



TUGAS AKHIR - TL 141584

PERANCANGAN SISTEM PROTEKSI KATODIK ARUS PAKSA PADA PIPA BAJA API 5L GRADE B DI DALAM TANAH DENGAN VARIASI JENIS COATING

MUHAMMAD RIZAL PAMBUDI
NRP 2713 100 004

Dosen Pembimbing :
Tubagus Noor Rohmannudin. S.T., M.Sc.
Lukman Noerochim, S.T., M.Sc.(Eng)., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017



TUGAS AKHIR - TL 141584

**PERANCANGAN SISTEM PROTEKSI KATODIK
ARUS PAKSA PADA PIPA BAJA API 5L GRADE
B DI DALAM TANAH DENGAN VARIASI JENIS
COATING**

**MUHAMMAD RIZAL PAMBUDI
NRP 2713 100 004**

**Dosen Pembimbing :
Tubagus Noor Rohmannudin. ST., M.Sc.
Lukman Noerochim, ST., M.Sc.(Eng)., Ph.D.**

**DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017**

(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)



FINAL PROJECT - TL 141584

**DESIGN OF IMPRESSED CURRENT CATHODIC
PROTECTION ON STEEL PIPE API 5L GRADE B
IN SOIL WITH TYPE OF COATING**

**MUHAMMAD RIZAL PAMBUDI
NRP 2713 100 004**

Advisor Lectures::

Tubagus Noor Rohmannudin. ST., M.Sc.

Lukman Noerochim, ST., M.Sc.(Eng)., Ph.D.

**MATERIALS AND METALLURGICAL ENGINEERING DEPARTE
MENT
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2017**

(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar
Sarjana Teknik

Pada

Bidang Studi Korosi dan Analisa Kegagalan

Program Studi S-1 Departemen Teknik Material dan Metalurgi

Fakultas Teknologi Industri

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh

MUHAMMAD RIZAL PAMBUDI

NRP 2713 100 004

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

Tubagus Noor Rohmannudin, ST., M.Sc. (Pembimbing I)

Lukman Noerochim, ST., M.Sc.(Eng.), Ph.D. (Pembimbing II)



(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)

*Design of Impressed Current Cathodic Protection on Steel Pipes
API 5L Grade B in Soil with Type of Coating*

Name : Muhammad Rizal Pambudi
NRP : 27131000004
Departemen : Material Engineering ITS
Advisors Lecture : Tubagus Noor R. ST., M.Sc.
Dr. Lukman N, ST., M.Sc (Eng)

ABSTRACT

Impressed Current Cathodic Protection (ICCP) is a method that aims to prevent corrosion of steel or iron material. This method works by reversing the direction of corrosion or electric current in the corrosion process so that an electric current uniformly flows throughout the metal surface through the electrolyte. Cathodic protection of forced current is chosen because it is easy to control the current given in the system. In ICCP, the anode used is an inert material so it has a longer active period. Materials such as platinum, magnets, silicon steel, and graphite are commonly used in such applications. Adapaun for cathode used Steel Pipe. The purpose of this research is to design cathodic protection on pipe with API type 5L with coating variable. The variables used in this study are different types of coatings namely base coat and top coat. The 5L API pipe length dimension used is 1.5m. Measurements taken are the measurement of soil resistivity and pH on the ground where the pipe is used. At the cathode with the use of secondary and primary coatings the required protective current will be lower than that of the cathode using only the primary coating. While in environmental conditions with different soil resistivity, the higher the soil resistivity will result in lower protection requirement.

Keywords: *Anode, Cathode, Corrosion, Impressed Current Cathodic Protection*

(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)

Perancangan Sistem Proteksi Katodik Arus Paksa pada Pipa Baja API 5L Grade B di Dalam Tanah Dengan Variasi Jenis Coating

Nama : Muhammad Rizal Pambudi
NRP : 27131000004
Departemen : Teknik Material FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Tubagus Noor R. ST., M.Sc.
Dr. Lukman N, ST., M.Sc (Eng)

ABSTRAK

Impressed Current Cathodic Protection (ICCP) adalah suatu metode yang bertujuan untuk mencegah korosi pada material baja atau besi. Metode ini bekerja dengan membalikkan arah arus korosi atau listrik dalam proses korosi sehingga arus listrik searah mengalir keseluruh permukaan logam melalui elektrolit. Proteksi katodik arus paksa dipilih karena mudah untuk mengontrol arus yang diberikan dalam sistem. Pada ICCP, anoda yang digunakan adalah material inert sehingga mempunyai masa aktif yang lebih lama. Material seperti platinum, magnet, baja silikon, dan grafit biasanya digunakan pada pengaplikasian tersebut. Adapaun untuk katoda digunakan Pipa Baja. Tujuan dalam penelitian ini adalah untuk merancang proteksi katodik pada pipa dengan tipe API 5L dengan variabel coating. Variabel yang digunakan pada penelitian ini adalah perbedaan jenis *pelapisan* yaitu *base coat* dan *top coat*. Dimensi panjang pipa API 5L yang digunakan adalah 1,5m. Pengukuran yang dilakukan adalah pengukuran resistivitas tanah dan pH pada tanah tempat pipa digunakan. Pada katoda dengan penggunaan coating sekunder dan primer maka arus proteksi yang diperlukan akan semakin rendah dibandingkan dengan katoda yang hanya menggunakan coating primer. Sementara pada kondisi lingkungan dengan resistivitas tanah yang berbeda, semakin tinggi resistivitas tanah maka mengakibatkan kebutuhan arus proteksi semakin rendah.

Kata kunci: *Anoda, Katoda, Korosi, Proteksi Katodik Arus Paksa,*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat, anugerah, serta karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir serta menyusun laporan tugas akhir dengan judul **“Perancangan Sistem Proteksi Katodik Arus Paksa pada Pipa Baja API 5L Grade B di Dalam Tanah Dengan Variasi Jenis Coating”**.

Laporan tugas akhir ini dibuat untuk melengkapi mata kuliah tugas akhir yang menjadi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T.) di Departemen Teknik Material - Fakultas Teknologi Industri - Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan dukungan dari berbagai pihak, laporan tugas akhir ini tidak dapat terselesaikan dengan baik. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada pihak yang telah memberikan dukungan, bimbingan, dan kesempatan kepada penulis hingga laporan tugas akhir ini dapat diselesaikan dengan baik, diantaranya:

1. Kedua orang tua serta kelima saudara penulis yang telah memberikan banyak doa, dukungan moriil dan materiil, semangat, cinta kasih, motivasi, dan inspirasi kepada penulis.
2. Bapak Dr. Agung Purniawan, S.T., M.Eng selaku Kepala Departemen Teknik Material FTI – ITS.
3. Bapak Tubagus Nur Rohmannudin, S. T, M. Sc selaku dosen pembimbing satu tugas akhir penulis yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu selama pengerjaan tugas akhir ini.
4. Bapak Lukman Noerochim, ST., M.Sc.(Eng)., Ph.D. selaku dosen pembimbing dua tugas akhir penulis yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu selama pengerjaan tugas akhir ini.
5. Bapak Dr. Eng. Hosta Ardhyanta, S.T., M.Sc. selaku Koordinator Tugas Akhir Departemen Teknik Material FTI-ITS.

6. Bapak Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc. selaku dosen wali yang sangat mengayomi dan memberikan motivasi selama penulis menjalani pendidikan di Departemen Teknik Material FTI-ITS.
7. Tim Dosen Penguji seminar dan sidang tugas akhir, serta seluruh bapak dan ibu dosen dan karyawan di lingkungan Departemen Teknik Material FTI-ITS yang tak kenal lelah dalam mendidik putra-putri terbaik bangsa ini.
8. Maulana, Pribadi, Dcebunk, Nia, Ilmi, Igfar, Kresna, Tanyo, Ayu, Bedry, Farid, Naufal, Fikri dan seluruh pengguna Laboratorium Korosi dan Kegagalan Material
9. Mia, Dony, dan Icha selaku teman menuntut ilmu agama
10. Teman-teman Keputih Galaxy
11. Penghuni Kos Big Mama yang senantiasa menemani kesendirian penulis.
12. Santri PPM yang mengajarkan motivasi untuk selalu belajar
13. Serta seluruh pihak yang belum bisa dituliskan satu per satu oleh penulis. Terimakasih atas dukungan dan bantuan teman-teman sekalian.

Penulis berharap laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi seluruh pihak yang membaca. Penulis juga menyadari masih terdapat banyak kekurangan dalam penulisan laporan tugas akhir ini, sehingga penulis sangat menerima kritik dan saran dari para pembaca yang dapat membangun demi kesempurnaan laporan tugas akhir ini.

Surabaya, Juli 2017
Penulis,

M Rizal Pambudi
2713100004

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xxi
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Korosi	5
2.2 Mekanisme Korosi	7
2.3 Elektrokimia dan Redox	9
2.4 Deret Volta	11
2.5 Sel Galvani	13
2.6 Jenis-Jenis Korosi	18
2.7 Laju Korosi	29
2.8 Korosi Baja Dalam Tanah	31
2.9 Pengaruh Lingkungan Terhadap Korosi	37
2.10 Teknik Pencegahan Korosi	41
2.11 Inhibitor	45
2.11.1 Sistem Kerja Inhibitor	46
2.11.2 Pengaruh Adanya Inhibitor pada Korosi	47
2.12 Proteksi Katodik	48
2.13 Proteksi Katodik Anoda Korban	48
2.13.1 Metode Kerja SACP	51
2.13.2 Anoda pada SACP	52

2.14.3 Penggunaan SACP	54
2.14 Proteksi Katodik Arus Paksa	56
2.14.1 Reaksi pada Sistem Proteksi Katodik Arus Paksa	58
2.14.2 Anoda pada Sistem Proteksi Katodik Arus Paksa	59
2.14.3 Susunan Penanaman Anoda Groundbed	65
2.14.4 Kedalaman Tanam Anoda Groundbed	66
2.14.5 Backfill	67
2.14.6 Transformator Rectifier	68
2.15 Elektroda Acuan	69
2.16 Katoda	72
2.17 Elektrolit	72
2.18 Angka Keamanan	73
2.19 Holiday Detector	73
2.20 Lapisan Pelindung	74
2.20.1 <i>Coating</i> primer	75
2.20.2 <i>Coating</i> Sekunder/ Intermediate	76
2.20.3 Top Coating	76
2.21 Potensial Proteksi	77
2.22 Resistivitas Tanah	78
2.23 Densitas Arus	81
2.24 Overprotection	82
2.25 Diagram Pourbaix	83
2.26 Penelitian Sebelumnya	88
BAB III METODOLOGI	
3.1 Diagram Alir	93
3.2 Bahan	94
3.3 Peralatan	94
3.4 Langkah Perancangan	94
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN	
4.1 Perencanaan Perancangan	115
4.1.1 Kriteria Desain	115
4.1.2 Standar Desain Perancangan	115
4.2 Pengumpulan Data	115
4.2.1 Data Material	115
4.2.2 Data Anoda	116

4.2.3 Data Lapis Lindung	116
4.2.4 Data Tanah	117
4.2.4.1 Pengukuran Resistivitas Tanah	117
4.2.4.2 Pengukuran pH Tanah	119
4.3 Perhitungan Desain	120
4.3.1 Luas permukaan yang diproteksi	121
4.3.2 Konduktansi Lapis Lindung Pipa	121
4.3.3 Tahanan Pipa	122
4.3.4 Konstanta Atenuasi	123
4.3.5 Tahanan Karakteristik Pipa	124
4.3.6 Pergeseran Potensial Pipa	124
4.3.7 Kebutuhan Arus Proteksi	125
4.3.8 Keperluan Arus DC minimum	126
4.3.9 Berat Anoda	127
4.3.10 Jumlah Anoda yang Dibutuhkan	128
4.3.11 Tahanan Anoda Tunggal	129
4.3.12 Faktor Interferensi Anoda	129
4.3.13 Tahanan groundbed	130
4.3.14 Tegangan yang diperlukan	131
4.4 Perhitungan Arus dan Potensial	132
4.5 Hasil Proteksi	138
4.6 Faktor yang Memengaruhi Kebutuhan Arus Proteksi	148
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan.....	153
5.2 Saran.....	153
DAFTAR PUSTAKA	xxiii
LAMPIRAN.....	xxv
BIODATA PENULIS.....	xxix

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Deret Volta	11
Gambar 2.2 Bagian Sel Volta atau Sel Galvani	15
Gambar 2.3 Penggambaran Notasi Sel	15
Gambar 2.4 Korosi Merata	19
Gambar 2.5 Proses Korosi Galvanik	19
Gambar 2.6 Contoh Korosi Celah	21
Gambar 2.7 Mekanisme Korosi sumuran	22
Gambar 2.8 Korosi SCC	23
Gambar 2.9 Korosi Integranular	24
Gambar 2.10 Korosi Erosi	27
Gambar 2.11 Korosi Mikrobiologi	28
Gambar 2.12 Korosi lelah komponen boiler	29
Gambar 2.13 Laju Korosi pada penambahan Oxidizer	33
Gambar 2.14 Temperatur dan laju korosi	38
Gambar 2.15 Korosi pada knalpot kendaraan bermotor	39
Gambar 2.16 Proses Pengecetan Pipa	41
Gambar 2.17 Pelapisan Krom pada Body Sepeda	42
Gambar 2.18 Pelapisan Timah pada Logam Fe	43
Gambar 2.19 Pelapisan dengan <i>Zink Spray</i>	43
Gambar 2.20 Rangkaian Proteksi Katodik Anoda Tumbal	49
Gambar 2.21 Rangkaian sistem SACP	52
Gambar 2.22 Rangkaian Proteksi Katodik Arus Paksa	57
Gambar 2.23 Besi Silicon	61
Gambar 2.24 Anoda Timbal Perak	62
Gambar 2.25 Anoda Grafit	62
Gambar 2.26 Anoda Platina	64
Gambar 2.27 Instalasi Anoda Tipe Vertikel	65
Gambar 2.28 Instalasi Tipe Anoda Tipe Horisontal	66
Gambar 2.29 Point Deep Well Anode Groundbed	67
Gambar 2.30 Transformator Rectifier	69
Gambar 2.31 Elektroda Acuan Ag/AgCl	71
Gambar 2.32 Elektroda Acuan Cu/CuSO ₄	72
Gambar 2.33 Konfigurasi Metode Werner	80

Gambar 2.34 Diagram Pourbaix	84
Gambar 2.35 Kebutuhan Arus proteksi (TA)	88
Gambar 2.36 Kebutuhan Arus Proteksi pada Pipa	89
Gambar 3.1 Diagram Alir	93
Gambar 3.2 Sel Aki	96
Gambar 3.3 Kabel Tembaga	96
Gambar 3.4 Pin Tembaga	97
Gambar 3.5 Multitester	97
Gambar 3.6 Pengukuran Resistivitas Tanah	98
Gambar 3.7 Pengukuran pH Tanah	100
Gambar 3.8 Pengukuran Pipa Baja API 5L Grade B	105
Gambar 3.9 Pembersih Pipa dari pengotor	105
Gambar 3.10 Pengait kabel pada pipa baja	106
Gambar 3.11 Pemberian Coating Primer	107
Gambar 3.12 Pemberian Coating Ganda (Primer dan Sekunder)	108
Gambar 3.13 Pengukuran anoda grafit	109
Gambar 3.14 Anoda yang telah diberi sambungan kabel	109
Gambar 3.15 Anoda yang akan diberikan backfill	110
Gambar 3.16 Pemberian kabel pada pipa	111
Gambar 3.17 Instalasi sambungan kabel pada Rectifier	111
Gambar 3.18 Pipa ditanam di kedalaman 50 cm	112
Gambar 3.19 Pemberian arus proteksi oleh rectifier	112
Gambar 3.20 Pengukuran tegangan proteksi	113
Gambar 4.1 Pengukuran potensial awal pipa sebelum diberi arus proteksi	132
Gambar 4.2 Grafik Kebutuhan Arus Proteksi Pipa	134
Gambar 4.3 Grafik Potensial Proteksi Pipa	137
Gambar 4.4 Pengukuran potensial akhir pipa sebelum diberi arus proteksi	138
Gambar 4.5 Pipa dengan coating Primer setelah 28 hari pemberian arus proteksi	139
Gambar 4.6 Pipa dengan coating Primer dan Sekunder setelah 28 hari pemberian arus proteksi	140
Gambar 4.7 Permukaan pipa coating primer setelah 28 hari	141

Gambar 4.8 Permukaan pipa coating primer dan sekunder setelah 28 hari	142
Gambar 4.9 Sambungan lasan pada pipa coating primer	144
Gambar 4.10 Sambungan lasan pada pipa coating primer dan sekunder	145
Gambar 4.11 Anoda grafit pada pipa coating primer	146
Gambar 4.12 Anoda grafit pada pipa coating primer dan sekunder	147

