Pada bab ini akan kita bahas tentang yang langsung berkaitan dengan korosi termodinamika yaitu: 1 Energi Bebas Gibb 2. Persamaan Nernst 3 .Kinetika elektrokimia korosi 4 Laju korosi. Korosi terjadi karena adanya kecenderungan suatu logam kembali pada keadaan lebih stabil, dengan reaksi oksidasi, reaksi korosi pasti melibatkan transfer elektron. Untuk alasan ini, reaksi dapat dianggap elektrokimia yang terjadi di alam. Termodinamika dapat memberikan dasar dalam memahami perubahan energi yang terkait dengan reaksi korosi. Secara umum akan dapat memprediksi kapan bisa terjadi proses korosi. Namun termodinamika tidak dapat memprediksi laju korosi. Laju hasil reaksi diatur oleh dinamika pergerakan secara kinetika.

Teorema Energi bebas Gibb's

Energi bebas Gibb, yang diberikan oleh persamaan di bawah ini, memberi kita sebuah *tools* yang dapat digunakan untuk meramal apakah reaksi korosi dimungkinkan secara termodinamika:

$$\Delta G = -nFE$$

Di mana:

ΔG = Energi bebas Gibb's (Joule)

N = Perpindahan elektron di dalam reaksi oksidasi (mole)

F = Constanta Faraday (96,500 J/v-mole)

E = standart emf Potensial $E_{oksidasi}^o + E_{reduksi}^o$ (volt)

$E_{reduksi}^o$ = Standar potensial katode setengah cell (Volt)

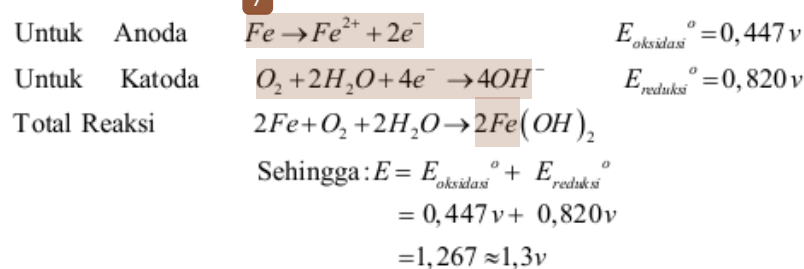
$E_{Oksidasi}$ = Standar potensial anode setengah cell (volt)

Jika ΔG positif, maka reaksi tidak akan dilanjutkan selanjutnya .dan sebaliknya Jika ΔG negatif, maka reaksi dimungkinkan (Tripathi, 2020).

Contoh kasus:

Jika sebatang baja dimasukkan ke dalam air laut yang diangin-anginkan dengan pH netral. Pertanyaannya apakah baja mungkin mengalami korosi, mengapa? (Asumsikan valensi 2).

Solusinya:



Dari persamaan energi bebas Gibb: $\Delta G = -nFE$ maka :

$$\Delta G = -(2 \text{ mole}) \left(96,500 \frac{\text{J}}{\text{v-mole}} \right) (1,3 \text{ v})$$

$$\Delta G = -250,9 \text{ J}$$

Catatan : tanda negatif menunjukkan reaksi korosi, dengan artian adalah memungkinkan.

5.2 Persamaan Nernst

Dalam sel volta pada pengukuran standar, pasti digunakan konsentrasi yang sama pada kedua gelas kimia yaitu pada anode dan katode. Namun, jika salah satu atau kedua gelas kimia tersebut konsentrasinya diubah, maka perhitungan potensial selnya tidak akan sama dengan perhitungan potensial sel volta biasa ($E^\circ_{\text{sel}} = E^\circ_{\text{katode}} - E^\circ_{\text{anode}}$).

Jadi, persamaan nernst adalah persamaan ketika konsentrasi dan tekanan pada kedua elektrode (anode dan katode) berbeda jenis pada kedua elektrode. Konsep ini dikemukakan oleh Walther Nernst. Seperti disebutkan sebelumnya, nilai potensial logam tergantung atau dimodifikasi oleh lingkungan sekitar. Konsentrasi reaktan anoda dan katoda akan merubah keseimbangan antara reaksi oksidasi dan reduksi. Persamaan Nernst akan memungkinkan dan bisa membantu dalam menghitung potensial logam dalam kondisi ion logam atau oksidasi / reduksi yang berbeda. Persamaan Nernst dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$E_{\text{cell}} = E^\circ + 2.3 \frac{RT}{nF} \log_{10} \frac{[\text{oksidasi}]}{[\text{reduksi}]}$$

Dimana :

E_{cell} = Potensial cell sesuai kondisi lingkungan (volt)

E° = Potensial reduksi standar @ 25⁰ C dan unit aktifitas (volt)

Pada suhu dan tekanan standar (25⁰C dan 760mm Hg) ini dapat disederhanakan menjadi berikut (ditunjukkan sebelumnya):

$$E_{\text{cell}} = E^\circ + \frac{0,059}{n} \text{Log}_{10} \frac{[\text{oksidasi}]}{[\text{reduksi}]}$$

Persamaan Nernst juga dapat ditulis untuk setiap setengah sel seperti yang ditunjukkan pada contoh sel konsentrasi ion logam berikut di bawah ini:

Sebuah tembaga bulat melingkar dan diputar di air garam/laut. Gradien dalam konsentrasi ion logam diatur pada permukaan piringan. Di pinggiran cakram konsentrasi ion tembaga adalah 0,001 M. Di dekat pusat cakram konsentrasi ion tembaga adalah 10 M. Berapa potensi situs anoda dan katoda yang terjadi pada tembaga? Dan di mana kehilangan logam akan terjadi? Asumsikan STP

Penyelesaian: Dalam hal ini kami menemukan EMF standar untuk persamaan berikut:

logam akan hilang dari luar cakram (ini lebih negatif)

$$E_{\text{Bagian luar}} = 0,342 \text{ v} + \frac{0,059}{2 \text{ mol}} \log_{10} (10^{-3})$$

$$= 0,2535 \text{ v}$$

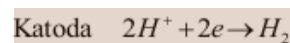
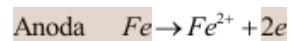
$$E_{\text{bagian tengah}} = E^{\circ} \frac{0,059}{2 \text{ mol}} \log_{10} (10^1)$$

$$= 0,3715 \text{ v}$$

$$E_{\text{keseluruhan}} = E_{\text{bagian tengah}} - E_{\text{bagian luar}}$$

$$= 0,118 \text{ v}$$

Dalam kasus lain keseimbangan Elektroda dan Persamaan Nernst seperti di bawah ini: Jika sebuah logam besi dicelupkan dalam sebuah larutan asam.



Elektroda kesetimbangan ditentukan oleh besarnya perubahan energi bebas ΔG yang merupakan perbedaan antara keadaan posisi akhir dan keadaan posisi awal, antar produk dan pereaksi untuk reaksi elektrokimia. Dengan kata lain, energi oksidasi (anodic) energi reduksi (katodik), tetapi dengan arah yang berlawanan untuk reaksi elektrokimia:

$$\text{Oksidasi} + ne \rightarrow \text{Red}$$

$$\Delta G_{\text{reaksi}} = G_{\text{produk}} - G_{\text{reaktan}}$$

$$= G_{\text{reduksi}} - G_{\text{Oksidan}}$$

7 Dalam suatu sistem elektrokimia dengan tekanan dan temperatur tetap, energi yang berhubungan dengan proses adalah perubahan energi bebas, yang dinyatakan dalam ΔG . Hubungan antara ΔG dengan potensial elektroda dirumuskan sesuai persamaan seperti di bawah ini:

$$\Delta G = -nFE \text{ atau } \Delta G^{\circ} = -nFE^{\circ}$$

Maka persamaan termodinamika dapat di tulis menjadi:

Persamaan ini disebut persamaan Nernst

$$\begin{aligned}\Delta G^{\circ} \text{reaksi} &= G^{\circ} \text{reduksi} - G^{\circ} \text{oksidan} + (RT) \ln \frac{\text{red}}{\text{oks}} \text{ atau} \\ &= G^{\circ} \text{produk} - G^{\circ} \text{reaktan} + (RT) \ln \frac{\text{produk}}{\text{reaktan}} \\ &= \Delta G^{\circ} + (RT) \ln \frac{\text{produk}}{\text{reaktan}}\end{aligned}$$

$$\text{dimana: } E = \frac{-\Delta G}{nF}$$

sehingga persamaan termodinamika menjadi:

$$E = E_{\circ} - \left(\frac{RT}{nF} \right) \ln \left[\frac{\text{red}}{\text{oks}} \right]$$

Persamaan ini disebut persamaan Nernst

$$\Delta G = \Delta G^{\circ} + RT \ln K$$

$$nFE = nFE_{\circ} - RT \ln K$$

$$E = E_{\circ} - \left[\frac{RT}{nF} \right] \ln K$$

Contoh jika terjadi reaksi :

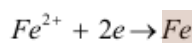


$$E = E_{\circ} - \left[\frac{RT}{nF} \right] \ln \left(\frac{a_G \cdot a_H}{a_E \cdot a_F} \right)$$

$$E = E_{\circ} - \left[\frac{RT}{nF} \right] \ln \left(\frac{a \text{ produk}}{a \text{ reaktan}} \right)$$

dimana : $a=1$ jika unsur senyawa, logam dalam kondisi stabil

Contoh sebuah reaksi :



$$E = E_{\circ} - \left(\frac{RT}{nF} \right) \ln a \frac{\text{red}}{aFe^{2+}}$$

dimana aktifitas $Fe=1$ maka:

$$E = E_{\circ} - \left(\frac{RT}{nF} \right) \ln a \frac{1}{aFe^{2+}}$$

$$E = E_{\circ} - \left(\frac{RT}{nF} \right) \ln a Fe^{2+}$$

Jika konsentrasi Fe^{2+} berurutan sebagai berikut :

1,0M 0,1M 0,01M dan $E_o Fe = -0,440 \frac{volt}{SHE}$ maka nilai E adalah :

$$E = E_o - 0,440 + \frac{\{(1,98)(298)(2,30)(4,184)\}}{(2)(96,500) \log a Fe^{2+}}$$

$$E = E_o - 0,440 + \frac{0,0592}{2 \log 1}$$

$$= -0,44 \frac{volt}{SHE}$$

$$E = E_o - 0,440 + \frac{0,0592}{2 \log 0,01}$$

$$= -0,4991 \frac{volt}{SHE}$$

$$E = E_o - 0,440 + \frac{0,0592}{2 \log 0,001}$$

$$= -0,52 \frac{volt}{SHE}$$

Keterangan: bobot nilai 0,0592 di dapat dari perhitungan $\frac{((1,98)(298)(2,30)(4,184))}{96500}$

bobot nilai 4,184 pengkonversian dari kalori menjadi Joule

bobot nilai 2,303 pengkonversian logaritma natural ke log

5.2.1 Kinetika Elektrokimia Korosi

Kinetika elektrokimia berperan dalam memprediksi apakah reaksi korosi memungkinkan terjadi, sekaligus dapat mengetahui seberapa cepat reaksi akan berlangsung. Secara teori, hukum Faraday dapat digunakan untuk melakukan ini.

Hukum Faraday dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$m = I z t$$

Dimana : m = kehilangan massa dari material setelah korosi (gram)

I = Arus korosi (A)

$$z = \text{Ekuvalen elektrokimia} = \frac{a}{nF} \left(\frac{\text{g}}{\text{A} \cdot \text{s}} \right)$$

a = Bobot atom menurut baja (gram)

n = Peralihan elektron dalam reaksi oksidasi (mol)

$$F = \text{Konstanta Faraday} \left(96,500 \frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{mol}} \right)$$

t = Waktu reaksi (det)

Contoh Kasus:

Sebuah spesimen baja memiliki luas permukaan anoda 1000 cm² berada dalam larutan elektrolit. Arus korosi 1 mA. Nah berapa massa baja yang akan hilang dalam waktu 6 jam? Berapa laju korosi dalam $\mu\text{g} / \text{cm}^2 / \text{hari}$? dalam mpy? asumsikan valensi 2.

dari persamaan: $m = Izt$

diana $I = 0,001\text{A}$

$$\begin{aligned} z &= \frac{a}{nF} = \frac{55,847 \text{ g}}{(2 \text{ mol}) \left(96,500 \frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{mol}} \right)} \\ &= 2,89 \times 10^{-4} \frac{\text{g}}{\text{A} \cdot \text{s}} \end{aligned}$$

Jika massa baja hilang sema 6 jam maka :

$$t = (6 \text{ jam}) \left(\frac{60 \text{ min}}{1 \text{ jam}} \right) \left(\frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} \right)$$

$$t = 21,600 \text{ s}$$

$$m = (0,001 \text{ A}) \left(2,89 \times 10^{-4} \frac{\text{g}}{\text{A} \cdot \text{s}} \right) (21,600 \text{ s})$$

$$m = 6,255 \times 10^{-3} \text{ g}$$

Laju korosi:

$$\begin{aligned}
 &= \frac{m}{At} \\
 &= \frac{6,255 \times 10^{-3} \text{ g}}{(1000 \text{ cm}^2)(21,600 \text{ s})} \left(\frac{10^{-6} \mu\text{g}}{1 \text{ g}} \right) \left(\frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ jam}} \right) \left(\frac{24 \text{ jam}}{1 \text{ hari}} \right) \\
 &= 25,02 \frac{\mu\text{g}}{\text{cm}^2} / \text{hari}
 \end{aligned}$$

Maka laju korosi dalam mpy, kita bagi dengan massa jenis logam.

Laju korosi dalam mpy adalah :

$$\begin{aligned}
 &= \frac{25,02 \frac{\mu\text{g}}{\text{cm}^2} / \text{hari}}{\rho} \\
 &= \frac{25,02 \frac{\mu\text{g}}{\text{cm}^2} / \text{hari}}{7,20 \times 10^6 \frac{\mu\text{g}}{\text{cm}^3}} \left(\frac{365 \text{ hari}}{\text{tahun}} \right) \left(\frac{1 \text{ mil}}{2,54 \times 10^{-3} \text{ cm}} \right) \\
 &= 0,499 \text{ mpy}
 \end{aligned}$$

5.3 Laju Korosi (Kerapatan Arus)

Laju korosi atau sering juga kerapatan arus ditentukan oleh beda potensial antara anoda dan katoda dan resistansi sel korosi. Maka untuk mendapatkan nilai arus korosi adalah:

$$I = \frac{V}{R}$$

Akibat adanya hambatan listrik atau polarisasi elektroda sehingga hambatan dalam sel juga akan terjadi.. sehingga semakin besar tahanan maka semakin rendah arus korosinya dan dari hukum Faraday semakin rendah massa yang hilang. Tahanan atau resistensi yang tinggi dalam sel korosi bermanfaat sebagai pengendalian. Hambatan ini dapat dihasilkan dari beberapa faktor yaitu:

1. Tahanan sambungan listrik antara anoda dan katoda.
2. Tahanan elektrolit.

- 3. Konsentrasi tinggi ion logam anoda dalam larutan.
- 4. Reaktan yang terbentuk di katoda.
- 5. Kekurangan reaktan di katoda.

Proses resistansi ini dapat diekspresikan dalam diagram polarisasi. Diagram ini juga memplot perbedaan potensial dengan arus (atau arus log Tabel di bawah ini menunjukkan massa jenis, massa atom, valensi, dan laju korosi untuk bermacam macam logam (Dawson et al., 1997).

Tabel Data korosi untuk bermacam macam logam

Tabel 5.1: Data Korosi untuk beberapa baja

No.	Elemen	Atomic Mass (g/mol)	Valensi	Elektrokimia Equivalen $\left(\frac{g}{coloumb}\right)$	Equivalen Laju Korosi $\frac{\mu A}{cm^2} \left(\frac{mm}{thn}\right)$	Massa Jenis $\left(\frac{g}{cm^3}\right)$
1	Magnesium	24,31	2	1,26E-04	0,023	1,74
2	Seng	65,38	2	3,39E-04	0,015	7,13
3	Al	26,98	3	9,30E-04	0,011	2,72
4	Besi	55,85	2	2,89E-04	0,013	7,20
5	Besi	55,85	3	1,93E-04	0,087	7,20
6	Copper	63,54	1	6,58E-04	0,023	8,94
7	Copper	63,54	2	3,29E-04	0,012	8,94
8	Ni	58,71	2	3,04E-04	0,011	8,89

Tabel 5.2: Sifat Termodinamika Ionik dan Unsur Netral 250C(Mahardika, 2015)

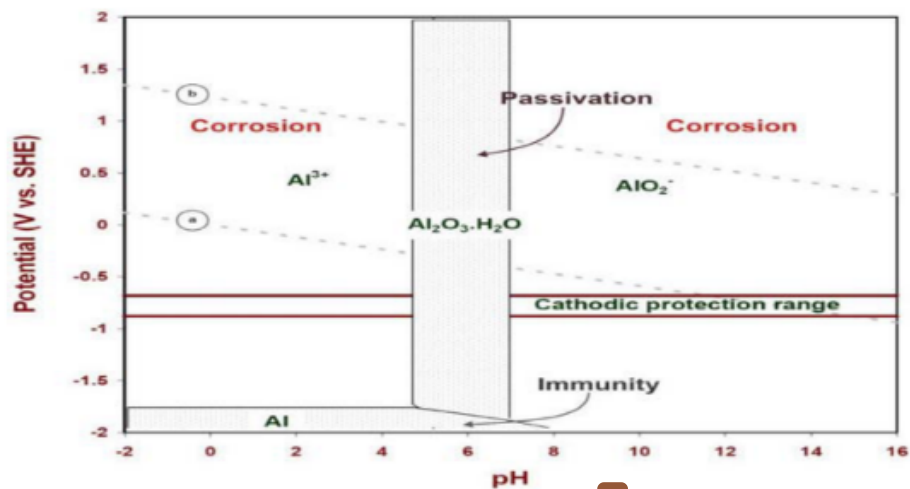
Unsur(species)	$\Delta H^o \left(kJ mol^{-1}\right)$	$\Delta G^o \left(kJ mol^{-1}\right)$	$S^o \left(J mol^{-1}K^{-1}\right)$
	0	0	0
$H_{2(g)}$	0	0	130,7

$O_{2(g)}$	0	0	205,0
$O_{2(aq)}$	-11,7	16,3	110,9
$H_2O_{(l)}$	-285,8	-237,2	69,9
$OH^-_{(aq)}$	-230,0	-157,3	-10,75
$Cu_{(s)}$	0	0	33,2
$Cu^+_{(aq)}$	72,1	50,3	41
$Cu^{2+}_{(aq)}$	65,8	65,7	-97,2
$Ag_{(s)}$	0	0	42,6
$Ag^+_{(aq)}$	105,6	77,2	72,7
$AgCl_{(s)}$	-127,1	-109,8	96,3
Cl^-	-166,9	-131,1	56,7

Diagram E - pH

Diagram ini menampilkan daerah daerah kestabilan air, daerah daerah logam akan imun, terkorosi atau terpasivasi sebagai fungsi dari potensial sel dan pH. Diagram ini memberikan informasi tentang reaksi anodik dan katodik yang mungkin terjadi dan kemungkinan proteksi korosi berdasarkan termodinamika. Diagram potensial –pH (E-pH) (Fourbaix dibuat untuk logam murni dan dengan bertambahnya hasil pengukuran besaran termodinamika paduan, beberapa diagram potensial paduan serta menjelaskan pengaruh lingkungan terhadap logam.

Aluminium E-pH (Pourbaix) Diagram



Tabel 5.3: Harga energi bebas unsur Fe/senyawanya

No.	Unsur, Senyawa, Ion	G- (kal)
1	Fe	0
2	Fe hydrous	-58,880
3	Fe ₃ O ₄ unhydrous	-242,400
4	Fe ₂ O ₃ unhydrous	-177,100
5	Fe ₂ O ₃ hydrous	-161,930
6	Fe ⁺⁺	-20,300
7	HeOH ₂ ⁻	-90,627
8	Fe ⁺⁺⁺	-2,530
9	Fe(OH) ₂ ⁺	-55,910

10	FeOH^{++}	-106,200
11	FeO_4	-117,685
12	H_2O	-56,690

Bab 6

Korosi pada Logam

6.1 Sumber Logam

Banyak literatur menyebutkan bahwa logam berasal dari lapisan kerak bumi, berupa bahan-bahan murni baik organik maupun anorganik. Dalam prosesnya, logam diambil dari hasil pertambangan, yang kemudian dicairkan dan dimurnikan sehingga menjadi logam murni. Logam murni ini selanjutnya dicairkan lagi sampai menjadi logam yang dapat dibentuk perhiasan seperti emas dan perak, juga alat-alat pertanian. Bahkan, untuk jenis logam tertentu dengan ukuran yang sangat kecil dapat difungsikan sebagai pengganti energi minyak (uranium). Logam juga mengalami siklus perputaran yang bermula dari lapisan kerak bumi ke lapisan tanah, kemudian makhluk hidup, masuk ke dalam air, lalu mengendap hingga akhirnya kembali lagi ke lapisan kerak bumi.

Darmono (1995) menyebutkan bahwa logam diklasifikasikan menjadi dua, yaitu logam makro dan logam mikro. Logam makro ditemukan pada lapisan kerak bumi dengan kurang lebih 1000 ppm, sementara logam mikro ditemukan kurang dari 500 ppm.

Tabel 6.1: Kandungan Logam Makro dan Mikro pada Lapisan Kerak Bumi (Stoker and Seager, 1975)

Kelompok	Logam	Simbol	Jumlah (mg/kg)
Makro	Aluminium	Al	81.300
	Besi	Fe	50.000
	Magnesium	Mg	25.900
	Mangan	Mn	20.900
Mikro	Nikel	Ni	75
	Seng	Zn	70
	Tembaga	Cu	55
	Timah putih	Sn	2
	Perak	Ag	0.07
	Emas	Au	0.004

6.2 Klasifikasi Logam

Klasifikasi logam berdasarkan unsur-unsur penyusunnya, logam, dan paduannya dibagi menjadi 2 golongan utama, yaitu:

1. Logam Tanpa Besi (Fe)
Logam tanpa besi artinya logam yang tidak mengandung unsur Ferrum (Fe) dan Karbon (C) dalam susunan unsur-unsur dasarnya. Jenis-jenis logam ini yang umum adalah Aluminium (Al), Magnesium (Mg), Cuprum (Cu), Zinc (Zn), Nikel (Ni), Plumbum (Pb), Stannum (Sn) dan logam-logam mulia.

2. Logam dengan Besi (Fe)

Logam ini merupakan logam yang mengandung Ferrum (Fe) dan Karbon (C) sebagai unsur dasarnya. Tidak hanya itu, terdapat juga unsur lain, seperti Mangan (Mn), Phosphor (P), Sulfur (S) dan Silikon (Si). Logam Ferro juga terdiri dari baja karbon. Menurut Love (1983), baja karbon adalah jenis logam yang mengandung beberapa unsur, seperti Ferrum (Fe), Karbon (C) dan unsur lainnya. Karbon (C) merupakan unsur yang paling berpengaruh terhadap sifat mekanik baja karbon.

Perlu diketahui, semakin kecil unsur Karbon (C) dalam sebuah baja, maka sifat baja tersebut menjadi lunak dan ulet. Sebaliknya, semakin besar unsur Karbon (C) yang dimiliki baja, maka baja tersebut menjadi keras dan kuat, namun ketangguhannya menurun. Selain unsur karbon, baja juga terdiri dari beberapa unsur lain, seperti Mangan, Silikon, Phospor, dan Belerang, yang umumnya berasal dari bahan-bahan seperti O₂, N₂, H₂, yang terjadi pada waktu proses pembuatan baja.

6.3 Faktor yang Mempercepat Terjadinya Korosi

Tidak dipungkiri bahwa logam merupakan bahan yang banyak diperlukan oleh manusia. Proses oksidasi logam di udara terbuka menyebabkan korosi/karat, sehingga kualitas dan kekuatan logam menjadi berkurang. Kecepatan korosi tersebut dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu air, kelembaban udara, unsur elektrolit seperti garam atau asam, bentuk permukaan logam, dan terbentuknya sel elektrokimia. Pada bagian logam yang berkarat akan mengalami perubahan molekul akibat proses kimiawi antara oksigen dengan atom logam. Adapun penjelasan lebih lengkap adalah sebagai berikut:

1. Air dan Kelembaban Udara

Proses korosi berlangsung cepat karena adanya udara lembab yang mengandung uap air. Dengan kata lain, air adalah salah satu faktor utama yang menyebabkan terjadinya korosi.

2. Asam dan Garam

Asam dan garam merupakan elektrolit dan media transfer muatan. Dengan proses ini, maka elektron akan diikat oleh oksigen yang ada di udara. Diketahui bahwa air laut mengandung garam, sedangkan air hujan banyak mengandung asam yang berasal dari polutan di udara. Keduanya merupakan penyebab korosi yang utama.

3. Struktur Permukaan Logam

Pada dasarnya, korosi terjadi ketika dua kutub muatan yang berperan sebagai katoda dan anoda terjadi pada permukaan logam yang tidak rata. Demikian sebaliknya, korosi tidak terjadi ketika dua kutub tersebut bersinggungan pada permukaan logam yang licin dan bersih.

4. Sel Elektrokimia

Perbedaan potensial dua logam yang saling bersinggungan dalam lingkungan yang lembab dapat menyebabkan terbentuknya sel elektrokimia. Jenis logam yang potensialnya lebih rendah akan melepaskan elektron ketika bersinggungan dengan logam yang potensialnya lebih tinggi, juga akan teroksidasi oleh oksigen yang ada di udara. Sehingga logam dengan potensial rendah sangat cepat mengalami korosi, sedangkan yang potensial tinggi sulit terbentuknya korosi atau dengan kata lain awet.

Menurut Widharto (1999), unsur logam akan mengalami korosi hampir disemua lapisan atmosfer jika tingkat kelembaban melampaui 60%. Korosi terjadi setelah pelapisan butir-butir air terbentuk di permukaan. Proses korosi akan diperparah jika logam bersinggungan dengan air laut. Unsur NaCl dalam kandungan air laut akan mempercepat terjadinya korosi.

6.4 Faktor Penyebab Terjadinya Korosi

Sebelum membahas lebih jauh tentang proses korosi, perlu kiranya mengetahui faktor-faktor yang mempengaruhi terjadinya korosi.

Berikut faktor lingkungan penyebab korosi secara umum, yaitu:

1. Suhu

Suhu sangat berpengaruh terhadap proses pembentukan korosi. Menurut Fogler (1987), suhu yang tinggi menyebabkan peningkatan pada energi kinetik partikel, sehingga melebihi energi aktivasi dan mempercepat terjadinya korosi. Demikian sebaliknya, suhu yang rendah dapat memperlambat proses korosi.

2. Kecepatan Pengadukan

Meningkatnya kecepatan pengadukan akan mempercepat laju terbentuknya korosi. Menurut Kirk, et al (1953), peristiwa tersebut terjadi karena adanya kontak zat pereaksi dengan logam, sehingga ion logam akan terlepas dan menyebabkan korosi pada logam.

3. Larutan Asam Basa

Menurut Vlack dan Djaprie (1991), larutan yang bersifat asam maupun basa dapat mempengaruhi kecepatan terjadinya korosi pada logam. Dalam hal ini, larutan asam bersifat sangat korosif karena merupakan reaksi anoda, sehingga mempercepat proses korosi pada logam. Sementara itu, larutan yang bersifat basa cenderung memperlambat korosi, karena larutan tersebut menimbulkan korosi pada reaksi katoda, dan reaksi katoda terjadi hampir bersamaan dengan reaksi anoda.

Seringnya terjadi kontak antara media korosif dengan logam juga dapat mempercepat proses korosi. Hal ini karena media korosif tersebut terdiri dari ion-ion aktif yang bergerak secara kinetis sehingga menyebabkan terjadi reaksi elektrokimia terhadap $Fe+2$ atau $Fe+3$ dan membentuk karat atau Fe_2O_3 .

4. Oksigen

Dalam proses korosi, oksigen (O_2) merupakan unsur kimia yang sangat penting. Pasalnya, korosi sendiri merupakan peristiwa

oksidasi, sehingga mutlak bahwa oksigen menjadi unsur yang tidak terpisahkan dari proses tersebut. Menurut Vlack dan Djaprie (1991), korosi terjadi karena oksigen yang ada di udara bebas berkontak langsung dengan permukaan logam yang bersifat lembab.

5. Inhibitor

Revie (2011) menyebutkan bahwa inhibitor dapat meningkatkan ketahanan logam terhadap korosi. Dengan menambahkan inhibitor ke dalam larutan, laju reaksi dapat berkurang, sehingga ketahanan logam menjadi lebih lama. Namun demikian, kemampuan inhibitor tersebut akan hilang ketika pengaruh larutan menjadi lebih besar.

6.5 Korosi Logam

Logam merupakan bagian dari unsur kimia yang bersifat kuat, liat serta penghantar listrik dan panas. Logam banyak digunakan dalam kehidupan sehari-hari, juga dapat dibentuk menjadi bahan utama pembuatan barang, seperti kapal, mobil dan konstruksi bangunan. Kendati demikian, logam sangat rentan mengalami korosi, yang akhirnya dapat merusak dan membahayakan lingkungan. Peristiwa interaksi logam alam dan logam lain dapat berubah. Jenis logam tertentu akan mengalami kerusakan jika terjadi reaksi kimia. Misalnya, karena pengaruh udara juga air, maka besi akan terkorosi seperti pada Gambar 6.1, dan berbagai alat dari perak akan terdampak noda. Sementara itu, jenis logam lainnya seperti emas dan platina tidak mengalami proses kimia.