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Konstanta <i>Corrosion Rate</i> Unit Desire	30
Tabel 2.2 Spesifikasi Anoda	53
Table 2.3 Karakteristik Anoda Korban	55
Tabel 2.4 Nilai Standar Potensial Logam untuk Proteksi Katodik	55
Tabel 2.5 Nilai Electrochemical Efficiency untul Al dan Zn pada anoda korban	56
Tabel 2.6 Jenis dan Spesifikasi Anoda	64
Tabel 2.7 Densitas <i>Carbonaceous Backfill</i>	68
Tabel 2.8 Nilai Elektroda Acuan	77
Tabel 2.9 Klasifikasi Resistivitas Tanah	79
Tabel 2.10 Klasifikasi Tingkat Densitas Arus	81
Tabel 2.11 Tabel Pourbaix (1)	86
Tabel 2.12 Tabel Pourbaix (2).....	87
Tabel 4.1 Komposisi Kimia Baja API 5L Grade B	116
Tabel 4.2 Hasil Pengukuran Resistivitas Tanah	118
Tabel 4.3 Hasil pengukuran pH	120
Tabel 4.4 Hasil Pengukuran Potensial Pipa Sebelum Proteksi .	132
Tabel 4.5 Hasil Pengukuran Arus Proteksi Pipa Coating Primer	133
Tabel 4.6 Hasil Pengukuran Arus Proteksi Pipa Coating Ganda (Primer dan Sekunder)	134
Tabel 4.7 Hasil Pengukuran Tegangan Proteksi Pipa Coating Primer	136
Tabel 4.8 Hasil Pengukuran Tegangan Proteksi Pipa Coating Ganda (Primer dan Sekunder)	137
Tabel 4.9 Hasil Pengukuran Potensial Pipa Setelah Proteksi ...	138

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1. 1. Latar Belakang

Korosi merupakan salah satu masalah serius yang berakibat pada timbulnya kerugian dalam segi pembiayaan. Berdasarkan penelitian di Amerika, korosi telah menelan biaya ratusan milyar dolar setiap tahunnya. Korosi adalah proses atau reaksi elektrokimia yang bersifat alamiah dan berlangsung dengan sendirinya, oleh karena itu korosi tidak dapat dicegah atau dihentikan sama sekali. Korosi hanya bisa dikendalikan atau diperlambat lajunya sehingga memperlambat proses perusakannya. Salah satu metode untuk mengendalikan korosi adalah dengan proteksi katodik metode *Impressed Current Cathodic Protection* (ICCP)

Impressed Current Cathodic Protection (ICCP) adalah suatu metode yang bertujuan untuk mencegah korosi pada material baja atau besi. Yaitu membalikkan arah arus korosi atau listrik dalam proses korosi, yang berarti mengalirkan arus listrik searah keseluruhan permukaan logam melalui elektrolit. Alasan yang paling umum untuk memilih ICCP yaitu dengan menggunakan galvanic cathodic karena kebutuhan arus proteksinya baik dibandingkan dengan proteksi dengan berbahan lain. Anoda yang digunakan sebagai proteksi kebutuhan yaitu mempunyai masa aktif yang lama. Dengan demikian, material seperti platinum, magnet, baja silikon, dan grafit biasanya digunakan pada pengaplikasian tersebut.

Pipa baja banyak digunakan dalam berbagai industri, pipa baja biasa digunakan untuk memindahkan zat hasil pemrosesan seperti cairan, gas, uap, zat padat yang dicairkan maupun serbuk halus. Material yang digunakan sebagai pipa sangat banyak diantaranya adalah beton cor, gelas, timbal, kuningan (brass), tembaga, plastik, aluminium, besi tuang, namun pada umumnya material yang umum digunakan sebagai pipa adalah baja karbon dan baja paduan.



Pada pipa baja yang ditanam didalam tanah sangat rawan terjadi korosi akibat pengaruh lingkungan sekitarnya. Proteksi pada pipa baja diperlukan agar menghambat laju korosi sehingga pipa tersebut tidak mengalami kegagalan atau kerusakan yang dapat membahayakan lingkungan sekitar. Proteksi pada pipa saat ini sudah mengalami beberapa kemajuan, proteksi yang biasa digunakan antara lain dengan menggunakan metoda anoda tumbal, metoda arus paksa, inhibitor, dan penggunaan lapisan pelindung (coating). Masing masing metoda memiliki keunggulan dan kekurangan tersendiri.

Perlindungan tambahan dalam korosi dapat dilakukan dengan memberikan lapisan pada pipa baja. Coating dapat menurunkan laju korosi sehingga memungkinkan pipa dapat lebih lama terlindungi. Pemberian coating juga dapat memperlambat konsumsi anoda sehingga konsumsi anoda yang terpasang dalam sistem proteksi katodik menjadi lebih lama. Dampak dari pemberian anoda dan konsumsi anoda juga akan mempengaruhi pemberian jumlah arus yang diberikan dalam sistem proteksi katodik arus paksa.

Hasil perhitungan dan pembahasan akan menunjukkan dan membandingkan kebutuhan arus proteksi dan konsumsi anoda dengan variabel coating sehingga akan bermanfaat untuk pengembangan teknologi dalam bidang korosi dan pengendalian korosi.

1. 2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang terdapat pada penelitian ini adalah:

1. Bagaimana merancang sistem proteksi katodik arus paksa (*Impressed Current Cathodic Protection*) pada pipa baja API 5L Grade B
2. Bagaimana perbedaan kebutuhan arus proteksi pipa pada setiap jenis pelapisan
3. Bagaimana faktor-faktor dalam sistem kerja proteksi arus paksa (*Impressed Current Cathodic Protection*) pada pipa

BAB I PENDAHULUAN



baja yang berada di dalam tanah dapat mempengaruhi sistem kerja tersebut.

1. 3. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Merancang sistem proteksi katodik arus paksa (*Impressed Current Cathodic Protection*) pada pipa baja API 5L Grade B
2. Membandingkan kebutuhan arus proteksi pipa pada setiap jenis pelapisan
3. Menganalisa faktor-faktor dalam sistem kerja proteksi arus paksa (*Impressed Current Cathodic Protection*) pada pipa baja yang berada di dalam tanah dapat mempengaruhi sistem kerja tersebut.

1. 4. Batasan dan Ruang Lingkup Penelitian

Batasan-batasan dari permasalahan yang dibahas didalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Pipa baja yang digunakan pada penelitian ini adalah tipe API 5L grade B
2. Ketebalan coating dianggap sama
3. Dimensi Pipa yang digunakan adalah homogen

1. 5. Manfaat penelitian Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk memberikan manfaat antara lain:

1. Menghasilkan rancangan sistem proteksi katodik arus proteksi pada pipa API 5L grade B dengan perbedaan coating
2. Dapat mempelajari pengaruh yang mempengaruhi sistem proteksi katodik arus paksa pada pipa API 5L grade B di dalam tanah



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Korosi

Indonesia merupakan negara yang beriklim tropis dengan tingkat curah hujan dan kelembaban yang tinggi serta intensitas sinar matahari yang tinggi pula, dan sebagai Negara berkembang, di Indonesia juga banyak bermunculan industri-industri yang mempunyai pengaruh cukup besar terhadap tingkat pencemaran pada lingkungan. Fenomena alam dan material khususnya logam mempunyai suatu keterikatan dalam suatu sistem dan proses. Hubungan tersebut diimplementasikan dalam suatu proses kerusakan yang dinamakan korosi. Korosi adalah kerusakan material khususnya logam secara umum akibat reaksi dengan lingkungan sekitarnya. Korosi merupakan penurunan kualitas yang disebabkan oleh reaksi kimia bahan logam dengan unsur-unsur lain yang terdapat di alam.

Dalam bahasa sehari-hari, korosi disebut perkaratan. Contoh korosi yang paling lazim adalah perkaratan besi. Pada peristiwa korosi, logam mengalami oksidasi, sedangkan oksigen (udara) mengalami reduksi. Karat logam umumnya adalah berupa oksida atau karbonat. Rumus kimia karat besi adalah $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, suatu zat padat yang berwarna coklat-merah. Dua jenis mekanisme utama dari korosi adalah berdasarkan reaksi kimia secara langsung, dan reaksi elektrokimia. Korosi dapat terjadi didalam lingkungan kering dan juga lingkungan basah. Korosi yang terjadi pada logam tidak dapat dihindari, tetapi hanya dapat dicegah dan dikendalikan sehingga struktur atau komponen mempunyai masa pakai yang lebih lama. Hasil dari proses kerusakan berupa berbagai produk korosi misalnya berbagai macam oksida logam, kerusakan permukaan logam secara morfologi, perubahan sifat mekanis, perubahan sifat kimia. Dengan dasar pengetahuan tentang elektrokimia proses korosi yang dapat menjelaskan mekanisme dari korosi, dapat dilakukan usaha-usaha untuk pencegahan terbentuknya korosi.



Kecepatan korosi sangat tergantung pada banyak faktor, seperti ada atau tidaknya lapisan oksida, karena lapisan oksida dapat menghalangi beda potensial terhadap elektrode lainnya yang akan sangat berbeda bila masih bersih dari oksida. Korosi pada besi menimbulkan banyak kerugian, karena barang-barang atau bangunan yang menggunakan besi menjadi tidak awet. Korosi pada besi dapat dicegah dengan membuat besi menjadi baja tahan karat (stainless steel), namun proses ini membutuhkan biaya yang mahal, sehingga tidak sesuai dengan kebanyakan penggunaan besi. Penggunaan struktur yang terbuat dari besi dan baja kini memiliki peranan yang sangat penting dalam dunia industri terutama pada penggunaan untuk saluran air, saluran gas, maupun tiang konstruksi. Struktur yang diaplikasikan pada kegiatan tersebut didesain sedemikian rupa agar dapat dipakai hingga 30-50 tahun. Namun pada kenyataannya timbul banyak permasalahan yang menyebabkan turunnya kualitas baja tersebut hingga terjadi kerusakan yang sangat parah. Hal ini dikarenakan korosi yang menjadi penyebab utama terhadap kegagalan material dimana dampak yang ditimbulkan akan berimbas pada lingkungan dan ekonomi. Oleh karena itu, berbagai upaya terus dilakukan guna untuk mempertahankan masa pemakaian yang lebih lama dan sesuai standar.

Selain itu, kondisi pada struktur yang dipendam didalam tanah dapat membuat masalah menjadi lebih kompleks. Pada umumnya, korosi pada tanah dapat dibatasi dengan pengukuran resistivitas tanah dan potensial struktur terhadap tanah. Namun setelah diteliti kembali masih terdapat banyak faktor yang dapat menyebabkan timbulnya korosi pada tanah, diantaranya ialah jenis tanah, kelembaban, pH tanah, dan cacat/goresan pada baja yang dapat menimbulkan korosi sumuran. Pelapisan (*Coating*) menjadi solusi untuk menjaga kestabilan dan penghalang terhadap lingkungan korosif untuk mengurangi laju degradasi. Lapisan tambahan diberikan untuk mengisolasi struktur agar terhindar dari lingkungan luar yang dapat menimbulkan korosi.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



Namun pada kenyataannya, tak jarang saat proses pemasangan *coating* terdapat ketidaksempurnaan sehingga timbul goresan atau sobekan. Usaha lain yang dapat dilakukan untuk mengendalikan korosi ialah dengan menggunakan proteksi katodik metode *Impressed Current Cathodic Protection* (ICCP). Sistem proteksi ini dapat melindungi baja yang relatif besar dengan memberikan sejumlah arus secara paksa yang dapat diatur sesuai dengan kebutuhan. Dengan keuntungan yang lebih fleksibel dalam mengendalikan korosi pada struktur baja konstruksi yang melatarbelakangi penulis untuk melakukan penelitian ini. Pada penelitian ini akan dibahas karakteristik tanah pada tingkat keasaman yang berbeda-beda terhadap kebutuhan arus proteksi yang dibutuhkan oleh struktur baja yang dipendam didalam tanah. Selain itu, variabel lain yang diteliti ialah variasi cacat gores yang diberikan pada lapis lindung diharapkan memiliki pengaruh pada kebutuhan proteksi katodik.

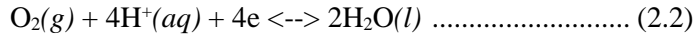
2.2 Mekanisme Korosi

Korosi terjadi melalui reaksi redoks, di mana logam mengalami oksidasi, sedangkan oksigen mengalami reduksi. Karat logam umumnya berupa oksida atau karbonat. Karat pada besi berupa zat yang berwarna coklat-merah dengan rumus kimia $Fe_2O_3 \cdot xH_2O$. Oksida besi (karat) dapat mengelupas, sehingga secara bertahap permukaan yang baru terbuka itu mengalami korosi. Berbeda dengan aluminium, hasil korosi berupa Al_2O_3 membentuk lapisan yang melindungi lapisan logam dari korosi selanjutnya. Hal ini dapat menerangkan mengapa panci dari besi lebih cepat rusak jika dibiarkan, sedangkan panci dari aluminium lebih awet.

Pada peristiwa korosi, logam mengalami oksidasi, sedangkan oksigen (udara) mengalami reduksi. Karat logam umumnya adalah berupa oksida atau karbonat. Rumus kimia karat besi adalah $Fe_2O_3 \cdot nH_2O$, suatu zat padat yang berwarna coklat-merah. Pada korosi besi, bagian tertentu dari besi itu berlaku sebagai anode, di mana besi mengalami oksidasi.



Elektron yang dibebaskan di anode mengalir ke bagian lain dari besi itu yang bertindak sebagai katode, di mana oksigen tereduksi.



atau



Ion besi (II) yang terbentuk pada anode selanjutnya teroksidasi membentuk ion besi (III) yang kemudian membentuk senyawa oksida terhidrasi, yaitu karat besi. Mengenai bagian mana dari besi itu yang bertindak sebagai anode dan bagian mana yang bertindak sebagai katode, bergantung pada berbagai faktor, misalnya zat pengotor, atau perbedaan rapat logam itu.

Korosi dapat juga diartikan sebagai serangan yang merusak logam karena logam bereaksi secara kimia atau elektrokimia dengan lingkungan. Ada definisi lain yang mengatakan bahwa korosi adalah kebalikan dari proses ekstraksi logam dari bijih mineralnya. Contohnya, bijih mineral logam besi di alam bebas ada dalam bentuk senyawa besi oksida atau besi sulfida, setelah diekstraksi dan diolah, akan dihasilkan besi yang digunakan untuk pembuatan baja atau baja paduan. Selama pemakaian, baja tersebut akan bereaksi dengan lingkungan yang menyebabkan korosi (kembali menjadi senyawa besi oksida).

Deret Volta dan hukum Nernst akan membantu untuk dapat mengetahui kemungkinan terjadinya korosi. Kecepatan korosi sangat tergantung pada banyak faktor, seperti ada atau tidaknya lapisan oksida, karena lapisan oksida dapat menghalangi beda potensial terhadap elektrode lainnya yang akan sangat berbeda bila masih bersih dari oksida.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



2.3 Elektrokimia dan Redox

Elektrokimia adalah cabang kimia yang mempelajari reaksi kimia yang berlangsung dalam larutan pada antarmuka konduktor elektron (logam atau semikonduktor) dan konduktor ionik (elektrolit), dan melibatkan perpindahan elektron antara elektroda dan elektrolit atau sejenis dalam larutan. Jika reaksi kimia didorong oleh tegangan eksternal, maka akan seperti elektrolisis, atau jika tegangan yang dibuat oleh reaksi kimia seperti di baterai, maka akan terjadi reaksi elektrokimia. Sebaliknya, reaksi kimia terjadi di mana elektron yang ditransfer antara molekul yang disebut oksidasi atau reduksi (redoks) reaksi. Secara umum, elektrokimia berkaitan dengan situasi di mana oksidasi dan reduksi reaksi dipisahkan dalam ruang atau waktu, dihubungkan oleh sebuah sirkuit listrik eksternal.

Ada dua jenis sel elektrokimia, yaitu sel galvanik dan elektrolit. Sel galvanik adalah sel yang menghasilkan tenaga listrik ketika sel mengalami reaksi kimia sedangkan Sel elektrolit adalah sel yang mengalami reaksi kimia ketika tegangan listrik diterapkan. Elektrolisis dan korosi adalah contoh dari proses penting seperti yang ada pada elektrokimia. Prinsip-prinsip dasar elektrokimia didasarkan pada rasio tegangan antara dua zat dan memiliki kemampuan untuk bereaksi satu sama lain. Semakin lama logam dalam elemen galvanik yang terpisah dalam seri tegangan elektrokimia, semakin kuat listrik akan terekstrak.

Teori Elektro-kimia dan metode elektrokimia memiliki aplikasi praktis dalam teknologi dan industri dalam banyak cara. Penemuan dan pemahaman reaksi elektrokimia telah memberikan kontribusi untuk mengembangkan sel bahan bakar dan baterai, dan pemahaman logam relatif terhadap satu sama lain dalam elektrolisis dan korosi. Reaksi kimia yang terjadi pada antarmuka konduktor listrik (disebut elektroda yang dapat menjadi logam atau semikonduktor) dan konduktor ionik (elektrolit) dapat menjadi solusi dan dalam beberapa kasus khusus, zat padat. Jika reaksi kimia didorong oleh beda potensial maka, secara eksternal disebut elektrolisis. Namun, jika penurunan potensi listrik dibuat sebagai



hasil dari reaksi kimia, yang dikenal sebagai "daya baterai", juga disebut sel baterai atau galvanik.