Pada dasarnya, korosi merupakan proses pengembalian logam ke bentuk alamiahnya. Terkait hal ini, energi yang dibutuhkan dalam proses pembuatan logam akan dilepaskan kembali untuk menghasilkan korosi. Dengan kata lain, logam kembali bersenyawa dengan oksigen. Korosi juga dapat disebabkan karena adanya kontak dengan zat kimia. Pada temperatur yang rendah, laju reaksi antara Magnesium dengan Cl_2 akan berlangsung cepat. Sementara itu, reaksi Magnesium atau Kalsium dengan oksigen cenderung lambat. Sebaliknya, dengan temperatur yang tinggi, laju reaksi logam lain (Fe, Cu) dengan O_2 akan berlangsung relatif cepat.



Gambar 6.1: Contoh Korosi pada Logam Besi (Daniel, 2020)

Sebagai tinjauan umum, akan memperkenalkan beberapa jenis korosi untuk logam / paduan dan berbagai bentuknya. Korosi dapat dibagi menjadi tiga kelompok utama, yaitu korosi basah, korosi dalam cairan lain dan korosi kering.

Pertama, korosi basah mengacu pada korosi logam yang terjadi di lingkungan basah. Prosesnya hampir selalu elektrokimia, dan terjadi ketika dua atau lebih reaksi elektrokimia terjadi pada permukaan logam. Ketika logam terkena lingkungan basah, sifat logam pada dasarnya diubah menjadi bentuk non logam menjadi spesies terlarut atau produk korosi padat. Energi sistem diturunkan saat logam dikonversi ke bentuk yang lebih stabil, dalam hal ini produk korosi non logam. Proses elektrokimia ini dapat terjadi secara seragam atau non uniform di seluruh permukaan logam, yang disebut "elektroda" dan cairan yang melakukan secara ionik disebut "elektrolit." Contoh klasik dari proses ini adalah karat substrat baja.

Kedua, korosi dalam cairan lain mengacu pada korosi logam/paduan di lingkungan yang tidak berurutan, seperti garam menyatu kadang-kadang disebut sebagai garam cair. Selain itu korosi juga dapat terjadi pada logam cair. Korosi dalam garam menyatu seperti nitrat, halida, karbonat, sulfat, hidroksida, dan oksida dapat menyebabkan kerusakan pada paduan logam melalui beberapa mekanisme:

- 1. *pitting* karena dampak elektrokimia;
- 2. transportasi massal karena gradien termal;
- 3. reaksi konstituen garam menyatu dengan paduan logam, dan/atau;
- 4. reaksi dengan kotoran yang ada di fluida.

Selain garam menyatu, paparan paduan logam ke lingkungan logam cair dapat menyebabkan korosi parah. Logam cair digunakan dalam aplikasi industri seperti agen pengurang suhu tinggi atau sebagai pendingin karena sifat perpindahan panas yang sangat baik. Korosi sebagai akibat dari paparan logam cair dapat disebabkan oleh pembubaran, *impuritas* atau reaksi interstisial, paduan, dan pengurangan senyawa.

Ketiga, korosi kering mengacu pada korosi yang mempengaruhi logam/paduan yang terpapar udara atau gas agresif lainnya. Untuk sejumlah kecil logam, paparan gas tidak mengakibatkan korosi, namun bagi sebagian besar logam, paparan gas suhu yang sangat tinggi meningkatkan tingkat korosi yang mengakibatkan kegagalan korosi.

Korosi logam juga merupakan masalah utama dalam bidang konstruksi mesin, khususnya yang memanfaatkan bahan baku logam. Dengan masifnya aktivitas industri, limbah berupa gas buang akan meningkat dan menyebabkan lingkungan menjadi rusak atau korosif. Oleh karena itu, perlu untuk mengamati gejala korosi logam di bidang industri melalui suatu sistem pengujian korosi. Terkait ini, industri telah memiliki sistem air panas dan air pendingin yang merupakan unit pendukung vital. Untuk percobaan dapat dilakukan dalam skala laboratorium yang memberikan gambaran secara umum tentang *korosifitas* lingkungan. Faktor yang mempercepat terjadinya korosi adalah lingkungan.

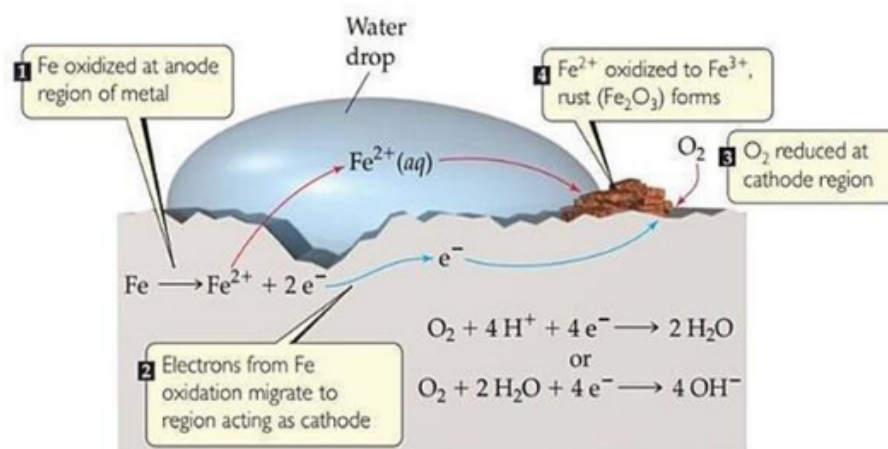
Tabel 6.2: Paduan Logam dan Kondisi Lingkungan (Husein, 2016)

Sistem Paduan	Lingkungan
Paduan Tembaga (Kuningan dan lain-lain)	Udara industri yang lembab
	Udara laut
	Ion Amonium
	Amine

Paduan Nikel	Hidroksida yang terkonsentrasi dan panas
	Uap asam Hidrofluorida (hydrofluoric)
Baja Karbon Rendah	Hidroksida yang terkonsentrasi dan mendidih
	Nitrat yang terkonsentrasi dan mendidih
	Produk penyuling destruktif dari batu bara
Baja “Oil-Country/Oil Field”	H ₂ S dan CO ₂
Baja paduan rendah berkekuatan tinggi	Klorida
Baja nir noda	Klorida mendidih
Baja Austentic (seri 300)	Hidroksida terkonsentrasi dan mendidih
	Asam politionik
Baja feritik dan Baja martensitik (seri 400)	Klorida
	Air pendingin reactor
Baja “maraging” (18% Ni)	Klorida
Paduan Titanium	Klorida
	Metal alkohol
	Klorida padat suhu di atas 550° F

6.5.1 Korosi pada Besi

Korosi pada besi dapat dibedakan menjadi dua, yaitu korosi kering yang terjadi karena proses kimia, dan korosi basah yang terjadi karena proses elektrokimia. Untuk korosi yang terjadi pada besi, suatu bagian dari benda tersebut akan teroksidasi karena fungsinya sebagai anoda. Elektron yang dilepaskan akan bergerak ke bagian lain dari besi yang bertindak sebagai katoda, sehingga menyebabkan oksigen tereduksi. Dalam prosesnya, Ion besi (II) yang terbentuk pada anoda kemudian teroksidasi menjadi ion besi (III). Selanjutnya, proses tersebut membentuk senyawa oksida terhidrasi, yaitu karat besi. Penentuan bagian besi yang menjadi anoda dan katoda bergantung pada beberapa faktor, seperti zat pengotor dan perbedaan kerapatan muatan listrik pada sebuah logam. Pada titik ini, maka jelas bahwa oksigen yang ada di udara dan air menjadi penyebab utama terjadinya korosi pada besi. Berikut gambaran umum terjadinya korosi pada logam besi (Fe).



Gambar 6.2: Reaksi Terbentuknya Korosi pada Besi (Brown et al., 2015)

Korosi ini terjadi ketika permukaan logam bersentuhan dengan berbagai senyawa yang ada di sekitarnya seperti oksigen atau air yang menjadi senyawa baru yang tidak dikehendaki. Bentuk dari korosi ini dapat berupa perubahan warna logam ataupun lubang pada logam.

7 Proses korosi terjadi hampir pada semua logam yang berinteraksi langsung dengan lingkungan terbuka. Meskipun bekerja dengan perlahan, korosi akan tetap terjadi, karena logam akan mengalami pengurangan mutu bahan. Umumnya, peristiwa korosi terjadi pada peralatan yang berbahan dasar besi (Fe). Unsur dengan nomor atom dua puluh enam (26) ini merupakan jenis

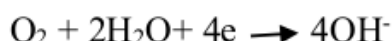
logam yang paling ekonomis, karena sebaran mineral yang luas dengan jumlah yang relatif banyak.

6.5.2 Korosi pada Baja

Korosi merupakan suatu peristiwa penurunan kualitas yang terjadi pada suatu logam yang disebabkan karena terjadinya reaksi kimia dengan lingkungan sekitar (Trethewey and Chamberlain, 1991). Kerugian yang ditimbulkan oleh korosi sangat besar, seperti jika sebuah bangunan yang konstruksinya terbuat dari baja rusak dikarenakan peristiwa korosi. Penyebab utama adalah karena kerusakan pasif. Kerusakan pasif merupakan mekanisme utama dimana baja dilindungi dari korosi dalam beton, sehingga perlu mempertimbangkan berbagai faktor yang dapat menyebabkan perlindungan ini gagal. Sejumlah modifikasi pada komposisi kimia beton diuraikan sebagai berikut, yaitu:

Penipisan Oksigen

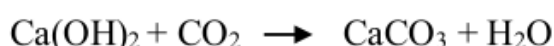
Struktur beton yang terpapar udara biasanya memiliki pasokan oksigen yang melimpah, baik untuk bertindak sebagai reaktan katodik di permukaan baja tertanam dan menyebabkan transformasi ion Fe^{2+} yang terbentuk secara anodik menjadi karat. Kasus penipisan oksigen umum, oleh karena itu Korosi dan perlindungan baja penguat dalam beton, tidak mungkin terjadi kecuali dalam keadaan di mana bahan sepenuhnya tenggelam dalam air, tertanam di tanah atau dikelilingi oleh media air tergenang. Efek pengurangan progresif dalam ketersediaan umum oksigen pada kurva polarisasi katoda untuk reaksi:



Pada dasarnya, proses korosi besi baja pada suhu kamar mensyaratkan adanya oksigen yang terlarut, sehingga alkali akan stabil tanpa kehadiran oksigen. Proses agitasi atau *stirring* akan mempercepat pelarutan oksigen dan laju korosi pada baja tersebut. Kendati demikian, pada temperatur tertentu, yaitu di atas 80°C, kelarutan oksigen justru memperlambat laju korosi. Selanjutnya, jika dibandingkan dengan logam tanpa besi (Fe), seperti zinc dan copper, nampak korosi yang terjadi pada baja karbon menjadi sedikit sensitif terhadap kualitas air. Laju korosi pada baja disebabkan oleh katodik, yaitu adanya oksigen terlarut.

Penipisan Alkalinitas karena Karbonasi

Penipisan alkalinitas biasanya merupakan hasil dari paparan jangka panjang beton ke udara dimana proporsi variabel karbon dioksida (dan jumlah yang lebih rendah dari gas asam lainnya). Ini menyebabkan karbonasi konstituen alkali semen, seperti yang diilustrasikan di bawah ini, yang bereaksi untuk membentuk kalsium karbonat, dan C-S-H, yang bereaksi terhadap pembentukan kalsium karbonat dan gel silika terhidrasi



Seperti disebutkan sebelumnya, reaksi antara CO₂ di atmosfer dan basa komponen beton menghasilkan lapisan permukaan yang di dalamnya berkarbonasi pori, nilai pH larutan ditekan ke tingkat mendekati netral. Efek sekunder dari karbonasi, juga signifikan dalam hal pengaruhnya terhadap korosi, adalah bahwa itu bisa menyebabkan pelepasan ion klorida terikat ke dalam fase larutan pori beton yang mengandung garam klorida dalam kadar sedang sebagai kontaminan, sehingga memperburuk sifat korosif elektrolit.

Pengenalan Ion Klorida

Sejauh ini penyebab paling serius dari masalah korosi yang mempengaruhi baja tulangan adalah garam klorida. Proses Korosi pada baja karbon juga dapat disebabkan oleh konsentrasi ion klorida (Cl⁻). Tingginya konsentrasi ion klorida akan cenderung menyebabkan korosi pada baja karbon. Ion klorida seringnya menjadi ion trigger atau ion agresif. Hal ini karena kemampuannya yang dapat merusak lapisan pasif pada permukaan baja karbon, sehingga meningkatkan laju korosi.

Lebih jauh, Ion klorida bukanlah unsur yang secara alamiah terkandung dalam air. Kendati demikian, unsur ini acapkali ditambahkan untuk merangsang perkembangan organisme air. Ketika dilarutkan dalam air, maka ion klorida akan berubah menjadi asam hipoklorit (HClO) dan asam klorida (HCl), yang mampu menurunkan nilai pH. Ion klorida umumnya diketahui bersifat merusak terhadap baja karbon. Kebanyakan ion ini mampu diserap oleh permukaan logam dan berinterferensi membentuk lapisan pasif.

Bab 7

Pengendalian Korosi

7.1 Pendahuluan

Korosi merupakan serangkaian reaksi kimia atau elektrokimia pada suatu logam dalam lingkungan yang menyebabkan terjadinya kehilangan material (Revie & Uhlig, 2008). Penggunaan material berbahan logam menjadi bagian fundamental yang digunakan dalam perkembangan industri. Pencegahan dan pengendalian terhadap proses terjadinya korosi wajib dilakukan demi menjaga kondisi material logam tetap baik dan memperpanjang *lifetime* dari penggunaan material logam tersebut. Secara umum korosi tidak dapat dihilangkan secara menyeluruh, oleh karena itu pengendalian korosi perlu diterapkan dalam suatu material logam dengan berbagai metode proteksi tergantung lingkungan yang ada. Berbagai bentuk atau strategi yang dapat digunakan untuk pengendalian korosi antara lain penggunaan inhibitor, perawatan permukaan, pelapisan dan *sealants*, proteksi katodik, dan proteksi anodik (Craig, et al., 2006).

7.2 Inhibitor Korosi

Penggunaan inhibitor dalam pengendali korosi dapat mengurangi laju oksidasi anodik, reduksi katodik, atau keduanya. Pengendalian korosi dengan cara membentuk lapisan pelindung pada permukaan logam. Misalnya, inhibitor ditambahkan ke dalam resirkulasi dalam radiator mobil dengan tujuan untuk mengurangi laju korosi dalam sistem tersebut. Penambahan inhibitor ke air dalam suatu sistem logam berfungsi untuk mencuci sistem atau komponen (Craig, et al., 2006). Inhibitor akan teradsorpsi baik ke permukaan logam dengan adsorpsi fisik (elektrostatik) atau *kemisorpsi*. Adsorpsi fisik merupakan gaya elektrostatik antara ion organik dan permukaan logam yang bermuatan listrik. Sedangkan *kemisorpsi* merupakan pemindahan atau pembagian muatan molekul inhibitor ke permukaan logam membentuk ikatan tipe koordinat. Kerja inhibitor mengurangi laju korosi dengan memperlambat reaksi pelarutan anodik logam, dengan perpindahan katodik hidrogen atau dengan keduanya (Schweitzer, 2010).

Hal ini dilakukan dengan menggunakan bahan kimia yang menghambat reaksi korosi yang terjadi di lokasi anodik sel korosi dengan menjaga logam agar tidak terdisosiasi menjadi ion. Mencegah pembebasan ion logam dilakukan dengan membentuk lapisan pelindung pada permukaan logam. Inhibitor dengan membentuk lapisan pelindung secara efektif mengisolasi logam dari lingkungan korosif atau dapat membentuk lapisan endapan pada permukaan yang berfungsi menghalangi agen korosif dalam mengakses logam. Inhibitor juga dapat meningkatkan hambatan listrik logam dengan memasifkan permukaannya (Craig, et al., 2006).

Penggunaan inhibitor harus kompatibel dengan tempat lingkungan logam yang harus dilindungi, seperti pH, sifat logamnya, ion terlarut, suhu, keberadaan mikroorganisme, kondisi aerasi dan aliran yang dapat memengaruhi kinerja inhibitor penghambat korosi. Secara khusus pH berperan penting karena memengaruhi reaksi anodik dan katodik. Jika pH pasif (terkontrol) sesuai dengan inhibitor maka membantu memperkuat lapisan oksida yang ada. Sebaliknya, ketika lapisan oksida tidak dapat terbentuk inhibitor membangun lapisan pelindung melalui adsorpsi di permukaan (Pederferri, 2018).

Pengendalian korosi dengan menggunakan inhibitor sangat berguna di berbagai kondisi lingkungan, kecuali kondisi (Ahmad, 2006):

1. Peralatan dan komponen yang mengalami aliran turbulen

- 2. Sistem yang beroperasi diatas batas stabilitas inhibitor
- 3. Perlengkapan yang dikenakan kecepatan tinggi yang melebihi 4 m/s

Berikut beberapa inhibitor yang umumnya digunakan dengan memperhatikan kondisi lingkungan suatu logam yang ingin dilindungi dari korosi (Tabel 7.1) dan Tabel 7.2 rangkuman inhibitor yang paling umum digunakan untuk pelindung korosi untuk beberapa logam.

Tabel 7.1: Beberapa Inhibitor yang digunakan dengan Memperhatikan Tipikal Lingkungan dalam Industri (Pedefferri, 2018)

Lingkungan Industri		Inhibitor	Logam	Dosis
Air	Air minum	Polifosfat	Fe, Zn, Cu, Al	5-10 ppm
		Silikat	Fe	10-20 ppm
		Ca(OH) ₂	Fe, Zn, Cu	10 ppm
	Sistem Pendingin	Ca(OH) ₂	Fe	10 ppm
		Cromat	Fe, Zn, Cu	0,1%
		NaNO ₂	Fe	300-500 ppm
		Poliposfat	Fe	10-20 ppm
		Silikat	Fe	20-40 ppm
	Boiler	NaHPO ₄	Fe, Zn, Cu	10 ppm
		Poliposfat	Fe	10 ppm

	Sirkuit pendingin mesin	Na_2CrO_4	Fe, Pb, Cu, Zn	0,1 - 1,0%
	Brine dan air laut	Nitrit	Fe	300-500 ppm
		Na_2SiO_3	Fe	0,001%
			Zn	10 ppm
		Amida kuarterner	Fe	10-25 ppm
		NaNO_2	Fe	0,5 - 3%
		$\text{NaNO}_2 + \text{NaH}_2\text{PO}_4$	Fe	0,5% + 10 ppm
Larutan pengawet	Asam sulfat	Phenylthiourea Orthotoluenthiourea Mercaptans Sulphides	Fe	0,003-0,01%
	Asam klorida	Senyawa organik dengan cincin N dan N.	Fe	100-200 ppm
		hexamethylenetetramine	Fe	5%
Industri Petroleum	Ekstraksi	Berbagai amina	Fe	100-500 ppm
	Refining	Imidazoline dan derivatnya	Fe	100 – 1000 ppm
Concrete	Marine De-icing salts	CaNO_2	Fe	10 kg/L
		Amina Alkanol-amina Garam karboksilat	Fe	1% versus cement weight

Tabel 7.2: Penghambatan Korosi Khas untuk Logam di Lingkungan Berbeda (Pedferri, 2018)

Logam	Lingkungan	Inhibitor
Baja karbon	Asam sitrat	Garam kadmium
	H ₂ SO ₄ encer	Amina aromatik
	H ₃ PO ₄ pekat	Dodekil-amina 0,01-0,5%
	Air garam yang mengandung oksigen	Metil, etil atau propyl-dithiocarbamates 0,001 – 3%
	Campuran glikol etilen-air	Na ₃ PO ₄ m,025% posfat atau boraks alkali
	NaCl 0,5% - pH netral	NaNO ₂ 0,2%
	Brine containing sulphide	Formaldehida
	Air	Asam benzoat, poliposfat, silikat
	Hidrokarbon dan air	NaNO ₂
	Concrete	Ca(NO ₃) ₂ , amina or karboksilat
Aluminium	HCl 1 N	Phenilacridina, Naphthoquinone, Acridine, Thiourea
	H ₂ SO ₄ pekat	Natrium kromat 5%
	HNO ₃ 10%	Hexamethylenetetramine 0.1%
	H ₃ PO ₄ 20%	Natrium kromat 0,5%
	Air yang mengandung	Natrium silikat

	klorin	
	Air laut	Amil stearat 0,3%
	Na ₂ CO ₃ 1%	Natrium silikat 0,3%
	Na ₂ CO ₃ 1%	Natrium silikat 0,2%
	Na ₂ S	Natrium metasilikat 1%
	Aromatis yang mengandung klor	Nitroklorobenzen 0,1-2%
	Etanol komersial	Karbonat, laktat, asetat atau boraks alkali
Kadmium (dalam baja)	Campuran glikol etilen-air	Fluophosphate sodium 1%
Magnesium	Alkohol	Alkali sulfida
	Trikloroetilen	Gormadehida 0,05%
	Air	Postasium dikromat 1%
Timah (<i>lead</i>)	Larutan netral	Natrium benzoat
Tembaga dan kuningan	H ₂ SO ₄ encer	Benzilthiocianate
	Campuran glikol etilen-air	Borates or alkaline phosphates Mercaptobenzothiazole Benzotriazole
	Larutan netral	Mercaptobenzothiazole Benzotriazole 0.2–0.3%
Timah (baja)	Alkaline soaps	NaNO ₂ 0,1%
	NaCl 0,05%	NaNO ₂ 0,2%
Titanium	HCl	Agen oksidasi
	H ₂ SO ₄	Agen oksidasi

Zink (galvanized steel)	Air	Calcium and zinc metaphosphates 15 ppm
-------------------------------	-----	---

Penggunaan utama inhibitor sangat berkaitan dengan:

1. Air dan larutan netral atau basa rendah dengan pH 5-9
2. Lingkungan asam seperti dalam proses pengawetan, pembersihan bahan kimia dan kerak
3. Produksi dan pemurnian hidrokarbon dan
4. Beton yang diperkirakan terkontaminasi dengan klorida (Pedferri, 2018)

Pemilihan inhibitor bergantung pada logam yang akan dilindungi dari korosi, serta lingkungan pengoperasian. Berbagai inhibitor yang digunakan untuk melindungi logam di beberapa lingkungan tercantum dalam Tabel 7.1 dan Tabel 7.2. Namun, penggunaan bahan inhibitor yang dapat menghambat laju korosi suatu logam harus mempelajari sifat bahan inhibitor yang akan digunakan untuk mempertimbangkan toksisitas yang diberikan sehingga perlu dikembangkan inhibitor yang ramah lingkungan (Godwin-Nwakwasi, et al., 2017).

Inhibitor dapat diklasifikasikan berdasarkan antara lain (Craig, et al., 2006):

1. Inhibitor pasif
2. Katodik
3. Organik
4. Precipitation
5. Vapor phase Inhibitors

7.2.1 Inhibitor Pasif

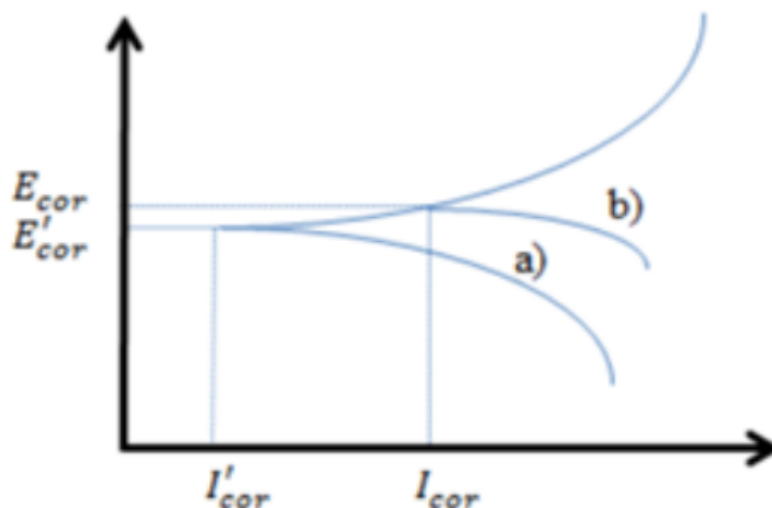
Inhibitor pasif merupakan jenis inhibitor yang paling umum karena sangat efektif dalam mengurangi laju korosi. Inhibitor pasif melindungi material dengan membentuk lapisan tipis dalam lembam pada permukaan logam. Inhibitor pasif dapat berupa oksidasi yang tidak memerlukan oksigen atau non oksidasi yang membutuhkan oksigen yang ada dalam lingkungan. Inhibitor pengoksidasi yang umum digunakan yaitu nitrit, nitrat dan kromat, tetapi

kromat yang paling banyak digunakan, sedangkan inhibitor non oksidasi yaitu fosfat dan molibdat.

Kerugian dalam penerapan inhibitor pasif yaitu mempercepat laju korosi lokal dari bahan yang dilindungi disaat konsentrasi inhibitor menurun di bawah konsentrasi kritis. Oleh karena itu perlu dilakukan pemantauan konsentrasi inhibitor secara berkala (Craig, et al., 2006).

7.2.2 Inhibitor Katodik

Inhibitor katodik merupakan metode perlindungan dengan menggunakan anoda. Perlindungan katodik dicapai dengan membuat logam bekerja sebagai katoda dalam sel elektrokimia. Anoda yang digunakan sebagai logam yang sangat aktif dengan potensi elektrokimia yang lebih negatif daripada logam lain yang digunakan untuk melindungi (Chigondo & Chigondo, 2016). Inhibitor ini membuat peningkatan impedansi di permukaan logam yang dilindungi sehingga menghambat difusi yang dapat direduksi, yaitu difusi oksigen dan elektron konduktif. Penghambatan ini menyebabkan inhibitor katodik yang tinggi. Gambar 7.1 menunjukkan contoh kurva polarisasi logam pada larutan dengan inhibitor katodik. Ketika reaksi katodik terpengaruh, potensi korosi bergeser ke nilai yang lebih negatif (Dariva & Galio, 2014).

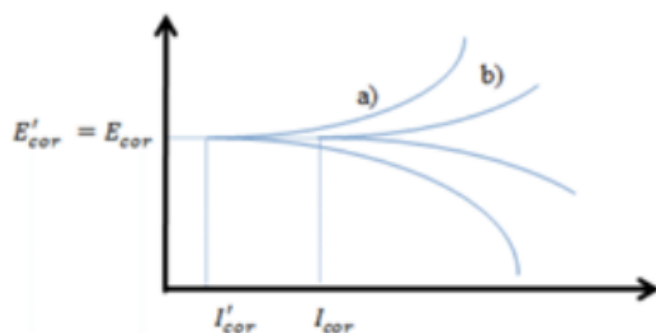


Gambar 7.1: Diagram polarisasi potensiostatik: perilaku elektrokimia logam dalam larutan inhibitor katodik (a), dibandingkan dengan larutan yang sama, tanpa inhibitor (b) (Dariva & Galio, 2014).

7.2.3 Inhibitor Organik

Inhibitor organik kecenderungan aktif di seluruh logam dengan menyerap pada permukaan dan membentuk lapisan tipis. Kekuatan ikatan absorptif antara logam dengan pelapisan (inhibitor organik) menjadi faktor kunci dalam menentukan tingkat perlindungan yang akan diberikan. Kekuatan ikatan terutama tergantung pada ion relatif antara permukaan logam dengan inhibitor organik. Inhibitor anionik (inhibitor dengan muatan ion negatif) seperti sulfonat digunakan untuk logam bermuatan positif. Inhibitor katodik (inhibitor dengan muatan ion positif) seperti amina digunakan untuk logam bermuatan negatif. Penghambat organik termasuk natrium sulfonat, fosfonat, mercaptobenzothiazole (MBT), dan senyawa alifatik atau aromatik yang mengandung gugus amina bermuatan positif (Craig, et al., 2006).

Inhibitor ini membangun molekul yang membentuk lapisan hidrofobik pada permukaan logam sehingga menjadi penghalang pelarutan logam dalam elektrolit. Gambar 7.2 menunjukkan kurva polarisasi potensiostatik teoritis, pengaruh larutan yang mengandung inhibitor organik terhadap logam dengan perilaku anodik dan katodik (Brycki, et al., 2018). Setelah penambahan inhibitor, potensi korosinya tetap sama, tetapi arus menurun dari I_{cor} ke I'_{cor} (Dariva & Galio, 2014).



Gambar 7.2: Diagram polarisasi *potensiostatik* teoritis: perilaku elektrokimia logam pada larutan yang mengandung inhibitor katodik dan anodik (a) dibandingkan dengan larutan yang sama tanpa inhibitor organik (b) (Dariva & Galio, 2014).

7.2.4 Inhibitor Pengendapan (Precipitation)

Inhibitor pengendapan merupakan inhibitor yang dapat menginduksi pembentukan endapan pada logam. Endapan cenderung menutupi seluruh

permukaan logam dan bertindak sebagai penghalang terjadinya korosi pada logam. Contoh inhibitor pengendapan yaitu silikat (natrium silikat) dan fosfat (Craig, et al., 2006; Schweitzer, 2010).

7.2.5 Vapor Phase Inhibitors

Merupakan inhibitor korosi yang mudah menguap ke permukaan logam yang akan dilindungi. Ketika mencapai permukaan logam, inhibitor dalam fase uap mengembun dan menyebabkan pelepasan ion inhibitor (Craig, et al., 2006). Senyawa yang dapat menjadi inhibitor fase uap ini memiliki tekanan rendah (0,0002 – 0,4 mmHg). Dalam wadah tertutup padatan yang mudah menguap seperti nitrit, karbonat, garam benzoat, disikloheksilamina, dan sikloheksilamina (Schweitzer, 2010).

Efisiensi suatu yang digunakan bergantung pada:

1. Tekanan uapnya (lebih tepatnya: kecenderungan untuk menyublim) dalam kondisi atmosfer cukup tinggi sehingga memungkinkan pengangkut fase uap yang signifikan dari inhibitor dalam ruangan tertutup ke permukaan logam;
2. Teradsorpsi langsung pada permukaan logam atau dilarutkan dalam lapisan air yang terkondensasi pada permukaan logam sehingga menghambat korosi logam (Rammelt, et al., 2009).

7.3 Perawatan Permukaan

Perawatan permukaan merupakan suatu modifikasi permukaan suatu bahan logam dengan menggunakan berbagai cara untuk memperbaiki suatu sifat bahan dalam memperpanjang *lifetime* suatu bahan logam agar terhindar dari korosi. Konversi pelapisan dan anodisasi melibatkan suatu reaksi kimia untuk membuat lapisan oksida yang tahan terhadap korosi yang baik pada permukaan lapisan logam. Perawatan dengan laser dengan tujuan mengubah struktur permukaan dengan melibatkan reaksi kimia dengan tujuan memodifikasi permukaan untuk menginduksi tegangan dalam logam dengan tujuan meningkatkan ketahanan terhadap korosi (Craig, et al., 2006).

Perawatan permukaan dapat dilakukan dengan beberapa cara antara lain: *conversion coatings*, anodisasi (anodizing), *shot peening*, dan *laser treatment*. Perawatan permukaan logam dengan *conversion coating* digunakan sebagai lapisan pelindung atau dekoratif yang digunakan secara in-situ melalui reaksi kimia di permukaan logam yang akan dilindungi. *Conversion coating* yang umum digunakan dengan posdat dan kromat. Perawatan permukaan dengan anodisasi merupakan proses elektrokimia dan yang paling umum digunakan aluminium, magnesium dan paduan titanium. Penggunaan pelapisan memiliki kelemahan dengan sifatnya yang rapuh dan rentan terhadap kondisi lingkungan yang asam dan basa kuat. *Shot peening* merupakan proses pengerjaan dingin yang awalnya diterapkan untuk meningkatkan kekuatan logam dan menghilangkan tegangan tarik dalam material. Kedalaman efek *shot peening* umumnya sekitar 0,13 – 0,25 mm di bawah permukaan logam untuk menghasilkan bahan tahan yang lebih tinggi dan juga ketahanan terhadap korosi. Penggunaan perawatan permukaan dengan *laser treatment* meningkatkan difusi termal di permukaan. Penggunaan metode ini bertujuan untuk memodifikasi struktur permukaan (Craig, et al., 2006).

7.4 Coatings dan Sealants

Pelapisan logam dengan bahan anorganik dan organik digunakan untuk memberikan perlindungan korosi jangka panjang pada logam di berbagai jenis media korosi. Ada dua jenis lapisan utama yaitu pelapisan perlindungan dan pelapisan dengan mengorbankan material lain. Lapisan pelindung bertindak sebagai perisai dan melindungi logam dari lingkungan sekitar terhadap korosi, sedangkan lapisan dengan mengorbankan material lain berfungsi sebagai anoda. Lapisan pelindung biasanya tidak reaktif, tahan korosi dan melindungi material logam tersebut dari keausan. Lapisan pengorbanan anoda memberikan perlindungan katodik dengan memasok elektron ke logam dasar. Sealant memberikan perlindungan korosi dengan mengamankan komponen sepenuhnya dari penetrasi kelembaban (Craig, et al., 2006).

Bab 8

Pelapisan (Coating)

8.1 Pendahuluan

Permasalahan yang sering dihadapi oleh para ahli konstruksi di bidang industri untuk merancang suatu mesin yaitu pemilihan material yang menjadi komponen mesin tersebut. Hal ini karena komponen dasar yang akan digunakan harus tepat dan sesuai kebutuhan. Di samping itu, pemilihan material harus memenuhi persyaratan yang cocok, agar penggunaannya dapat bertahan lama, terlindungi dari korosi dan keausan, menarik, serta proses pengerjaannya lebih mudah dan cepat. Dengan demikian, maka komponen logam yang akan digunakan harus mempunyai kualitas tinggi. Logam yang memiliki kualitas tinggi tentu membutuhkan biaya dan harga jual suatu mesin atau peralatan juga akan semakin tinggi.

Oleh karena itu berakibat pada produksi material semakin berkurang dan sulit diperoleh. Perusahaan akan mengalami kerugian jika hasil produksi berkurang di pasaran karena para pengguna juga akan memilih yang terbaik dan tetap yang lebih murah. Material mesin dengan kualitas tinggi, belum tentu menguntungkan secara finansial. Namun yang paling penting diperhatikan oleh para perancang dan pelaku industri seperti industri otomotif adalah pemilihan material yang dapat diproduksi dengan biaya yang relatif rendah dan kualitas terjaga.

Dengan berbagai pertimbangan, para ahli konstruksi di bidang industri mengupayakan penggunaan bahan dasar dengan kualitas tinggi dan sedang dan dengan pertimbangan biaya yang murah. Bahan dasar tersebut dilakukan perlakuan khusus pada permukaannya (surface treatment). Hal yang dilakukan dapat berupa pelapisan permukaan (coating), perlakuan mekanis (mechanical treatment), atau berupa perlakuan panas (heat treatment).

Secara umum untuk memperoleh sifat-sifat tertentu suatu material (logam dan non-logam) diberikan perlakuan permukaan (surface treatment) dengan tujuan sebagai berikut:

1. Meningkatkan ketahanan korosi suatu permukaan.
2. Meningkatkan tahan aus permukaan (menurunkan koefisien gesek).
3. Meningkatkan kekuatan bahan.
4. Meningkatkan tahan korosi suatu permukaan.
5. Meningkatkan tahan aus permukaan (menurunkan koefisien gesek).
6. Meningkatkan kekuatan bahan

Khusus untuk bahan non-logam, pelapisan permukaan dapat menghasilkan:

1. Warna metalik (metallic appearance) di mana warnanya berkilau karena seperti polesan material logam.
2. Sifat anti reflection pada lensa optics (dari bahan kaca) yang berfungsi untuk meminimalkan dan mengarahkan sinar-sinar yang masuk.
3. Bahan-bahan untuk chip semikonduktor yang dapat dialiri listrik dan *printed circuit board* (PCB) yang dapat digunakan sebagai penyambung komponen-komponen elektronika yang terdiri dari bagian isolator dan konduktor.

Pengendalian korosi yang paling sering dilakukan yaitu dengan teknik pelapisan (coating). Teknik yang digunakan adalah menambahkan lapisan organik (organic coating) untuk menghalangi kotoran yang menempel dalam permukaan suatu material. Teknik ini sangat mudah dilakukan sehingga diminati oleh para perancang industri (J. Keijiman, 1999).

8.2 Pengertian Pelapisan (Coating)

Teknik yang sering dilakukan untuk melindungi logam dari korosi dan keausan adalah dengan cara pelapisan. Teknik pelapisan merupakan cara dengan memberikan perlakuan sifat dari suatu bahan material pada suatu permukaan logam dengan harapan dapat memperbaiki logam serta dapat mengubah bentuk fisik maupun meningkatkan ketahanannya terhadap korosi. Proses produksi terakhir dari suatu komponen mesin sebelum digunakan adalah membuat material tambahan yang tahan korosi dan aus dengan cara melapisi logam. Proses pengerjaan mesin dilakukan setelah permukaan benda kerja yang diberikan perlakuan mencapai bentuk yang diharapkan. Proses pelapisan merupakan pekerjaan terakhir (finishing) atau tahap penyelesaian dari suatu pembuatan mesin atau benda kerja sebelum benda kerja tersebut digunakan atau dipasarkan.

Pelapisan logam dilakukan dengan menggunakan larutan elektrolit maupun dengan reaksi kimia dengan menempelkan permukaan benda kerja (logam dan non-logam) pada suatu lapisan tipis yang telah dipilih. Melalui proses pelapisan logam, diharapkan benda tersebut dapat mengalami perubahan struktur walaupun kecil maupun tingkat ketahanannya yang semakin kuat (Purwanto dan Huda, 2005).

Pelapisan logam sering digunakan karena sangat bermanfaat. Berdasarkan manfaatnya, pelapisan logam terdiri dari dua jenis lapisan yaitu lapisan yang bersifat dekoratif dan pelapisan bersifat melindungi (protektif). Manfaat dari proses pelapisan dekoratif yaitu menambah keindahan suatu benda atau produk sehingga lebih menarik. Material yang sering digunakan untuk pelapisan dekoratif yaitu yang terbuat dari krom, emas, perak, nikel karena warnanya yang mengkilap dan tahan terhadap korosi sehingga bertahan lama. Pelapisan Protektif berfungsi untuk melindungi logam dari proses oksidasi atau korosi dengan membuat penghalang dengan lapisan tipis agar tetap terjaga kualitasnya dan bertahan lama.

Cara kerja dari suatu pelapisan adalah dengan menempelkan logam induk atau logam dasar dengan suatu bahan atau material yang dapat melindungi logam tersebut kemudian melapisinya. Pelapisan logam dibagi dalam tiga jenis yaitu pelapisan dari material organik, pelapisan dengan material non organik dan logam dengan material logam. Pelapisan organik merupakan pelapisan yang menggunakan bahan-bahan organik seperti pelapisan dengan cat, vernis, dan

lacquer, dan biasanya dilakukan untuk membuat benda yang dilapisi lebih indah dan menarik dan mengindikasikan identitas suatu benda. Pelapisan non organik yaitu dengan bahan-bahan non organik yaitu gelas porselen dan enarael. Pelapisan non organik ini digunakan pada mesin atau pipa yang terbuat dari material besi dan baja. Pelapisan ini diminati para pelaku industri karena harganya yang ekonomis dan relatif lebih murah. Pelapisan logam yaitu melapisi suatu material logam dengan menggunakan logam lain untuk maksud dan tujuan tertentu.

Terdapat beberapa teknik pelapisan logam, diantaranya yaitu pelapisan dengan menggunakan material seng/zink, galvanis, perak, emas, brass, tembaga, nikel, krom. Electroplating krom merupakan salah satu teknik pelapisan logam yang banyak digunakan karena memiliki tujuan agar logam yang dilapisi tahan karat dan dapat digunakan dalam waktu yang lama, serta penampilan dan warna yang lebih menarik.

Manfaat pelapisan logam antara lain:

1. Mengubah bentuk logam tersebut agar lebih merata dan menambah keindahan material yang dilapisi (dekoratif) yaitu dengan penambahan lapisan emas, perak, kuningan dan tembaga.
2. Melindungi logam dasar atau logam asli dari korosi dengan logam yang lebih mulia seperti lapisan platina, emas dan baja.
3. Melindungi logam dasar dengan logam yang kurang mulia seperti lapisan seng dan baja.
4. Menjaga material produk agar lebih kuat terhadap benturan atau tekanan dan tahan lama, yaitu dengan menggunakan lapisan krom keras.
5. Memperbaiki tingkat kekasaran logam agar bentuk permukaan logam dasar lebih halus. Bahan yang digunakan adalah lapisan nikel, krom, dan lain sebagainya.

8.3 Teknik Pelapisan (Coating)

8.3.1 Pelapisan Electroplating (electrochemical plating)

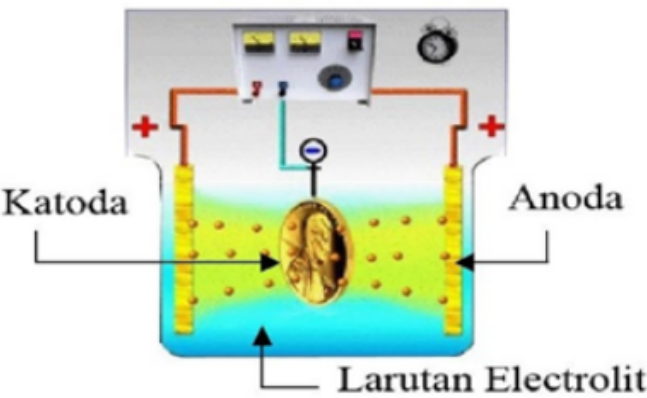
Pelapisan logam atau dengan istilah lain disebut electroplating merupakan proses pelapisan dengan cara elektrokimia atau pengendapan. Teknik pelapisan electroplating adalah salah satu teknik pelapisan dengan menggunakan larutan elektrolit seperti basa, asam dan garam. Pelapisan electroplating terdiri dari katoda yang berfungsi substrat dan anoda sebagai logam yang akan dilapisi dan ditempelkan pada suatu benda kerja. Electroplating menggunakan arus listrik atau elektroda dimasukkan ke dalam larutan dengan tujuan ion-ion yang terdapat dalam larutan dapat berpindah dari logam ke substrat. *Electroplating* logam sering digunakan karena memiliki keunggulan dari segi kemudahan dalam melakukannya juga hasil logam yang dilapisi memiliki ketahanan terhadap korosi sangat kuat (Ahmadi, 2011).

1. Rangkaian agar yang dapat dialiri arus listrik pada proses pelapisan electroplating terdiri dari:
2. Rangkaian luar yaitu sumber arus DC, Amperemeter, Voltmeter, dan alat pengatur tegangan dan arus.
3. Anoda adalah terminal positif yang dihubungkan dengan kutub positif dari sumber arus listrik. Logam yang dimasukkan ke dalam larutan elektrolit adalah bahan yang dapat larut dan tidak dapat larut. Logam yang tidak larut untuk menghantarkan listrik, sedangkan logam yang larut adalah sebagai pelapis.
4. Katoda yaitu material yang akan dilapisi dan diletakkan pada kutub negatif dari sumber arus.
5. Elektrolit yaitu larutan yang terdiri dari ion bermuatan positif dan ion bermuatan negatif dan bertindak sebagai pelapis.

Prinsip electroplating berdasarkan Hukum Faraday yaitu:

1. Ion logam bermuatan positif dalam larutan elektrolit berpindah ke ion bermuatan negatif. Ion logam positif akan mengendap dan membentuk lapisan logam.

- 2. Massa logam yang akan dilapisi sebanding dengan kuat arus yang dialirkan dalam larutan elektrolit.
- 3. Massa sebanding dengan yang rasio berat atom terhadap valensi.



Infometrik

Gambar 8.1: Anoda, Katoda, dan Elektrolit (Agung Suprihatin, 2016)

Massa logam yang dilepaskan dapat dihitung dengan persamaan 8.1 sebagai berikut:

$W = \frac{e \times i \times t}{96500}$(8.1)

Di mana:

W = Berat (gr)

$e = \frac{Ar}{valensi}$

i = arus (A)

t = waktu (s)

$d \times V = \frac{e \times i \times t}{96500}$

d = jenis logam (gr/ml atau gr/m³)

V = volume logam yang disepuhkan

Besarnya volume lapisan yang berpindah dari logam ke substrat (anoda ke katoda) dapat diketahui dengan persamaan 8.2 sebagai berikut:

$V = E \times C \times I \times t$ (8.2)

di mana:

- V = Volume (cm³)
- C = Konstanta (cm³/As)
- I = Arus (A)
- t = Waktu (s)
- E = Efisiensi katoda

Ketebalan lapisan yang terbentuk pada substrat diperoleh dengan persamaan 8.3 berikut ini:

$d = \frac{V}{A}$ (8.3)

di mana A adalah luas permukaan katoda (cm²)

Faktor-faktor yang memengaruhi proses pelapisan electroplating antara lain:

1. Kerapatan arus memengaruhi ketebalan hasil lapisan.
2. Tegangan (voltage) ion-ion yang akan terurai agar dapat menempel pada logam.
3. Suhu akan membantu kelancaran proses terjadinya reaksi dan pelapisan yang diharapkan tercapai. Faktor-faktor agar suhu tetap seimbang adalah dengan memperhatikan ketahanan logam selama proses pelapisan, jarak anoda dengan katoda, dan kuat arus yang diberikan selama perlakuan konstan.
4. Konsentrasi ion-ion dalam larutan elektrolit akan memengaruhi struktur logam. Kenaikan konsentrasi logam dapat meningkatkan kelancaran pergerakan ion dari katoda ke anoda.
5. Waktu yang digunakan memengaruhi ketebalan lapisan dan jumlah ion-ion yang mengendap pada permukaan substrat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan adanya variasi waktu selama proses pelapisan, dapat menghasilkan ketebalan lapisan yang berbeda-beda.

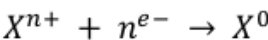
Semakin banyak waktu yang digunakan maka ion-ion yang menempel pada substrat juga akan semakin banyak.

6. Komposisi elektrolit yang digunakan sangat berpengaruh terhadap karakteristik electroplating. Elektrolit yang digunakan adalah larutan asam/basa dicampur dengan air murni.
7. Agitasi atau pengadukan yaitu proses jalannya katoda dan jalannya larutan. Tujuan proses agitasi adalah untuk menjaga ion-ion agar selalu berjalan dan tidak menumpuk, mengisi kembali ion-ion logam yang berkurang agar tidak terjadi gelembung udara pada permukaan logam.
8. Throwing power atau kekuatan larutan dalam mengurai jumlah ion-ion akan memengaruhi permukaan komponen lapisan.
9. Konsentrasi larutan akan memengaruhi pergerakan ion-ion.
10. Nilai pH larutan sangat penting dalam menjaga konduktivitas larutan tersebut.
11. Pasivitas yaitu lapisan pasif yang terdapat pada logam yang mengalami korosi. Jika hal ini terjadi pada anoda, proses pelapisan akan terganggu dan hasil yang diharapkan tidak tercapai karena ion-ion logam pelapis terus menurun.

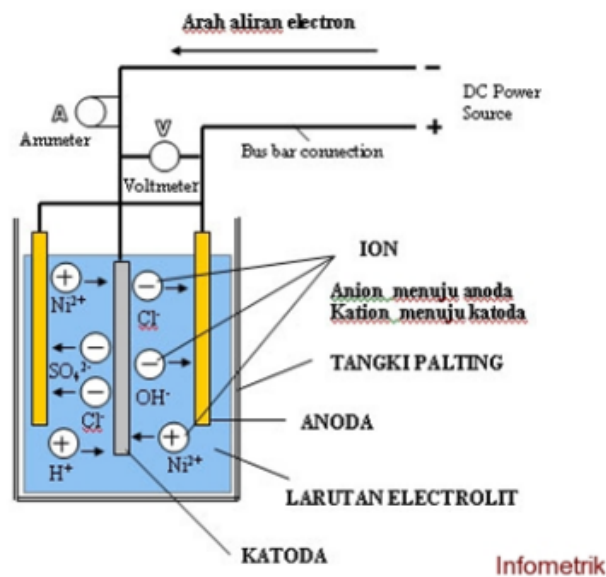
Secara sederhana, electroplating merupakan proses pelapisan logam dengan menggunakan arus listrik dan senyawa kimia tertentu dengan tujuan agar ion-ion pada logam pelapis bergerak dan menempel pada material logam yang akan dilapisi. Pelapisan logam dapat berupa lapisan seng (zinc), galvanis, perak, emas, brass, tembaga (Cu), nikel (Ni), dan krom (Cr). Penggunaan lapisan harus dengan perkiraan agar hasil sesuai dengan yang diharapkan. Untuk itu perlu diketahui kegunaan masing-masing material dan material apa yang dibutuhkan. Pada proses electroplating, logam yang akan dilapisi akan berubah secara sifat fisik dan mekanik. Perubahan bentuk terjadi ketika bertambahnya kapasitas konduktivitasnya material yang dilapisi dan juga semakin bertambahnya daya tahan terhadap korosi. Perubahan sifat mekanik logam terjadi pada daya tarik dan daya tekan yang semakin bertambah dari sebelum pelapisan dan setelah pelapisan.

Menurut Anton J. Hartomo dan Tomijiro Kaneko (1992), electroplating adalah suatu proses terjadinya elektrodposisi logam atau pengendapan elektro yang

melekat pada lapisan elektroda dengan tujuan untuk menghasilkan sifat dan dimensi yang berbeda dari logam dasarnya. Proses electroplating adalah proses terjadinya reaksi reduksi dari material pelapis dan oksidasi yaitu logam yang akan dilapisi. Katoda berfungsi menangkap elektron sedangkan anoda melepaskan elektron. Proses pelapisan logam yang dilapisi oleh logam lain terjadi dengan persamaan kimia sebagai berikut:



Agar reaksi reduksi dan oksidasi tetap seimbang, maka terjadi pelepasan elektron dengan persamaan kimia berikut ini.



Gambar 8.2: Skema Proses Electroplating (Agung Suprihatin, 2016)

Prinsip kerja electroplating berlawanan dengan sel volta sehingga rangkaian sel electroplating juga berbeda. Pada sel electroplating, anoda bermuatan positif (+) dan katoda bermuatan negatif (-) yang didasarkan pada potensial yang diberikan dari luar. Pada electroplating arus yang dipakai adalah arus searah (Direct Current = DS). Namun reaksi reduksi dan oksidasi terjadi dalam sel elektrolisis di mana reaksi ini juga terjadi pada sel volta yaitu reaksi reduksi terjadi pada katoda dan reaksi oksidasi terjadi pada anoda.

Gerakan ion-ion dalam larutan searah dengan arus yang diberikan dan menyebabkan terjadinya reaksi pada elektrolit. Dengan adanya aliran listrik,

ion yang bermuatan negatif (anion) berpindah ke anoda dan ion yang bermuatan positif (kation) berpindah ke katoda. Perpindahan dari ion-ion tersebut menyebabkan reaksi reduksi dan oksidasi (Abdul Rasyad dan Budianto, 2011).

Larutan elektrolit yang sering digunakan pada pelapisan electroplating adalah larutan asam, larutan sianida, larutan alkali zinkat dan larutan pyrophosphate. Larutan (elektrolit) yang akan digunakan pada pelapisan electroplating harus mengandung bahan-bahan yang sesuai dengan fungsi dan tujuan pelapisan tersebut, di antaranya sebagai berikut:

1. Memiliki kandungan ion yang cukup untuk mencapai lapisan yang diharapkan. Dalam suatu elektrolit harus memiliki ion positif (kation) dan ion negatif (anion).
2. Memiliki atom-atom dalam bentuk senyawa kompleks.
3. Memiliki kandungan konduktor yang baik agar pergerakan ion-ion lancar dengan menambahkan garam.
4. Memiliki zat penyangga (buffer) agar pH tetap terjaga.
5. Memiliki zat atau komponen yang dapat mengatur proses endapan.
6. Memiliki zat pelarut untuk memudahkan ion-ion pelapis terurai.
7. Memiliki zat yang dapat membantu proses hidrolisis agar tetap stabil larutan tetap stabil.

Jenis larutan elektrolit yang digunakan yaitu larutan yang memiliki sifat konduktor kuat dan konduktor lemah. Setiap proses pelapisan selalu menggunakan elektrolit yang berbeda karena material pelapis dan hasil lapisan logam yang diharapkan berbeda juga. Elektrolit tersebut kuat atau lemah dapat diketahui dari interaksi ion-ion dalam larutan dengan bahan yang ditambahkan sebagai pelarut. Komposisi larutan yang digunakan yaitu harus memperhatikan persentase massa, konsentrasi, dan molalitas.

Metode, bahan pelapisan, dan aplikasi electroplating adalah sebagai berikut:

1. Pelapisan Tembaga (cooper plating)
Pelapisan tembaga digunakan untuk mengubah penampilan pada material seperti baja, seng, dan paduannya, serta untuk print circuit board agar terlihat lebih menarik. Dalam pelapisan tembaga, larutan elektrolit yang digunakan adalah larutan asam, larutan sianida,

larutan fluoborat, dan Larutan pyrophosphate. Pelapis yang digunakan sebagai pelapis pada proses ini adalah tembaga dan larutan elektrolitnya terdiri dari larutan asam dan larutan sianida.

2. Pelapisan Timah Putih

Pelapisan timah putih dilakukan untuk jenis kaleng makanan dan kaleng minuman. Dengan pelapisan electroplating, hasil yang diperoleh lebih sempurna karena ketebalannya merata dan halus sehingga pelapisan ini dapat menggantikan pelapisan dengan cara celup panas (Hot Dip Galvanizing) di mana hasilnya berupa lapisan yang lebih kasar.

3. Pelapisan Seng

Pelapisan seng dilakukan pada material baja seperti mur, baut, alat-alat listrik dan sejenis lainnya. Manfaatnya adalah meningkatkan ketahanan pemakaian produk yang lebih lama dan meningkatkan daya tahan logam terhadap korosi lebih lama. Di samping itu, bahan pelapis seng memiliki harga yang lebih murah dan bentuk permukaan yang sangat cocok digunakan. Proses pelapisan seng dilakukan dengan cara mencelupkan baja ke dalam seng yang telah dilarutkan (galvanizing), membuat larutan dari asam fosfat ($\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2$) agar pori logam tertutupi (sherardizing), dan menggunakan serbuk logam yang disemburkan dengan kecepatan tinggi (metal spraying).

Di antara berbagai teknik pelapisan tersebut, pelapisan electroplating lebih sering digunakan karena memiliki kelebihan yaitu memperoleh hasil lapisan dengan bentuk penampilan yang lebih baik, lapisan halus, dan daya rekatnya tinggi. Pelapisan seng secara listrik disebut dengan electrogalvanizing dan merupakan salah satu alternatif yang dijadikan sebagai substrat.

4. Pelapisan Nikel

Pada saat ini, pelapisan nikel pada besi sangat sering digunakan karena manfaatnya. Di samping dapat mencegah karat, manfaat lain yaitu menambah keindahan suatu material agar lebih menarik dan mudah dipasarkan. Nikel merupakan salah satu material pelapis yang paling banyak diinginkan para pelaku industri terutama industri

otomotif karena memiliki hasil lapisan yang mengkilau terutama ketika adanya cahaya yang datang. Bahan campuran lapisan yang sering digunakan yaitu lapisan Cr dan Ni merupakan lapisan dasarnya.

5. Pelapisan Khrom (Chromium plating)

Selain nikel, pelapisan khrom banyak dilakukan untuk mendapatkan bentuk permukaan yang lebih menarik. Khrom memiliki kelebihan yaitu sangat tahan karat dan keras dibandingkan dengan material pelapis lainnya. Untuk memperoleh hasil lapisan logam yang baik dan prosesnya cepat, logam yang menjadi benda kerja tersebut dicelupkan ke dalam larutan asam yang memiliki banyak ion Cr^{6+} . Contoh larutan tersebut adalah $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ dilarutkan dalam asam mineral H_2SO_4 . Pelapisan khrom dalam 24 jam pertama dan tidak boleh berhenti agar struktur lapisan kuat dan merata. Perbandingan berat antara pencampuran bahan katalis dengan kromnya untuk proses electroplating yaitu 1:100 sampai 1:70. Chromium plating dilakukan pada komponen berbahan piston, mesin pesawat, mesin tekstil, industri otomotif, peralatan kantor, dan peralatan rumah tangga.

6. Barrel plating yaitu pelapisan pada logam berukuran kecil namun menghasilkan volume lapisan yang besar.
7. Rack plating yaitu pelapisan dengan berat dan bentuk logam yang lebih besar. Rack terbuat dari kawat tembaga sehingga substrat dapat dialiri arus listrik. Substrat diletakkan dalam sebuah tempat dalam bentuk keranjang yang digantung dengan bantuan kait (hook).
8. Strip plating yaitu pelapisan logam dengan jumlah produksi yang banyak pada setiap proses pelapisan. Bahan yang menjadi substrat adalah baja, sedangkan bahan yang dipakai sebagai pelapis adalah nikel, seng, dan tembaga. Teknik pelapisan ini banyak digunakan untuk pelapisan jam tangan dan perhiasan dengan material pelapis seperti emas, silver dan platinum.
9. Tin plating yaitu pelapisan logam dari bahan timah tujuan untuk dekoratif dan protektif.

8.3.2 Pelapisan Anodisasi (Anodizing)

Anodizing adalah proses pelapisan logam dengan cara menambahkan larutan elektrolit sebagai media dengan penambahan oksigen (O_2) pada aluminium menjadi aluminium oksida (Al_2O_3) secara elektrolisis. Dengan reaksi kimia tersebut akan mengakibatkan terjadinya anodisasi atau pembentukan lapisan oksida (anodic oxidation) pada permukaan logam. Prinsip pelapisan anodisasi hampir sama dengan proses pelapisan dengan cara listrik (electroplating). Prinsip dasar proses anodizing adalah proses terjadinya elektrolisis. Hasil lapisan dengan teknik anodizing coating adalah berupa lapisan tipis oksida dengan sifat kekerasan yang lebih tinggi daripada logam dasarnya.

Pada proses anodizing, material yang digunakan adalah aluminium. Aluminium memiliki berat jenis yang sangat ringan ($2,70 \text{ gr/cm}^3$), sehingga pelapisannya mudah dibentuk dan ketahanan terhadap korosi juga kuat (Hutasoit, 2008). Proses anodizing merupakan salah satu cara untuk melindungi logam dengan cara oksidasi. Oksidasi yaitu proses pelepasan elektron dengan cara menambahkan oksigen (O_2) pada bahan aluminium (Al). Lapisan oksida berasal dari larutan elektrolit asam sulfat (H_2SO_4) yang (Santhiarsa, N.N., 2009).

Komponen utama pada rangkaian anodizing adalah sebagai berikut:

1. Elektroda

Elektroda adalah konduktor yang digunakan agar dapat diletakkan bersentuhan dengan media yang terbuat dari bahan. Elektron yang dihasilkan dari proses elektrolisis aluminium digunakan sebagai anoda sedangkan katodanya adalah timbal (Pb). Oksidasi terjadi karena adanya serapan elektron dari cell selama proses elektrolisis. Anoda merupakan elektroda positif berupa elektron yang berasal dari oksidasi dan katoda merupakan elektroda negatif dari hasil reduksi.