Reaksi kimia yang menghasilkan perpindahan elektron antara molekul yang dikenal sebagai reaksi redoks, dan pentingnya dalam elektrokimia sangat penting, karena melalui reaksi tersebut dilakukan proses yang menghasilkan listrik atau sebaliknya, yang diproduksi sebagai konsekuensinya. Secara umum, studi elektrokimia menangani situasi di mana terdapat reaksi oksidasi-reduksi ditemukan dipisahkan secara fisik atau sementara, berada di lingkungan yang terhubung ke sebuah sirkuit listrik. Penelitian yang terakhir adalah kimia analitik dalam subdiscipline dikenal sebagai analisis potensiometri. Ada 2 prinsip sel elektrokimia:

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

Sel elektrokimia baik yang melepas atau menyerap energi selalu melibatkan perpindahan elektron-elektron dari satu senyawa ke senyawa yang lain dalam suatu reaksi oksidasi reduksi. Oksidasi adalah hilangnya elektron sedangkan reduksi diperolehnya elektron. Zat pengoksidasi adalah spesies yang melakukan oksidasi, mengambil elektron dari zat yang teroksidasi. Zat pereduksi adalah spesies yang melakukan reduksi memberikan elektron kepada zat yang tereduksi. Setelah reaksi zat teroksidasi memiliki bilangan oksidasi lebih tinggi sedangkan zat tereduksi memiliki bilangan oksidasi lebih rendah

Redoks adalah istilah yang menjelaskan berubahnya bilangan oksidasi (keadaan oksidasi) atom-atom dalam sebuah reaksi kimia. Hal ini dapat berupa proses redoks yang sederhana seperti oksidasi karbon yang menghasilkan karbon dioksida, atau reduksi karbon oleh hidrogen menghasilkan metana(CH_4), ataupun ia dapat berupa proses yang kompleks seperti oksidasi gula pada tubuh manusia melalui rentetan transfer elektron yang rumit. Istilah

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



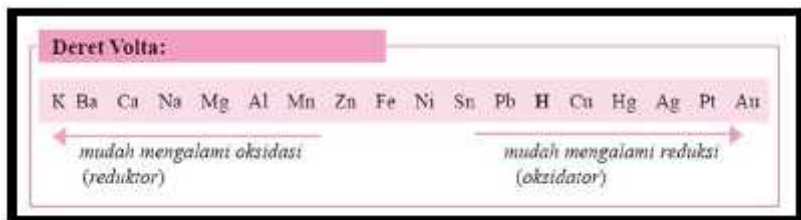
redoks berasal dari dua konsep, yaitu reduksi dan oksidasi. Ia dapat dijelaskan dengan mudah sebagai berikut:

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

Oksidasi dan reduksi tepatnya merujuk pada perubahan bilangan oksidasi karena transfer elektron yang sebenarnya tidak akan selalu terjadi. Sehingga oksidasi lebih baik didefinisikan sebagai peningkatan bilangan oksidasi, dan reduksi sebagai penurunan bilangan oksidasi. Dalam praktiknya, transfer elektron akan selalu mengubah bilangan oksidasi, namun terdapat banyak reaksi yang diklasifikasikan sebagai "redoks" walaupun tidak ada transfer elektron dalam reaksi tersebut (misalnya yang melibatkan ikatan kovalen). Reaksi non-redoks yang tidak melibatkan perubahan muatan formal (formal charge) dikenal sebagai reaksi metatesis. (Day & Underwood, 1998)

2.4 Deret Volta

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



Gambar 2.1 Deret Volta

Keterangan Gambar 2.1 Deret Volta:

- Logam bagian kiri memiliki E° sel bertanda negatif
- Logam bagian kanan memiliki E° sel bertanda positif



- Semakin ke kiri kedudukan logam semakin reaktif (semakin mudah melepaskan elektron)
- Semakin ke kiri kedudukan logam semakin mudah mengalami korosi dan merupakan reduktor yang semakin kuat
- Semakin ke kanan kedudukan logam semakin kurang reaktif (sukar melepaskan elektron)
- Semakin ke kanan kedudukan logam semakin kuat mencegah korosi dan merupakan oksidator yang semakin kuat
- Logam sebelah kiri dapat mengusir atau mendesak atau mereduksi logam sebelah kanan sehingga reaksi dapat berlangsung (spontan)
- Logam sebelah kanan tidak dapat mengusir atau mendesak atau mengoksidasi logam sebelah kiri sehingga reaksi tidak dapat berlangsung (tidak spontan)

Pada Deret Volta, unsur logam dengan potensial elektrode lebih negatif ditempatkan di bagian kiri, sedangkan unsur dengan potensial elektrode yang lebih positif ditempatkan di bagian kanan. Semakin ke kiri kedudukan suatu logam dalam deret tersebut, maka

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

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

- Logam semakin kurang reaktif (semakin sulit melepas elektron)
- Logam merupakan oksidator yang semakin kuat (semakin mudah mengalami reduksi)

Salah satu metode untuk mencegah korosi antara lain dengan menghubungkan logam (misalnya besi) dengan logam yang letaknya lebih kiri dari logam tersebut dalam deret volta (misalnya magnesium) sehingga logam yang mempunyai potensial elektrode yang lebih negatif lah yang akan mengalami oksidasi. Metode

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



pengecahan karat seperti ini disebut perlindungan katodik. Contoh lain dari perlindungan katodik adalah pipa besi, tiang telepon, dan berbagai barang lain yang dilapisi dengan zink, atau disebut Galvanisasi. Zink dapat melindungi besi dari korosi sekalipun lapisannya tidak utuh. Oleh karena potensial reduksi besi lebih positif daripada zink (posisinya dalam deret Volta lebih ke kanan), maka besi yang kontak dengan zink akan membentuk sel elektrokimia dengan besi sebagai katode. Dengan demikian besi terlindungi dan zink yang mengalami oksidasi. Badan mobil-mobil baru pada umumnya telah digalvanisasi, sehingga tahan karat. Berdasarkan sifatnya korosi terbagi atas:

1. Korosi Aktif

Ciri-ciri dari korosi aktif ini antara lain:

- Mudah melepaskan ion
- Mudah menempel di tangan

Contoh: paku yang berkarat

2. Korosi Pasif

Ciri-ciri dari korosi pasif ini antara lain:

- Sulit melepaskan ion
- Sulit menempel di tangan

Contoh: Korosi pada Aluminium

2.5 Sel Galvani

Sel volta atau sel galvani adalah suatu sel elektrokimia yang terdiri atas dua buah elektrode yang dapat menghasilkan energi listrik akibat terjadinya reaksi redoks secara spontan pada kedua elektroda tersebut yaitu sel yang mengubah energi kimia menjadi energi listrik. Sel Galvani / Sel Volta disebut juga sel kimia. Sel Galvani dipakai sebagai sumber listrik untuk penerangan, pemanasan, menjalankan motor, dan sebagainya. Reaksi redoks spontan yang dapat mengakibatkan terjadinya energi listrik ini ditemukan oleh Alessandro Guiseppe Volta (1800) dan Luigi Galvani (1780). Deret Volta pada Gambar 1 merupakan deret yang menyatakan unsur-unsur logam berdasarkan potensial



elektrode standarnya. Dan ini digunakan sebagai acuan apakah sebuah logam bisa bereaksi dengan ion logam lain (Chang, 2005) Untuk prinsip kerja sel galvani sendiri yaitu:

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

Untuk perlu dipahami juga anoda dan katoda adalah elektroda dengan polaritas yang berlawanan, Pada sel galvani, Anoda adalah elektroda sel kutub negatif (-), sedangkan katoda adalah elektroda sel yang berkutub (+). Anoda mengalami oksidasi (Pelepasan Elektron) yaitu sebagai reduktor sedangkan katoda mengalami reaksi reduksi (mengikat elektron) yaitu sebagai oksidator (Keenan,1980).

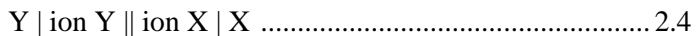
Bagian Sel Galvani atau Sel Volta (Gambar 2.2) yaitu:

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

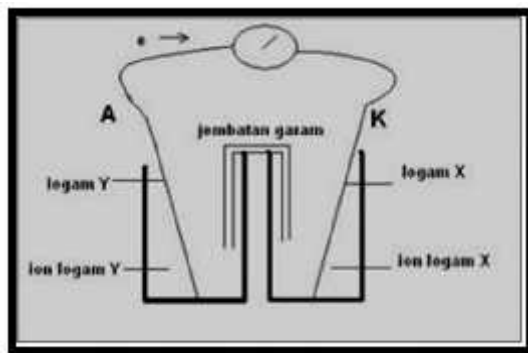


Gambar 2.2 Bagian Sel volta atau Sel Galvani

Susunan Sel Voltanya dinotasikan dengan Notasi sel:



Dimana pada bagian kanan menyatakan katode (yang mengalami reduksi), dan bagian kiri menyatakan anode (yang mengalami oksidasi). Pemisahan oleh jembatan garam dinyatakan dengan notasi “||” sedangkan batas fasa dinyatakan dengan notasi “|”. Penggambaran notasi sel juga dapat dilihat pada gambar 2.3.



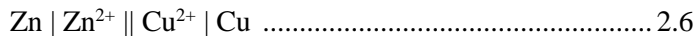
Gambar 2.3 Penggambaran Notasi Sel



Pada gambar di atas, logam X mempunyai potensial reduksi yang lebih positif dibanding logam Y, sehingga logam Y bertindak sebagai anoda dan logam X bertindak sebagai katoda. Jembatan garam mengandung ion-ion positif dan ion-ion negatif yang berfungsi menetralkan muatan positif dan negatif dalam larutan elektrolit. Contoh penulisan notasi sel untuk reaksi:



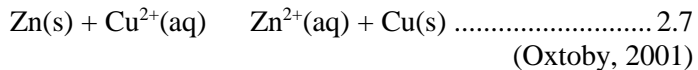
yaitu



Proses yang terjadi adalah

- a) Pada anode, logam Zn melepaskan elektron dan menjadi Zn^{2+} yang larut. $\text{Zn(s)} \rightarrow \text{Zn}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^-$
- b) Pada katode, ion Cu^{2+} menangkap elektron dan mengendap menjadi logam Cu. $\text{Cu}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu(s)}$

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



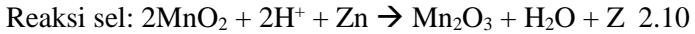
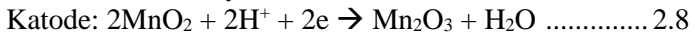
Contoh beberapa Sel Galvani dalam kehidupan sehari-hari:

1. Sel Kering (Sel Leclanche)

Dikenal sebagai batu baterai. Pada Gambar 4, dapat dilihat bahwa sel kering terdiri dari katode yang berasal dari karbon (grafit) dan anode logam zink. Elektrolit yang dipakai berupa pasta campuran MnO_2 , serbuk karbon dan NH_4Cl .



Persamaan reaksinya:



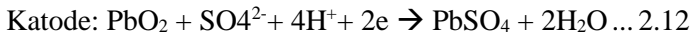
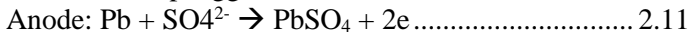
Anode (-): Logam seng (Zn) yang dipakai sebagai wadah.

Katode (+): Batang karbon (tidak aktif)

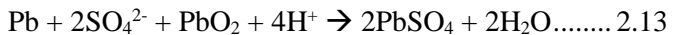
Elektrolit : Campuran berupa pasta yang terdiri dari MnO_2 , NH_4Cl , dan sedikit air

2. Sel aki

Sel aki disebut juga sebagai sel penyimpan, karena dapat berfungsi penyimpan listrik dan pada setiap saat dapat dikeluarkan. Anodenya terbuat dari logam timbal (Pb) dan katodenya terbuat dari logam timbal yang dilapisi PbO_2 . Reaksi penggunaan aki:



Reaksi sel:



Reaksi Pengisian aki:



Anode (-): Lempeng logam timbal (Pb).

Katode (+): Lempeng logam oksida timbal (PbO_2)

Elektrolit: Larutan asam sulfat (H_2SO_4) encer

(Oman, 1999)

2.6 Jenis-Jenis Korosi

Kebanyakan logam ada secara alami sebagai bijih-bijih yang stabil dari oksida-oksida, karbonat atau sulfida. Diperlukan energi untuk mengubah bijih logam menjadi sesuatu yang bermanfaat. Korosi hanyalah perjalanan sifat pembalikan satu proses yang tidak wajar kembali kepada suatu keadaan tenaga yang lebih rendah. Secara umum, tipe dari korosi dapat diklasifikasikan sebagai berikut:



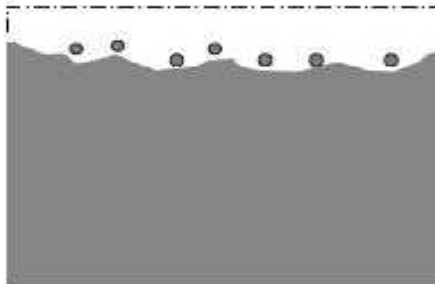
1. Korosi Seragam (*Uniform Corrosion*)

Korosi atau perkaratan sangat lazim terjadi pada logam contohnya paling umum adalah besi. Besi merupakan logam yang mudah berkarat. Karat besi merupakan zat yang dihasilkan pada peristiwa korosi, yaitu berupa zat padat berwarna coklat kemerahan yang bersifat rapuh serta berpori. Bila dibiarkan, lama kelamaan besi akan habis menjadi karat.

Korosi seragam merupakan korosi dengan serangan merata pada seluruh permukaan logam. Korosi terjadi pada permukaan logam yang terekspos pada lingkungan korosif. Korosi merata (*uniform corrosion*) menyebar secara serentak diseluruh permukaan logam, oleh karena itu pada logam yang mengalami korosi merata akan terjadi pengurangan dimensi yang relatif besar per satuan waktu. Kerugian langsung akibat korosi merata berupa kehilangan material konstruksi, keselamatan kerja dan pencemaran lingkungan akibat produk korosi dalam bentuk senyawa yang mencemarkan lingkungan. Sedangkan kerugian tidak langsung, antara lain berupa penurunan kapasitas dan peningkatan biaya perawatan (*preventive maintenance*). (Fontana,1986)

Besi merupakan unsur yang paling banyak digunakan. Salah satu kelemahan besi adalah sifatnya yang sangat mudah mengalami korosi. Hal ini dapat mengurangi umur pakai barang atau benda yang terbuat dari unsur besi, ini tentu saja merugikan sekaligus membahayakan. Besi yang murni adalah logam yang berwarna putih perak yang kukuh dan liat. Biasanya besi mengandung sejumlah kecil sulfida dari besi, fosfida, karbida dan silisida, zat-zat tersebut berperan penting dalam kekuatan struktur besi.

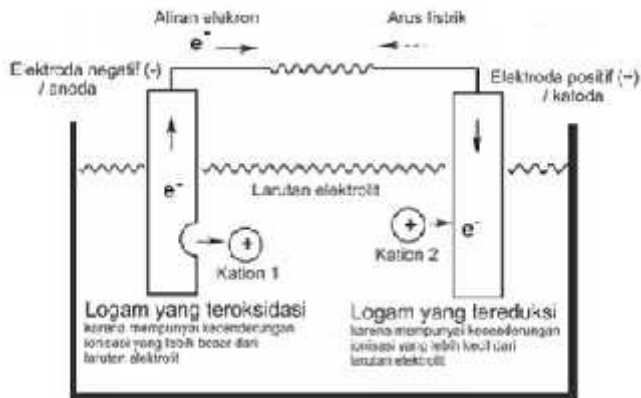
Ketebalan berkurang merata



Gambar 2.4 Korosi Merata (Sumber : Fontana,1986)

2. Korosi Galvanik

Korosi galvanik terjadi jika dua logam yang berbeda tersambung melalui elektrolit sehingga salah satu dari logam tersebut akan terserang korosi sedang lainnya terlindungi dari korosi. Untuk memprediksi logam yang terkorosi pada korosi galvanic dapat dilihat pada deret galvanik. Proses korosi secara galvanic dapat kita lihat pada gambar berikut:



Gambar 2.5 Proses Korosi Galvanik



Pada reaksi di atas dapat kita lihat dimana Cu bertindak sebagai katoda mengalami penambahan massa dengan melekatnya electron pada Cu. Sedangkan Zn bertindak sebagai anoda, dimana terjadinya pengurangan massa Zn yang di tandai dengan lepasnya elektron dari Zn. Peristiwa pelepasan dan penerimaan elektron ini harus mempunyai lingkungan, dimana yang menjadi ling

kungan adalah asam sulfat. Jika ada dua buah unsur yang di celupkan dalam larutan elektrolit yang di hubungkan dengan sumber arus maka yang akan mengalami korosi adalah material yang lebih anodik. (Tretheway,1991)

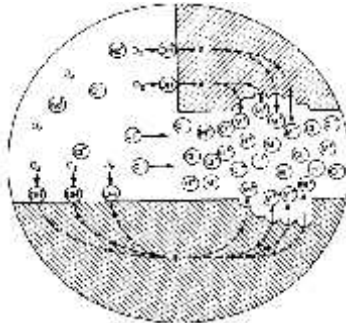
3. Korosi Celah

Mirip dengan korosi galvanik, dengan pengecualian pada perbedaan konsentrasi media korosifnya. Celah atau ketidak teraturan permukaan lainnya seperti celah paku keling (*rivet*), baut, washer, gasket, deposit dan sebagainya, yang bersentuhan dengan media korosif dapat menyebabkan korosi terlokalisasi.

Korosi celah (*crevice corrosion*) adalah korosi lokal yang terjadi pada celah di antara dua komponen. Mekanisme terjadinya korosi celah ini diawali dengan terjadi korosi merata di luar dan di dalam celah, sehingga terjadi oksidasi logam dan reduksi oksigen. Apabila oksigen (O₂) di dalam celah telah habis sedangkan oksigen (O₂) di luar celah masih banyak, maka akibatnya permukaan logam yang berhubungan dengan bagian luar menjadi katode dan permukaan logam di dalam celah menjadi anoda sehingga terbentuk celah yang terkorosi.korosi ini Tidak tampak dari luar dan sangat merusak konstruksi.Sering terjadi pada sambungan kurang kedap. Penyebabnya, lubang, gasket, *lap joint*, kotoran/endapan. Pencegahan korosi celah yaitu dengan:

1. Penggunaan sistem sambungan butt joint dengan pengelasan dibanding dengan sambungan keling untuk peralatan peralatan baru

2. Celah sambungan ditutup dengan pengelasan atau dengan *soldering*
 3. Peralatan – peralatan harus diperiksa dan dibersihkan secara teratur, terutama pada sambungan – sambungan yang rawan
 4. Hindari pemakaian packing yang bersifat higroskopis
 5. Penggunaan gasket dan absorbent seperti teflon jika memungkinkan
 6. Pada desain saluran drainase, hindari adanya lengkungan – lengkungan tajam serta daerah genangan fluida
- (Fontana, 1986)



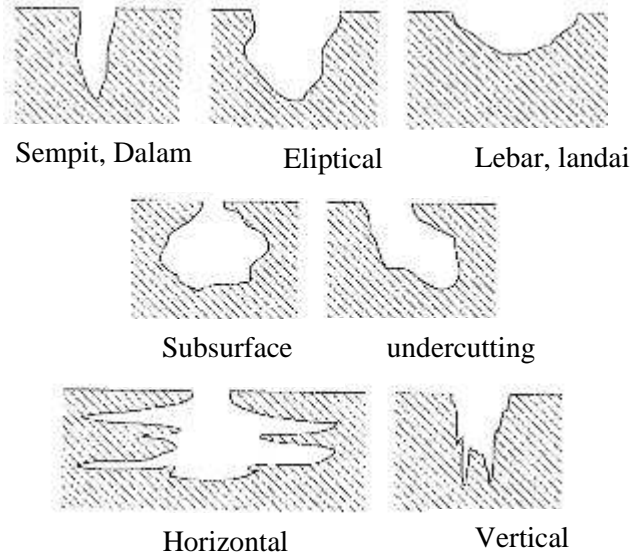
Gambar 2.6 contoh korosi celah
(Sumber : Fontana, 1986)

4. Korosi Sumuran

Korosi logam pada baja tahan karat terjadi karena rusaknya lapisan pelindung (passive film). Korosi sumuran (*pitting corrosion*) merupakan korosi lokal yang terjadi pada permukaan yang terbuka akibat pecahnya lapisan pasif. Terjadinya korosi sumuran ini diawali dengan pembentukan lapisan pasif di permukaan bahan pada antar muka lapisan pasif dan elektrolit terjadi penurunan pH, sehingga terjadi pelarutan lapisan pasif secara perlahan-lahan dan menyebabkan lapisan pasif pecah dan terjadi korosi sumuran. Korosi sumuran ini sangat berbahaya karena lokasi terjadinya



sangat kecil tetapi dalam, sehingga dapat menyebabkan peralatan atau struktur patah mendadak. (Fontana,1986)



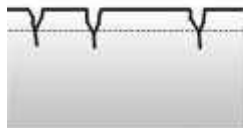
Gambar 2.7 Mekanisme Korosi sumuran
(Sumber: Denni,1992)

5. Retak Pengaruh Lingkungan (*Environmentally Induced Cracking*)

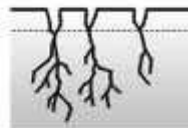
Merupakan patah getas dari logam paduan ulet yang beroperasi di lingkungan yang menyebabkan terjadinya korosi seragam. Ada tiga jenis tipe perpatahan pada kelompok ini, yaitu: stress corrosion cracking (SSC), corrosion fatigue cracking (CFC), dan hydrogen-induced cracking (HIC). Korosi retak tegang (*stress corrosion cracking*), korosi retak lelah (*corrosion fatigue cracking*) dan korosi akibat pengaruh hidrogen (*corrosion induced hydrogen*) adalah bentuk korosi dimana material mengalami keretakan akibat pengaruh lingkungannya. Korosi retak tegang terjadi pada paduan

logam yang mengalami tegangan tarik statis dilingkungan tertentu, seperti: baja tahan karat sangat rentan terhadap lingkungan klorida panas, tembaga rentan dilarutan ammonia dan baja karbon rentan terhadap nitrat. Korosi retak lelah terjadi akibat tegangan berulang dilingkungan korosif. Sedangkan korosi akibat pengaruh hidrogen terjadi karena berlangsungnya difusi hidrogen kedalam kisi paduan. (Fontana,1986)

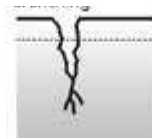
A. SCC atau patah lelah nucleate pada pits



B. Patahan SCC bercabang lebar



C. Korosi patah lelah punya sedikit cabang



Gambar 2.8 Korosi SCC

(sumber : <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=102>)

6. Kerusakan Akibat Hidrogen (*Hydrogen Damage*)

Kerusakan ini disebabkan karena serangan hydrogen yaitu reaksi antara hydrogen dengan karbida pada baja dan membentuk metana sehingga menyebabkan terjadinya dekarburasi, rongga, atau retak pada permukaan logam. Pada logam reaktif seperti titanium, magnesium, zirconium dan vanadium, terbentuknya hidrida menyebabkan terjadinya penggetasan pada logam.



7. Korosi Batas Butir (*Intergranular Corrosion*)

Korosi yang menyerang pada batas butir akibat adanya segregasi dari unsur pasif seperti krom meninggalkan batas butir sehingga pada batas butir bersifat anodic. Korosi ini merupakan bentuk desefitif dari korosi dengan bukti pengurangan berat yang kecil dan penyebaran desintegrasi yang tidak terdeteksi yang berakibat hilangnya sifat-sifat mekanis dan berkurangnya kekuatan. Dalam kondisi normal, batas butir sedikit lebih bersifat anodic, dari pada lainnya, dan korosi yang terjadi tipe merata. Tetapi karena suatu perlakuan terhadap paduan, di batas butir dapat tercipta daerah-daerah anodic dan katodik, sehingga terjadilah serangan korosi di batas butir.

Sebagai contoh baja tahan karat austenitic yang mengalami sensitasi Antara suhu 400-850°C akan terserang korosi antar butir. Karbida krom (Cr_{23}C_6) cenderung akan terendapkan sepanjang batas butir, dan matriks didekatnya akan kekurangan krom menjadi seperti baja karbon biasa, yang bersifat lebih anodic dan akan terkorosi dalam lingkungan klorida atau asam.



Gambar 2.9 Korosi Integranular

Korosi antar butir dapat pula terjadi pada paduan aluminium, yang serangannya sejajar dengan permukaan, terkenal dengan istilah “eksfoliasi”. Pengendalian krom tipe ini adalah dengan jalan menghindarkan terjadinya endapan-



endapan dibatas butir. Pada baja tahan karat austenitic caranya adalah dengan:

- a. Memanaskan bagian-bagian yang tersensitisasi (daerah las) sampai 1100 °C dan kemudian dikejut dalam air.
- b. Penggunaan baja tahan karat dengan kadar karbon yang rendah, atau yang mengandung unsur niobium, titanium, atau columbium plus tantalum.

8. Dealloying

Dealloying adalah lepasnya unsur-unsur paduan yang lebih aktif (anodik) dari logam paduan, sebagai contoh: lepasnya unsur seng atau Zn pada kuningan (Cu-Zn) dan dikenal dengan istilah densification.

9. Korosi Erosi

Korosi erosi disebabkan oleh kombinasi fluida korosif dan kecepatan aliran yang tinggi. Bagian fluida yang kecepatan alirannya rendah akan mengalami laju korosi rendah, sedangkan fluida kecepatan tinggi menyebabkan terjadinya erosi dan dapat menggerus lapisan pelindung sehingga mempercepat korosi. Korosi erosi adalah korosi yang terjadi pada permukaan logam yang disebabkan aliran fluida yang sangat cepat sehingga merusak permukaan logam dan lapisan film pelindung. Korosi erosi juga dapat terjadi karena efek-efek mekanik yang terjadi pada permukaan logam, misalnya : pengausan, abrasi dan gesekan. Logam yang mengalami korosi erosi akan menimbulkan bagian-bagian yang kasar dan tajam.

Proses terjadinya korosi secara umum adalah melalui beberapa tahap berikut:

- a. Pada tahap pertama terjadi serangan oleh gelembung udara yang menempel di permukaan lapisan pelindung logam, karena adanya aliran turbulen yang melintas di atas permukaan logam tersebut.



- b. Pada tahap kedua gelembung udara tersebut mengikis dan merusak lapisan pelindung.
- c. Pada tahap ketiga, laju korosi semakin meningkat, karena lapisan pelindung telah hilang. Logam yang berada di bawah lapisan pelindung mulai terkorosi, sehingga membentuk cekungan, kemudian terjadi pembentukan kembali lapisan

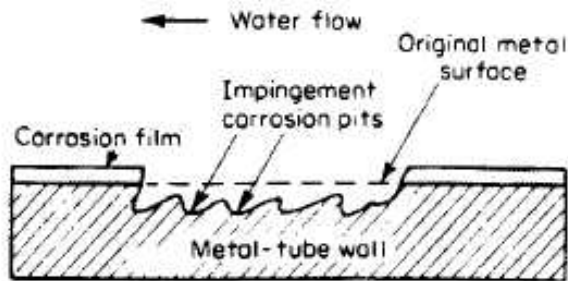
Pelindung dan logam, menjadi tidak rata. Bila aliran terus mengalir, maka akan terjadi serangan kembali oleh gelembung udara yang terbawa aliran. Serangan ini akan mengikis dan merusak lapisan pelindung yang baru saja terbentuk, rusaknya lapisan pelindung tersebut akan mengakibatkan serangan lebih lanjut pada logam yang lebih dalam sampai membentuk cekungan. Contoh Korosi Erosi:

1. Korosi Erosi pada sambungan pipa
2. Korosi Erosi pada washing machine

Pengendalian korosi erosi dapat dilakukan dengan cara :

1. Mengurangi kecepatan aliran fluida untuk mengurangi turbulensi dan tumbukan yang berlebihan.
2. Menggunakan kompenen yang halus dan rapi pengerjaannya, sehingga tempat pembentukan gelembung menjadi sesedikit mungkin
3. Penambahan inhibitor atau passivator
4. Menggunakan paduan logam yang lebih tahan korosi dan tahan erosi
5. Proteksi katodik

(Fontana,1986)



Gambar 2.10 Korosi Erosi
(Fontana,1986)

10. Korosi Aliran (*Flow Induced Corrosion*)

Korosi aliran digambarkan sebagai efek dari aliran terhadap terjadinya korosi. Meskipun mirip, antara korosi aliran dan korosi erosi adalah dua hal yang berbeda. Korosi aliran adalah peningkatan laju korosi yang disebabkan oleh turbulensi fluida dan perpindahan massa akibat dari aliran fluida diatas permukaan logam. Korosi erosi adalah naiknya korosi dikarenakan benturan secara fisik.

11. Korosi Mikrobiologi

Korosi yang terjadi karena mikroba Mikroorganisme yang mempengaruhi korosi antara lain bakteri, jamur, alga dan *protozoa*. Korosi ini bertanggung jawab terhadap degradasi material di lingkungan. Pengaruh inisiasi atau laju korosi di suatu area, mikroorganisme umumnya berhubungan dengan permukaan korosi kemudian menempel pada permukaan logam dalam bentuk lapisan tipis atau biodeposit. Lapisan film tipis atau biofilm. Pembentukan lapisan tipis saat 2 – 4 jam pencelupan sehingga membentuk lapisan ini terlihat hanya bintik-bintik dibandingkan menyeluruh di permukaan. Korosi jenis ini dapat dicegah dengan cara:

- a. Memilih logam yang tepat untuk suatu lingkungan dengan kondisi-kondisinya



- b. Memberi lapisan pelindung agar lapisan logam terlindung dari lingkungannya
- c. Memperbaiki lingkungan supaya tidak korosif
- d. Perlindungan secara elektrokimia dengan anoda korban atau arus tandingan.
- e. Memperbaiki konstruksi agar tidak menyimpan air, lumpur dan zat korosif lainnya.



Gambar 2.11 Korosi Mikrobiologi

12. Korosi Lelah (Fatigue corrosion)

Korosi ini terjadi karena logam mendapatkan beban siklus yang terus berulang sehingga semakin lama logam akan mengalami patah karena terjadi kelelahan logam. Korosi ini biasanya terjadi pada turbin uap, pengeboran minyak dan propeller kapal. Korosi jenis ini dapat dicegah dengan cara:

- a. Menggunakan inhibitor
- b. Memilih bahan yang tepat atau memilih bahan yang kuat korosi.
- c. Memilih bahan yang tepat atau memilih bahan yang kuat korosi.



Gambar 2.12 Korosi lelah komponen boiler

2.7 Laju Korosi

Laju korosi diperhitungkan dengan menyatakan berat yang hilang per satuan luas permukaan per satuan waktu. Satuan laju korosi ini biasa didekati dengan rumus:

$$CR = (K \cdot W) / (A \cdot T \cdot D) \dots\dots\dots (1)$$

Dimana

W = berat yang hilang (gram)

D = Densitas specimen (g/cm^3)

A = Luas permukaan specimen (cm^2)

T = waktu paparan (jam)

K = konstanta laju korosi (dapat dilihat pada table)



Tabel 2.1 Konstanta *Corrosion Rate* Unit Desire

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

Sumber: Tretheway,1991

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

1. Polarisasi

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

Sebagai ilustrasi yang mudah adalah reaksi terlepasnya atom hidrogen pada logam *zinc* sebagai akibat dari korosi pada lingkungan asam. Tahapan proses tereduksinya hidrogen pada permukaan logam *zinc* dapat pula terjadi pada suatu jenis atom yang tereduksi pada permukaan logam. Tahap pertama atom tersebut harus dapat mengikat



suatu permukaan sebelum terjadinya reaksi. Tahap kedua harus terjadi transfer elektron sebagai hasil reduksi dari atom tersebut. Tahap ketiga, dua atom hidrogen menyatu untuk membentuk gelembung dan pada tahap ke empat, gelembung tersebut menjadi gas hidrogen. Kecepatan reduksi pada ion hidrogen dapat dikendalikan dengan memperlambat empat tahap di atas.

2. Pasivasi

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

2.8 Korosi Baja Dalam Tanah

Mekanisme korosi baja dalam tanah adalah sama seperti pada kondisi basah, yaitu elektrokimia. Reaksi korosi terjadi karena adanya daerah-daerah anodic dan katodik dipermukaan logam yang membentuk korosi. Faktor yang mempengaruhi proses



korosi baja dalam tanah terutama adalah sifat fisik dan kimia dari tanah. Beberapa factor penting tersebut diantaranya:

1. Air

Air dalam larutan dapat bertindak sebagai elektrolit yang dibutuhkan dalam reaksi elektrokimia korosi, dan dibedakan antaranya air yang mengalir dalam tanah *saturated or unsaturated*. Air mengalir dari daerah tanah basah ke daerah tanah kering. *Saturated water* mengalir berdasarkan ukuran dan distribusi pori, tekstur, struktur dan organik. Aliran air dalam tanah dapat terjadi karena pengaruh: gravitasi, kapilaritas, tekanan osmosis, interaksi elektrostatik Antara air dan partikel tanah. Kapasitas kandungan air dalam tanah didasarkan pada struktur tanah. Pasir kasar kandungan airnya sangat kecil, tanah liat kandungan airnya sangat besar.