2. Elektrolit

Elektrolit merupakan bahan yang dapat menghantarkan arus listrik. Besarnya konduktivitas elektroda ditentukan oleh konsentrasi elektrolit yang digunakan. Larutan elektrolit terdiri dari dua macam yaitu larutan elektrolit kuat dan elektrolit lemah. Elektrolit kuat yaitu larutan yang sangat mudah menghantarkan listrik di mana ion-ion yang terdapat dalam larutan mudah berpindah karena bebas bergerak.

Larutan elektrolit lemah adalah larutan yang memiliki ion-ion di dalamnya tidak bebas bergerak sehingga arus yang mengalir menjadi lambat.

3. Elektrolisa

Elektrolisa bertindak sebagai anoda dan bahan material pelapisnya adalah aluminium. Ion pada logam aluminium terurai dan larut seperti dijelaskan pada persamaan reaksi berikut:



Jumlah zat pada larutan sama dengan besar tegangan yang diberikan dan zat-zat yang dihasilkan juga sama. Maka akan dihasilkan jumlah ekuivalen masing-masing zat. Berdasarkan Hukum Faraday diperoleh persamaan 8.4 berikut ini.

$$n = \frac{I.t}{F.z} \dots\dots\dots(8.4)$$

Di mana:

- n = jumlah zat (mol)
- I = arus listrik (ampere)
- F = tetapan Faraday (1 Faraday = 96485 coulomb/mol)
- z = jumlah elektron yang ditransfer per ion

Karena jumlah zat adalah massa atom (AR) dikalikan dengan mol atom, maka dapat diperoleh persamaan 8.5, persamaan 8.6, dan persamaan 8.7.

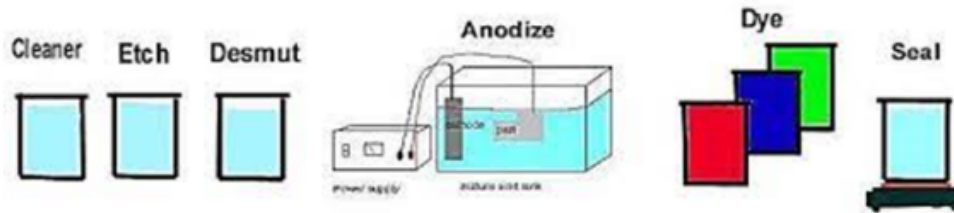
$$n \times AR = \frac{I.t}{F.z} \times AR \dots\dots\dots(8.5)$$

$$m = \frac{I.t}{F.z} \times AR \dots\dots\dots(8.6)$$

$$\frac{m}{t} = \frac{I}{F.z} \times AR \dots\dots\dots(8.7)$$

Anodisasi atau oksida anodik bertujuan untuk menghasilkan lapisan oksida yang lebih tebal dan lebih kuat dibandingkan lapisan oksida yang terbentuk secara alami. Proses anodisasi yang dilakukan secara tepat akan menghasilkan lapisan dengan tingkat ketahanan terhadap korosi tinggi. Secara umum, anodisasi merupakan proses pelapisan secara elektrokimia dengan mengkonversikan ion-ion yang terdapat pada larutan dan logam dasar menjadi

lapisan porous aluminium oksida (Al_2O_3). Pada proses ini, langkah-langkah yang harus dilakukan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.3 di bawah ini.



Gambar 8.3: Proses Anodizing (Taufiq, T., 2011)

Keterangan Gambar:

1. Cleaning
Proses cleaning adalah membersihkan aluminium menggunakan larutan detergen murni agar tidak mengganggu proses *etching*. Agar pembersihan permukaan benda kerja aluminium berhasil, digunakan konsentrasi larutan detergen murni natrium karbonat (Na_2CO_3) sebesar 50 gr/liter.
2. Rinsing Cleaning
Proses rinsing cleaning adalah pembersihan ulang dengan bahan air *reverse osmosis* dari bahan kimia yang tidak dapat dibersihkan pada proses cleaning.
3. Etching
Etching (etsa) dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan permukaan aluminium yang lebih bersih. Bahan yang digunakan adalah soda api (NaOH) dengan konsentrasi 100 gr/liter. Proses ini dilakukan agar permukaan aluminium benar-benar bersih karena ada sebagian kotoran yang tidak dapat dibersihkan melalui proses cleaning atau rinsing.
4. Rinsing Etching
Proses *rinsing etching* membersihkan aluminium dengan tujuan memperlancar proses berikutnya.
5. Desmut
Proses desmut bertujuan untuk membersihkan bercak-bercak hitam yang terdapat pada permukaan benda kerja akibat proses *etching*.

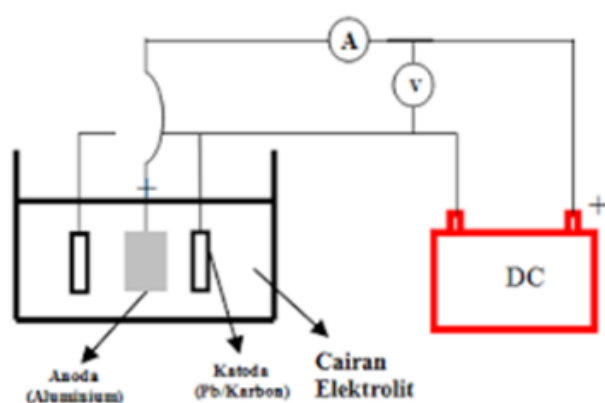
Bahan larutan yang digunakan sebagai pembersih adalah larutan yang terdiri dari asam fosfat (H_3PO_4) 75%, asam sulfat (H_2SO_4) 15%, dan asam asetat ($\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H}$) 10%.

6. Rinsing Desmut

Proses rinsing desmut dilakukan untuk membersihkan permukaan benda kerja aluminium dari bahan kimia setelah proses desmut selesai. Bahan yang digunakan sebagai pembersih adalah air reverse osmosis (RO). Proses ini dilakukan agar tidak mengganggu proses selanjutnya yaitu proses anodizing.

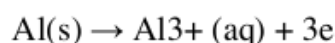
7. Anodizing

Proses anodic oxidation merupakan proses elektrolisis menggunakan larutan asam sulfat (H_2SO_4) pada konsentrasi 400 ml/liter. Hal ini dilakukan untuk memperoleh aluminium oksida sebagai pelapis logam dasar. Lapisan aluminium oksida diletakkan pada katoda (-) dan logam dasar pada anoda (+) seperti pada Gambar 8.4 di bawah ini.

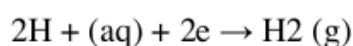


Gambar 8.4: Skema proses Anodizing (Priyanto, 2012)

Persamaan reaksi yang terjadi pada proses anodic oxidation adalah



Persamaan reaksi pada katoda adalah



8. Rinsing anodizing

Proses rinsing anodizing dilakukan untuk membersihkan permukaan logam aluminium sebelum dilakukan pewarnaan (coloring) dengan menggunakan larutan asam sulfat.

9. Coloring/dyeing

Proses pewarnaan dilakukan untuk permukaan logam yang mengalami korosi sehingga lebih menarik setelah proses anodic oxidation dengan menggunakan larutan pada konsentrasi 15 gr/liter.

10. Sealing

Proses sealing adalah memperbaiki permukaan logam akibat oksidasi agar membentuk struktur permukaan yang lebih merata dan halus. Larutan yang digunakan sebagai pelapis yaitu Asam Asetat ($\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H}$) dengan konsentrasi 20 ml/liter.

11. Rinsing sealing

Proses rinsing sealing merupakan proses terakhir pelapisan logam aluminium. Hal ini dilakukan agar lapisan logam yang diharapkan tercapai dari segi pewarnaan dan ketahanan logam terhadap korosi dan aus semakin kuat, serta bentuknya halus dan merata.

Adapun tujuan dilakukannya proses anodizing antara lain:

1. Lapisan logam semakin tahan terhadap korosi.

Lapisan oksida yang terbentuk melalui proses anodisasi mampu melindungi ketahanan logam terhadap korosi. Lapisan oksida berfungsi untuk menghalangi serangan dari lingkungan yang korosif.

2. Meningkatkan sifat adhesif.

Proses anodisasi dengan menggunakan asam fosfor dan kromat akan meningkatkan sifat adhesif logam, sehingga logam akan ikatan logam akan semakin kuat dan tangguh terhadap korosi.

3. Logam yang telah dilapisi tahan terhadap aus (wear resistant).

Hasil lapisan memiliki ketebalan 25-100 mikron sehingga dapat diaplikasikan pada kondisi abrasi. Kekerasan lapisan oksida sangat tinggi, hampir sama dengan sapphire dan intan.

4. Penghantar listrik.
Resistivitas lapisan yang diperoleh sangat tinggi dan merata sehingga mampu mengatur jalannya arus listrik.
5. Dapat digunakan untuk plating berikutnya.
Sisa larutan masih ada sehingga dapat digunakan untuk proses selanjutnya dengan penambahan asam fosfor.
6. Digunakan untuk mengubah tampilan permukaan logam (dekoratif).
Proses anodisasi dapat dikatakan berhasil jika hasil lapisan oksida memiliki warna yang mengkilap.

Bab 9

Proteksi Katodik

7

9.1 Pendahuluan

Korosi adalah bentuk kerusakan atau degradasi suatu jenis logam akibat mengalami reaksi reduksi-oksidasi antara suatu jenis logam dengan berbagai jenis zat pada lingkungannya, menyebabkan dihasilkannya senyawa-senyawa tidak diinginkan karena menurunkan kualitas dan mutu logam tersebut. Bahasa sehari-hari, korosi reaksi yang terjadinya perkaratan yang mungkin salah satu penyebabnya adalah reaksi oksidasi antara permukaan logam dengan udara pada suhu kamar. Contoh korosi yang paling umum ada di sekitar kita adalah perkaratan besi.

Proteksi Katodik (Cathodic Protection) adalah salah satu teknik yang digunakan dalam mengendalikan atau mengurangi terjadinya korosi pada permukaan logam dengan rekayasa permukaan logam sebagai katoda pada sel volta. Proteksi katodik ini merupakan salah satu metode yang umum digunakan dalam melindungi komposisi logam dari proses perkaratan. Sistem proteksi katodik umumnya digunakan untuk proteksi baja, rangka, pipa, tiang pancang, permukaan bawah kapal, anjungan lepas pantai termasuk *casing* atau selubung pada sumur minyak di darat (Sumantri and P.T., 2020).

Metode proteksi baja dari perkaratan sangat bermanfaat dalam memperpanjang umur dan penggunaan saluran distribusi, proteksi dari kebocoran dan untuk

keamanan operasi dari ledakan. Namun demikian dibalik manfaat metode ini sesungguhnya memiliki efek samping dalam penggunaan, karena proteksi katodik dengan fungsi utama mencegah kebocoran akibat perkaratan, namun jika dilakukan kurang tepat, karena dapat menimbulkan timbulnya molekul hidrogen yang dapat terperangkap dalam logam yang dilapisi, sehingga menyebabkan adanya efek kegetasan hydrogen (hydrogen embrittlement) (Wicaksono and Sutjahji, 2019).

Pada prinsipnya proteksi katodik adalah suatu teknik yang bertujuan untuk mengendalikan karat khususnya pada logam, dilakukan dengan menjadikan permukaan logam bertindak sebagai katode pada rangkaian sel elektrokimia. Proteksi katodik efektif untuk mencegah retak karena kikisan dari proses korosi (stress corrosion cracking) dengan cara *memvisibalkan* arah arus korosi, sehingga terjadi proses pengendalian elektron, sehingga terjadi peruraian elektron dari logam tertentu. Proses pembalikan arah elektron bersifat imun atau kebal, sehingga perkaratan pada logam dapat diminimalkan atau jika mungkin ditiadakan, meskipun secara teoritis tidak dapat hilang sama sekali. Sistem proteksi katodik umumnya digunakan untuk perlindungan pada peralatan yang konstruksinya mengandung material baja.

Prinsip proteksi katodik adalah penyediaan elektron pada struktur logam yang diproteksi. Teori proteksi katodik didasarkan pada aliran arus yang mengalir dari kutub positif (katoda) ke kutub negatif (anode). Teori konvensional ini berfungsi untuk membentuk struktur yang melindungi permukaan material jika terdapat arus yang masuk dari elektrode. Sebaliknya terjadi peningkatan laju korosi terdapat arus masuk melalui logam menuju ke elektrode. Jika ditinjau pada sumber listrik yang digunakan, dikenal dua metode proteksi katodik, yaitu metode arus tanding (impressed current) dan metode anoda korban (sacrificial anode) (Utami, 2009).

Pada dasarnya terdapat banyak metode yang dapat digunakan dalam mengendalikan atau menurunkan laju perkaratan, salah satu di antaranya dan mudah dalam aplikasinya adalah metode pelapisan (coating). Korosi merupakan umum dan proses alamiah yang hampir pasti terjadi dinamika dalam kehidupan akibat interaksi satu jenis zat dengan komponen lainnya, namun menjadi ⁹ suatu masalah karena selalu menimbulkan efek samping, jika material tersebut berkaitan dengan logam. Proteksi katodik adalah salah satu metode proteksi logam terhadap terjadinya korosi, misalnya pada jaringan pipa baik di dalam tanah maupun di bawah laut dan sebagainya. Metode proteksi katodik dipandang dapat memproteksi material logam hingga dapat

memperpanjang masa hidup atau pemakaian material tersebut dalam suatu instalasi atau konstruksi infrastruktur fisik (Umar et al., 2020).

9.2 Sejarah Penemuan Proteksi Katodik

Penggunaan pertama metode proteksi katodik pada abad ke-19, tepatnya sekitar tahun 1852, yang dimotori oleh Sir Humphry Davy, seorang perwira Angkatan Laut Inggris, menempatkan setumpuk besi pada bagian luar badan kapal berlapis tembaga dalam keadaan terendam air. Dari peristiwa tersebut ditemukan bahwa besi relatif lebih mudah mengalami perkaratan dibandingkan dengan tembaga sehingga ketika dilekatkan pada badan kapal, laju korosi pada tembaga akan menjadi turun. Metode proteksi katodik yang umum digunakan, ada dua yakni:

Potensial Impressed Current

Bangunan dengan strukt¹³ yang lebih besar, penggunaan metode anode galvanic dipandang tidak ekonomis mengalirkan arus yang cukup agar terjadi perlindungan maksimal dan menyeluruh. Sistem Impressed Current Cathodic Protection (ICCP) umumnya menggunakan anode yang dikorelasikan dengan sumber arus searah (DC) yang dinamakan cathodic protection rectifier. Anode untuk sistem ICCP dapat berbentuk batang atau pita panjang dari berbagai jenis material khusus. Material ini dapat berupa *high silicon cast iron* atau campuran besi dan silikon, dapat pula berupa grafit, campuran logam oksida, platina dan niobium serta material lainnya.

Tipe sistem ICCP yang umum umumnya digunakan pada jalur pipa terdiri dari *rectifier* bertenaga arus bolak-balik atau AC dan output arus DC maksimum jika dalam range antara 10 - 50 ampere dan 50 volt. Terminal kutub positif (katoda) dari output DC, selanjutnya dihubungkan menggunakan kabel ke anode-anode l¹³ yang ditanam di dalam tanah. Biasanya menanam anode menggunakan aplikasi menanam anode hingga kedalaman 60 m atau 200 kaki, dengan diameter lubang antara 2¹³ cm atau 10 inci, serta ditimbun lagi menggunakan dengan suatu jenis material yang dapat meningkatkan kinerja dan umur dari anode (Sufrianti and Hamzah, 2019).

Potensial Galvanic

Eksperimen pengendalian korosi yang diperkenalkan oleh Galvanik atau anode timbal dapat dibuat dalam beberapa model dengan menggunakan alloy (campuran logam) seng, magnesium dan aluminium. Potensial elektrokimia, kapasitas arus, dan laju konsumsi dari campuran logam jenis alloy lebih dominan sebagai proteksi katodik dibandingkan pada besi. Pada Anode Galvanic selalu dirancang agar memiliki voltase aktif (Shochib, 2013).

Secara teknik pada metode Anode memiliki potensial elektrokimia lebih negatif, artinya lebih tinggi daripada logam yang terdapat pada struktur baja. Proteksi katodik dapat diperoleh dengan maksimal dan efektif apabila potensial dari permukaan baja dipolarisasikan (dikutubkan) agar kekuatan negatifnya meningkat, hingga permukaannya memiliki potensial yang seragam. Metode ini memiliki daya dorong yang dapat mengakibatkan terjadinya reaksi korosi lebih tertahan, sehingga Anode Galvanic akan terus terkorosi dan dapat memakan material anode, hingga pada suatu periode perlu dilakukan penggantian. Polarisasi yang terjadi disebabkan oleh laju arus yang berasal dari anode menuju ke katode. Laju arus dari proteksi katodik tergantung pada perbedaan potensial antara elektrokimia anode dengan katode (Pratikno, 2006).

Beberapa jenis Anoda yang dapat digunakan pada teknik *impressed current* dibagi dalam beberapa bagian:

1. Fully consumable adalah jenis anoda bersifat aktif. Contoh: besi tuang, baja, seng, aluminium, dan lain sebagainya.
2. Konduktor bukan golongan metalik. Contoh: anoda magnetit (Fe_3O_4) dan anoda grafit. Pada bagian permukaan anoda jenis ini, biasanya hanya terjadi reaksi pembentukan gas, berupa gas CO_2 .
3. Paduan logam yang pasif sebagian. Contoh: paduan Pb, dan ferrosilicon. Pada anoda jenis ini, selama anode bekerja terjadi pelapisan pasif yang masih konduktif, reaksi dan juga terjadi reaksi pembentukan gas.
4. Logam pasif sempurna. Contoh: platinized titanium, anode platina, platinized niobium, dan lain sebagainya. Lapisan pasif protektif terbentuk selama anode masih bekerja dan selaput yang ada juga masih dapat menghantarkan elektron.

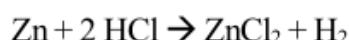
5. Jenis ³Oksida. Contoh: mixed oxide dan magnetit. Pada permukaan anoda ini hanya terbentuk reaksi gas.

9.3 Panel Galvanis

Korosi mutlak menimbulkan kerugian bagi kehidupan, setidaknya kerugian tersebut digolongkan menjadi 2, yaitu: Kerugian Langsung: Diperlukan biaya untuk mengganti material logam atau alat yang rusak akibat korosi, biaya pengerjaan untuk penggantian material tersebut, biaya untuk pengendalian korosi, biaya tambahan untuk membuat konstruksi dengan logam yang spesifikasinya lebih tinggi (Pratikno, 2006) dan Kerugian Tidak Langsung, Pemberhentian produksi suatu industri, penurunan efisiensi suatu peralatan, kehilangan produk berharga, pengotoran produk, mengurangi keselamatan kerja, pencemaran lingkungan, pengurangan cadangan sumber logam.

Penggunaan jenis material logam ³dalam berbagai aplikasi industri, termasuk pada industri pengolahan minyak dan gas, hingga saat ini masih dominan. Salah satu aplikasi penggunaan material logam dalam industri pengolahan migas paling banyak digunakan pada sistem distribusi. Industri pengolahan ³minyak dan gas untuk distribusi atau penyaluran ataupun pengangkutan dari tempat pengeboran menghasilkan minyak mentah ke tempat pengolahan yang mengolah minyak mentah menjadi produk siap pakai sering kali letaknya terpisah dan bahkan berjauhan, sehingga dalam sistem distribusinya digunakan banyak pipa yang didominasi oleh komposisi material logam khususnya baja (Karyono, Budinto and Pamungkas, 2017).

Contoh reaksi pada logam seng dalam larutan klorida:



Logam seng berpindah ke lingkungan sebagai ion seng, ini adalah peristiwa oksidasi atau korosi yang terjadi di daerah permukaan logam yang energinya lebih tinggi dari sekitarnya. Daerah ini disebut daerah anodik atau anoda. Pada umumnya di daerah ini terjadi korosi. Ion hidrogen direduksi menjadi gas hidrogen (H₂) dan keluar dari larutan. Peristiwa ini terjadi pada daerah yang permukaan logamnya berenergi lebih rendah, yang disebut katodik atau katoda di mana tidak terjadi korosi (Anwar et al., 2014).

Penggunaan material logam pada industri tidak dapat dihindari, demikian pula karena keunggulan yang dimiliki logam itu sendiri seperti ketahanannya dalam menerima dan menahan beban, ketahanan terhadap temperatur tinggi, dan berbagai kelebihan lainnya. Oleh karena itu penggunaan material logam dalam industri cukup besar, seolah industri tersebut tergantung pada logam. Dari berbagai kelebihan dan keunggulan dari material logam ini, juga memiliki kelemahan. Salah satunya kelemahan utama material logam adalah sifatnya yang mudah mengalami perkaratan.

Pada umumnya, setiap logam berada dalam keadaan stabil apabila dalam bentuk oksidanya, namun karena rekayasa-rekayasa yang dilakukan manusia dalam pemanfaatan logam, maka muncullah oksida-oksida logam yang diolah dan diproses sedemikian rupa, sehingga menjadi logam yang siap pakai yang memiliki tingkat energi lebih tinggi. Proses distribusi material gas, minyak dan bahan mengalir lainnya tidak dapat dilepaskan dari kebutuhan pipa baja, namun pipa baja juga tidak dapat lepas dari masalah korosi. Korosi yang sulit diatasi hingga saat ini adalah pada bagian sambungan antar pipa, karena pada proses penyambungan tersebut dilakukan dengan menghubungkan daerah anoda dan katoda, dan juga adanya elektrolit akibat kontak dengan lingkungan.

Proses penyambungan ini, sering kali menimbulkan masalah dengan terbentuknya oksida hidrogen. Zat ini adalah prekursor terbentuknya reaksi perkaratan, karena potensi untuk terjadi reaksi dengan udara atau air, di mana kontak udara atau air tidak dapat dihindarkan pada proses distribusi. Mengatasi hal tersebut, maka sering kali digunakan teknologi beda potensial elektrokimia diukur berdasarkan elektrode referensi. Sebagai contoh untuk menghindari terjadinya karat agar terhindar dari kebocoran distribusi digunakan elektrode tembaga (II) sulfat hampir peruntukkan untuk struktur distribusi yang kontak dengan tanah atau air tawar sedangkan elektrode perak klorida digunakan untuk struktur yang kontak dengan air laut (Hermawan, 2019).

Baja Galvani tidak dapat dilepaskan dari industri manufaktur. Dewasa ini mobil-mobil modern umumnya menggunakan rangka dan panel Galvanis berlapis seng, sehingga potensi timbulnya masalah. Jika pada penggunaan baja pada panel tersebut tidak terproteksi akan membentuk lapisan besi oksida yang sangat mungkin dapat menyerap udara dan air atau menyerap keduanya dalam waktu yang relatif sama, sehingga dapat potensi korosi hampir pasti terjadi seiring dengan pertambahan waktu operasinya dan terus berlanjut seiring dengan pertambahan waktu. Korosi ini umumnya akan terjadi pada bagian bawah.

Mengatasi masalah tersebut, maka penggunaan seng oksida menjadi pilihan tepat karena seng oksida ini yang dihasilkan dari permukaan barang dengan lapisan seng tidak dapat ditembus oleh penetrasi air dan udara, selama lapisan seng dengan seng oksida tidak terganggu, misalnya dengan terkikis atau tergores, baja di bawahnya tidak akan berkarat (Hermawan, 2019).

Secara prinsip baja Galvanis memiliki sifat proteksi alami atau dapat memperbaiki diri sendiri. Goresan kecil di mana baja terekspos ke udara luar akan ditutup kembali oleh seng. Hal ini terjadi karena seng yang di ada sekitarnya dapat terserap dan mengendap pada bagian goresan baja tersebut, sehingga dapat mengganti apa yang sebelumnya hilang karena goresan, proses ini disebut proteksi alamiah.

9

9.4 Sistem Proteksi Katodik

Pada prinsipnya proteksi katodik merupakan kontrol korosi yang dilakukan secara elektrokimia di mana reaksi oksida pada sel Galvanis difokuskan pada daerah anoda, sekaligus menekan proses korosi pada daerah katoda dalam sel yang sama. Teknologi ini merupakan kombinasi dan perpaduan sel yang terbentuk dari unsur elektrokimia, listrik dan pengetahuan tentang bahan. Unsur elektrokimia mencakup mekanisme terjadinya suatu reaksi korosi, sedangkan unsur kelistrikan mencakup aspek perilaku objek yang diproteksi dan perilaku objek tersebut dalam lingkungan jika arus listrik dialirkan (Anwar et al., 2014).

9.4.1 Konsep Dasar Proteksi Katodik

Gambaran konsep dasar mengenai proses korosi dan aplikasi proteksi katodik secara teoritis dapat dicontohkan pada sistem proteksi anoda korban. Prinsipnya dasar proteksi korosi pada sistem karbon dengan menghubungkan logam yang akan proteksi dengan logam lain, yang mana lain lain tersebut memiliki sifat kurang mulia pada keadaan lingkungan tertentu. Logam yang dihubungkan, bertindak sebagai anoda korban, di mana karena sifatnya yang lebih aktif, logam tersebut akan menghasilkan lebih banyak elektron untuk disumbangkan, sehingga bertindak sebagai logam yang akan melindungi atau memproteksi logam pertama dari korosi.

3 Kriteria proteksi menurut standar National Association of Corrosion Engineers (NACE), menyatakan bahwa proses korosi dapat terhenti jika voltase (CSE) yang diukur berada diatas batas:

1. -850 mV jika diukur dengan Cu/CuSO₄ dalam tanah biasa
2. -950 mV jika diukur dengan Cu/CuSO₄ dalam lingkungan terdapat bakteri (SRB)
3. -950 mV jika suhu pipa > 60 oC atau 140 oF (Utami, 2009).

Konsep proteksi logam adalah dengan mengukur potensial material logam yang diproteksi dengan proteksi katodik dapat dilakukan dengan menghubungkan elektroda referensi, yang ditancapkan di permukaan tanah pada lokasi penempatan misalnya pada pipa, di mana pipa tersebut selanjutnya kemudian dapat diukur dengan voltmeter. Hasil pengukuran diketahui nilai potensial pipa dengan tanah dan IR-drop. IR-drop dapat terjadi jika aliran arus yang mengalir melalui tanah dan pipa memiliki tahanan dengan nilai tertentu. Nilai potensial pipa dengan tanah dapat dijadikan rujukan untuk mengilustrasikan kondisi pipa.

Penggunaan metode proteksi dengan perbatasan dan tentunya kelebihan. Kelebihan teknik anoda korban penggunaannya, antara lain:

1. tidak menyebabkan interferensi atau stray current;
2. umumnya dapat digunakan pada struktur dengan kebutuhan arus proteksi total rendah dan lingkungan padat struktur;
3. biasanya digunakan untuk menggantikan sistem ICCP, jika sumber arus listrik tidak tersedia;
4. dapat digunakan untuk mencukupi kekurangan arus proteksi dalam suatu sistem ICCP.

Dari kelebihan tersebut, juga teridentifikasi beberapa kekurangan dalam penggunaan teknik proteksi anode karbon misalnya memiliki jangkauan proteksi terbatas karena adanya tahanan listrik, sehingga kurang efektif untuk melindungi wilayah yang luas (Umar et al., 2020).

9.4.2 Mekanisme Proteksi Katodik

Pencegahan korosi pada teknik *offshore pipeline* dapat dilakukan dengan menggunakan metode Cathodic Protection. Prinsip dari Cathodic Protection

adalah menyediakan elektron untuk struktur logam yang akan dilindungi. Jika arus mengalir dari kutub positif ke kutub negatif (teori listrik konvensional) struktur akan terlindungi jika arus masuk dari elektroda. Kebalikannya, laju korosi akan meningkat bila arus masuk melalui logam ke elektroda.

Gambaran proteksi katodik diilustrasikan pada rangkaian sel elektrolit dengan penempatan dua buah logam besi dan zinc yang ditempatkan terpisah dan masing-masing dicelup ke dalam suatu elektrolit. Kedua jenis logam tersebut terkorosi dan membentuk reaksi korosi (oksidasi) diseimbangkan dengan reaksi reduksi yang sama. Pada kasus diatas, terjadi pembebasan gas hidrogen. Reaksi korosi difokuskan pada elektroda zinc sebagai anoda dan hampir semua reaksi reduksi difokuskan pada elektroda besi sebagai katoda. Reaksi anoda zinc pada rangkaian akan lebih cepat dari pada rangkaian yang lain. Pada waktu yang bersamaan, korosi pada besi akan berhenti. Mekanisme ini menyebabkan korbannya anoda zinc untuk memproteksi besi (Shochib, 2013).

Struktur yang dilindungi (logam besi), akan diusahakan menjadi lebih katodik dibandingkan dengan bahan lain yang dikorbankan untuk terkorosi. Proses ini dilakukan dengan mengalirkan arus searah dari sumber lain melalui elektrolit ke permukaan material dan menghindari adanya arus yang meninggalkan pipa. Jika jumlah arus yang dialirkan diatur dengan baik, maka dapat mencegah mengalirnya arus korosi yang keluar dari anoda mengalir ke permukaan pipa, sedangkan arus akan mengalir dalam pipa pada daerah tersebut, akibatnya permukaan pipa menjadi lebih bersifat katodik, dengan demikian maka proteksi menjadi lengkap.