2. Kandungan Oksigen

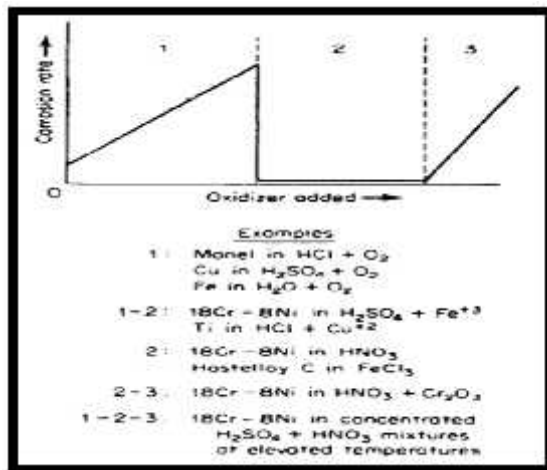
Konsentrasi oksigen akan semakin menurun terhadap kedalaman tanah. Pada tanah metral, konstansi oksigen sangat berpengaruh terhadap laju korosi sehubungan dengan peranannya dalam reaksi katodik, oksigen berperan dalam reaksi reduksi untuk menghasilkan ion-ion hidroksil dengan reaksi sebagai berikut:



Ion-ion akan berinteraksi dengan ion-ion logam sehingga semakin banyak pula ion-ion logam yang teroksidasi dalam proses korosi. Dengan adanya bakteri pereduksi sulfat (*Sulfate Reducing Bacteria*), laju korosi dapat berlangsung lebih cepat walaupun dalam keadaan anaerobik. Transpor oksigen dapat berlangsung lebih cepat dalam tanah dengan tekstur *coarse* (kasar), tanah kering, tekstur waterlogged. Penggalan dapat menaikkan kandungan udara dalam tanah, dibandingkan dengan tanah

tanpa gangguan. Laju korosi dalam tanah yang digali mempunyai kandungan oksigen yang tinggi sehingga korosi dapat terjadi lebih cepat daripada tanah tanpa gangguan.

Efek dari oxidizers pada laju korosi dapat dilihat pada gambar dibawah ini:



Gambar 2.13 Laju Korosi pada penambahan Oxidizer

Gambar diatas dibagi menjadi tiga bagian. Perilaku pada bagian pertama, merupakan karkarakteristik logam pada umumnya dan juga dalam kondisi aktif. Pasif dapat terjadi jika jumlah oxidizer dalam medium cukup. Pada grafik 1, laju korosi akan meningkat saat konsentrasi oksigen juga ditingkatkan. Hal ini terjadi pada monel dan tembaga dalam larutan asam yang mengandung oksigen. Kedua logam ini tidak dapat di pasifkan. Pada besi, bisa dipasifkan dengan kelarutan oksigen dalam air terbatas.

Jika aktif-pasif logam membentuk pasif pada suatu medium, penambahan agen oksidasi tidak akan menimbulkan efek pada laju korosi. Kondisi ini biasanya



terjadi pada aktif-pasif logam diimersi dalam medium asam nitrat ataupun besi klorida. Perilaku ini tampak pada grafik bagian 2, dan 3 merupakan hasil dari ketika logam pada kondisi pasif, terkena oksidizer yang sangat kuat dan membuat transisi ke daerah transpasif. Hal ini dapat terjadi pada stainless steel pada medium korosi yang ditambahkan kromat.

Dari penjelasan diatas, efek penamabahan oksidizer ataupun keberadaan oksigen dalam laku korosi tergantung pada mediu dan logam itu sendiri. Laju korosi mungkin meningkat saat penambahan oksidizer, oksidizer mungkin dapat memberi efek tidak berarti, ataupun pengamatan pada perilaku kompleks (Fontana Mars, 1986).

Adanya oksigen yang terlarut akan menyebabkan korosi pada metal seperti laju korosi pada mild stell 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 adalah sebagai berikut:



3. Keasaman (pH) Tanah

Tanah biasanya memiliki pH Antara 5-8. Pada range tersebut secara umum pH bukanlah sebagai variabel utama penyebab korosi. Tanah yang lebih asam akan menyebabkan resiko korosi yang besar pada material konstruksi seperti baja, besi mineral, dekomposisi tanaman



asam (coniferous tree needles), sampah industry, hujan asam, aktivitas mikrobiologi.

Air adalah molekul netral dengan dua atom hydrogen yang digabungkan dengan sebuah atom oksigen dan molekul ini terdisosiasi menjadi sebuah ion hydrogen dan sebuah ion hydrogen dan sebuah ion hidroksil, seperti pada persamaan:



Faktor yang sama dengan sifat-sifat asam adalah adanya ion-ion hydrogen sedangkan basa dihubungkan dengan adanya ion-ion hidroksil. Air memiliki kuantitas ion hydrogen dan ion hidroksil yang sama sehingga air bersifat netral. Air murni dapat diuraikan seperti pada persamaan berikut:

$$[\text{H}^+] = [\text{OH}^-] \dots\dots\dots (2)$$

Metode yang telah diterima secara umum untuk mendaatkan keasaman adalah metode pH. Dalam metode ini keasaman diukur dengan skala 0 hingga 14 dan didefinisikan dalam persamaan berikut:

$$\text{pH} = -\log [\text{H}^+] \dots\dots\dots (3)$$

pH bernilai 0 sampai 7 akan bersifat asam sedangkan pH dengan nilai 7 sampai 14 akan bersifat basa. Konsentrasi basa dapat didefinisikan dengan cara yang sama seperti pada persamaan :

$$\text{pOH} = -\log [\text{OH}^-] \dots\dots\dots (4)$$

pH merupakan salah satu factor penting dalam mempengaruhi proses korosi yang menunjukkan



konsentrasi ion hydrogen $[H^+]$ dalam air dan menghasilkan pelepasan electron oleh logam pada reaksi anodic. Pada saat pH di bawah 5, besi terkorosi cepat dan merata. Pada saat pH di atas 9 besi akan terptoteksi. Antara pH 5 sampai 9 korosi logam akan terjadi bila lapisan pelindung pada permukaan rusak. Tanah alkali mengandung kandungan sodium tinggi, potassium, magnesium, dan kalsium. Dua elemen tersebut cenderung membentuk calcareous deposits (lapisan kapur) pada struktur yang tertanam, dapat memberikan perlindungan yang dapat melawan korosi.

4. Klorida

Ion klorida sangat berbahaya, sehubungan dengan keberadaannya dalam reaksi anodic pada logam. Keberadaannya cenderung menurunkan tahanan jenis tanah. Ion klorida ditemukan secara alami dalam tanah sebagai akibat dari intrusi air laut atau dapat berasal dari sumber luar seperti terlepasnya lapisan garam pada jalan raya. Konsentrasi ion klorida pada korosi tanah akan bervariasi bergantung pada keadaan tanah sebagai elektrolit, basah atau kering. Semakin tinggi konsentrasi ion Cl^- , semakin tinggi pula tingkat korosifitas tanah tersebut dan kemungkinan kerusakan lapisan perlindungan pada permukaan logam oleh ion Cl^- juga semakin besar. Ion klorida cenderung menyebabkan pecahnya lapisan pasif, dengan mekanisme ion Cl^- melakukan penetrasi melalui lapisan film pasif sehingga terbentuk lubang dan tercipta daerah anodik pada daerah lubang.

5. Sulfat

Ion SO_4^{2-} merupakan ion asam kuat dan agresif yang mempengaruhi korosifitas lingkungan. Ion sulfat mempunyai kecenderungan menyerang lapisan pelindung logam. Dibandingkan dengan efek korosi yang dihasilkan oleh klorida, pada umumnya sulfat lebih kuat sebagai



penyebab korosi pada material logam, misalnya kerusakan struktur pada beton adalah sebagai akibat dari tingginya kandungan sulfat. Keberadaan sulfat yang menyebabkan resiko pada material logam telah dikonversikan pada korosi sulfida oleh bakteri pereduksi sulfat (*Sulfate reducing bacteria*).

2.9 Pengaruh Lingkungan Terhadap Korosi

Beberapa kemungkinan perubahan lingkungan dan pengaruhnya terhadap laju korosi sebagai dasar untuk menentukan pemecahan kasus serupa. Perubahan kondisi lingkungan yang memungkinkan adalah perubahan pada kelembaban relative, tekanan, temperature, pH, konsentrasi gas terlarut, bahan pengotor, komposisi media, bakteri media, kecepatan elektrolit, konsentrasi media dan beda potensial media.

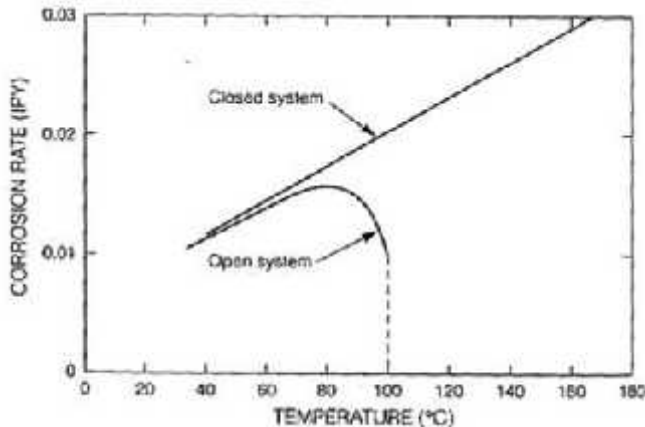
1. Temperatur

Secara umum kenaikan temperature menyebabkan kenaikan laju korosi, biasanya tiap kenaikan 10°C laju reaksi meningkat hamper dua kali lipat. Oleh karena itu temperature harus dikendalikan serendah mungkin relative terhadap kondisi yang ada dengan system pengkondisian. Perlu dicatat bahwa penurunan temperature dibawah titik embun (dew point) menyebabkan udara menjadi jenuh uap air sehingga memungkinkan terjadinya titik embun pada permukaan logam dan terjadi korosi local. Sebaliknya tidak jarang pula pemanasan ruangan digunakan untuk mengurangi kelembaban, selama temperature tidak menjadi sebab utama korosi untuk kondisi yang ada, karena temperature bias berakibat kenaikan laju korosi. (Sulistijono. 1999)

Penambahan temperatur akan menambah laju korosi walaupun kenyataannya kelarutan oksigen berkurang dengan meningkatnya temperatur. Apabila logam pada temperatur yang tidak uniform, maka besar kemungkinan terjadi korosi. Pada lingkungan temperatur tinggi, laju



korosi yang terjadi lebih tinggi dibandingkan dengan temperatur rendah, karena pada temperatur tinggi kinetika reaksi kimia akan meningkat. Gambar berikut menunjukkan pengaruh temperature terhadap laju korosi pada Fe. Semakin tinggi temperature, maka laju korosi akan semakin meningkat, namun menurunkan kelarutan oksigen. Sehingga pada suatu sistem terbuka, diatas suhu 80°C, laju korosi akan mengalami penurunan karena oksigen akan keluar sedangkan pada suatu sistem tertutup, laju korosi akan terus meningkat karena adanya oksigen yang terlarut.



Gambar 2.14 Temperatur dan laju korosi

Kecepatan reaksi redoks akan meningkat pula pada temperatur tinggi dalam peristiwa korosi. Secara umum, semakin tinggi temperatur maka semakin cepat terjadinya korosi. Hal ini disebabkan dengan meningkatnya temperatur maka meningkat pula energi kinetik partikel sehingga kemungkinan terjadinya tumbukan efektif pada reaksi redoks semakin besar dan laju korosi pada logam semakin meningkat. Efek korosi yang disebabkan oleh

pengaruh temperatur dapat dilihat pada perkakas-perkakas atau mesin-mesin yang dalam pemakaiannya menimbulkan panas akibat gesekan (seperti cutting tools) atau dikenai panas secara langsung (seperti mesin kendaraan bermotor).



Gambar 2.15 Korosi pada knalpot kendaraan bermotor.

2. pH

pH memengaruhi laju korosi. Pengaruh pH terhadap korosi baja bergantung pada komposisi logam, tegangan, larutan basa kuat, reaksi korosi dalam kondisi *anodic-controlled* dan berlangsung dengan laju tinggi. Dalam larutan basa lemah atau netral, laju korosi dalam kondisi *cathodic-controlled* dan dapat memproteksi korosi. Besi hidroksida memberikan lapisan protektif pada permukaan logam. Laju korosi actual bergantung pada difusi oksigen ke permukaan logam. Korosi meningkat seiring dengan kenaikan konsentrasi oksigen, partikel abrasive dan aliran turbulent, aliran kecepatan tinggi.

Dalam lingkungan pH asam, korosi dalam kondisi *anodic-controlled* dan komposisi logam mempengaruhi laju korosi secara ekstensif. Kadar paduan dalam baja dan tegangan mempengaruhi kerusakan akibat korosi. Tipe asam dalam larutan menentukan pH dimana laju korosi meningkat pesat seiring dengan reaksi evolusi hydrogen.



Evolusi hydrogen mulai pada pH 4 maka korosi makin cepat dengan penurunan pH. Evolusi hydrogen pada pH 4 terjadi dalam elektrolit dengan kadar asam tinggi.

Asam karbonat dalam larutan bereaksi dengan besi pada pH 6 dan evolusi gas hydrogen menghasilkan korosi yang dahsyat. Hal ini dapat mengilustrasikan bahwa esensi pengendalian pH jika terdapat gas CO₂ dalam elektrolit.

3. Bahan pengotor dan komposisi media

Bahan pengotor di media korosif biasa berupa unsur dan senyawa karbondioksida (CO₂), sulfurdiooksida (SO₂), sulfurtriooksida (SO₃), senyawa nitrat, asam belerang, ion-ion sulfur, ion-ion klorida, dll. Bahan pengotor bersifat mempercepat laju korosi karena menurunkan pH (menaikkan derajat keasaman) media korosif. (Sulistijono. 1999)

4. Kecepatan elektrolit

Laju korosi dipengaruhi oleh laju media korosif. Secara umum laju korosi meningkat seiring dengan kenaikan kecepatan media korosif kecuali untuk beberapa kondisi media korosif yang dikontrol oleh polarisasi aktivasi (media korosi yang spesies aktifnya tinggi). Beberapa pengaruh kecepatan pada media korosif dimana laju korosi cenderung naik untuk kenaikan kecepatan namun pada media air Fe yang mula-mula naik, akan turun secara drastis lalu stabil. (Sulistijono. 1999)

5. Pengaruh konsentrasi elektrolit

Konsentrasi media korosif berpengaruh terhadap laju korosi bergantung dari jenis media tersebut dan jenis logam yang berada di media tersebut. Seperti tampak pada gambar, kurva A bagian 2 beberapa jenis logam terkorosi dengan hebat pada konsentrasi tinggi media, sebaliknya pada kurva B bagian 2 laju korosi rendah pada konsentrasi

media yang tinggi. Semakin pekat konsentrasi HNO_3 laju korosi semakin naik sedangkan pada H_2SO_4 terjadi sebaliknya yaitu semakin pekat laju korosi semakin turun. (Sulistijono. 1999)

2.10 Teknik Pencegahan Korosi

Korosi pada besi menimbulkan banyak kerugian, karena barang-barang atau bangunan yang menggunakan besi menjadi tidak awet. Korosi pada besi dapat dicegah dengan membuat besi menjadi baja tahan karat (stainless steel), namun proses ini membutuhkan biaya yang mahal, sehingga tidak sesuai dengan kebanyakan penggunaan besi. Cara pencegahan korosi pada besi dapat dilakukan sebagai berikut:

1. Pengecatan

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



Gambar 2.16 Proses Pengecatan Pipa



2. Dibalut plastik
Plastik mencegah besi kontak dengan air dan udara. Peralatan rumah tangga biasanya dibalut plastik untuk menghindari korosi.
3. Pelapisan dengan krom (Cromium plating)
Krom memberi lapisan pelindung, sehingga besi yang dikrom akan menjadi mengkilap. Cromium plating dilakukan dengan proses elektrolisis. Krom dapat memberikan perlindungan meskipun lapisan krom tersebut ada yang rusak. Cara ini umumnya dilakukan pada kendaraan bermotor, misalnya bumper mobil.



Gambar 2.17 Pelapisan Krom pada Body Sepeda

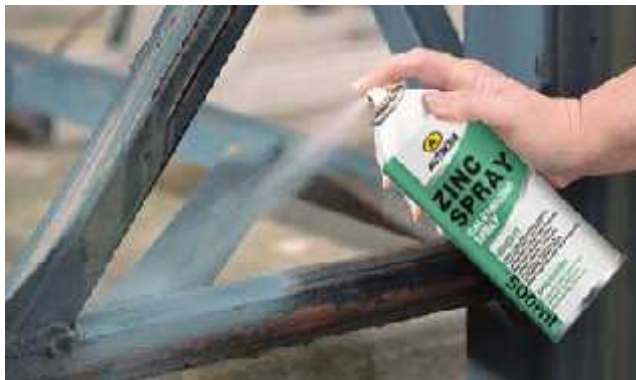
4. Pelapisan dengan timah (Tin plating)
Timah termasuk logam yang tahan karat. Kaleng kemasan dari besi umumnya dilapisi dengan timah. Proses pelapisan dilakukan secara elektrolisis atau elektroplating. Lapisan timah akan melindungi besi selama lapisan itu masih utuh. Apabila terdapat goresan, maka timah justru mempercepat proses korosi karena potensial elektrode besi lebih positif dari timah.