Mekanisme lain akan terjadi berbeda apabila kedua logam tersebut dihubungkan satu dengan lain secara elektris. Pada kasus ini, reaksi korosi difokuskan pada elektroda zinc sebagai anoda dan reaksi reduksi difokuskan lebih dominan pada elektroda besi sebagai fungsi katoda. Reaksi pada anoda zinc biasanya berjalan lebih cepat dari pada rangkaian lainnya. Pada waktu bersamaan, korosi terjadi pada besi akan berhenti. Pada kasus ini menggambarkan bahwa proses telah mengorbankan anoda zinc untuk tujuan memproteksi logam besi (Ambarwati and Bahri, 2018).

9.4.3 Jenis-jenis Proteksi Katodik

Sistem anoda korban secara umum digunakan untuk melindungi struktur di mana kebutuhan arus proteksinya kecil dan resistivitas tanah rendah. Di

samping itu sistem ini juga digunakan untuk keperluan dan kondisi yang lebih spesifik seperti:

1. Proteksi struktur di mana sumber listrik tidak tersedia.
2. Proteksi struktur pada kebutuhan arusnya relatif lebih kecil, jika ditinjau dari segi ekonomi, maka lebih menguntungkan dibandingkan dengan sistem arus tanding.
3. Proteksi pada daerah spot yang tidak dilapisi, misalnya pada daerah yang terdapat ada indikasi aktivitas korosi yang cukup tinggi.
4. Sebagai suplemen sistem arus tanding, jika dipandang arus proteksi yang ada dan kurang memenuhi syarat, biasanya terjadi pada daerah yang resistivitas tanahnya rendah seperti daerah rawa-rawa.
5. Mengurangi efek interferensi yang disebabkan karena adanya sistem arus tanding atau sumber arus searah.
6. Proteksi terhadap pipa yang akan dilapisi dengan baik, sehingga kebutuhan arus proteksi relatif kecil.
7. Proteksi yang bersifat sementara selama konstruksi pipa hingga sistem arus tanding selesai dipasang.
8. Proteksi pipa bawah laut, yang biasanya menggunakan *bracelet anode* dengan cara ditempelkan pada pipa yang dilapisi (Gebregewergis, 2020).

9.5 Pengendalian Korosi Pada Sistem Pipa

Upaya proteksi material logam dalam suatu konstruksi dimulai dari tahap pemilihan rancangan konstruksi dengan melakukan pemilihan logam yang sesuai untuk lingkungannya, diikuti dengan rancangan sistem proteksi yang tepat untuk menghindari atau meminimalkan terjadinya korosi yang berlebihan saat struktur atau instalasi digunakan. Pemilihan material logam dan sistem proteksi yang digunakan sangat bergantung pada mekanisme korosi yang mungkin terjadi, termasuk bentuk korosi logam yang mungkin dapat

3 menyerang logam di lingkungan operasinya. Agresivitas lingkungan dan keterbatasan dalam mengatasinya perlu diperkirakan dengan cermat.

Sistem proteksi katodik merupakan metoda pengendalian korosi yang menjalankan prinsip mengubah anoda menjadi katoda dengan cara menurunkan beda potensial antar-muka logam hingga mendekati atau berada pada *range* daerah imun dari korosi. Potensial struktur diturunkan dengan membanjiri instalasi dengan elektron melalui konduktor metalik atau membombardir struktur dengan arus proteksi melalui lingkungannya, sehingga tercapai potensial struktur lingkungan lebih kecil atau sama dengan kriteria potensial proteksi, yaitu *range* -850 mV pada Cu/ CuSO₄ jenuh atau -950 mV pada Cu/CuSO₄ jenuh jika tersedia bakteri pereduksi sulfat. Sistem proteksi katodik dapat dibagi menjadi dua teknik, yaitu *sacrificial anode* (anoda korban) dan *impressed current* (Sumantri and P.T., 2020).

3 Proses pengendalian korosi pada sistem pipa biasanya menggunakan sistem proteksi katodik yang dikombinasikan dengan *coating*. Akan tetapi bukan berarti dengan demikian tidak timbul masalah. Pada jalur pipa yang jaraknya bisa mencapai ratusan kilometer sangat mungkin jalur tersebut dipengaruhi oleh hubungan arus sesaat maupun interferensi seperti akibat adanya jalur pipa lain, sistem jaringan listrik, ataupun jalur kereta listrik. Adanya pengaruh tersebut dapat menyebabkan tidak efektifnya kinerja sistem proteksi katodik atau bahkan dapat mempercepat terjadinya korosi. Oleh karena itu diperlukan pemahaman dan usaha-usaha tertentu untuk menanggulangi permasalahan korosi akibat pengaruh interferensi dan arus sesaat (Sufrianti and Hamzah, 2019).

9.5.1 Pengendalian korosi celah dan sumuran

Pencegahan dan pengendalian korosi celah dan sumuran biasanya dilakukan menggunakan metode yang sama, dilakukan dengan beberapa cara, yakni:

1. Pemilihan material tahan korosi. 10 Paduan yang tahan terhadap korosi sumuran dan juga tahan korosi celah, misalnya krom, nikel dan molibdenum adalah material yang dapat meningkatkan ketahanan terhadap korosi sumuran dan korosi celah untuk baja tahan karat. Paduan nikel dengan kombinasi krom dan molibdenum dalam komposisi ideal seimbang, akan memiliki ketahanan yang lebih

baik dari baja tahan karat meskipun memiliki konsekuensi material akan lebih mahal.

2. Hindari unsur ikutan atau material pengotor, seperti adanya karbon dan sulfur, karena memiliki potensi menurunkan ketahanan paduan tahan karat. Khusus untuk paduan titanium memiliki ketahanan korosi sumuran di lingkungan yang sedikit agresif, tetapi rentan terhadap korosi celah di lingkungan yang mengandung klorida dan larutan halida lainnya pada temperatur diatas 70 oC.
3. Agresivitas larutan dapat dikurangi dengan menurunkan kandungan klorida atau derajat keasaman serta temperaturnya yang dapat menghambat aliran proses pembentukan deposit korosi, sehingga dapat mengeliminasi terakumulasinya hidrolisa produk korosi dan menurunkan pH.
4. Memberi unsur penghambat di larutan atau fungsi inhibitor. Metode ini juga merupakan salah satu alternatif untuk pengendalian korosi sumuran dan korosi celah, namun penerapan cara ini harus dipertimbangkan dan diperhitungkan dengan baik, karena apabila kandungan inhibitor yang terdapat di larutan tidak mencukupi, maka pada beberapa bagian peralatan dapat terjadi kerusakan berupa terbentuk lubang kecil dan dalam.
5. Proteksi katodik juga dapat mengendalikan korosi sumuran dan korosi celah untuk peralatan yang digunakan di lingkungan laut, tetapi cara ini tidak selalu menjadi pilihan yang memungkinkan untuk aliran proses kimia yang agresif.
6. Umumnya korosi celah dapat dikontrol melalui perencanaan dengan cara menghindari adanya celah-celah. Untuk kepentingan ini, maka dibutuhkan peralatan yang digunakan harus dilengkapi dengan saluran pembuangan dan menghindarkan daerah yang menyebabkan tertahannya atau mengendapnya larutan. Untuk mengatasinya, maka disarankan menggunakan sambungan las temu (butt-joint) pada struktur akan lebih baik diaplikasikan dibanding sambungan paku keling atau sambungan ulir.

7. Membersihkan permukaan material logam apabila memungkinkan, akan menurunkan terjadinya korosi sumuran dan korosi celah (Anwar et al., 2014).

Menghilangkan partikel padat yang dilakukan untuk meminimalkan pembentukan deposit (endapan) atau spot korosi, di mana pengendalian korosi Galvanik dapat dilakukan dengan beberapa cara, yaitu:

1. Menghindarkan terjadinya hubungan Galvanik antara logam, dengan cara memilih material yang memiliki potensial yang tidak jauh berbeda atau berdekatan pada (Galvanic Series).
2. Mengontrol Anoda, dilakukan apabila hubungan Galvanik tidak dapat dihindarkan, sehingga logam yang merupakan daerah anoda hendaknya diperluas atau dibuat lebih tebal. Secara ekonomis, akan lebih baik lagi dilakukan dengan membuat anoda menjadi bagian yang mudah diganti.
3. Memasang sekat antara dua bagian logam yang berhubungan biasanya dilakukan untuk menghindari terjadinya hubungan Galvanik yang merugikan instalasi.
4. Menghindarkan terjadinya cacat lapisan. Pada pelapisan logam hampir pasti bahwa hubungan Galvanik akan terjadi bila lapisannya pecah, oleh karena itu pada saat proses pelapisan dilakukan harus dihindarkan terjadinya cacat pelapisan yang dapat menjadi anoda yang sangat kecil sekalipun (Shochib, 2013).

9.5.2 Pengendalian Korosi Retak

Pencegahan dan pengendalian korosi retak tegang dapat dilakukan dengan cara mengeliminasi satu faktor dari tiga faktor penyebab korosi, yaitu: tegangan tarik, lingkungan kritis dan paduan yang rentan terhadap korosi.

1. Mengeliminasi tegangan tarik yang terjadi pada bagian kritis komponen atau peralatan dapat dilakukan dengan redesain. Selain itu penurunan tegangan tarik sisa pada logam dapat dilakukan dengan perlakuan panas anil.

2. Pengontrolan lingkungan dapat dilakukan dengan cara menurunkan agent oksidasi yang membuat oksigen terlarut, menghindarkan adanya unsur-unsur kritis yang terdapat pada larutan, serta memberi unsur penghambat di larutan (inhibitors). Pelapisan (coating) juga merupakan salah satu pilihan untuk membatasi interaksi logam yang dilindungi dengan lingkungannya, namun cara ini kurang efektif karena tidak dapat menahan zat kimia yang agresif.
3. Memilih paduan yang memiliki ketahanan korosi terhadap lingkungan spesifik merupakan salah satu upaya yang dilakukan. Cara ini dikombinasikan dengan pengaturan dan merubah proporsi elemen pemuat pada paduan logam, sehingga memiliki kekuatan yang lebih tinggi atau merubah struktur metalurginya, sehingga dapat meningkatkan ketahanan logam tersebut terhadap korosi retak tegang.
4. Penerapan proteksi katodik juga dapat dilakukan untuk pengendalian korosi retak tegang, namun cara ini dapat mempercepat terjadinya *hydrogen induced cracking*, sehingga tetap potensial terbentuk korosi. Karena itu penerapan proteksi katodik kurang tepat karena proteksi katodik justru efektif dilakukan pada paduan yang memiliki tegangan tinggi dan mengalami retak oleh mekanisme anodik (Utami, 2009).

9.5.3 Pengendalian Korosi Retak Fatik

Korosi retak fatik (corrosion fatigue cracking) dapat dikendalikan dengan beberapa cara, yaitu:

1. Menurunkan laju terjadinya korosi, dengan cara mengganti peralatan yang digunakan dengan paduan logam yang memiliki ketahanan korosi yang lebih baik sehingga laju korosinya menjadi lebih lambat.
2. Membatasi interaksi material logam dengan lingkungannya. Cara ini dilakukan bertujuan memberi unsur penghambat dalam larutan atau membuat lapisan pelindung yang memberi sekat antara larutan korosif dengan permukaan logam. Pelapisan anoda timbal-seng (Galvanis) untuk melindungi baja yang bersifat katodik dapat melindungi baja tersebut dari korosi retak fatik.

3. Melakukan desain ulang terhadap peralatan yang digunakan untuk menurunkan atau menghindarkan terjadinya tegangan berulang pada peralatan tersebut.
4. Melakukan proteksi katodik adalah cara lain pengendalian korosi retak fatik yang dapat dilakukan, dengan syarat dapat memastikan terhindar dari *hydrogen induced cracking*, karena pada kasus tertentu penerapan proteksi katodik tidak dapat terhindar dari pembentukan *hydrogen induced cracking*.
5. Menurunkan atau mereduksi oksidator dan meningkatkan pH larutan, bertujuan bertujuan mengendalikan retak yang disebabkan oleh hydrogen (Pratikno, 2006).

Sebenarnya ada beberapa cara yang dapat dilakukan untuk ¹⁰mengeliminasi terjadinya keretakan yang disebabkan oleh ¹⁰hidrogen (*hydrogen induced cracking*) pada material logam. Cara tersebut, antara lain:

1. ¹⁰menghilangkan sumber hidrogen atau membatasi interaksi hidrogen dengan logam. Menurunkan tegangan tarik. Penurunan tegangan tarik logam ini dapat dilakukan dengan memberikan perlakuan panas anil atau pembakaran (*baking*), karena proses tersebut dapat menghilangkan tegangan tarik sisa pada logam. Selain itu pada saat pemanasan akan terjadi peningkatan mobilitas hidrogen sehingga ¹⁰dapat melepaskan hidrogen terlarut pada logam;
2. ¹⁰menurunkan level tegangan. Penurunan level tegangan yang terjadi pada peralatan dapat dilakukan dengan merencanakan kembali ¹⁰alatan yang digunakan sesuai dengan kondisi lingkungannya;
3. ¹⁰pemaduan kembali atau memberi perlakuan panas pada logam yang digunakan, sehingga logam menjadi lebih kuat dan kemampuannya terhadap tegangan yang terjadi relatif lebih baik (Karyono, Budinto and Pamungkas, 2017).

9.6 Aplikasi Proteksi Katodik

Sistem anoda korban (Sacrificial Anode) dapat diterapkan pada pekerjaan sipil. Sistem anoda korban harus terbuat dari logam yang mempunyai potensial listrik lebih rendah dari logam yang diproteksi. Logam yang diproteksi dalam hal ini misalnya tiang pancang pipa baja. Aliran elektron (supply elektron) diharapkan dapat terjadi dan mengalir dari anoda ke katoda yang berlangsung secara kontinu sampai logam anoda yang dikorbankan habis (Pratikno, 2006).

Anoda yang digunakan pada proteksi katodik tiang pancang berbahan dasar material pipa baja dengan metoda anoda korban umumnya menggunakan logam paduan tiga jenis logam yang dikombinasi dari Magnesium, Seng, dan Aluminium. Pada prinsipnya arus yang dihasilkan anoda harus dapat mengalir pada tiang pancang pipa baja yang akan diproteksi, sehingga perlu dibuat loop tertutup dengan cara:

1. Tiang pancang pipa baja sebagai objek pada tiap bagian jembatan, satu sama lain dihubungkan antara lain dengan besi profil, besi beton ukuran yang sesuai sehingga membentuk suatu sirkuit tertutup.
2. Anoda didistribusikan secara merata pada tiang pancang pipa baja dengan jumlah sesuai kebutuhan.

Pada teknik pekerjaan sipil penempatan anoda dalam air, di mana anoda pada sistem proteksi anoda korban harus ditempatkan pada daerah di bawah permukaan air terendah agar anoda selalu terendam air, sedangkan titik penghubung atau dengan cara las, dapat bebas di atas permukaan air. Pada teknik pekerjaan sipil lainnya, misalnya pada penempatan anoda di dalam tanah atau tepat di permukaan tanah dilakukan dengan cara anoda harus ditanam atau ditempatkan tepat di permukaan tanah dasar sungai, anoda diupayakan ditanam mengikuti tekstur atau kelandaian dasar sungai (Sufrianti and Hamzah, 2019).

Evaluasi efektivitas proteksi katodik dengan teknik proteksi anoda karbon dapat di analisis pada sistem analisa efektivitas proteksi katodik anoda korban pada tiang pancang pipa baja dilihat berdasarkan pengukuran potensial yang dilakukan. Pengukuran potensial tiang pancang pipa baja dan pH air dan tanah yang menjadi lingkungan tiang pancang pipa baja tersebut. Berbagai hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem proteksi katodik anoda korban dapat mencegah korosi pada tiang pancang pipa baja apabila pada diagram potensial-pH berada pada posisi kebal dari korosi atau imun (Hermawan, 2019).

Bab 10

Proteksi Anodik

10.1 Pendahuluan

Wilayah beriklim tropis akan mudah mengalami masalah korosi. Negara Indonesia merupakan negara tropis dan merupakan negara yang sedang berkembang dengan kepadatan jumlah penduduk yang tinggi. Tingginya curah hujan dan intensitas matahari diikuti dengan paparan polusi udara menjadi faktor pemercepat terjadinya korosi. Korosi terjadi pada logam, dan pada kenyataannya banyak jenis logam yang digunakan dalam kehidupan sehari-hari. Korosi tersebut diakibatkan oleh reaksi elektrokimia pada lingkungan. Korosi ini tidak dapat dielakkan sama sekali, namun dapat dicegah. Dengan demikian, logam akan memiliki masa pakai yang lebih panjang (Sidiq, 2013).

Proteksi anodik dan katodik adalah dua di antara beberapa cara yang ditawarkan untuk mengatasi korosi. Logam akan mengalami korosi pada rentang potensial larutan dan pH tertentu. Pada potensial yang lebih negatif dari rentang ini maka korosi akan berhenti (proteksi katodik). Pada potensial yang lebih positif dari rentang ini, beberapa logam menjadi pasif. Untuk logam tersebut, potensial dapat digeser secara elektropositif ke rentang pasif melalui proteksi anodik (Munro&Shim, 2010). Teknik ini dikenal dengan teknik pencegahan elektrokimia (baik anodik maupun katodik). Pemilihan jenis ini ditentukan oleh karakteristik logam dan lingkungan.

keadaan terkorosi secara alami ke arah potensial imun atau kebal (Harsisto, dkk., 2001).

10.2 Aspek Dalam Proteksi Anodik

10.2.1 Pengertian

Proteksi anodik adalah langkah pencegahan korosi dengan cara mengontrol laju korosi pada permukaan yang akan dilindungi yaitu anoda dari sel elektrokimia. Reaksi pada anoda ini akan disertai dengan pasifasi permukaan sehingga reaksi korosi dapat dihentikan (Fernandez & Cabeza, 2019). Sistem proteksi anodik menyaratkan kondisi lingkungan harus stabil. Pada jenis lingkungan yang tidak stabil maka penerapan sistem proteksi anodik tidak dianjurkan (Yunus, 2011).

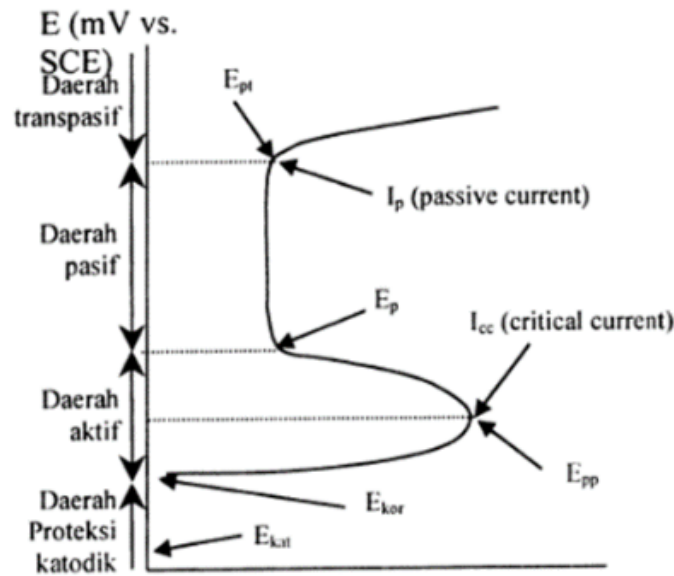
Syarat utama proteksi anodik adalah bahan yang dilindungi memiliki sifat 'aktif-pasif' di mana rentang potensial pasif cukup lebar dan arus pasif cukup rendah jika dibandingkan dengan arus korosi, dalam hal ini digunakan potensiostat. Proses pasifikasi dinyatakan selesai ketika akumulasi pembentukan lapisan oksida dari ion yang bereaksi (lapisan logam) pada permukaan anoda. Akibatnya arus yang mengalir dari anoda ke elektrolit berkurang karena lapisan logam yang terbentuk memiliki resistensi listrik yang tinggi. Sukses dari sistem proteksi anodik tidak hanya bergantung pada arus/potensial terkontrol melainkan lapisan pasif kualitas tinggi yang tidak larutan dalam larutan agresif sekalipun (Perez, 2004).

Arus anodik akan meningkatkan laju ketidaklarutan logam dan menurunkan laju pembentukan hidrogen. Logam-logam 'aktif-pasif' seperti Ni, Fe, Cr, Ti, dan paduannya. Arus yang dilewatkan pada logam dikontrol sehingga logam akan bersifat pasif dan pembentukan logam tak terlarut akan berkurang (Sidik, 2013).

Grafik pada Gambar 10.2 sebagaimana dijelaskan dalam Harsisto., dkk (2001) dapat dibagi menjadi 4 daerah, yaitu:

1. Daerah proteksi katodik, yaitu daerah antara potensial korosi alami (Ekor) hingga daerah yang lebih negatif, Ekat (potensial katodik). Dengan potensial sistem yang masuk ke dalam daerah ini

mengakibatkan logam tidak mengalami korosi yang berarti, karena sifat logam menjadi imun atau kebal terhadap lingkungan korosif.

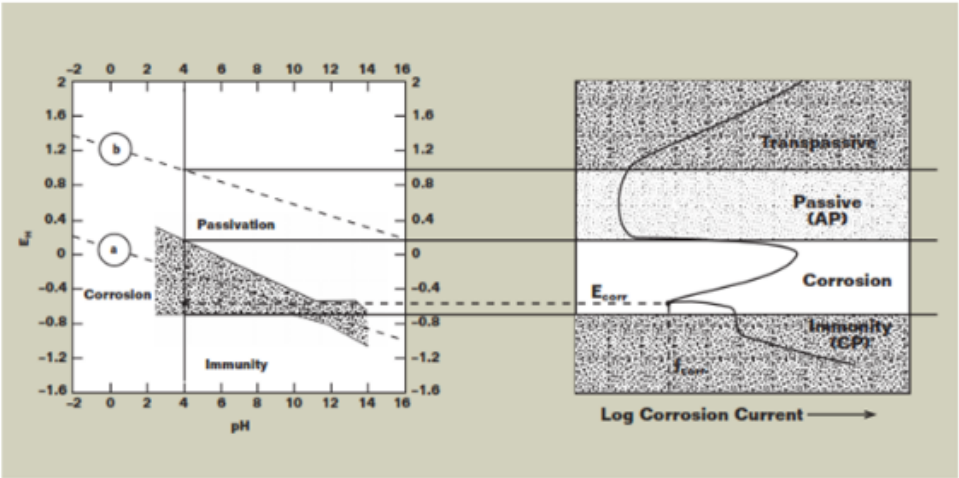


Gambar 10.2: Diagram polarisasi potensial (Harsisto, dkk., 2001)

2. Daerah aktif, yaitu daerah antara E_{kor} hingga E_p (garis batas permulaan pasif). Pada daerah potensial sistem ini, logam mengalami korosi merata yang pesat.
3. Daerah pasif, yaitu daerah antara E_{pp} hingga E_{pt} (garis batas pasif-transpasif). Apabila potensial sistem ada di daerah ini, maka dapat mengakibatkan permukaan logam menjadi pasif.
4. Daerah transpasif, adalah daerah antara E_{pt} ke atas. Pada daerah ini logam akan mengalami korosi lokal yang hebat, khususnya korosi lubang dan korosi retak.

Logam memiliki sifat transisi “aktif-pasif” ketika polarisasi dilakukan dalam arah elektropositif (Gambar 10.3). Pada keadaan ini potensial logam bergerak ke wilayah pasif ketika potensial digeser ke arah elektropositif setelah arus searah diterapkan. Lapisan permukaan pasif akan terbentuk mengakibatkan penurunan densitas arus korosi sehingga menurunkan laju korosi. Peningkatan polarisasi anoda ke wilayah transpassive dapat mengakibatkan pecahnya

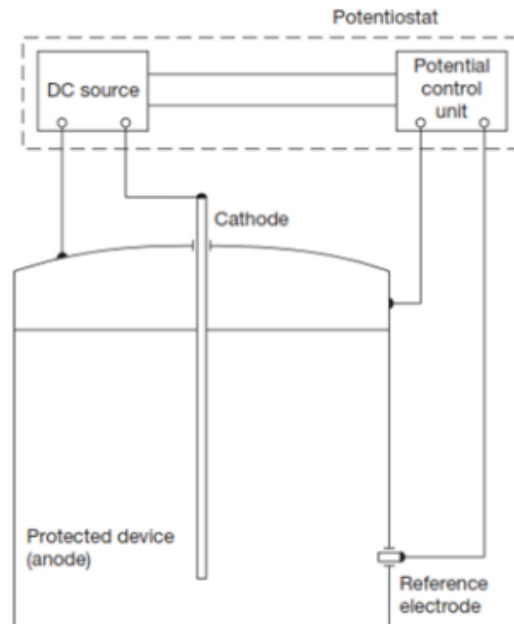
lapisan pasif dan akan memicu terjadinya korosi lubang. Durasi pasifikasi ini terjadi dengan syarat besar arus dan waktu yang digunakan bersesuaian. Apabila digunakan arus tinggi maka hanya diperlukan waktu yang singkat, demikian pula sebaliknya. Arus yang dibutuhkan untuk pasifikasi (passivate) permukaan logam biasanya lebih besar dari arus yang digunakan untuk mempertahankan (maintain) pasifikasi (Tabel 9.3).



Gambar 10.3: Diagram EH-pH dalam kaitannya dengan kurva polarisasi AP (Anodic Protection) [Munro&Shim, 2001].

10.2.2 Sistem Proteksi Anodik

Proteksi anodik ini terutama dapat diaplikasikan pada lingkungan H₂SO₄ dan basa kuat. Jenis paduan rendah daripada logam resisten korosi untuk tujuan menekan biaya operasional (Munro&Shim, 2001). Elektroda yang terlibat dalam sistem proteksi anodik adalah elektroda referensi dan katoda. Diagram alat proteksi anodik ditunjukkan pada Gambar 10.4. Elektroda referensi ini disyaratkan kompatibel dengan lingkungan korosif dan stabilitas elektrokimia dalam sistem Proteksi Anodik.



Gambar 10.4: Diagram alat proteksi anodik (Novak, 2010)

Gambar 10.4 menunjukkan diagram alat proteksi anodik. Pada gambar tersebut, dapat diamati bahwa komponen peralatannya adalah elektroda referensi, katoda, dan anoda sebagai objek yang dilindungi. Komponen listrik berupa arus DC dan unit pengontrol potensial dijaga kestabilannya dengan menggunakan *potensiostat*. Penjelasan ketiga komponen tersebut disampaikan oleh Novak (2010).

Katoda

Pengaliran arus polarisasi permukaan logam yang diproteksi secara anoda dipastikan dengan penggunaan elektroda pembantu yang dihubungkan dengan kutub negatif dari arus searah (Direct Current, DC). Material ini harus memiliki ketahanan yang tinggi, memiliki sifat mekanik yang sesuai, konduktivitas listrik tinggi, *overvoltage* reaksi katodik rendah dan harga yang terjangkau (Novak, 2010).

Pemilihan material katoda didasarkan stabilitas pada lingkungan. Elektroda ini harus *inert* dan terlindungi katodanya dengan arus yang digunakan. Permukaan katoda yang luas lebih disukai agar mengurangi penggunaan energi. Besar dan jumlah katoda akan ditentukan oleh resistensi sirkuit dan distribusi arus (Riggs & Locke, 1981). Tabel 9.1 menunjukkan beberapa jenis bahan katoda yang

dapat digunakan untuk Proteksi Anodik disertai dengan jenis lingkungan di mana elektroda tersebut dapat diaplikasikan.

Tabel 10.1: Bahan Katoda untuk Proteksi Anodik (Locke, 1987)

Elektroda	Lingkungan
Kalomel	Asam Sulfat
Silikon berlapis Besi	Asam Sulfat
Perak-Perak Klorida	Asam Sulfat, Cairan Kraft
Tembaga	Hidroksilamin sulfat
Stainless steel	Pupuk Cair (larutan nitrat)
Nikel-Plat Baja	Bahan kimia larutan pelapis Nikel
Hastelloy	Pupuk Cair, Asam sulfat

Elektroda Referensi

Elektroda ini berperan untuk menjaga potensial dari keseluruhan permukaan yang dilindungi dalam rentang potensial *passivity*. Elektroda ini merupakan bagian yang tetap dalam proteksi anodik, yang berperan sebagai sensor pengukuran potensial. Pada praktiknya elektroda referensi dibebankan dengan arus yang berhubungan dengan input resistensi dari potensial pengontrol dan selisih potensial antara elektroda referensi dan alat yang dilindungi.

Secara umum, elektroda ini dapat dibagi menjadi dua, elektroda jenis pertama dan elektroda jenis kedua. Elektroda jenis pertama adalah elektroda, di mana reaksi transfer muatan terjadi antara komponen elektrolit atau antara elektroda dan komponen elektrolit. Elektroda jenis kedua adalah elektroda yang mengubah muatan melalui garam/oksida tak larut. Mayoritas elektroda yang digunakan dalam sistem Proteksi Anodik adalah elektroda jenis kedua, seperti elektroda kalomel, perak klorida, merkuri sulfat untuk lingkungan asam sulfat dan elektroda merkuri oksida untuk lingkungan basa. Tabel 9.2 menunjukkan beberapa jenis elektroda referensi yang dapat digunakan untuk Proteksi Anodik dalam bidang industri. Tabel 9.3 menunjukkan persyaratan arus untuk Proteksi Anodik.

Peralatan Listrik

Sumber arus searah (DC) dihubungkan dengan konduktor pada komponen sistem Proteksi Anodik dan peralatan pelindung yang digunakan dalam Proteksi Anodik untuk polarisasi permukaan yang dilindungi dalam rentang pasifitas. Pengembangan alat listrik untuk sistem Proteksi Anodik ke arah

teknologi digital. Kontrol dan operasi diamankan dengan penggunaan komputer atau mikroprosesor.