Gambar 2.18 Pelapisan Timah pada Logam Fe

5. Pelapisan dengan seng (Galvanisasi)

Seng dapat melindungi besi meskipun lapisannya ada yang rusak. Hal ini karena potensial elektrode besi lebih negative daripada seng, maka besi yang kontak dengan seng akan membentuk sel elektrokimia dengan besi sebagai katode. Sehingga seng akan mengalami oksidasi, sedangkan besi akan terlindungi.



Gambar 2.19 Pelapisan dengan Zink Spray



6. Proteksi katodik

Perbaikan pipa bawah tanah yang terkorosi mungkin memerlukan perbaikan yang mahal biayanya. Metoda ini dilakukan dengan jalan mengalirkan arus listrik searah melalui elektrolit ke logam sehingga potensial antarmuka logam-larutan elektrolit turun menuju/mencapai daerah imunnya atau sampai nilai tertentu sehingga laju korosi logam masih diperbolehkan/ minimum. Sistem proteksi katodik ini biasanya digunakan untuk melindungi baja, jalur pipa, tangki, tiang pancang, kapal, anjungan lepas pantai dan casing (selubung) sumur minyak di darat. Sumber arus listrik searah dapat diperoleh dengan dua cara yaitu : arus listrik searah diperoleh dari sumber luar disebut metoda arus yang dipaksakan (*impressed current*), dan cara kedua arus listrik searah diperoleh dari reaksi galvanik disebut metoda anoda tumbal (*sacrificial anode*).

7. Proteksi anodic

Metode ini dikembangkan menggunakan prinsip kinetika dari elektroda. Secara sederhana, proteksi anodic bekerja berdasarkan susunan lapisan pelindung pada logam yang dihasilkan dari arus anodik yang dialirkan dari luar. Proteksi anodik mempunyai kelebihan yang unik, contohnya adalah arus yang dialirkan biasanya sebanding dengan laju korosi dari sistem yang dilindungi. Sehingga proteksi anodik tidak hanya melindungi tapi juga memberikan nilai langsung laju korosi untuk monitoring sistem. Proteksi anodik ini biasa digunakan untuk melindungi peralatan yang digunakan untuk menyimpan dan menanggapi asam sulfat (H_2SO_4).

Pada perlindungan dengan sistem anodic (proteksi anodic), tegangan sistem yang akan dilindungi dinaikkan sehingga memasuki daerah anodiknya. Pada kondisi ini sistem terlindungi dari korosi karena terbentuknya lapisan pasif. Syarat yang harus dipenuhi agar sistem ini berjalan



dengan baik adalah bahwa karakteristik lingkungannya harus sabil. Pada jenis lingkungan yang tidak stabil (berfluktuasi), maka penerapan sistem proteksi anodic tidak dianjurkan (Rochim, 2000)

8. Modifikasi Lingkungan

Laju korosi pada logam dikendalikan oleh proses yang paling lambat dalam sel. Logam tidak dapat terkorosi dan menghasilkan ion-ion lebih cepat dari kecepatan katoda memanfaatkan electron yang dihasilkan, atau kecepatan elektrolit mengangkut arus melalui penghantaran ion. Sifat elektrolit yang dapat dirubah untuk membatasi keganasannya terhadap permukaan logam, yaitu dengan mengubah konduktivitas elektrolit, mengubah keasaman (pH) dan mereaksikan zat kimia dengan permukaan logam untuk membentuk selaput pasif. (Trethewey, 1991)

2.11 Inhibitor

Untuk memperlambat reaksi korosi digunakan bahan kimia yang disebut corrosion inhibitor yang bekerja dengan cara membentuk lapisan pelindung pada permukaan logam. Lapisan molekul pertama yang terbentuk mempunyai ikatan yang sangat kuat disebut chemis option. *Corrosion inhibitor* umumnya berbentuk fluida atau 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. Material corrosion inhibitor terbagi 2, yaitu:

1. Organik Inhibitor

Organik inhibitor ini adalah inhibitor yang diperoleh dari hewan dan tumbuhan yang mengandung unsur karbon dalam senyawanya. Material dasar dari organic inhibitor Antara lain:



- a. Turunnya asam lemak alifatik, yaitu: monoamine, diamine, amida, asetat, oleat, senyawa-senyawa amfoterc
 - b. Imdazolines dan derivatifnya
2. Inorganik inhibitor

Inorganik inhibitor adalah inhibitor yang diperoleh dari mineral-mineral yang tidak mengandung unsur karbon dalam senyawanya. Material dasar dari inorganic inhibitor Antara lain kromat, nitrit, silikat, dan pospat.

2.11.1 Sistem Kerja Inhibitor

Secara umum inhibitor dibagi menjadi 3 macam yaitu inhibitor katodik, inhibitor anodic dan inhibitor adsorpsi. Inhibitor katodik menurunkan laju korosi dengan cara memperlambat reaksi katodik, inhibitor katodik ini membentuk senyawa tak larut yang mengendap pada katodik dengan membentuk lapisan penghalang. Inhibitor anodik menurunkan laju korosi dengan cara memperlambat reaksi anodic, inhibitor anodic ini menggeser kesetimbangan proses korosi ke daerah pasif yang menyebabkan pembentukan film pasif oksida yang tidak kelihatan pada daerah anodik yang memicu kenaikan potensial anoda dan menekan proses oksidasi.

Berkurangnya daerah anodik yang efektif menyebabkan turunnya laju korosi. Sedangkan, Inhibitor korosi adsorpsi menurunkan laju korosi disebabkan polarisasi logam dengan lapisan tipis dari molekul inhibitor yang teradsorpsi pada permukaan. Berkurangnya luas permukaan efektif bisa menurunkan laju korosi. (Febrianto, dkk. 2010)

Inhibitor adalah cara yang digunakan di dalam atau di sebelah pada pipa baja karbon dan vessel sebagai control yang ekonomis pengganti dari baja tahan karat dan paduan, dan juga digunakan sebagai lapisan pada komponen non-metal.

(Zaki Ahmad. 2006)



2.11.2 Pengaruh Adanya Inhibitor pada Korosi

Suatu inhibitor kimia adalah suatu zat kimia yang dapat menghambat atau memperlambat suatu reaksi kimia. Secara khusus, inhibitor korosi merupakan suatu zat kimia yang bila ditambahkan kedalam suatu lingkungan tertentu, dapat menurunkan laju penyerangan lingkungan itu terhadap suatu logam. Atau inhibitor dapat berarti senyawa yang jika ditambahkan dalam jumlah kecil pada suatu sistem korosi dapat meminimalkan laju korosi pada konsentrasi tertentu. (Uhlig, 2004).

Adapun mekanisme kerjanya dapat dibedakan sebagai berikut:

1. Inhibitor teradsorpsi pada permukaan logam, dan membentuk suatu lapisan tipis dengan ketebalan beberapa molekul inhibitor. Lapisan ini tidak dapat dilihat oleh mata biasa, namun dapat menghambat penyerangan lingkungan terhadap logamnya.
2. Melalui pengaruh lingkungan (misal pH) menyebabkan inhibitor dapat mengendap dan selanjutnya teradsorpsi pada permukaan logam serta melindunginya terhadap korosi. Endapan yang terjadi cukup banyak, sehingga lapisan yang terjadi dapat teramati oleh mata.
3. Inhibitor lebih dulu mengkorosi logamnya, dan menghasilkan suatu zat kimia yang kemudian melalui peristiwa adsorpsi dari produk korosi tersebut membentuk suatu lapisan pasif pada permukaan logam.
4. Inhibitor menghilangkan kontinuen yang agresif dari lingkungannya.

Berdasarkan sifat korosi logam secara elektrokimia, inhibitor dapat mempengaruhi polarisasi anodik dan katodik. Bila suatu sel korosi dapat dianggap terdiri dari empat komponen yaitu: anoda, katoda, elektrolit dan penghantar elektronik, maka inhibitor korosi memberikan kemungkinan menaikkan polarisasi anodik, atau menaikkan polarisasi katodik atau menaikkan tahanan listrik dari rangkaian melalui pembentukan endapan tipis pada



permukaan logam. Pemakaian Inhibitor Korosi adalah salah satu upaya untuk mencegah korosi.

2.12 Proteksi Katodik

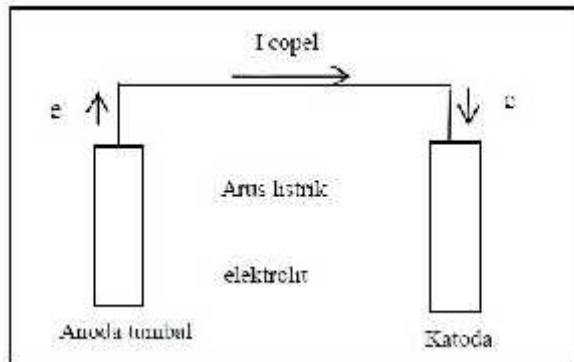
Proteksi katodik merupakan salah satu metoda pengendalian korosi struktur baja dalam lingkungan elektrolit dengan cara memperlakukan struktur logam sebagai katoda. Metoda ini dilakukan dengan jalan mengalirkan arus listrik searah melalui elektrolit ke logam sehingga potensial antarmuka logam-larutan elektrolit turun menuju/mencapai daerah immunnnya atau sampai nilai tertentu sehingga laju korosi logam masih diperbolehkan/ minimum. Sistem proteksi katodik ini biasanya digunakan untuk melindungi baja, jalur pipa, tangki, tiang pancang, kapal, anjungan lepas pantai dan casing (selubung) sumur minyak di darat. Sumber arus listrik searah dapat diperoleh dengan dua cara yaitu : arus listrik searah diperoleh dari sumber luar disebut metoda arus yang dipaksakan (*impressed curent*), dan cara kedua arus listrik searah diperoleh dari reaksi galvanik disebut metoda anoda tumbal (*sacrificial anode*).

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

2.13 Proteksi Katodik Anoda Korban

Sistem ini dikenal juga dengan galvanic anode, di mana cara kerja dan sumber arus yang digunakan berasal hanya dari reaksi galvanis anoda itu sendiri. Prinsip dasar dari sistem anoda korban adalah hanya dengan cara menciptakan sel elektrokimia galvanic dimana dua logam yang berbeda dihubungkan secara elektris dan ditanam dalam elektrolit alam (tanah atau air). Dalam sel logam yang berbeda tersebut, logam yang lebih tinggi dalam

seri elektromotif-Emf series (lebih aktif) akan menjadi anodic terhadap logam yang kurang aktif dan dikonsumsi selama reaksi elektrokimia. Logam yang kurang aktif menerima proteksi katodik pada permukaannya karena adanya aliran arus melalui elektrolit dari logam yang anodic.



Gambar 2.20 Rangkaian Proteksi Katodik Anoda Tumbal

Sistem anoda korban secara umum digunakan untuk melindungi struktur dimana kebutuhan arus proteksinya kecil dan resistivitas tanah rendah. Di samping itu sistem ini juga digunakan untuk keperluan dan kondisi yang lebih spesifik seperti:

1. Untuk memproteksi struktur dimana sumber listrik tidak tersedia.
2. Memproteksi struktur yang kebutuhan arusnya relatif kecil, yang jika ditinjau dari segi ekonomi akan lebih menguntungkan dibandingkan dengan sistem arus tanding.
3. Memproteksi pada daerah hot spot yang tidak dicoating, misalnya pada daerah dimana ada indikasi aktifitas korosi yang cukup tinggi.
4. Untuk mensuplemen sistem arus tanding, jika dipandang arus proteksi yang ada kurang memadai. Ini biasanya terjadi pada daerah yang resistivitas tanahnya rendah seperti daerah rawa.



5. Untuk mengurangi efek interferensi yang disebabkan oleh sistem arus tanding atau sumber arus searah lainnya.
6. Untuk memproteksi pipa yang dicoating dengan baik, sehingga kebutuhan arus proteksi relatif kecil.
7. Untuk memproteksi sementara selama konstruksi pipa hingga sistem arus tanding terpasang.
8. Untuk memproteksi pipa bawah laut, yang biasanya menggunakan bracelet anode dengan cara ditempelkan pada pipa yang di *coating*.

Di samping sifat anoda, faktor-faktor lain juga mempengaruhi proses proteksi katodik yaitu:

1. Luas permukaan tiang yang akan diproteksi. Makin luas permukaan makin banyak anoda yang digunakan;
2. Beda potensial listrik antara anoda dan katoda. Makin besar perbedaan makin besar arus proteksi dari anoda ke katoda
3. Logam dan ukuran anoda. Makin kecil tahanan anoda berarti makin sedikit penggunaan logam anoda. Makin kecil ukuran logam anoda makin besar tahanan anoda, berarti makin banyak penggunaan logam anoda. (Sumber : Departemen Pemukiman dan prasarana wilayah, 2004)

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

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



Kelemahan proteksi katodik dengan anoda korban dibandingkan dengan sistem arus tanding adalah driving voltage dari sistem ini relatif rendah karena arus proteksi hanya terjadi dari reaksi galvanis material itu sendiri sehingga sistem ini hanya dapat digunakan untuk memproteksi struktur yang arus proteksinya relatif kecil dan resistivitas lingkungan rendah. Karena kondisi yang demikian itu, sistem ini akan menjadi kurang ekonomis jika dipakai untuk keperluan memproteksi struktur yang relatif besar. Kemampuan untuk mengontrol variabel efek arus terhadap struktur yang diproteksi relatif kecil. (Peabody, 2001)

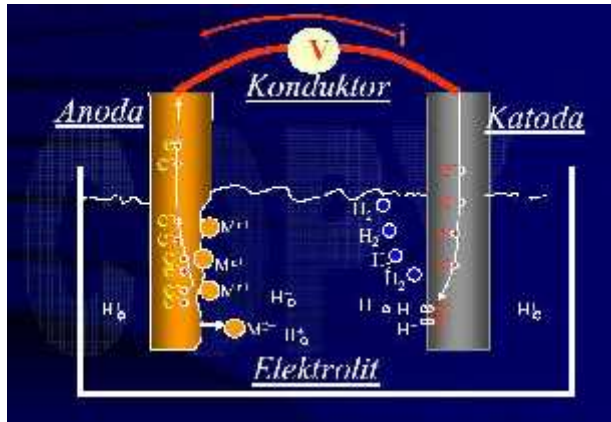
2.13.1 Metode Kerja SACP

Sistem ini tidak menggunakan sumber arus dan hanya memakai anoda yang akan dikorbankan. Dalam mendesain perlindungan katoda, yang pertamakali dianalisis adalah komposisi material anoda yang akan dikorbankan. Anoda ini haruslah lebih bersifat korosif daripada katoda. Kalau sifat material anoda sama korosif atau tidak lebih korosif daripada katoda yang akan dilindungi, maka tujuan proteksi katoda tidak tercapai. Komposisi anoda terkait erat dengan lokasi penempatannya. Anoda yang akan ditempatkan di pinggir pantai atau di laut akan berbeda dengan anoda yang akan ditempatkan di tanah pada ketinggian tertentu. Derajat oksidasi untuk tiap tempat berbeda satu sama lain. Sehingga, kecepatan penggerusan katoda pun akan berlainan.

Sistem SACP juga dikenal juga dengan galvanic anode, dimana cara kerja dan sumber arus yang digunakan memang berasal hanya dari reaksi galvanis anoda itu sendiri. Prinsip dasar dari sistem anoda korban adalah hanya dengan cara menciptakan sel elektrokimia galvanic dimana dua logam yang berbeda dihubungkan secara elektrik dan ditanam dalam elektrolit alam (tanah atau air). Dalam sel logam yang berbeda tersebut, logam yang lebih tinggi dalam seri elektromotive-Emf series (lebih aktif) akan menjadi anodic terhadap logam yang kurang aktif dan terkonsumsi selama reaksi elektrokimia. Logam yang kurang aktif menerima proteksi katodik pada permukaannya karena adanya



aliran arus melalui elektrolit dari logam yang anodic. Berikut visualisasi dari rangkaian SACP.