Tabel 10.2: Elektroda Referensi untuk Proteksi Anodik Industri (Novak, 2010)

Elektroda	Lingkungan
Kalomel (Hg/HgCl ₂)	Asam Sulfat Amonium nitrat-urea Larutan basa <i>Universal</i>
Merkurosulfat (Hg/HgSO ₄)	Asam Sulfat Hidroksilamoniumsulfat
Perak-Perak Klorida (Ag/AgCl)	Asam Sulfat Amonium nitrat-urea <i>Universal</i>
Perak Sulfida (Ag/Ag ₂ S)	<i>Kraft liquour</i>
Platina (Pt/PtO ₂)	Asam sulfat Asam posfat Campuran Pupuk
Emas (Au/Au ₂ O ₃)	Asam sulfat Asam posfat
Molybdenum (Mo/MoO ₃)	Natrium hidroksida Asam sulfat Asam posfat
Bismut (Bi)	Lingkungan amonia
Nikel (Ni)	Nikel tanpa listrik Natrium hidroksida Campuran Pupuk
Silikon (Si)	Campuran Pupuk
Kromium (Cr)	Campuran Pupuk
Passive austenitic steel	Amonium nitrat
FeCr18Ni10	Natrium hidroksida
Besi Silikon	Asam sulfat
Merkurooksida (Hg/HgO)	Natrium hidroksida
Merkuroposfat (Hg/Hg ₃ PO ₄)	Asam posfat
Wolfram (W/WO ₃)	Asam sulfat
Grafit	Lingkungan amonia Amonium nitrat-urea

Tabel 10.3: Persyaratan Arus Proteksi Anodik (Riggs & Locke, 1981)

Larutan	Konsentrasi, %	Suhu, °C	Logam	Passivate		Maintain	
				mA/ft ²	mA/cm ²	mA/ft ²	mA/cm ²
Oleum		25	Baja Karbon	120	2,640	0,15	0,00380
Asam sulfat	93-98	25	Baja Karbon	120	2,640	1,80	0,03960
Asam sulfat	90-94	20	316 SS	2	0,044		
Asam sulfat	78	25	Baja Karbon			0,90	0,00198
Asam sulfat	78	25	Baja Karbon	140	3,080	2,50	0,05500
Amonium hidroksida	25	25	Baja Karbon	1850	40,070	0,22	0,00484
Asam oksalat	0,1 M	20	Baja Karbon			5,80	0,12760
Larutan pupuk		20	Baja Karbon			0,46	0,001012
Asam sulfat	93	60	316L			0,40	0,00880
Asam sulfat	67	25	317	164	3,608	0,09	0,00198

10.3 Beberapa Penelitian Proteksi Anodik

Fernandez & Cabeza (2019) telah melakukan proteksi katoda dan anoda pada lelehan garam klorida untuk pembangkit tenaga surya terkonsentrasi (Concentrated Solar Power Plant). Proteksi anoda yang dilakukan dalam penelitian tersebut adalah penggunaan *Alumina Forming Alloy*. Material ini digunakan karena pembentukan lapisan protektif alumnina dibandingkan dengan krom digunakan pada *stainless steel*. Beberapa material uji yang menunjukkan kemampuannya adalah *stainless steel* AISI 304, AFA OC-4, OC-7, dan material berbasis Nikel, HR224 dan In702. Publikasi oleh peneliti yang sama pada tahun 2020, menunjukkan bahwa proteksi anodik dapat dihasilkan dari lapisan MgAl₂O₃. Material ini berperan sebagai pelindung pada alloy alumina.

Proteksi anoda dilakukan pula dengan cara meningkatkan potensial logam untuk pengembangan lapisan tipis pasif pada permukaan yang dibentuk oleh oksida dari logamnya. Lapisan oksida berperan sebagai pelindung untuk mengisolasi permukaan subtract dari elektrolit. Penelitian Silvia et al. (2014)

menggunakan *binder polianilin* dan mengombinasikannya dengan cat *nitrosellulosa* yang disebut sebagai *smart paint*. Material ini digunakan untuk melapisi *stainless steel* AISI 1006 sehingga terjadi pasifikasi substrat logam dan pada akhirnya dapat melindungi dari korosi.

Penelitian Harsisto, dkk. (2001) telah melakukan pengujian terkait kinerja proteksi anodik baja ASTM A 516-60 dan JIS G 3131-SPHC dalam asam sulfat pekat. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa nilai potensial sel yang menunjukkan terjadinya proteksi berbeda untuk tiap konsentrasi larutan asam sulfat yang digunakan sebagai media uji terhadap kedua jenis baja.

Bab 11

Inhibitor

5

11.1 Pendahuluan

Logam dan paduannya telah banyak digunakan secara luas di dalam berbagai bidang industri, meskipun material ini mudah terkorosi di dalam media korosif. Baja karbon rendah merupakan salah satu jenis logam tersebut. Namun demikian baja karbon rendah ini memiliki kelemahan terutama terhadap ketahanan korosi terutama jika diaplikasikan pada lingkungan korosif. Korosi dapat diartikan sebagai penurunan mutu logam akibat reaksi elektrokimia dengan lingkungannya. Tetapi bila kerusakan tersebut aksi mekanis, seperti penarikan, pembengkakan atau patah, maka hal ini tidak disebut peristiwa korosi. Korosi dapat digambarkan sebagai sel galvanik yang mempunyai “hubungan pendek” di mana beberapa daerah permukaan logam bertindak sebagai katoda dan lainnya sebagai anoda, dan “rangkain listrik” dilengkapi oleh rangkaian elektron menuju besi itu sendiri.

Korosi logam adalah salah satu masalah penting yang dihadapi oleh kelompok industri maju. Diperkirakan bahwa di Amerika Serikat saja biaya tahunan untuk korosi mencapai sepuluh milyar dolar. Korosi atau secara awam dikenal sebagai pengarat, merupakan suatu peristiwa kerusakan atau penurunan kualitas suatu bahan logam yang disebabkan oleh terjadi reaksi dengan lingkungan. Proses korosi logam berlangsung secara elektrokimia yang terjadi

secara simultan pada daerah anoda dan katoda yang membentuk rangkaian arus listrik tertutup.

5

Masalah korosi merupakan suatu gejala degradasi kualitas permukaan suatu material yang prosesnya berjalan lambat. Namun demikian tidak ditangani akan menyebabkan banyak kerugian. Peristiwa korosi dapat terjadi di mana saja. Dari peristiwa korosi yang terjadi, dapat menimbulkan kerusakan yang mengakibatkan kerugian baik secara ekonomi maupun keamanan. Menurut Jones (1997), dalam banyak hal, korosi tidak dapat dihindarkan. Hampir semua material apabila berinteraksi dengan lingkungannya secara perlahan tapi pasti, akan mengalami degradasi mutu bahan, pengertian ini didefinisikan sebagai korosi. Proses korosi merupakan suatu gejala alamiah yang merupakan konsekuensi dari siklus hidup.

12

Proses pencegahan korosi dapat dilakukan, di antaranya dengan pelapisan pada permukaan logam, perlindungan katodik, penambahan inhibitor korosi dan lain-lain. Inhibitor korosi sendiri didefinisikan sebagai suatu zat yang apabila ditambahkan dalam jumlah sedikit ke dalam lingkungan akan menurunkan serangan korosi lingkungan terhadap logam. Umumnya inhibitor korosi berasal dari senyawa organik dan anorganik yang mengandung gugus-gugus yang memiliki pasangan elektron bebas, seperti nitrit, kromat, fosfat, urea, fenilalanin, imidazolin, dan senyawa-senyawa amina. Namun demikian, pada kenyataannya bahwa bahan kimia sintesis ini merupakan bahan kimia yang berbahaya, harganya lumayan mahal, dan tidak ramah lingkungan, maka sering industri-industri kecil dan menengah jarang menggunakan inhibitor pada sistem pendingin, sistem pemipaan, dan sistem pengolahan air produksi mereka, untuk melindungi besi/baja dari serangan korosi. Untuk itu penggunaan inhibitor yang aman, mudah didapatkan, bersifat *biodegradable*, biaya murah, dan ramah lingkungan sangatlah diperlukan.

11.2 Inhibitor Korosi

Secara umum suatu inhibitor adalah suatu zat kimia yang dapat menghambat atau memperlambat suatu reaksi kimia. Inhibitor dapat juga dikatakan sebagai suatu zat yang bila ditambahkan (additive) dalam jumlah kecil pada suatu lingkungan yang korosif akan menurunkan laju korosi tersebut. Sedangkan inhibitor korosi adalah suatu zat kimia yang bila ditambahkan ke dalam suatu lingkungan, dapat menurunkan laju penyerangan korosi lingkungan itu

terhadap suatu logam. Mekanisme penghambatannya terkadang lebih dari satu jenis. Sejumlah inhibitor menghambat korosi melalui cara adsorpsi untuk membentuk suatu lapisan tipis yang tidak tampak dengan ketebalan beberapa molekul saja, ada pula yang karena pengaruh lingkungan membentuk endapan yang tampak dan melindungi logam dari serangan yang mengkorosi logamnya dan menghasilkan produk yang membentuk lapisan pasif, dan ada pula yang menghilangkan konstituen yang agresif. Terdapat 6 jenis inhibitor, yaitu inhibitor yang memberikan pasivasi anodik, pasivasi katodik, inhibitor ohmik, inhibitor organik, inhibitor pengendapan, dan inhibitor fasa uap (id.wikipedia.org).

1 Salah satu cara untuk meminimalkan efek degradasi material yang sering digunakan adalah dengan penggunaan inhibitor. Inhibitor berfungsi untuk memperlambat reaksi korosi yang bekerja dengan cara membentuk lapisan pelindung pada permukaan logam. Lapisan molekul pertama yang terbentuk mempunyai ikatan yang sangat kuat yang disebut *chemis option*. Inhibitor umumnya berbentuk cairan yang diinjeksikan pada *production line*. Karena inhibitor tersebut merupakan masalah yang penting dalam menangani korosi maka perlu dilakukan pemilihan inhibitor yang sesuai dengan kondisinya.

Inhibitor digunakan untuk melindungi bagian dalam struktur dari serangan korosi yang diakibatkan oleh fluida yang mengalir atau tersimpan di dalamnya. Inhibitor biasanya ditambahkan sedikit dalam lingkungan asam, air pendingin, uap, maupun lingkungan lain. Keuntungan menggunakan inhibitor antara lain; menaikkan umur struktur atau bahan, mencegah berhentinya suatu proses produksi, mencegah kecelakaan akibat korosi, menghindari kontaminasi produk dan lain sebagainya.

Penggunaan inhibitor hingga saat ini masih menjadi solusi terbaik untuk melindungi korosi internal pada logam, dan dijadikan sebagai pertahanan utama industri proses dan ekstraksi minyak. Inhibitor merupakan metode perlindungan yang fleksibel, yaitu mampu memberikan perlindungan dari lingkungan yang kurang agresif sampai pada lingkungan yang tingkat korosifitasnya sangat tinggi, mudah diaplikasikan dan tingkat keefektifan biayanya paling tinggi karena lapisan yang terbentuk sangat tipis sehingga dalam jumlah kecil mampu memberikan perlindungan yang luas (Terms dan Zahrani, 2006).

5 Inhibitor menghambat korosi melalui cara modifikasi polarisasi katodik dan anodik, mengurangi pergerakan ion ke permukaan logam, menambah

5 hambatan listrik pada permukaan logam dan menangkap atau menjebak zat korosif dalam larutan melalui pembentukan senyawa tidak agresif.

Inhibitor korosi dapat menurunkan laju korosi yang terjadi pada lingkungan tersebut terhadap suatu logam di dalamnya. Pada praktiknya, jumlah yang ditambahkan adalah sedikit, baik secara kontinu maupun periodik menurut suatu selang waktu tertentu (Agung Akhmad Gumelar, 2011). Inhibitor korosi menurut bahan pembuatannya dibagi menjadi dua yaitu inhibitor dengan bahan baku alami dan inhibitor buatan. Inhibitor alami yaitu inhibitor yang terbuat dari bahan organik yang dapat diperbarui seperti contohnya tanaman dan buah buahan. Secara keseluruhan senyawa inhibitor adalah netral tetapi, gugus nitrogen pada senyawa memiliki pasangan elektron bebas yang menyebabkan inhibitor cenderung bermuatan negatif sehingga, inhibitor akan tertarik ke permukaan logam dan membentuk lapisan (Andy Kristian dan Setyo Purwanto, 2015).

8 Salah satu metode untuk meminimalkan korosi adalah dengan menggunakan inhibitor korosi. Inhibitor korosi adalah suatu zat kimia yang bila ditambahkan ke dalam lingkungan yang korosif, secara efektif dapat menurunkan laju korosi (Roberge, 2000). Inhibitor korosi digunakan secara luas dalam berbagai penerapannya. Sebagai contoh pabrik pengolahan minyak bumi dan petrokimia, pipa saluran yang membawa produk minyak bumi dan gas, pengeboran minyak bumi dan pengumpul cairan, air minum, pendingin air, sistem desalinasi, sistem asam, mobil dan lingkungannya, bahan kimia pertanian, pipa saluran bubur batubara, baja tulangan dalam beton, pusat energi atom dan nuklir. Meskipun demikian, susunan kimia kebanyakan inhibitor korosi adalah bukan pengetahuan umum dan biasanya ditangani sebagai informasi yang diproteksi oleh perusahaan perusahaan kimia. Literatur teknik yang didistribusikan oleh perusahaan perusahaan inhibitor tidak menjelaskan metode penerapan inhibitor atau mekanisme proses inhibisi korosinya.

Di dalam praktik, inhibitor korosi digunakan terutama untuk pengendalian korosi dalam sistem tertutup, sebagai suatu alternatif-biaya yang efisien terhadap penggunaan bahan/material yang sangat tahan korosi. Kriteria praktis untuk pemilihan inhibitor korosi dari berbagai zat/senyawa anorganik dan organik dengan sifat-sifat inhibisinya tidak hanya efisiensi inhibisinya tetapi juga keamanan penggunaan, kendala ekonomi, kesesuaian dengan bahan kimia yang lain di dalam sistem dan masalah lingkungan (Magnussen, 2003).

8

Sebagai contoh garam-garam kromat dan zinc merupakan inhibitor-inhibitor anorganik yang sangat efisien, kurang/sedikit digunakan karena toksisitasnya dan diganti secara besar-besaran dengan inhibitor organik yang merupakan senyawa-senyawa organik.

4

Inhibitor dapat menurunkan laju disolusi anodik hanya jika memengaruhi kinetika proses elektrokimia pada proses tersebut. Inhibitor korosi untuk sistem pendingin misalnya akan larut dalam air dan membentuk suatu lapisan pada permukaan logam. Lapisan semacam ini akan melindungi permukaan dan menghambat terjadinya/ berlangsungnya reaksi korosi dengan cara mencegah reduksi dari oksigen terlarut atau lebih dikenal sebagai mencegah hidrasi logam. Berdasar hal ini dapat diklasifikasikan dalam beberapa kelompok: Inhibitor anodik menaikkan polarisasi anodik (over potensial) dan menggeser kurva polarisasi anodik keatas dengan cara membentuk lapisan pasif pada permukaan logam yang intinya menghambat korosi pada lapisan oksida.

Contoh tipe ini adalah *cromat* dan *nitrit* atau biasa disebut *passivation*. Dengan adanya inhibitor ini untuk *carbon steel* akan dinaikkan potensial korosinya pada tingkat yang lebih tinggi dengan cara mengoksidasi ion ferro pada proses korosi. Dengan demikian akan terbentuk lapisan tipis tak berpori pada permukaan logam dan kelemahannya jika lain waktu pemberian inhibitor dikurangi atau konsentrasinya menurun akibatnya *passivation* ini menjadi tidak aktif/melemah sehingga gampang terkena korosi lagi. Peningkatan korosi yang bersifat lokal disebabkan oleh karena tidak memadainya inhibitor yang ditambahkan ke dalam elektrolit, pengenceran elektrolit sesudah inhibitor ditambahkan dan tingginya konsentrasi ion-ion depolarisasi seperti sulfat atau klorida yang ditambahkan untuk mengurangi kegunaan inhibitor dalam larutan. Inhibitor katodik merupakan jenis lapisan endapan yang akan membentuk lapisan pelindung pada katoda setempat di mana ion ion OH dihasilkan oleh korosi reaksi katoda.

Polifosfat adalah penghambat korosi tipe endapan khusus yang akan bersenyawa dengan ion-ion kalsium di dalam air serta ion-ion seng yang ditambahkan sebagai penghambat korosi. Polipospat ini akan membentuk lapisan pelindung pada permukaan logam yang tidak larut dalam air dan menunjukkan efek penghambat korosi. Sebagai suatu lapisan pelindung yang terbentuk dari kalsium fosfat, akan mudah terbentuk pada lingkungan yang bersuasana basa. Dalam beberapa hal, jenis inhibitor ini lebih berpori dan kurang efektif dibanding dengan inhibitor anodik. Jika inhibitor jenis ini ditambahkan dengan konsentrasi yang tinggi dengan maksud untuk lebih

meningkatkan efektivitasnya, maka lapisan pelindung yang terbentuk menjadi tebal dan sering kali menimbulkan masalah terbentuknya kerak. Oleh karena itu penggunaan inhibitor sebagai penghambat korosi konsentrasinya harus selalu dikontrol. Inhibitor adsorpsi mempunyai gugus fungsional hidrofob. Inhibitor jenis ini mencegah korosi dengan mengabsorbi pada permukaan logam yang masih bersih dengan gugus fungsionalnya dan akan memperlambat difusi air dan oksigen terlarut pada permukaan logam oleh gugus-gugus hidrofob. Pada sistem air pendingin inhibitor ini kurang efektif karena biasanya permukaan baja karbon tidak bersih, sehingga pembentukan lapisan adsorpsi yang sempurna sulit terbentuk.

Bila logam dilapisi dengan cat ataukah lapisan non konduktif lainnya maka kontak logam dengan media korosif akan terhindar dan kecepatan reaksi anodik katodik dapat ditekan sehingga korosi dapat dicegah. Begitu pula halnya dengan menambahkan inhibitor ke dalam media korosif, inhibitor korosi adalah suatu aditif yang akan menurunkan tingkat korosifitas media, melalui penetralisan media korosif dan pembentukan lapisan.

11.3 Mekanisme Inhibitor

Korosi baja adalah penurunan kualitas baja karena terjadinya reaksi kimia atau elektrokimia, antara baja dengan lingkungannya, sebagai contoh; apabila baja dicelupkan dalam air akan terlihat bagian baja yang terkorosi (berkarat). Bagian baja yang terkorosi disebut anodik dan bagian baja yang tidak terkorosi disebut katodik.

Reaksi-reaksi elektrokimia terjadi dalam lingkungan netral:

Pada anoda: $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ (reaksi oksidasi)

Pada katoda: $\text{H}_2\text{O} + \frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{OH}^-$ (reaksi reduksi)

Reaksi total: $\text{Fe} + \frac{1}{2} \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{OH}^-$

$\text{Fe}^{2+} + 4\text{OH}^- \rightarrow 2\text{Fe}(\text{OH})_2$

$2\text{Fe}(\text{OH})_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow 2\text{FeO}(\text{OH}) + \text{H}_2\text{O} \rightarrow (2\text{H}_2\text{O} + \text{Fe}_3\text{O}_4)$ Di

mana senyawa Fe_3O_4 merupakan produk karat.

Sejumlah inhibitor menghambat korosi melalui cara adsorpsi untuk membentuk suatu lapisan tipis yang tidak tampak dengan ketebalan beberapa

molekul saja, ada pula yang karena pengaruh lingkungan membentuk endapan yang tampak dan melindungi logam dari serangan yang mengkorosi logamnya dan menghasilkan produk yang membentuk lapisan pasif, dan ada pula yang menghilangkan konstituen yang agresif.

¹ Saat telah banyak dikembangkan berbagai jenis inhibitor baik organik maupun anorganik. Salah jenis inhibitor yang banyak digunakan adalah inhibitor anorganik dengan berbagai bahan dasar. Ada berbagai jenis inhibitor sintesis yang sekarang banyak digunakan untuk menggantikan inhibitor anorganik konvensional seperti HBTB (hydroxy-benzylidene)-amino]-2-thioxo-thiazolidin-4-one), DHBTPH (N-(3,4-dihydroxybenzylidene)-3-[[8-(trifluoromethyl)quinolin-4-yl]thio]propanohydrazide), BMIC (Alkaloid, 1-butyl-3-methylimidazolium chlorides), [BMIM]HSO₄ (1-butyl-3-methylimidazolium hydrogen sulfate), Calcium Gluconate, PEGME (Polyethylene Glycol Methyl Ether) dan lain-lain.

Bahan inhibitor dengan menggunakan HIBTT, dimaksudkan untuk memperbaiki efisiensi dari bahan Rhodanine beserta turunannya yang telah memberikan hasil yang cukup baik ketika diaplikasikan pada material baja karbon rendah. Molekul inhibitor HIBTT yang pertama kali akan diserap pada permukaan baja karbon rendah dan menahan reaksi kimia yang terjadi pada permukaan material dengan fluida yang mengalir (Doner dkk, 2012).

Molekul inhibitor HIBTT (Hydroxy-Benzylideneamino-Thioxo-Thiazolidin) tersebut akan terserap pada permukaan baja karbon rendah baik pada reaksi anodik maupun katodik. Reaksi yang timbul dari HIBTT pada baja karbon rendah seperti penggunaan dua jenis inhibitor yang digunakan secara bersamaan. Namun demikian penggunaan inhibitor jenis ini menunjukkan hasil yang lebih baik jika digunakan dengan konsentrasi yang tinggi dan akan menurun seiring dengan lamanya waktu penggunaan HIBTT. Ditinjau dari ada energi Gibbs antara molekul HIBTT dengan permukaan baja karbon rendah juga menunjukkan adanya interaksi yang kuat, sehingga dengan penambahan inhibitor ini dengan konsentrasi larutan yang tepat akan menghasilkan lapisan pelindung terhadap korosi pada permukaan baja karbon rendah (Done dkk, 2012).

Selanjutnya DHBTPH (Dihydroxybenzylidene-Trifluoromethyl-Thio Propano Hydrazide) merupakan jenis bahan inhibitor jenis baru yang digunakan untuk menahan serangan korosi pada baja karbon rendah. Dari pengamatan reaksi baik pada katodik dan anodik terlihat bahwa reaksi kimia pada reaksi anodik

5 lebih besar daripada reaksi katodik. Penggunaan DHBTPH sebagai inhibitor tergantung pada temperatur operasional dan jumlah kandungan zat tambahan untuk mengurangi laju korosi. Reaksi inhibitor ini baik jika dilakukan dalam reaksi yang isothermis (Saliyan dan Adhikari, 2008).

1 Jenis inhibitor korosi yang lain adalah BMIC (Alkaloid, 1-butyl-3-methylimidazolium chlorides) dan [BMIM]HSO₄ (1-butyl-3-methylimidazolium hydrogen sulfate) yang digunakan secara bersama-sama. Kedua jenis inhibitor ini semakin baik dan efektif untuk mencegah terjadinya korosi jika konsentrasinya dinaikkan. Namun dalam aplikasinya konsentrasi BMIC harus lebih tinggi jika dibandingkan dengan [BMIM]HSO₄. Reaksi yang terjadi antara larutan inhibitor dan permukaan baja karbon rendah berlangsung secara spontan dan exothermis. (Zhang dan Hua, 2008)

Calcium Gluconate juga dapat digunakan sebagai inhibitor untuk mencegah korosi pada baja karbon rendah. Namun dalam aplikasinya jenis inhibitor ini harus digunakan kondisi pH netral. Aktivitas inhibitor akan semakin naik meningkat dengan meningkatnya konsentrasi gluconate pada pH 6 dan akan semakin menurun dengan menurunnya kadar pH fluida. Dalam kondisi basa, efektivitas *Calcium Gluconate* menunjukkan hasil yang semakin baik terutama jika digunakan dalam waktu yang cukup lama. Penggunaan jenis inhibitor ini menunjukkan baik untuk fluida berbasis air. (Karim dkk, 2010).

Bahan kimia lainnya yang bisa digunakan sebagai larutan inhibitor untuk mencegah korosi pada baja karbon rendah adalah Poly Ethylene Glycol Methyl Ether (PEGME) yang memiliki rumus kimia CH₃(OCH₂CH₂)_nOH. Penggunaan PEGME sebagai larutan inhibitor dalam lingkungan asam menunjukan hasil yang sangat baik dan sangat efektif untuk mengatasi masalah korosi pada material baja karbon rendah (Dubey dan Singh, 2007). Efisiensi inhibitor korosi dengan menggunakan bahan PEGME ini akan semakin baik dengan meningkatnya konsentrasi PEGME yang digunakan.

6 11.4 Pencegahan Korosi Dengan Inhibitor

Korosi dapat dikurangi dengan berbagai macam cara, cara yang paling mudah dan paling murah adalah dengan menambahkan inhibitor ke dalam media.

Inhibitor adalah senyawa yang bila ditambahkan dengan konsentrasi yang kecil ke dalam lingkungan elektrolit, akan menurunkan laju korosi. Inhibitor dapat dianggap merupakan katalisator yang memperlambat (retarding catalyst). Pemakaian inhibitor dalam suatu sistem tertutup atau sistem resirkulasi, pada umumnya hanya dipakai sebanyak 0.1% berat.

Inhibitor yang ditambahkan akan menyebabkan:

1. Meningkatnya polarisasi anoda
2. Meningkatnya polarisasi katoda
3. Meningkatnya bahan tahanan listrik dari sirkuit oleh pembentukan lapisan tebal pada permukaan logam

Umumnya inhibitor korosi berasal dari senyawa organik dan anorganik yang mengandung gugus-gugus yang memiliki pasangan elektron bebas, seperti nitrit, kromat, fosfat, urea, fenilalanin, imidazolin, dan senyawa-senyawa amina. Namun demikian, pada kenyataannya bahwa bahan kimia sintesis ini merupakan bahan kimia yang berbahaya, harganya lumayan mahal, dan tidak ramah lingkungan, maka sering industri-industri kecil dan menengah jarang menggunakan inhibitor pada sistem pendingin, sistem pemipaan, dan sistem pengolahan air produksi mereka, untuk melindungi besi/baja dari serangan korosi. Untuk itu penggunaan inhibitor yang aman, mudah didapatkan, bersifat *biodegradable*, biaya murah, dan ramah lingkungan sangatlah diperlukan.

Inhibitor dari ekstrak bahan alam adalah solusinya karena aman, mudah didapatkan, bersifat *biodegradable*, biaya murah, dan ramah lingkungan. Ekstrak bahan alam khususnya senyawa yang mengandung atom N, O, P, S, dan atom-atom yang memiliki pasangan elektron bebas. Unsur-unsur yang mengandung pasangan elektron bebas ini nantinya dapat berfungsi sebagai ligan yang akan membentuk senyawa kompleks dengan logam.

Ekstrak daun tembakau, teh dan kopi dapat efektif sebagai inhibitor pada sampel logam besi, tembaga, dan aluminium dalam medium larutan garam. Keefektifan ini diduga karena ekstrak daun tembakau, teh, dan kopi memiliki unsur nitrogen yang berfungsi sebagai pendonor elektron terhadap logam Fe^{2+} untuk membentuk senyawa kompleks. Kopi mengandung kafein yang merupakan alkaloid yang mempunyai cincin purin dan merupakan derivat dari metil xanthine (1,3,7-trimetil xanthine) dengan BM 194,14, specific gravity 1,23. Rumus molekul dari kafein adalah $\text{C}_8\text{H}_{10}\text{N}_4\text{O}_2$. Ekstrak daun tembakau, lidah buaya, daun pepaya, daun teh, dan kopi dapat efektif

12

menurunkan laju korosi *mild steel* dalam medium air laut buatan yang jenuh CO₂. Lidah buaya mengandung aloin, aloenin, aloesin dan asam amino. Daun pepaya mengandung N-asetil-glukosaminida, benzil isotiosianat, asam amino.

Efektivitas ekstrak bahan alam sebagai inhibitor korosi tidak terlepas dari kandungan nitrogen yang terdapat dalam senyawa kimianya seperti daun tembakau yang mengandung senyawa-senyawa kimia antara lain nikotin, hidrazin, alanin, quinolin, anilin, piridin, amina, dan lain-lain. Sedangkan daun teh dan kopi banyak mengandung senyawa kafein di mana kafein dari daun teh lebih banyak dibandingkan kopi (www.chem-is-try.org).

11.5 Inhibitor Alami (Organik)

5

Inhibitor korosi menurut bahan dasarnya, dapat dibagi menjadi dua, yaitu inhibitor dari senyawa organik dan dari senyawa anorganik (Widharto,1999). Inhibitor organik pada umumnya berasal dari ekstrak bahan alami yang mengandung atom N, O, P, S dan atom-atom yang mempunyai pasangan elektron bebas. Inhibitor anorganik yang saat ini biasa digunakan adalah sodium nitrit, kromat, fosfat, dan garam seng (Hatch,1984).