Gambar 2.21 Rangkaian sistem SACP
(Denny A. Jones, 1996)

2.13.2 Anoda pada SACP

Anoda korban harus terbuat dari logam yang mempunyai potensial listrik lebih rendah dari logam yang diproteksi (lihat tabel di bawah). Logam yang diproteksi dalam hal ini adalah tiang pancang pipa baja. Dengan demikian akan terjadi aliran elektron (*supply electron*) dari anoda ke katoda yang berlangsung secara terus menerus sampai logam anoda yang dikorbankan habis. Anoda yang digunakan pada proteksi katodik tiang pancang pipa baja dengan metoda anoda korban biasanya digunakan logam paduan dari Magnesium, Seng, dan Aluminium sebagaimana tampak pada tabel berikut ini



Tabel 2.2 Spesifikasi Anoda

Sifat	Paduan Seng*	Paduan Aluminium**	Paduan Magnesium***
Komponen (%0)	Al : 0.4 – 0.6 Cd : 0.075 – 0.0125 Cu : < 0.005 Fe : < 0.0014 Tb : < 0.15 Si : < 0.125 Zn : < Sisa	Al : Sisa Cu : 0.006 Fe : < 0.1 Hg : 0.02 – 0.05 Si : 0.11 – 0.21 Zn : 0.3 – 0.5 Lain lain, Masing masing : < 0.02	Al : < 0.01 Cu : 0.02 Fe : < 0.03 Mg : rem Mn : 0.5 – 1.3 Ni : 0.001 Pb : < 0.01 Sn : < 0.01 Zn : 0.01
Kapasitas E_{Korr} (SSC)	780 Ah-kg ⁻¹ -0.1050 mv	2640 Ah-kg ⁻¹ -0.1000 mv	1232 Ah-kg ⁻¹ -0.1700 mv
Kerapatan kg-m ⁻³	7060	2695	1765
Kapasitas Ah-kg ⁻¹	780	2.640	1.232
Pengausan (berat) Kg-Ay ⁻¹	10.7	3.2	4.1
Pengausan (Volume) ml-Ay ⁻¹	1518	1180	1196
Keluaran Am ⁻²	6.5	6.5	10.8
E_{kor} (SSC) mv	-1050	-1050	-1700



(Sumber : Departemen Pemukiman dan prasarana wilayah, 2004)

- * = Spesifikasi Departemen AS untuk bahan Anoda Korban Seng membutuhkan pengontrolan lebih ketat dalam hal tingkat kemurnian dari pada bahan ini.
- ** = Merk dagang Impalloy
- *** = Merk dagang Dow Chemical Company
- SSC = Ag/AgCl

2.13.3 Penggunaan SACP

Pada Sacrificial Anode Cathodic Protection (SACP) pemilihan anoda korban didasarkan pada konduktivitas lingkungan, kebutuhan potensial untuk mendistribusikan arus, kemungkinan adanya efek samping dan juga pertimbangan ekonomi. Anoda korban relatif lebih murah, mudah dipasang bila dibandingkan dengan metoda arus tanding. Keuntungan lainnya adalah tidak diperlukannya peralatan listrik yang mahal dan tidak ada kemungkinan salah arah dalam pengaliran arus (Trethewey, 1991).

Adapun logam yang sangat umum digunakan sebagai anoda korban adalah : Zn, Al, dan Mg. Potensial tunggal untuk logam magnesium adalah sekitar 1.6 Volt dalam skala Calomel, sedangkan untuk Zn 1,0 Volt dalam skala Calomel. Oleh karenanya Mg memberikan rapat arus jauh lebih besar daripada Zn dan dapat menyebabkan Overproteksi. Anoda korban Mg cocok untuk digunakan pada lingkungan yang kurang konduktis seperti dalam lingkungan tanah, atau air payau.

Logam seng yang digunakan sebagai anoda korban harus memiliki kemurnian tinggi. Kandungan pengotor utama yang dapat mengganggu sifat anodinya harus seminimal mungkin. Kandungan besi dalam anoda seng tidak boleh lebih daripada 0,001 persen. Penggunaan anoda korban magnesium biasa digunakan untuk melindungi pipa yang ditanam pada tanah. Anoda magnesium



sering dipadu dengan logam aluminium sekitar t6 persen, dan seng sebesar 3 persen. Penambahan unsur – unsur ini bertujuan untuk menghindari terjadinya Pitting Corrosion/ Korosi Sumuran pelapisan yang diterapkan pada benda kerja yang akan dilindungi dapat mengurangi jumlah konsumsi anoda korban magnesium, sehingga lebih efisien dan murah. Sebuah anoda korban magnesium dapat melindungi pipa yang telah diberi coating sejauh 8 Km.

Pada Anoda korban umumnya juga ditambahkan back fill dengan maksud untuk meningkatkan konduktivitas tanah sekeliling anoda dan menurunkan kecepatan korosi anoda magnesium yang berlebihan. Berikut adalah tabel properties dari beberapa Anoda Korban yang sering digunakan.

Table 2.3 Karakteristik Anoda Korban

Anode Material	Density (g.cm ⁻³)	Potensial volts Cu/CuSO ₄	Amp-hrs per kg
Zn	7.1	-1.10	780
Al	2.7	-1.15	2700
Mg	1.7	-1.55	1230

Tabel 2.4 Nilai Standar Potensial Logam untuk Proteksi Katodik

Metal	Potensial (Cu/CuSO ₄)
Steel	-850 mV
Steel (Sulphate reducing bacteria)	-950 mV
Copper alloys	-500 to -650 mV
Lead	-600 mV
Aluminium	-950 to -1200 mV

Logam Aluminium dapat dipadu dengan logam lain agar memiliki potensial di antara anoda Zn dan Mg. Logam aluminium mempunyai potensial besar untuk dijadikan anoda korban, namun demikian logam aluminium memiliki efisiensi anodik yang rendah. Dengan menambahkan unsur merkuri sebesar 0.04 persen, efisiensi anodik aluminium dapat bertambah sampai menjadi 90 %.



Berikut adalah nilai Electrochemical Efficiency (ϵ) anoda korban yang digunakan dalam perhitungan desain untuk berat anoda korban yang disyaratkan:

Tabel 2.5 Nilai Electrochemical Efficiency untuk Al dan Zn pada anoda korban

Material Anoda	Electrochemical Efficiency (Ah.kg)
Al	2000 ^{1*}
Zn	700 ^{2*}
^{1*} Temperatur anoda: maksimal 25 °C	
^{2*} Temperatur anoda: maksimal 50 °C	

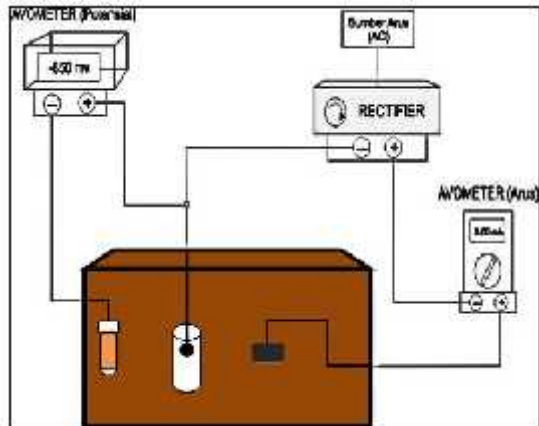
Sumber: Chamberlain J., *Trethewey* KR. 1991

2.14 Proteksi Katodik Arus Paksa

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

Sistem arus tanding digunakan untuk melindungi struktur yang besar atau yang membutuhkan arus proteksi yang lebih besar dan dipandang kurang ekonomis jika menggunakan anoda korban. Sistem ini dapat dipakai untuk melindungi struktur baik yang tidak

dicoating, kondisi coating yang kurang baik maupun yang kondisi *coatingnya* baik.



Gambar 2.22 Rangkaian Proteksi Katodik Arus Paksa

Kelebihan sistem arus tanding adalah dapat didesain untuk aplikasi dengan tingkat fleksibilitas yang tinggi karena mempunyai rentang kapasitas *output* arus yang luas. Artinya kebutuhan arus dapat diatur baik secara manual maupun secara otomatis dengan merubah tegangan *output* sesuai dengan kebutuhan. Kelebihan lain dari sistem ini, dengan hanya memasang sistem di salah satu tempat dapat memproteksi struktur yang cukup besar.

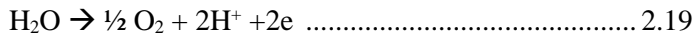
Kekurangan dari sistem ini yaitu memerlukan perawatan yang lebih banyak dibanding sistem anoda korban sehingga biaya operasional akan bertambah. Sistem ini juga mempunyai ketergantungan terhadap kehandalan pemasok energi (*rectifier*) sehingga kerusakan pada sistem ini akan berakibat fatal terhadap kinerja sistem proteksi. Kekurangan yang lain sistem arus tanding adalah cenderung lebih mahal karena peralatan dan bahan yang digunakan lebih banyak. Di samping itu ada kemungkinan dapat



menimbulkan masalah efek interferensi arus terhadap struktur di sekitarnya. (Peabody, 2001)

2.14.1 Reaksi pada Sistem Proteksi Katodik Arus Paksa

Reaksi yang terjadi pada system proteksi katodik arus paksa adalah dengan arus yang dipaksakan, transfer muatan negatif dari anoda ke katoda tidak berlangsung spontan, tetapi oleh sumber listrik dari luar. Secara teoritis, semua konduktor listrik, baik logam maupun non-logam, dapat digunakan sebagai anoda. Dalam lingkungan air yang tidak mengandung klorida, reaksi utama yang terjadi pada anoda yang relative bersifat mulia adalah evolusi oksigen menurut reaksi:

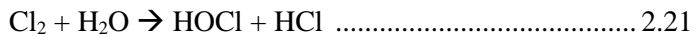


Dapat disimpulkan bahwa pada proses di anoda diperlukan air. Bila tanahnya kering, tahanannya akan naik dan keluaran arus anoda akan sangat kecil, dan bila arus dipaksakan untuk dinaikkan dengan menaikkan tegangan di rectifier, akibatnya akan fatal. Karena tahanan antar muka/ tanah besar, permukaan anoda akan panas dan anoda akan rusak. Keperluan air ini sebenarnya hanya sedikit ditinjau dari reaksinya, yaitu sekitar 1,15 gram per ampere per hari. Tetapi ketersediaan air di permukaan anoda menjadi masalah, karena air harus berdifusi dalam tanah.

Tetapi bila dalam air terlarut klorida, meskipun dalam konsentrasi kecil, akan terjadi tambahan reaksi oksidasi klorida menurut reaksi:



Gas klorin kemudian akan bereaksi dengan air membentuk asam hipokloro dan asam klorida menurut:



BAB II TINJAUAN PUSTAKA



Hasil reaksi ini dapat merusakkan insulasi kabel yang bersinggungan atau berdekatan dengan anoda. Oleh karena itu untuk lingkungan laut diperlukan insulasi kabel yang khusus. Kebutuhan dalam ICCP

2. 14.2 Anoda pada Sistem Proteksi Katodik Arus Paksa

Anoda adalah elektrode negatif, bisa berupa logam maupun penghantar listrik lain, pada sel elektrokimia yang terpolarisasi jika arus listrik mengalir ke dalamnya. Arus listrik mengalir berlawanan dengan arah pergerakan elektron. Pada proses elektrokimia, baik sel galvanic (baterai) maupun sel elektrolisis, anode mengalami oksidasi. Anoda biasanya terkorosi dengan melepaskan elektron-elektron dari atomatom logam netral untuk membentuk ionion yang bersangkutan. Ion-ion ini mungkin tetap tinggal dalam larutan atau bereaksi membentuk hasil korosi yang tidak larut.

Bentuk dan ukurannya bermacam-macam, bisa berbentuk kawat, tabung, lempengan, batangan, dan piringan. Kriteria yang ideal untuk anoda menurut Shreir dan Hayfield:

1. Laju konsumsi yang rendah
2. Tingkat polarisasi yang rendah
3. Konduktifitas listrik yang tinggi
4. Kemudahan dalam instalasi
5. Kuat secara fisik, sehingga tidak mudah mengalami kerusakan
6. Tahan terhadap abrasi dan erosi
7. Mudah dibentuk
8. Biaya yang rendah

Pada sistem arus paksa disamping anoda sebagai sumber elektron juga dibutuhkan sumber arus seperti rectifier yang dihubungkan dengan anoda. Pada metode arus paksa, anoda tidak dipilih dari logam dengan potensial elektrode lebih negatif dari logam yang dilindungi, tetapi justru dipilih dari logam mulia. Meskipun potensial elektrode anoda tersebut lebih besar daripada



pipa baja, elektron tetap mengalir dari anoda menuju pipa karena dipaksa oleh arus searah (DC) yang diperoleh dari transformator rectifier. Dengan demikian suatu struktur yang memiliki luasan besar dapat dilindungi oleh sebuah anoda tunggal dan karena tegangan dorong yang dimiliki tinggi, anoda dapat ditempatkan jauh dari struktur Anoda untuk metode arus paksa umumnya diklasifikasikan ke dalam tiga tipe:

1. Anoda tipe aktif (terkonsumsi cepat) : besi atau baja
2. Anoda semi-pasif (semi-terkonsumsi) : grafit, timbal, besi-silikon
3. Anoda paif sempurna (tidak terkonsumsi) : terbuat dari platina

Uraian lebih rinci dari jenis-jenis anoda untuk metoda arus tanding seperti berikut.

a. Anoda baja

Baja atau baja tua dapat digunakan untuk anoda. Anoda jenis ini tentu saja murah, tetapi konsumsinya sangat tinggi, yaitu sekitar 10 kg/AY (kilogram/ Ampere Year) dan cepat habis. Pemasangan anoda jenis ini harus hati-hati karena mudah rusak pada daerah sambungna anatar anoda dan kabel positif.

b. Anoda besi Silikon (*High-Silicon-Iron, HIS atau Fe-Si*)

Jenis Anoda ini bersifat keras, rapuh dan tidak tahan benturan dan kejutan suhu. Komposisinya sudah standar yaitu: 14.4%Si; 0.7%Mn; 0.95%C dan sisanya Fe. Anoda ini dikenal sejak tahun 1915, dan sebagai anoda HIS akan membentuk lapisan film protektif yang akan terbaharui bila rusak. Filmnya 50% berpori dan 75% terdiri dari SiO₂ yang cukup sebagai konduktor elektronik. Laju konsumsinya sekitar 1 kg/AY.



Gambar 2.23 Besi Silicon

- c. Anoda besi-silikon-krom (*High-Silicon-Iron-Chromium, Fe-S-Cr*)

Jenis anoda ini mulai digunakan sejak 1960. Komposisi tipikalnya adalah: 14.4%Si; 0.7%Mn; 1.0%C; 4.25%Cr dan sisanya Fe. Penambahan krom dimaksudkan untuk ketahanan terhadap korosi sumuran (pitting), dan dapat digunakan dalam lingkungan yang mengandung klorida. Laju konsumsinya sekitar 0.5 kg/AY.

- d. Anoda timbal-perak (*Lead-Silver, Pb-Ag*)

Anoda paduan timbal ini digunakan mulai sekitar 1954. Penggunaan yang umum di lingkungan air laut. Dalam aplikasi, anoda jenis ini akan membentuk lapisan PbO_2 yang relatif keras dan bersifat konduktor elektronik (1/10 dari timbal). Anoda ini tahan asam, tetapi tidak tahan basa sekitar pH 10. Komposisi yang biasa digunakan: 6%Sb; 1%Ag; sisanya Pb. Laju konsumsinya bervariasi Antara 0.06 sampai 0.12 kg/A.Y.



Gambar 2.24 Anoda Timbal Perak

e. Anoda grafit

Anoda grafit banyak digunakan untuk lingkungan laut, karena grafit imun terhadap klorida. Sejarah anoda grafit sangat panjang, karena grafit telah lama digunakan sebagai anoda dalam industry kimia. Laju konsumsinya sekitar 0.05 kg/A.Y tetapi di lumpur sangat tinggi yaitu sekitar 1.4 kg/A.Y



Gambar 2.25 Anoda Grafit



f. Anoda plastik-konduktif

Anoda jenis plastic-konduktif umumnya berupa anyaman (mesh) atau mastic. Penggunaannya terutama untuk proteksi katodik tulangan beton, dimana distribusi arus merupakan masalah utama. Dengan bentuk mesh atau mastic, anoda dapat disebar merata di seluruh permukaan beton.

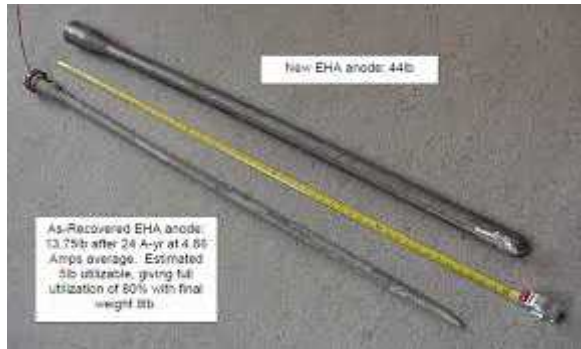
g. Anoda keramik

Ini tergolong anoda terbaru, dikembangkan mulai tahun 1970. Anoda jenis ini dapat berupa “bulk” oksida atau lapisan tipis oksida. Contoh anoda jenis ini adalah magnetit (bulk) dan mixed metal oxide (Mixmeo) untuk jenis lapisan oksida. Jenis terakhir dipatenkan sebagai DSA (*Dimensionally Stable Anode*) atau *oxide/ meta composite anode*.