Beberapa bahan alami inhibitor antara lain:

1. Daun teh memiliki beberapa kandungan penting yang sangat berguna bagi manusia. Beberapa kandung yang dimaksud antara lain kafein, theofilin, tanin, adenine, minyak atsiri, kuersetin, naringenin, dan natural fluoride. Daun teh mengandung sekitar 2-4% senyawa kafein. Sedangkan di dalam daun teh terdapat kandungan zat tanin sekitar 8-18% di dalamnya (Afithroni Lubis Habibie dan Aisyah Endah Palupi, 2014).
2. Daun jambu biji (*Psidium guajava*) merupakan tanaman yang berasal dari Amerika, banyak ditanam sebagai tanaman buah-buahan yang tumbuh pada ketinggian 1-1.2 m di atas permukaan laut dan merupakan tanaman perdu atau pohon kecil, tinggi tanaman umumnya 3-10 m (M.Luki Yudha Akhsan, 2015). Kandungan kimia yang terdapat dalam jambu biji yaitu buah, daun, dan kulit batang pohon jambu biji mengandung tanin. Sedangkan pada bunganya tidak

banyak mengandung tanin. Daun Jambu biji juga mengandung zat lain seperti minyak atsiri, asam ursolat, asam psidiolat, asam kratogolat, asam oleanolat, asam guajaverin, dan vitamin. Daun jambu biji yang digiling halus diketahui mempunyai kandungan tanin sampai 17% (A Rasyid Fachry, RM.Arief Sastrawan, dan Guntur Svingkoe, 2012).

3. Kedelai Kedelai (*Glycine max* (L.) Merril) merupakan tanaman pangan turunan kedelai jenis liar *Glycine Ururiencis* berbentuk semak yang tumbuh tegak. Kandungan nutrisi yang terdapat dalam kedelai adalah energi, karbohidrat, gula, serat, lemak, protein, asam amino, dll. Kandungan asam amino dalam kacang kedelai cukup tinggi yaitu sekitar 42% dari total berat keringnya.
4. Kopi Tanaman kopi (*Coffea* sp.) termasuk familia Rubiaceae dan merupakan tanaman tropis yang banyak diperdagangkan di dunia. Tanaman kopi memiliki kandungan senyawa kafein yang dapat digunakan sebagai bahan untuk pembuatan inhibitor korosi dari bahan alami
5. Tanin merupakan senyawa organik yang sangat kompleks dan banyak terdapat pada bermacam-macam tumbuhan. Tanin merupakan suatu senyawa kompleks dalam bentuk campuran polifenol yang sukar dipindahkan (A Rasyid Fachry, RM.Arief Sastrawan, dan Guntur Svingkoe, 2012). Tanin kaya akan senyawa polifenol yang mampu menghambat proses oksidasi sehingga laju korosi dapat menurun.
6. Kafein Inhibitor kafein merupakan inhibitor organik sehingga, proses penginhibisi nya disebabkan adsorpsi molekul dalam permukaan logam. Inhibitor teradsorpsi pada permukaan logam membentuk lapisan pasif yang melindungi logam terhadap korosi lebih lanjut. Kafein merupakan alkaloid yang mempunyai cincin purin dan merupakan derivate dari metil xanthine (1,3,7-trimetil xanthine) dengan BM 194,14, specific gravity 1,23 (Gogot Haryono, Bambang Sugiarto, Hanima Farid dan Yudi Tanoto, 2010)
7. Asam amino adalah sembarang senyawa organik yang memiliki gugus fungsional karboksil (-COOH) dan amina (biasanya -NH₂).

Dalam biokimia sering kali pengertiannya dipersempit: keduanya terikat pada satu atom karbon (C) yang sama (disebut atom C "alfa" atau α). Gugus karboksil memberikan sifat asam dan gugus amina memberikan sifat basa. Dalam bentuk larutan, asam amino bersifat amfoterik, cenderung menjadi asam pada larutan basa dan menjadi basa pada larutan asam (Ach. Firdaus Rafiqi dan Achmad Junaidi, 2012)

Bab 12

Penanggulangan dan Pencegahan Korosi

12.1 Pendahuluan

Korosi merupakan peristiwa atau fenomena alam, yang membutuhkan tiga kondisi: kelembapan, permukaan logam, dan zat pengoksidasi yang dikenal sebagai akseptor elektron. Proses korosi mengubah permukaan logam reaktif menjadi bentuk yang lebih stabil yaitu oksida, hidroksida, atau sulfida. Karat merupakan bentuk korosi yang umumnya terjadi. Pencegahan korosi berarti tindakan yang diambil untuk mengendalikan korosi sampai batas tertentu sementara perlindungan berarti pengukuran ekstensif atau lebih komprehensif yang dilakukan untuk mengendalikan proses korosi. Dalam istilah yang lebih umum, tindakan pencegahan berbasis pengetahuan sementara perlindungan melibatkan faktor-faktor yang diketahui dan tidak diketahui, seperti bencana alam.

Ada tiga area yang menjadi perhatian ketika korosi dan pencegahannya dipertimbangkan. Ketiga faktor utama tersebut adalah ekonomi, keamanan dan kerusakan lingkungan. Korosi logam, meskipun tampaknya tidak berbahaya, tapi dapat memengaruhi sektor ekonomi.

Korosi didefinisikan dengan cara yang berbeda, tetapi interpretasi umum dari istilah tersebut adalah "serangan terhadap bahan logam melalui reaksi dengan lingkungannya". Konsep korosi juga dapat digunakan dalam pengertian yang lebih luas, yang mencakup serangan terhadap bahan non-logam

Bardal (2003) Korosi bahan logam dapat dibagi menjadi tiga kelompok utama:

1. Korosi basah, di mana lingkungan korosifnya adalah air dengan spesies terlarut. Cairan tersebut adalah elektrolit dan prosesnya biasanya elektrokimia.
2. Korosi pada fluida lain seperti garam leburan dan logam cair.
3. Korosi kering, di mana lingkungan korosifnya adalah gas kering. Korosi kering juga sering disebut korosi kimia dan contoh paling terkenal adalah korosi suhu tinggi.

12.2 Prinsip Pencegahan Korosi

Pencegahan korosi melibatkan faktor-faktor yang melekat, yang berada dalam kendali ahli bedah atau insinyur. Tiga kategori utama yang dipertimbangkan adalah pemilihan bahan, faktor desain dan analisis prediksi kehidupan. Prinsip pencegahan korosi disesuaikan dengan pemakaian pada jenis peralatan yang tepat, serta jenis keadaan lingkungan yang korosif sebagai berikut:

1. Modifikasi lingkungan, dengan mereduksi korosi dengan memperbaiki kondisi lingkungan di mana logam berada.
2. Menetralisasi zat korosif sebagai pemicu terjadinya korosi.
3. Melakukan perlindungan pada permukaan dengan cara:
 - a. Pelapisan dengan cat (*organic coating*).
 - b. Pelapisan dengan metal *coating, lining, overlay*, dan *cladding*.
 - c. Pelapisan *anorganic*.
 - d. Pembalutan (*wrapper*)
4. Pada jenis korosi tertentu menggunakan bahan yang tahan korosi.
5. Perlindungan katodik dan perlindungan anodik.
6. Pemakaian zat pelambat korosi (*corrosion inhibitor*) (Handana and Indaryanto, 2002)

Dua proses yang dilakukan untuk penanggulangan dan pencegahan korosi pada logam yaitu:

1. Proses paduan dan
2. Proses pelapisan permukaan.

12.3 Paduan

Khrom, nikel atau gabungan dari kedua logam tersebut dapat dileburkan bersama baja tanpa campuran. Proses ini kemudian membuat baja menjadi tahan korosi karena sifat-sifat tertentu dikarenakan penambahan kristal-kristal. Baja ini disebut dengan baja tahan korosi atau baja tahan karat. Secara metalurgi baja tahan karat ini digolongkan menjadi baja tahan karat ferrit, baja tahan karat martensi, baja tahan karat austenite, dan baja tahan karat tipe presipitasi. Dengan memadukan atau melakukan pencampuran minimal 11 % kromium maka akan diperoleh sifat tahan karat. Beberapa penambahan material lain, dan penambahan jumlah yang tinggi paduan kromium dan penambahan nikel, akan membuat sifat tahan karat dari stainless steel semakin baik (Gunawan, 2017).

Berkurangnya berat akibat korosi dalam asam dan ketahanan korosi yang telah diperbaiki disebabkan adanya penambahan unsur nikel menjadi sebab baja bersifat tahan karat.

12.4 Pelapisan permukaan

Pencegahan korosi pada permukaan logam agar tidak bersentuhan dengan udara dan air dilakukan dengan cara memberikan perlindungan pada permukaan logam yang terdiri dari berbagai bahan dan pelapisan dengan berbagai cara.

Pelapisan permukaan terbagi atas dua cara, yaitu

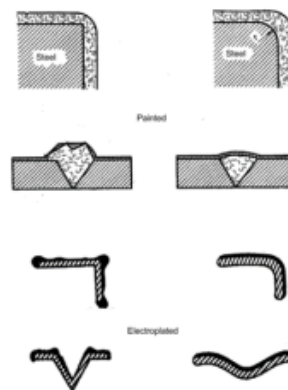
1. Pelapisan permukaan dari logam
2. Pelapisan permukaan bukan logam

12.4.1 Pelapisan Permukaan dari Logam

Perlindungan lapisan logam dari korosi umumnya dilakukan dengan cara memberikan bahan tertentu atau biasa disebut coating, ini merupakan cara yang paling mudah mencegah korosi pada logam. Produk-produk coating sangat membantu dan mudah ditemukan dalam melakukan pelapisan. Cairan *polyurethane* atau epoxy merupakan produk-produk coating yang mudah diterapkan pada lapisan logam. Tidak perlu dilakukan oleh profesional karena prosesnya sangat mudah begitu juga kegunaannya. Beberapa produk bahkan bisa digunakan untuk pelapisan logam pada peralatan yang digunakan pada tempat yang basah, dingin atau panas pelapisan (metal coating) dengan seng, nikel, dan krom; cat (organic coating), spray dengan seng, nikel, dan krom (Hardiyanti and Santoso, 2018).

Electroplating

Deposisi elektrolitik disukai oleh suhu proses yang rendah dibandingkan dengan metode pelapisan lainnya. Karenanya efek panas apa pun, yang dapat menyebabkan perubahan pada struktur, bentuk, dan sifat mekanis media, dapat dihindari.



Gambar 12.1: Tepi tajam dan ketidak teraturan di permukaan tidak cocok sebagai dasar pelapisan. (Pludek VR.1., 1977)

Adapun metode lain, baik geometri lokal dan keseluruhan permukaan yang akan dilapisi harus dipertimbangkan dengan cermat sebagai bagian dari pekerjaan desain. Rongga, di mana udara atau cairan mungkin tertutup, tidak dapat diterima, dan sudut tajam harus dihindari (Gambar 12.1). Karena pelapisan biasanya tipis ($5\text{--}40\ \mu\text{m}$), faktor-faktor seperti kekasaran dan

porositas dalam substrat dapat menyebabkan masalah yang tidak ada untuk metode di mana lapisan yang lebih tebal biasa digunakan.

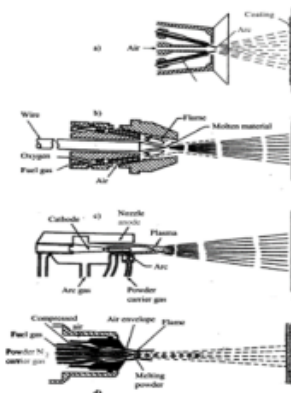
Pencelupan Panas (hot dipping)

Lapisan seng, timah dan timah / timbal biasanya diaplikasikan dengan pencelupan panas, yaitu mencelupkan benda yang akan dilapisi logam pelapis cair. Aluminasi dengan metode ini kurang tersebar luas, karena Al membuat proses lebih sulit dioperasikan. Galvanisasi hot-dip adalah metode yang paling ekonomis dalam kasus di mana lapisan Zn yang relatif tebal (hingga 100–200 μm) diperlukan atau diinginkan pada komponen yang dapat ditempatkan di bak tanpa banyak kesulitan.

Terbentuknya ikatan-ikatan metalurgi yang baik diantara logam pelapis dan logam yang dilindungi karena terjadinya proses perpaduan antar muka (interface alloying). Metode ini memiliki kesulitan dalam mengatur tebal pelapisan disebabkan tidak meratanya lapisan. Namun, keuntungannya seluruh permukaan yang akan dilapisi tertutupi oleh lelehan logam.

Pelapisan dengan Penyemprotan

Penyemprotan api dan busur paling umum untuk pencegahan korosi suhu rendah. Lapisan ini biasanya memiliki ketebalan 100 sampai 300 μm . Kebanyakan logam bisa disemprotkan untuk memproteksi baja di perairan dan atmosfer, aluminium dan seng dari korosi. Bahan lain seperti baja tahan karat juga disemprot dengan hasil yang baik dan memiliki kegunaan yang penting.



Gambar 12.2: Pistol semprot termal untuk a) penyemprotan busur, b) penyemprotan api dengan kawat, c) penyemprotan plasma, dan d) penyemprotan bahan bakar oksigen kecepatan tinggi (HVOF) (metode paling umum untuk penyemprotan api berkecepatan tinggi). (Bardal, 2003)

Keuntungan khusus dari penyemprotan termal dibandingkan dengan metode pelapisan lainnya adalah pelapisan yang lebih tebal dapat diterapkan, dan terutama bahwa peralatan penyemprotan bersifat portabel, sehingga pekerjaan pelapisan dapat dilakukan hampir di mana saja. Untuk struktur besar dan tetap yang tidak dapat dilapisi galvanis, penyemprotan termal sering kali menjadi satu-satunya alternatif untuk mengecat. Kelemahan penyemprotan termal dianggap biaya yang relatif tinggi, daya rekat yang relatif rendah antara substrat dan lapisan, porositas tinggi pada lapisan dan permukaan kasar

12.4.2 Pelapisan permukaan bukan logam

Enamel

Berbagai jenis lapisan enamel dan kaca sebagai bahan pelapis, harus memiliki koefisien muai panas yang sesuai, diaplikasikan dalam bentuk bubuk (setelah pengawetan atau pembersihan bahan dasar lainnya) dan dipanaskan dalam tungku sampai bahan pelapis menjadi lunak dan terikat pada logam. Email terdiri dari campuran kwarsa, felspar boraks dan zat-zat lain. Email digunakan pada alat rumah tangga.

Minyak dan gemuk

Melapisi permukaan menggunakan kuas atau dengan mencelupkan lapisan gemuk atau minyak pada permukaan logam yang penggunaannya pada bagian-bagian mesin atau perkakas tertentu. Gemuk juga bermanfaat sebagai bahan pembersih, yaitu mengeluarkan dan mencegah kotoran masuk ke bagian-bagian yang terlumasi bisa mencegah karat yang biasanya disebabkan oleh air.

Cat

Penggunaan pelapis cat adalah metode yang paling umum untuk pencegahan korosi. Komposisi dan jenis cat. Cat *anticorrosive* terdiri dari pengikat, pigmen, pelarut / pengencer, *extender* dan sejumlah variabel aditif lainnya seperti antioksidan, zat aktif permukaan, pengering, pengental, dan zat *antisettling*.

Pertanyaan utama yang harus ditanyakan sebelum memilih sistem pengecatan adalah:

1. Perawatan awal apa yang mungkin dilakukan, dan bagaimana kondisi media sebelum pengecatan?

2. Bagaimana lingkungan di sekitar struktur yang dicat akan berubah selama berbagai periode seumur hidup? Serangan mekanis dan kimia apa yang akan membuat lapisan tersebut terkena?
3. Bagaimana kondisi pengaplikasian dan pengeringan / pengerasan cat, khususnya suhu dan kelembaban?
4. Berapa biaya awal dan perawatan pekerjaan pengecatan dan pengecatan?

Lapisan karet memberikan perlindungan korosi yang sangat baik pada air laut dan beberapa bahan kimia, dan digunakan secara internal dalam tangki dan saluran pipa. Secara eksternal pada pipa yang terkubur, aspal atau tar batu bara telah umum digunakan, sering kali diperkuat dengan tekstil atau jaring mineral, dan selama generasi terakhir, juga pita yang terbuat dari bahan seperti polivinil klorida atau polietilen dengan perekat dan primer di satu sisi.

Gambar 12: Selektor untuk pelapis organik yang dapat digunakan untuk membuat pilihan awal dari jenis pelapis terbaik untuk aplikasi tertentu. Empat lingkaran dalam pertama dari roda memberikan aplikasi yang direkomendasikan (lantai, lapisan tangki, perawatan, dan suhu tinggi). lingkaran berikutnya memberikan tiga klasifikasi dasar pelapis, termoseting, termoplastik, dan elastomer. lingkaran luar memberikan jenis umum pelapis dalam tiga jenis utama. misalnya, pelapis berikut direkomendasikan untuk aplikasi suhu tinggi (mulai dari posisi jam 7 dan membaca searah jarum jam): seng anorganik, berpigmen silikon, silikon alkid, dan akrilik (Fontana, 1987)

Pra-perawatan Sebelum Pelapisan

(Bardal, 2003) langkah terpenting dalam perawatan permukaan. Tujuan utamanya adalah untuk mendapatkan permukaan dengan kebersihan tinggi dan kekasaran yang memadai. Perlakuan awal dapat dibagi menjadi dua kelompok:

1. penghilangan lemak
2. penghilangan skala gilingan dan karat, dan secara bersamaan membuat permukaan menjadi kasar.

Degreasing dilakukan dengan:

1. pelarut organik, seperti white spirit dan parafin;

2. bahan pembersih alkali, mis. larutan yang mengandung *sodiumphosphate*, silikat, karbonat atau hidroksida, bersama dengan sabun atau bahan pembasah lainnya;
3. kombinasi bahan pembersih organik dan alkali (emulsi), atau;
4. uap bertekanan tinggi yang mengandung sedikit bahan pembersih. Pembersihan alkalin memberikan permukaan terbersih dan sering digunakan pada langkah terakhir

Dari pra-perawatan, misalnya sebelum pelapisan logam elektrolitik. Uap bermanfaat digunakan setelah penghilangan minyak dengan emulsi dan setelah penghilangan cat lama dengan pembersihan alkali sebelum aplikasi cat baru [10.24]. Semua pelapisan dan metode aplikasi membutuhkan permukaan yang bebas dari minyak sebelum pelapisan.

Penghapusan karat dan skala pabrik sebaiknya dilakukan secara kimiawi dengan pengawetan atau secara mekanis dengan pembersihan ledakan.

Daftar Pustaka

- Abdul, R. dan Budiarto (2011) “Pengaruh Waktu Electroplating dan Powdercoating NiCr Terhadap Sifat Mekanis dan Struktur Mikro Pada Baja Karbon SPCC- SD,” Prosiding Seminar Nasional Pengembangan Energi Nuklir IV, Pusat Pengembangan Energi Nuklir Badan Tenaga Nuklir Nasional, BATAN.
- Afandi, Y. K., Arief, I. S. and Amiadji, A. (2015) ‘Analisa Laju Korosi pada pelat baja Karbon dengan Variasi ketebalan coating’, Jurnal Teknik ITS, 4(1), pp. G1–G5.
- Afandi, Y. K., dkk. (2015). Analisa Laju Korosi pada Pelat Baja Karbon. Jurusan Teknik ITS, 4.
- Agung, S. (2016) “Korosi dan Pengendaliannya,” Pusat Pengembangan dan Pemberdayaan Pendidik dan Tenaga Kependidikan Bidang Otomotif dan Elektronika, Direktorat Jenderal Guru dan Tenaga Kependidikan, PPPPTK, Malang.
- Agus (2013) Corrosion Engineering: Perhitungan Laju Korosi. Available at: <http://m10mechanicalengineering.blogspot.com/2013/11/laju-korosi.html> (Accessed: 1 April 2021).
- Ahmad, Z. (Hrsg.). (2006). Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control. New York: Elsevier Science and Technology Books.
- Ahmadi, (2011) “Strategi Pembelajaran Sekolah Terpadu,” Jakarta: Prestasi Pustaka Publiaher.

- Akhsan, M.Luki Yudha. (2015). Pengaruh Inhibitor Ekstrak Daun Jambu Biji Merah Terhadap Laju Korosi Baja A131 Pada Air Laut. Skripsi. Jember: Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Jember.
- Al Hasa, M. H. (2007) "Pengaruh Rapat Arus Listrik dan Waktu Pelapisan Terhadap Ketebalan Lapisan Nikel Pada Foil Uranium," Jurnal Urania, Vol. 13, No 1, Hal. 1-45.
- Al-Darbi, M.M., Muntasser, M.Z., Tango, M. and Islam, M.R. (2010) "Control of microbial corrosion using coatings and natural additives," Energy Sources, 24, 1009-1018
- Ambarwati, Y. and Bahri, S. (2018) 'Review: Fitoremediasi Limbah Logam Berat dengan Tumbuhan Akar Wangi (*Vetiveria zizanioides* L)', Analit: Analytical and Environmental Chemistry, 3(02), pp. 139–147. doi: 10.23960/aec.v3.i2.2018.p139-147.
- Anwar, M. .S. et al. (2014) 'Investigasi Korosi Baja Tulang Beton Sirip dengan Proteksi Katodik Arus Tanding Menggunakan Anoda MMO-Ti Mortar Konduktif', Majalah Metalurgi, 20(3), pp. 255–264.
- ASTM G31-72 (2004) Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals.
- Bardal, E. (2004). Corrosion and Protection (1 Ausg.). Verlag London: Springer.
- Brown, T. L. et al. (2015) Chemistry: The Central Science. 13th edn. America: Pearson. Available at: <http://libgen.gs/ads.php?md5=c9ed65221232a78d7ac77745c0951563>.
- Brycki, B. E. et al., 2018. Organic Corrosion Inhibitors. In: Corrosion Inhibitors, Principles and Recent Applications. Poland: InTech, pp. 3-32.
- Bundjali, B. (2000) 'Tinjauan Termodinamika dan Kinetika Korosi serta Teknik-Teknik Pengukuran Laju Korosi', Diktat Kuliah, ITB, Bandung.
- Bundjali, B. (2005) 'Perilaku dan Inhibisi Korosi Baja Karbon dalam Larutan Buffer Asetat, Bikarbonat-CO₂', Disertasi Program Doktor, Institut Teknologi Bandung, pp. 16–30.
- Cakbentra (2015) Memahami Bahaya Korosi Pada Peralatan Pabrik Kimia. Available at: <http://chee-sys.blogspot.com/2015/01/memahami-bahaya-korosi-pada-peralatan.html>.
- Chang, R. (2005). Kimia Dasar: Konsep-Konsep Inti (3 Ausg.). (L. Simartama, Hrsg.) Jakarta: Erlangga.

- Chigondo, M. & Chigondo, F., (2016). Review Article: Recent Natural Corrosion Inhibitors for Mild Steel: An Overview. Hindawi Publishing Corporation, pp. 1-7.
- Chodijah, S. (2008) 'Efektifitas Penggunaan Pelapis Epoxy Terhadap Ketahanan Korosi Pipa Baja ASTM A53'. Thesis tidak diterbitkan. Depok: Departemen Teknik Metalurgi Universitas
- Cicek, V. and Al-Numan, B. (2011) "Corrosion chemistry." USA: John Willey and Sons
- Craig, B. D., Lane, R. & Rose, D. H., (2006). Corrosion Prevention and Control: A Program Management Guide for Selecting Materials, Spiral 2. Rome: Advanced Materials and Manufacturing Technology Information Analysis Center (AMMTIAC).
- Daniel (2020) Cara Menghilangkan Karat Pada Pagar Besi Dirumah Anda Dalam 3 Langkah Mudah, Portal Harga dan Informasi Jual Beli Rumah di Pontianak. Available at: <https://www.jualrumahpontianak.com/>.
- Dariva, C. G. & Galio, A. F., (2014). Corrosion Inhibitors – Principles, Mechanisms and Applications. In: M. Aliofkhazraei, ed. Developments in Corrosion Protection. Brazil: In Tech, pp. 365-380.
- Darmono (1995) Logam dalam Sistem Biologi Makhluk Hidup. Jakarta: UI Press.
- Dawson, T. et al. (1997) 'EN380 Naval Material Science and Engineering Course Notes', in. Florida Institute of Technology, pp. 1-5.
- ⁶ Djaprie, S. (1995) 'Ilmu dan Teknologi Bahan, ed. 5, hal. 483-510', Erlangga, Jakarta.
- ⁴ Djunaidi., & Utomo, S. B. (2007). Pemakaian Inhibitor untuk Pengendalian Korosi pada Sistem Pendingin Sekunder RSG-GAS. Buletin "Reaktor", 51-58.
- ⁵ Doner, A. dkk, (2012), "Investigation of corrosion inhibition effect of 3-[(2-hydroxybenzylidene)-amino]-2-thioxo-thiazolidin-4-one on corrosion of mild steel in the acidic medium", Corrosion Science.
- Dubeya, A.K. and Singh, G., (2007), "Corrosion Inhibition of Mild Steel in Sulphuric Acid Solution by Using Polyethylene Glycol Methyl Ether (PEGME)", Portugaliae Electrochimica Acta.

- Fachry, A Rasyid, RM.Arief Sastrawan, dan Guntur Svingkoe. (2012). Kondisi Optimal Proses Ekstraksi Tanin dari Daun Jambu Biji Menggunakan Pelarut Etanol. *Prosiding STNK TOPI* (7): 69-73.
- Febrianto., Sriyono., & Puradwi. (2000). Pengaruh Temperatur terhadap Laju Korosi Incoloy 800 dalam Larutan Klorida. Serpong: Prosiding Presentasi Ilmiah Teknologi Keselamatan Nuklir - V.
- Fernandez, A.G & Cabeza, L.F (2019) "Anodic and Cathodic Protection Assessment on Chloride Molten Salts for the Next Generation of CSP Plants", *Proceedings of the 25th SolarPACES Conference*, Daegu, South Korea, October 1-4, 2019, <http://hdl.handle.net/10459.1/69559>
- Fernandez, A.G & Cabeza, L.F (2020) "Anodic Protection Assessment Using Alumina-Forming Alloys in Chloride Molten Salts for CSP Plants", *Coatings*, 10 (138) hal 1-12
- Fogler, H. S. (1992) 'Elements of Chemical Reaction Engineering. PTR Prentice-Hall', Inc., Englewood Cliffs, NJ, USA.
- Fogler, S. H. (1987) 'Elements of Chemical Reaction Engineering', *Chemical Engineering Science*. doi: 10.1016/0009-2509(87)80130-6.
- Fontana, M. G. (1987). *Corrosion Engineering* (3 Aug.). Singapore: McGraw-Hill Book .
- Fontana, M. G. (2005) *Corrosion engineering*. Tata McGraw-Hill Education.
- Gebregewergis, A. (2020) 'Levels of selected metals in white teff grain samples collected from there different areas of Ethiopia by using Microwave Plasma Atomic Emission Spectroscopy (MP-AES)', *International Journal of Novel Research in Physics Chemistry & Mathematics*, 7(1), pp. 13–24.
- Godwin-Nwakwasi, E., Elachi, E. E., Ezeokonkwo, M. A. & Onwuchuruba, L. E., (2017). A Study of the Corrosion Inhibition of Mild Steel in 0.5M Tetraoxosulphate (VI) acid by *Alstonia boonei* Leaves Extract as an Inhibitor at Different Temperatures.. *International Journal of Advanced Engineering, Management and Science (IJAEMS)*, 3(12), pp. 1150-1157.
- Gumelar, Agung Akhmad. (2011). Studi Pengaruh Konsentrasi Ekstrak Teh Roselia (*Hibbicus sabdariffa*) sebagai Green Corrosion Inhibitor untuk Material Baja Karbon Rendah di Lingkungan NaCl 3,5% pada Temperatur 50 Derajat Celsius. Skripsi. Depok: Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

- Gunawan, E. (2017) 'Pengaruh Temperatur Pada Proses Perlakuan Panas Baja Tahan Karat Martensitik AISI 431 Terhadap Laju Korosi Dan Struktur Mikro', *Teknika: Engineering and Sains Journal*, 1(1), p. 55. doi: 10.51804/tesj.v1i1.69.55-66.
- H.H. Uhlig., & W.R. Revie. (2000). *Uhlig's Corrosion Handbook*. New York: John Wiley and Sons.
- Habibie, Afithroni Lubis dan Aisyah Endah Palupi. (2014). "Pengaruh Daun Teh dan Daun Jambu Biji sebagai Inhibitor Organik Alami pada Baja SS 304 dalam Larutan Asam". *Jurnal Teknik Mesin (JTM)* 03 No.01: 9-13.
- Halimatuddahlia (2003) 'Pencegahan Korosi dan Scale Pada Proses Produksi Minyak Bumi', *USU digital library*, pp. 1–8.
- Handana, D. and Indaryanto, H. (2002) 'STUDI EVALUASI PENERAPAN PENCEGAHAN KOROSI SECARA KATODIK PADA PIPA INDUK DISTRIBUSI DI JALAN RAJAWALI – JALAN KAPASAN SURABAYA', *Jurnal Purifikasi*, 4(1), pp. 85–90.
- Hardiyanti, F. and Santoso, M. Y. (2018) 'Analisis Pelapisan Tembaga Terhadap Laju Korosi Dan Struktur Mikro Grey Cast Iron', *Jurnal Teknologi Maritim*, 1(1), pp. 37–42. doi: 10.35991/jtm.v1i1.423.
- Harsisto, I.G dan Eddy, D.C. (2001) "Kinerja Proteksi Anodik Baja ASTM A 516-60 dan JIS G 3131-SPHC dalam Asam Sulfat Pekat", *Jurnal Sains Materi Indonesia*, 2(3), hal 19-25
- Hartomo, A. J. and Kaneko, T. (1992) *Mengenal pelapisan logam:(elektroplating)*. Andi Offset.
- Hartomo, Anton J. dan Kaneko, Tomijiro. (1992) "Mengenal Pelapisan Logam (Electroplating)," Yogyakarta: Andi Offset.
- Haryono, G. et al. (2010) 'Ekstrak bahan alam sebagai inhibitor korosi', *Ekstrak Bahan Alam sebagai Inhibitor Korosi*.
- Haryono, Gogot, Bambang Sugiarto, Hanima Farid dan Yudi Tanoto. (2010). *Ekstrak Bahan Alam sebagai Inhibitor Korosi*. Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia "Kejuangan" (1): 1-6.
- Hatch GB, Nathan CC, (1984), *Corrosion Inhibitor*. National Association for Corrosion Engineers". page : 126-147.

- Hendrik, H. (2018) TERMODINAMIKA KOROSI. Available at: https://www.academia.edu/37872585/TERMODINAMIKA_KOROSI_pptx (Accessed: 21 March 2021).
- Hermawan, H. (2019) Pengantar proteksi katodik. doi: 10.31227/osf.io/mxky6.
- Husein, S. (2016) Pemanfatan Bioinhibitor Korosi dari Ekstrak Buah Mahkota Dewa, Politeknik Negeri Sriwijaya. Politeknik Negeri Sriwijaya. Available at: [http://eprints.polsri.ac.id/1002/3/BAB II.pdf](http://eprints.polsri.ac.id/1002/3/BAB%20II.pdf) (Accessed: 8 April 2021).
- Hutasoit, F. M. (2008) “Pengaruh Penambahan Konsentrasi Asam Oksalat Terhadap Ketebalan Lapisan Oksida pada Aluminium Foil Hasil Proses Anodisasi”. Jakarta: Skripsi, Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- Jones. (1992). Principles and Prevention of Corrosion. USA: Macmillan PC.
- 5 Jones. Denny A., (1997),” Principles and Prevention of Corrosion”, 2nd Ed, Singapore : Prentice Hall International, Inc.
- Karim, S, dkk., (2010), “Corrosion Inhibition of Mild Steel by Calcium Gluconate in Simulated Cooling Water”, *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*.,
- Karyono, T., Budinto and Pamungkas, R. G. (2017) ‘Analisis Teknik Pencegahan Korosi Pada Lambung Kapal dengan Variasi Sistem Pencegahan ICCP Dibandingkan dengan SACP’, *Jurnal Pendidikan Profesional*, 6(1), pp. 7–17.
- Keijiman, J. (1999) “Achieving quality in coating work: the 21st century challenge,” in *Proceeding Inorganic and Organic Coating – The Difference*.
- Kirk, R. E., Othmer, D. F. and Newburger, S. H. (1953) ‘Encyclopedia of Chemical Technology’, *Journal of AOAC INTERNATIONAL*. doi: 10.1093/jaoac/36.4.1190a.
- Kristian, Andy dan Setyo Purwanto. (2015). Pengaruh Inhibitor Kafeina terhadap Laju Korosi Baja API 5L Grade B dalam Media Air Laut. Tangerang: BATAN PUSPITEK.
- Lazzari, L (2017) “Engineering Tools for Corrosion : Basic Principle, hal 1-23, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102424-9.00001-X>

- Locke, C.E. (1987) "Anodic Protection" in Corrosion, ASM International, Ninth Edition, Metals Handbook.
- Loto, C.A. (2017) "Microbial corrosion: mechanism, control and impact-A review," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 92, 4241-4252
- Love, G. H. (1983) The Theory and Practice of Metalwork. 3rd edn. New York: Pearson Schools.
- Magnussen, O.M., (2003), Corrosion Protection by Inhibition, in Encyclopedia of Electrochemistry: Corrosion and Oxide Films, Vol. 4, Eds. Bard, A.J and Stratmann, M., Weinheim: Wiley-VCH GmbH & Co. KGaA., p 435.
- Mahardika, R. S. (2015) Termodinamika Korosi. Available at: <https://www.scribd.com/doc/290512710/Bab-II-Termodinamika-Korosi> (Accessed: 21 March 2021).
- Mardhani, I. &. (2013). Pengaruh Suhu Terhadap Korosi Baja SS 304 dalam Media 1 M HCL dengan Adanya Inhibitor Kinina. JURNAL SAINS DAN SENI POMITS , 2, No.2.
- Munro, J.I.dan Shim, W.W (2001) "Anodic Protection-Its Operation and Application", Materials Performance, hal. 13104-1307
- Nicklin, A. (2017) "Sulzer comments on corrosion and erosion." <https://www.worldpipelines.com/business-news/13012017/sulzer-comments-on-corrosion-and-erosion/>: Online 20 Maret 2021
- Novak, P (2010) "Shreir's Corrosion: Anodic Protection", hal 2857-2889, <https://doi.org/10.1016/B978-044452787-5.00158-X>
- Othmer, K. (1965) 'Encyclopedia of Chemical Technology Interscience Publishers', New York, NY, 9, p. 880.
- Pattireuw, K. J., dkk. (2013). Analisis Laju Korosi pada Baja Karbon dengan Menggunakan Air laut dan H₂SO₄. Jurnal Teknik Mesin Unsrat, 2.
- Pedefferri, M. and Lazzari, L. (2018) "Corrosion science and engineering." Switzerland: Springer Nature Switzerland
- Pedefferri, P., (2018). Corrosion Science and Engineering. Milan, Italy: Springer.
- Perez N. (eds) (2004) "Anodic Protection. In: Electrochemistry and Corrosion Science". Springer, Boston, MA.

- Permatasari, A. (2019) Bagaimana cara menghitung laju Korosi dan Efisiensi Inhibitor? Available at: <https://www.dictio.id/t/bagaimana-cara-menghitung-laju-korosi-dan-efisiensi-inhibitor/121535/2> (Accessed: 29 March 2021).
- Pludek VR.1. (1977) Design and Corrosion Contro. The MacMillian Press.
- Popov, B.N. (2015) "Corrosion Engineering: Passivity", hal 143-179, <https://doi:10.1016/B978-0-444-62722-3.00004-5>
- Pratikno, H. (2006) 'Pengaruh Salinitas terhadap Kinerja Beberapa Sacrificial Anode Pada Proteksi Katodik di Lingkungan Laut', Jurnal Purifikasi, 7(1), pp. 31–36.
- Priyantoro, F. S. (2012). Analisa Pengaruh Luasan Scratch Permukaan terhadap Laju Korosi pada Pelat Baja A36 dengan Variasi Sistem Pengelasan. Jurnal Teknik ITS , 1.
- Purwanto, Syamsul, H. (2005) "Teknologi Industri Electroplating," Semarang: Badan Penerbit Universitas Diponegoro.
- Putra, R., Muhammad., & Rahman, A. (2018). Dasar-Dasar Korosi. Lhokseumawe: Sefa Bumi Persada.
- Rafiqi, Ach. Firdaus dan Achmad Junaidi. (2012). Asam Amino: Gerak dan Perubahan. Materi Ajar. Sumenep: Universitas Wiraraja.
- Rammelt, U., Koehler, S. & Reinhard, G., (2009). Use of vapour phase corrosion inhibitors in packages for protecting mild steel against corrosion. Elsevirt, 1(51), p. 921–925.
- Revie, R. W. (2011) Uhlig's Corrosion Handbook. 3rd edn, Uhlig's Corrosion Handbook. 3rd edn. New York: John Wiley & Sons, Inc. doi: 10.1002/9780470872864.
- Revie, R. W. & Uhlig, H. H., (2008). Corrosion and Corrosion Control "An Introduction to Corrosion Science and Engineering". Fourth ed. Canada: y John Wiley & Sons, Inc. All right reserved.
- Revie, R. W. and Uhlig, H. H. (2008) Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering. Fourth. Canada: Wiley - Interscience.
- Riggs, O.L. and Locke, C.E. (1981) "Anodic Protection: Theory and Practice in the Prevention of Corrosion" Plenum Press, New York & London.

- Roberge, P.R., (2000), Handbook of Corrosion Engineering, New York: McGraw Hill, p 833, 837.
- Rozenfeld, I.L., (1981), Corrosion Inhibitors, New York: McGraw Hill Book Inc., p 133.
- Rumah Belajar (2009) Korosi. Available at: <https://sumberbelajar.belajar.kemdikbud.go.id/sumberbelajar/tampil/Korosi-2009/konten5.html> (Accessed: 27 March 2021).
- Saliyan, VR. and Adhikari, AV, (2008) "Inhibition of corrosion of mild steel in acid media by Ng-benzylidene-3-(quinolin-4-ylthio)propanohydrazide", Indian Academy of Sciences, Bull. Mater. Sci., Vol. 31, No. 4.
- Santhiarsa, N.N., (2009) "Pengaruh Kuat Arus Listrik dan Waktu Proses Hard Anodizing pada Aluminium Terhadap Kekerasan dan Ketebalan Lapisan," Jurnal ilmiah Teknik Mesin Universitas Udayana.
- Schweitzer, P. A., (2010). Fundamentals of corrosion : mechanisms, causes, and preventative methods. United States of America: CRC Press Taylor & Francis Group.
- Sharma, R. (2016) "Erosion Corrosion." https://www.slideshare.net/RISHABHSHARMA248/presentation-on-erosion-corrosion?next_slideshow=1: Online 20 Maret 2021
- Shaw, B.A. & Kelly, R. (03 2006). What is Corrosion? Electrochemical Society Interface, 15.
- Shochib, M. (2013) 'Analisis Sistem Proteksi Korosi Untuk Pipa Petroleum Gas, Material API-5L X52 (ø 20", Sch. 40, 8560m)', Wahana Teknik, 02(1), pp. 72–80.
- Sidik, M.F. (2013) "Analisa Korosi dan Pengendaliannya", J. Foundry, 3(1), hal. 25-30.
- Silvia, R.S., Aleman, C., Ferreira, C.A., Armelin, E., Ferreira, J.Z. and Meneguzzi, A. (2015) "Smart Paint for Anodic Protection of Steel". Progress in Organic Coatings" 78, hal 116-123
- Siregar, T. (2010). Korosi dan Mekanisme Inhibisi Aluminium (Studi Polarisasi Linier). Bandung: LoGoz Publishing.

- Stoker, H. S. and Seager, S. L. (1975) *Environmental Chemistry: Air and Water Pollution*. 2nd edn. Scott, Foresman.
- Sudiarti, T. (2014) 'Mekanisme inhibisi korosi baja karbon dalam lingkungan air sadah', *JURNAL ISTEK*, 8(2).
- Sufrianti, J. and Hamzah, A. (2019) 'Desain Metode Proteksi Katodik dengan Arus Paksa (Impressed Current) pada Pipa Dermaga', *JOM F. Teknik*, 6(1), pp. 1–8.
- Sumantri, D. and P.T., I. (2020) 'Desain Proteksi Katodik pada Struktur Baja di Laut dan di Darat untuk Masa Layan 10 Tahun', *Mechanical Design and Testing*, 2(2), pp. 77–86.
- Supiyanti, D. (no date) *Bahan Ajar Korosi*. Available at: <https://id.scribd.com/document/342235060/Bahan-Ajar-Korosi> (Accessed: 2 April 2021).
- Taufiq, T. (2011) "Proses Anodizing Pada Logam Aluminium dan Paduannya," *Jurnal Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan Institut Teknologi Bandung*.
- 5 Tems, R & Al-Zahrani., A.M, (2006),"Cost of Corrosion in Oil Production & Refining:", *Saudi Aramco Journal of Technology*.
- 8 Trabanelli, G and Carasetti, (1970), *Mechanism and Phenomenology of Organic Inhibitors*, in *Advances in Corrosion Science and Technology*, Vol. 1, Eds. Fontana, M.G and Stachie, R.W., New York: Plenum Press, p 119.
- Trethewey, K. R. and Chamberlain, J. (1991) *Korosi untuk Mahasiswa dan Rekayasawan*. Jakarta: PT Gramedia Pustaka Utama.
- Trethewey, K.R., & Chamberlain, J. (1991). *Korosi untuk Mahasiswa Sains dan Rekayasa*. Jakarta: Gramedia Pustaka Utama.
- Tripathi, S. (2020) *Naval Material Science and Engineering USNA.pdf | Anode | Corrosion*. Available at: <https://www.scribd.com/document/446121181/Naval-Material-Science-and-Engineering-USNA-pdf> (Accessed: 21 March 2021).
- Umar, H. et al. (2020) 'Analisa Penempatan dan Kebutuhan Proteksi Katodik pada Sistem Pipa Gas Bawah Laut Offshore dari Pulau Pemping Ke Tanjung Uncang Batam', *Zona Laut*, I(3), p. 57.

- Utami, I. (2009) 'Proteksi Katodik dengan Anoda Tumbal Sebagai Pengendali Laju Korosi Baja dalam Lingkungan Aqueous', *J. Teknik Kimia*, 3(2), pp. 240–245.
- Utomo, B. (2009) "Jenis korosi dan penanggulangannya." *KAPAL*, 6(2), 138-141
- Vargel, C. (2020). *Corrosion of Aluminium* (2 Ausg.). Elsevier.
- Videla, H.A. (2002) "Prevention and control of biocorrosion," *International Biodeterioration & Biodegradation*, 49, 259–270
- Vlack, L. H. van and Djaprie, S. (1991) *Ilmu dan Teknologi Bahan*. 5th edn. Jakarta: Erlangga.
- Vogel, A. I. (1979) 'Vogel's Textbook of Macro and Semimicro Qualitative Inorganic Analysis (Kelima ed.)', G. Svehla, Penyunt.) New York: Longman Inc.
- Wicaksono, A. and Sutjahji, D. H. (2019) 'Pengaruh Proteksi Katodik Arus Terpasang (ICCP) Sebagai Upaya Pengendalian Laju Korosi Pada Sea Chest Kapal', *JPTM*, 9(1), pp. 85–94.
- Widharto, S. (1999) *Karat dan Pencegahannya*. Jakarta: Pradnya Paramita.
- Widharto. Sri., (1999), "Karat dan Pencegahannya", Cet.1, Jakarta : Pradnya Paramitha
- Wiraraja, A. H. (2012) 'STUDI LAJU KOROSI BAJA SS-316L TERHADAP VARIASI KONSENTRASI INHIBITOR QUINOLINE (C₉H₇N) DAN TEMPERATUR DALAM LARUTAN NaCl'. UNIVERSITAS AIRLANGGA.
- www.chem-is-try.org
- Yunus, A. (2011) "Korosi Logam dan Pengendaliannya; Artikel Review", *Jurnal Polimesin*, 9(1), hal 847-852
- Zhang, Q.B, Hua, Y.X, (2008), "Corrosion inhibition of mild steel by alkylimidazolium ionic liquids In hydrochloric acid", *Electrochimica Acta* Elsevier

Biodata Penulis



Prof. Dr. TIURLINA SIREGAR, M.Si lahir di Pematang Siantar, 08 Agustus 1966. Menyelesaikan pendidikan Doktor (S3) Universitas Padjadjaran (UNPAD) Bandung bidang kimia pada tahun 2007. Pada tahun 2001 menyelesaikan pendidikan Magister (S2) kimia analitik pada Universitas Padjadjaran (UNPAD) Bandung, dan menempuh pendidikan Sarjana (S1) bidang pendidikan kimia pada tahun 1990 dari Fakultas Pendidikan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FPMIPA) IKIP Medan. Menjadi dosen tetap program studi Pendidikan Kimia FKIP UNCEN Sejak 1 Maret 1991, dan sejak tahun 2016 menjadi Guru Besar Ilmu Kimia FKIP UNCEN. Penulis banyak menulis artikel pada jurnal nasional dan internasional dalam bidang kimia, pendidikan kimia, dan pendidikan IPA. Saat ini penulis sebagai ketua program studi S2 Magister Pendidikan IPA FKIP UNCEN. Email :tiurlina.siregar@yahoo.com



Efbertias Sitorus, S.Si., M.Si. Lahir di Medan, 22 Mei 1992, Sumatera Utara, Indonesia, merupakan anak dari Drs. Edward Sitorus, M.Si dan Juliana Tarigan, S.Pd. Menyelesaikan studi Sarjana Kimia dari Universitas Negeri Medan, Magister Kimia (bidang analitik) di Universitas Sumatera Utara. Menulis buku sejak tahun 2019. Kegiatan saat ini melaksanakan tri dharma perguruan tinggi dan aktif sebagai staff pengajar di Fakultas Pertanian Universitas Methodist Indonesia. Penulis dapat dihubungi melalui email: efbertias.s92@gmail.com



Yoga Priastomo, S.Si., M.Eng., lahir di Temanggung, 30 Juni 1991. Pendidikan formal telah ia selesaikan dari jenjang S1 di Departemen Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Gadjah Mada dalam bidang ilmu kimia pada tahun 2014 dengan predikat cum laude. Pendidikan S2 telah ia selesaikan pada tahun 2017 di Chemistry and Applied Chemistry Department, Faculty of Science and Engineering, Saga University, Jepang dalam bidang ilmu kimia dan kimia terapan

dengan predikat cum laude (SK Kemendikbud 2019). Pria dengan sapaan Yoga, saat ini sedang menjadi asisten peneliti di Laboratorium Kimia Organik, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta sejak tahun 2017 hingga sekarang. Aktivitas penelitian yang ia tekuni saat ini adalah mengenai sintesis senyawa organik khususnya supramolecular chemistry: kaliksarena, kalikspirogalolarena dan kaliksesorsinarena untuk diaplikasikan pada bidang energi, lingkungan, dan obat-obatan. Saat ini, ia juga tergabung dalam tim pelaksana teknis riset RISPRO LPDP Invitasi Batch 1 2020 UGM dengan RTC PT Pertamina yang diketuai oleh Prof. Drs. Jumina, Ph.D. Selain aktif menulis buku dan bergabung di Yayasan Kita Menulis, anak ke-4 dari 4 bersaudara ini juga aktif menulis paper ilmiah yang telah ia terbitkan di journal internasional bereputasi dan terindeks scopus. Terdapat kurang lebih 8 journal internasional telah ia terbitkan dan saat ini ia memperoleh H indexed scopus 3.



Dr. Ir. Erniati Bachtiar, ST., MT. adalah anak ke dua dari pasangan Alm. Drs. H. Bachtiar Rasyid dan Hj. Hatijah Nur. Penulis lahir di Watampone, 06 Oktober 1977. Penulis menikah dengan Nur Zaman, SP., M.Si tahun 2006 dan Penulis telah memiliki 1 putra 2 putri yaitu Fitrah Alif Firmasnyah, Fadhilah Dwi Fatimah dan Faiqah Fauziah. Penulis menyelesaikan studinya S1–Sarjana Teknik (S.T) pada Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Muslim Indonesia (UMI) tahun 2000, S2 –Magister Teknik (M.T) Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada (UGM) tahun 2003, S3–Program Doktor (Dr) Program studi ilmu Teknik sipil Fakultas

tahun 2003, S3–Program Doktor (Dr) Program studi ilmu Teknik sipil Fakultas

Teknik Universitas Hasanuddin (UNHAS) tahun 2015. Mengikuti Program Profesi Insinyur (PPI) di UNHAS tahun 2019 dan telah peroleh gelar Insinyur (Ir) Tahun 2020. Bergabung jadi Dosen Tetap pada Universitas Fajar sejak tahun 2008 - sekarang. Penulis mengampuh mata kuliah Teknologi Bahan, Statika, Topik Khusus Struktur, Teknologi Bahan lanjut. Penulis sangat tertarik tentang penelitian tentang Self Compacting Concrete (SCC), Beton Geopolimer dengan Bahan Dasar Limbah Fly Ash, Beton Ringan dengan Agregat Buatan dari Limbah Plastik. Penulis telah menulis beberapa jurnal nasional dan internasional dan buku. Penulis sebagai Ketua Lembaga Pengembangan dan Penjaminan Mutu Internal LP2MI (2015-2019), Dekan FT (2019-sekarang), asesor BKD dan Verifikator Sinta serta Ketua Tim PAK pada Universitas Fajar. SINTA ID: 5975589; Scopus ID: 56568222900, email: erni@unifa.ac.id. HP/wa: 081354937610.



Parulian Siagian saat ini sebagai dosen tetap di FT UHN Program Studi Teknik Mesin Beliau menamatkan S1 pada Program Studi Teknik Permesinan Kapal Unpatti, S2 Program Studi Teknik Mesin Konsentrasi Konversi Energi USU tahun 2006 dan saat ini sedang menyelesaikan program dokoral Teknik Mesin Konsentrasi Konversi Energi Terbarukan di Sekolah Pascasarjana USU Medan



Erni Mohamad, S.Pd, M.Si, adalah Seorang Dosen kimia di Universitas Negeri Gorontalo. Dilahirkan di Gorontalo pada tanggal 12 agustus 1969. Jabatan saat ini disamping dosen mempunyai tugas tambahan sebagai kepala laboratorium kimia. Menyelesaikan Pendidikan diploma 3 di Fakultas Pendidikan dan Keguruan Di Universitas Sam Ratulangi Manado di Gorontalo tahun 1992, melanjutkan Sarjana S1 di Sekolah Tinggi Keguruan dan Ilmu Pendidikan (STKIP) Gorontalo tahun 1997. Kemudian melanjutkan Pasca Sarjana di Universitas Brawijaya jurusan Kimia pada konsentrasi kimia Lingkungan tahun 2011



Kasta Gurning, S.Pd., M.Sc., M.Pd., lahir di Simpang Tiga, 11 Juli 1989. Anak ke sepuluh dari dua belas bersaudara pasangan Alm G. Gurning dan S. Sitorus. Gelar Sarjana Pendidikan (S.Pd.) diperoleh dari Program Studi Pendidikan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA), Universitas Negeri Medan di tahun 2011. Gelar Master of Science (M.Sc.) diperoleh dari Program Studi Ilmu Kimia dengan Konsentrasi Kimia Organik di Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) Universitas Gadjah Mada Tahun 2014. Gelar Magister Pendidikan (M.Pd.) diperoleh dari Program Pascasarjana (PPs)

Universitas Negeri Yogyakarta Program Studi Pendidikan Sains dengan Konsentrasi Pendidikan Kimia Tahun 2015 dengan Konsentrasi Pendidikan Kimia. Sejak Tahun 2015 bekerja sebagai Dosen di Sekolah Tinggi Ilmu Kesehatan Senior Medan sampai sekarang. Penulis aktif menulis di jurnal-jurnal nasional dan internasional serta sejak tahun 2021 telah menerbitkan tulisan dalam bentuk buku dengan penulis kolaboratif yaitu Biokimia dan Proses Pengelolaan Limbah.



Ferawati Artauli Hasibuan, lahir pada tanggal 06 April 1984 di Sosor Silobu Kabupaten Toba Samosir. Lahir dari Bapak (+) D. Hasibuan dan Ibu R. Sirait. Lulus S1 pada tahun 2011 jurusan Pendidikan Fisika Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Graha Nusantara Padangsidempuan. Lulus S2 tahun 2015 Program Magister of Science jurusan Ilmu Fisika Fakultas MIPA Universitas Gadjah Mada Yogyakarta. Saat ini adalah sebagai dosen tetap yayasan Universitas Graha Nusantara Padangsidempuan dan mengampu mata kuliah Fisika Modern, Pendahuluan Fisika Inti, Pendahuluan

Fisika Kuantum, Pendahuluan Fisika Zat Padat. Aktif menulis artikel ilmiah dengan pengembangan model pembelajaran serta pernah memperoleh Hibah

Kompetitif Nasional Kemenristekdikti. Buku yang telah berhasil ditulis dan diterbitkan pada tahun 2019 yaitu Buku Fisika Modern.



Lia Destiarti lahir di Pontianak, pada 2 Desember 1983. Ia menamatkan S1 Kimia di Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) Universitas Tanjungpura di Pontianak (2006) dan S2 Kimia di FMIPA Universitas Padjadjaran di Bandung (2010). Pada saat ini, ia sedang menempuh tahun pertama di Program Doktor Kimia Universitas Gadjah Mada di Yogyakarta. Wanita yang kerap disapa Lia ini merupakan dosen S1 Kimia di tempat almamaternya berada, Universitas Tanjungpura Pontianak dengan bidang kajian Kimia Analitik. Ia adalah pasangan dari Mahmudi Herman dan ibu dari Muhammad Haikal (6 tahun). Ia telah mengeluarkan beberapa publikasi di jurnal nasional terakreditasi dan jurnal internasional bereputasi. Ia juga telah meluluskan banyak mahasiswa S1 Kimia sejak kiprahnya menjadi dosen dari tahun 2010.



Dr. Ismail Marzuki, M.Si, lahir di Kabere, 03 Juli 1973. Pendidikan formal yang telah diikuti SD Negeri 19 Kabere Tahun 1980-1986, SMP Negeri Kabere Tahun 1986-1989, dan SMA Negeri 1 Enrekang 1989-1992. Gelar sarjana Sains (kimia) disandang tahun 1999, di Jurusan Kimia F.MIPA UNHAS, dan gelar Magister Sains (M.Si) Tahun 2003. Menyelesaikan program Doktor Pada Bulan Januari tahun 2016, Program Pascasarjana UNHAS.

Karir sebagai akademisi dimulai tahun 2000 hingga sekarang. Status PNS (Dosen) diperoleh pada Tahun 2005, pada unit kerja Kopertis (L2dikti) Wil. IX Sulawesi. Jabatan struktural yang pernah di sandang, yakni: Direktur Akademi Analis Kimia Yapika Makassar, (Tahun 2002-2008), Ketua I Bidang Akademik Sekolah Tinggi Ilmu Kesehatan (STIKES) Yapika Makassar (Tahun 2008-2012). Ketua Stikes Bina Mandiri Gorontalo (Tahun 2014-2015), Di mutasi ke Universitas Fajar (UNIFA) Tahun 2015, Prodi home base Teknik Kimia. Tugas tambahan yang

diamanahkan oleh UNIFA adalah Pimred Jurnal Techno Entrepreneur Acta (2016-sekarang), Ketua Unit Pusat Karir UNIFA (Tahun 2016-2018) dan Ketua Lembaga Penjaminan Mutu Internal UNIFA, (2019-2020), serta Dekan Fak. Pascasarjana Univ. Fajar, (2020-sekarang). Sejak pandemik Coviv-19 dan masa pemulihan dengan kebiasaan hidup baru bergabung dalam komunitas Yayasan Kita Menulis, yang hingga saat ini telah menulis 22 chapter pada judul buku yang berbeda.



Asri Mulya Setiawan, ST., MT. adalah pertama dari pasangan Drs. M. Arief Tahir dan Asmawati HL, S.Pd. Penulis lahir di Ujung Pandang , 21 November 1988. Penulis menyelesaikan studi S1–Sarjana Teknik (ST) pada Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin tahun 2013 konsentrasi Struktur, S2–Magister Teknik (MT) Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Univeristas Hasanuddin (Unhas) tahun 2015 konsentrasi Struktur dan berhasil mendapatkan Beasiswa BPPDN hingga penyelesaian studi. Bergabung menjadi Dosen Tetap pada Universitas Fajar sejak tahun 2016 - sekarang. Penulis mengampuh mata kuliah konsentrasi struktur seperti Rekayasa & Dinamika Gempa, Perancangan Bangunan Sipil, Perencanaan Jembatan, hingga Aplikasi Komputer Struktur. Penulis sangat tertarik tentang penelitian mengenai Kuat Lentur Beton Pasca Retak Dengan Pemanfaatan Material FRP Sebagai Perkuatan Eksternal. Penulis telah menulis beberapa jurnal nasional terakreditasi Sinta dan pada prosiding internasional. email: klanmulyasetiawan@gmail.com dan asrimulya@unifa.ac.id. HP/wa: 08114106226



Yanti, S.Pd., MT, lahir di kota Ujung Pandang, 26 April 1983. Menyelesaikan pendidikan Strata Satu di kampus Universitas Negeri Makassar jurusan Pendidikan Teknik Mesin pada tahun 2007. Dan Melanjutkan pendidikan di Universitas Hasanuddin jurusan Teknik Mesin pada tahun 2008 dan tamat di tahun 2011. Saat ini sebagai Dosen di Universitas Fajar pada program studi Teknik Mesin.

KOROSI & PENCEGAHANNYA

Pencegahan Korosi hingga kini belum seperti yang diharapkan, seperti pudarnya warna mengkilap pada perak (Ag), munculnya warna kehijauan pada tembaga (Cu), kerusakan logam besi (Fe) dengan terbentuknya karat oksida, dan lain-lain. Oleh karena itu perlu dikelola dengan baik melalui pencegahan terjadinya korosi.

Buku Korosi dan Pencegahannya terdiri atas 12 bab yaitu: Pengertian Korosi, Mekanisme Korosi, Jenis-Jenis Korosi, Pengukuran Korosi, Termodinamika Korosi, Korosi Pada Logam, Pengendalian Korosi, Pelapisan (Coating), Proteksi Anodik, Proteksi Katodik, Inhibitor, Penanggulangan Dan Pencegahan Korosi.



YAYASAN KITA MENULIS
press@kitamenulis.id
www.kitamenulis.id

ISBN 978-623-342-041-9



kasta 2

ORIGINALITY REPORT

14%	14%	0%	3%
SIMILARITY INDEX	INTERNET SOURCES	PUBLICATIONS	STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1	richohan.blogspot.com	2%
	Internet Source	
2	www.scribd.com	2%
	Internet Source	
3	initu.id	2%
	Internet Source	
4	repo-nkm.batan.go.id	1%
	Internet Source	
5	adoc.tips	1%
	Internet Source	
6	pt.scribd.com	1%
	Internet Source	
7	es.scribd.com	1%
	Internet Source	
8	eprints.uny.ac.id	1%
	Internet Source	
9	beeothers.wordpress.com	1%
	Internet Source	
10	www.bunghatta.ac.id	1%
	Internet Source	
11	www.coursehero.com	1%
	Internet Source	
12	repository.upnyk.ac.id	1%
	Internet Source	
13	id.wikipedia.org	1%
	Internet Source	

Exclude quotes	On	Exclude matches	< 1%
Exclude bibliography	On		