Anoda jenis DSA yang digunakan untuk lingkungan yang mengandung klorida, terdiri dari campuran oksida RnO_2 , TiO_2 dan PtO yang dilapiskan pada titanium murni. Oksida-oksida ini bersifat konduktif, tahan baik oksidasi maupun reduksi, di lingkungan asam atau basa. Kapasitas arusnya sangat tinggi, antara $100-500 A/m^2$ dan laju konsumsinya sangat rendah.

h. Anoda platina

Logam platina digunakan sebagai anoda karena kapasitas arusnya sangat tinggi ($100A/m^2$). Platina dilapiskan secara listrik sebagai film yang sangat tipis pada logam Ti, Nb, atau Ta. Tebal lapisan umumnya $2.5 \mu m$ dan $7.5 \mu m$ biasanya dibuat atas pesanan konsumen. Penggunaan anoda jenis ini harus hati-hati, karena banyak kegagalan telah dialami. Anoda ini memang merupakan satu-satunya pilihan untuk lingkungan laut dengan keperluan arus yang besar.



Gambar 2.26 Anoda Platina

Anoda yang digunakan tidak harus lebih reaktif daripada struktur logam yang akan dilindungi, anoda yang digunakan biasanya bersifat inert dan memiliki ketahanan yang tinggi terhadap serangan korosi. Anoda dapat terbuat dari material seperti graphite, logam paduan, dan mixed-metal oxide-coated titanium (MMO).

Tabel 2.6 Jenis dan Spesifikasi Anoda

Material Anoda	Aplikasi Khusus	Typical Loss (Lb/ A. Y)
Scrap Steel	Tanah, air tawar/ laut	20
Aluminium	Tanah, air tawar/ laut	10-12
Grafit	Tanah, air tawar	0.25-5.0
High Silicon Iron dan Si-Cr Iron	Tanah, air tawar/ laut	0.25-5.0
Timah	Air laut	0.1-0.25
Platinum dan Titanium	Air laut	Kosong

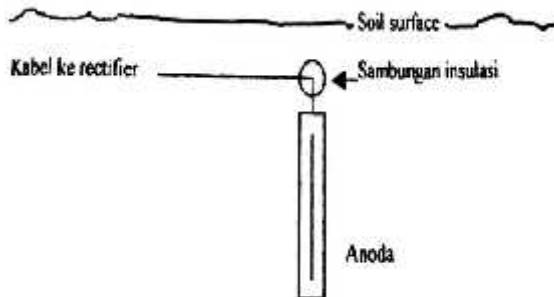
Sumber: Supomo, 1995

2.14.3 Susunan Penanaman Anoda Groundbed

Dalam proteksi katodik terdapat beberapa tipe penanaman anoda groundbed dengan penggunaan dalam kondisi tertentu yaitu:

1. Anoda Tipe Vertikal

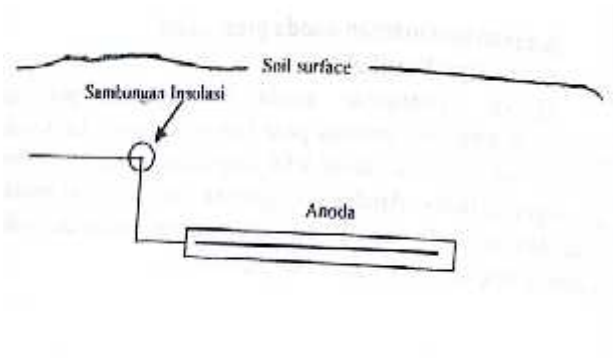
Metode penanaman anoda ini membuat potensial perlindungan mengalir terbatas pada titik-titik yang tidak terlalu berjauhan. Hal ini dikarenakan sifat jangkauan anoda groundbed yang sangat terbatas. Apabila penggunaan anoda dalam jumlah banyak dan pertimbangan biaya tidak menjadi masalah, maka penanaman tipe vertikal sangat menguntungkan.



Gambar 2.27 Instalasi Anoda Tipe Vertikal

2. Anoda Tipe Horizontal

Bentuk penanaman horizontal menjadikan jangkauan potensial proteksi dari anoda semakin jauh. Hal ini bisa merugikan apabila posisi kedalaman tanam anoda tidak terletak dalam posisi lurus terhadap struktur yang dilindungi, sebab arus dapat lari kemana-mana. Pada tipe ini jumlah anoda yang digunakan tidak terlalu banyak sehingga dapat menghemat biaya instalasi maupun biaya perawatan.



Gambar 2.28 Instalasi Tipe Anoda Tipe Horizontal

2.14.4 Kedalaman Tanam Anoda Groundbed

Kedalaman tanam dari anoda groundbed menentukan pengaruh yang akan diterima struktur yang hendak diproteksi. Oleh karena itu juga berpengaruh pada interferensi yang diterima struktur yang dimaksudkan untuk tidak dilindungi pada area yang berdekatan. Terdapat tiga macam kedalaman tanam anoda groundbed, yaitu:

a. *Point surface*

Tipe yang mudah digunakan baik dari segi desain maupun konstruksinya. Namun sangat mudah memberikan pengaruh terhadap struktur di sekelilingnya. Meskipun demikian dapat diletakkan pada posisi optimal yang memberikan efek seminimal mungkin.

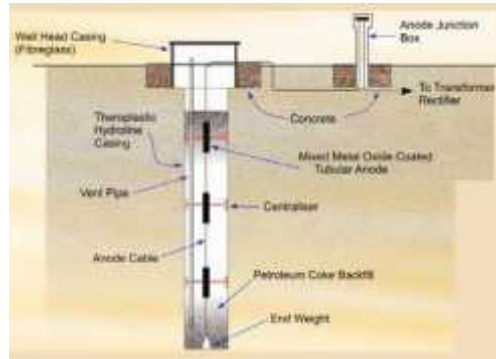
b. *Distributed*

Digunakan untuk memproteksi system pemipaan pada daerah terbatas. Pada level proteksi yang sama, digunakan anoda atau catu daya yang lebih banyak. Selain itu, arus yang digunakan lebih sedikit untuk melindungi logam pada luasan yang sama.

c. *Point deep well*

Metode ini dapat mendistribusikan arus proteksi dengan lebih baik disbanding yang lainnya. Akan tetapi sistem ini sangat mahal, apabila memerlukan perbaikan

harus diganti dengan anoda baru serta dapat merusak struktur lain di sekitarnya. (*Nace Standard RP0572-2001*)



Gambar 2.29 Point Deep Well Anode Groundbed

2.14.5 Backfill

Backfill merupakan material yang ditempatkan pada suatu lubang (*canister*) untuk mengisi spasi di antara anoda-anoda. *Carbonaceous backfill* merupakan istilah yang digunakan untuk menggambarkan *backfill* berbahan dasar karbon dengan tahanan jenis rendah yang berada di sekeliling anoda *groundbed*. *Backfill* menyediakan lingkungan yang homogeny bagi anoda sehingga reaksi pada seluruh permukaan yang aktif berjalan seragam. Dengan demikian, laju konsumsi sekelompok anoda dalam *groundbed* tidak berbeda. Backfill mencegah kontak langsung anoda dengan tanah yang dapat membentuk lapisan film dan mengurangi daya gunanya. Lapisan film ini memiliki tahanan tinggi pada permukaan anoda dan menjadikan pasif. Selain ini, backfill menarik butir-butir air dan meningkatkan konduktivitas di daerah sekitar anoda. Hal ini mencegah korosi local pada anoda oleh unsur-unsur agresif dalam tanah.

Tiga material yang umum digunakan sebagai backfill adalah:

1. Pasir arang batubara (*coal coke breeze*)
2. Pasir arang minyak bumi (*calcined petroleum coke breeze*)



3. Partikel grafit alami atau buatan manusia

Tabel 2.7 Densitas *Carbonaceous Backfill*

Material Backfill	Densitas (kg-m ³)
Coal coke breeze	650 – 800
Calcined petroleum coke granules	700 – 1100
Natural graphite particles	1100 – 1300
Crushed man-made graphite	1100 – 1300

Sumber: Sheir, 1993

2.14.6 Transformator Rectifier

Untuk memproteksi pipa pada sistem arus paksa dibutuhkan sumber arus proteksi yang berasal dari luar seperti: Rectifier, Solar Cell, dan Generator. Rectifier adalah alat yang digunakan sebagai penyearah arus yang berfungsi untuk mengubah arus dari arus bolak-balik (AC) ke arus searah (DC). Seperti ditunjukkan pada gambar 2.21.

Alat ini menggunakan arus bolak-balik / AC (Alternating Current) sebagai sumber listrik utamanya dan mengubahnya menjadi arus searah, sehingga alat ini banyak digunakan sebagai sumber energi (Power Supply) dalam menyediakan tegangan dan arus DC. Untuk melengkapi rangkaian listrik pada sistem ICCP, Terminal positif power supply dihubungkan ke anoda sedangkan terminal negatif dihubungkan ke katoda, sehingga arus DC akan mengalir dari power supply ke anoda melewati elektrolit hingga sampai ke katoda dan akhirnya kembali lagi ke power supply.

Ada beberapa jenis rectifier yang akan digunakan tergantung pada kondisi lingkungannya, antara lain:

1. Rectifier dengan pendingin udara
2. Rectifier dengan pendingin minyak
3. Rectifier arus konstan
4. Rectifier dengan control potensial otomatis

Rectifier yang banyak digunakan saat ini adalah rectifier dengan pendingin udara. Sistem pendingin pada rectifier tipe ini berasal

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



dari udara yang masuk ke dalam kotak rectifier dari bagian atas dan bawah sehingga rectifier jenis ini cocok untuk lingkungan yang udaranya relative bersih. Pemasangan rectifier ini dapat digantung di dinding, tiang atau pada alas/ lantai tergantung kondisi tempat yang tersedia.



Gambar 2.30 Transformator Rectifier

Rectifier juga harus dilengkapi dengan:

1. Input circuit breakers dan sekering untuk perlindungan terhadap overload
2. Metering, voltmeter dan amperemeter yang mempunyai skala dan pelindung
3. Fasilitas metering tambahan untuk pembacaan eksternal
4. Terminal untuk kabel sampai 16mm²
5. Pengatur keluaran arus dan daya listrik

2.15 Elektroda Acuan

Elektroda Acuan (*Reference Electrode*) adalah suatu elektroda yang mempunyai potensial elektroda stabil dan diketahui nilainya. Potensial elektroda yang mempunyai tingkat stabilitas yang tinggi biasanya dicapai dengan menerapkan sistem Redoks, dimana konsentrasi setiap partisipannya dibuat konstan (buffered atau saturated).



Terdapat banyak jenis elektroda acuan yang biasa digunakan tergantung keperluannya, dan yang biasa digunakan pada sistem proteksi katodik adalah Cu/CuSO₄, Ag/AgCl dan Zinc Reference Electrode. Berikut adalah beberapa jenis elektroda acuan beserta potensialnya:

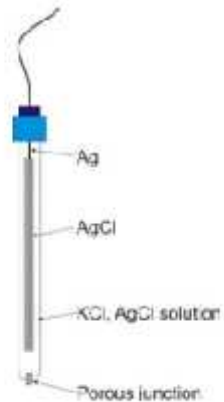
1. Standard Hydrogen Electrode (SHE) ($E = 0.000 \text{ V}$)
aktifitas ion $\text{H}^+ = 1$
2. Normal Hydrogen Electrode (NHE) ($E = 0.000 \text{ V}$)
konsentrasi ion $\text{H}^+ = 1$
3. Reversible Hydrogen Electrode (RHE) ($E = 0.000 \text{ V}$
sampai $0.0591 \cdot \text{pH}$)
4. Saturated Calomel Electrode (SCE) ($E = +0.242 \text{ V}$
saturated)
5. Copper-Copper(II) Sulfate Electrode ($E = +0.314 \text{ V}$)
6. Silver Chloride Electrode ($E = +0.197 \text{ V}$ saturated)
7. Ph-Electrode
8. Palladium-Hydrogen Electrode
9. Dynamic Hydrogen Electrode (DHE)

Silver/Silver Chloride Reference Electrode (Ag/AgCl) adalah jenis elektroda acuan yang paling banyak digunakan karena sederhana, murah, sangat stabil dan tidak beracun. Elektroda acuan ini biasa digunakan dengan elektrolit KCl jenuh sebagai buffer-nya, dan dapat juga digunakan dengan konsentrasi yang rendah seperti 1M KCl bahkan dapat juga secara langsung menggunakan air laut. Elektroda Ag/AgCl umumnya terbuat dari kawat silver/perak (Ag) yang dilapisi dengan lapisan tipis perak klorida (AgCl). Ketika elektroda ditempatkan ke dalam larutan potasium klorida jenuh (KCl) maka akan menghasilkan potensial 197 mV vs. SHE. Potensial dari reaksi setengah selnya ditentukan oleh konsentrasi klorida dalam larutan.

Elektroda acuan Ag/AgCl menghasilkan potensial yang sebanding dengan konsentrasi ion klorida, baik itu dari sodium klorida, potasium klorida, amonium klorida atau beberapa garam klorida lainnya, dan nilainya akan selalu konstan selama

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

konsentrasi ion kloridanya juga konstan. Gambar yang mengilustrasikan elektroda acuan Ag/AgCl dapat dilihat pada gambar 2.30



Gambar 2.31 Elektroda Acuan Ag/AgCL

Elektroda yang sering digunakan dalam ranah adalah Cu/CuSO₄ jenuh. Elektrode CuSO₄ terbuat dari tabung yang berisi batang tembaga dan larutan CuSO₄. Jika sebuah voltmeter dihubungkan dengan electrode CuSO₄ dan pipa, maka potensial yang terbaca adalah gabungan dari dua jenis potensial. Masing-masing dari potensial itu disebut “Half Cell”. Adapun kedua potensial tersebut adalah:

- Potensial antara batang tembaga dengan tanah melalui perantara larutan CuSO₄
- Potensial antara pipa dan tanah.

Aliran arus dari luar ke pipa yang diproteksi akan ditandai dengan adanya beda potensial antara tanah dengan pipa ke kutub negative. Perbedaan potensial digunakan pada beberapa kriteria untuk menentukan derajat proteksivitas dari sistem proteksi katodik.



Gambar 2.32 Elektroda Acuan Cu/CuSO₄

2.16 Katoda

Komponen katoda yang dimaksud disini adalah logam yang akan dilindungi, logam tersebut dibuat supaya bertindak sebagai katoda sehingga potensialnya berada pada daerah imun yang tahan terhadap serangan korosi. Dalam sistem proteksi katodik arus paksa / ICCP, logam yang dibuat menjadi katoda dinamakan sebagai elektroda kerja. Material pembentuk katoda dapat berupa besi, baja atau logam paduan, oleh karena itu metode ICCP biasa digunakan untuk pipa-pipa yang dikubur dalam tanah dan air laut.

2.17 Elektrolit

Elektrolit merupakan suatu larutan yang bersifat konduktif atau dapat menghantarkan arus listrik. Elektrolit terdiri dari ion-ion bebas yang memungkinkan terjadinya perpindahan elektron antara katoda ke anoda, sehingga elektrolit dapat bertindak sebagai jalur listrik yang merupakan medium perpindahan elektron. Karena ion-ion yang dimilikinya, elektrolit menjadi bersifat korosif, elektrolit banyak terkandung dalam tanah dengan kedalaman tertentu dan air laut, sehingga ketika suatu logam tanpa perlindungan berada dalam lingkungan tersebut maka logam tersebut akan terkorosi.



2.18 Angka Keamanan

Dalam aplikasi lapangan, biasanya terdapat beberapa penyimpangan perhitungan, pengukuran yang kurang tepat. Oleh karena itu perlu adanya angka keamanan yang meliputi:

a. *Coating efficiency*

Untuk pipa yang diberi lapis lindung, angka ini perlu diambil meskipun pipa telah dites dengan holiday detector sebelum dipasang. Karena pada saat penurunan pipa ke dalam tanah memungkinkan adanya lecet maupun crack pada lapis lindung pipa tersebut sehingga dapat menyebabkan timbulnya korosi. Angka keamanan biasanya ditentukan tergantung dari kualitas lapis lindung pipa baja yang ditanam.

b. *Utility factor*

Faktor utilitas juga perlu diperhitungkan karena dapat mengurangi arus proteksi yang semestinya hanya untuk struktur yang dilindungi. Angka keamanan untuk factor utilitas biasanya diambil sekitar 5-10%.

Kriteria di atas merupakan kriteria yang umum digunakan dalam perencanaan untuk menghitung kebutuhan anoda dalam sistem proteksi katodik. (Sulaiman)

2.19 Holiday Detector

Struktur pipa yang telah dilindungi oleh pelapisan yang baru terutama pada pipa yang pelapisan tersebut sangat berpengaruh pada lingkungan tempat pipa ditanam, seharusnya telah di inspeksi dengan holiday detector untuk mengetahui kontinuitas, adalah sebuah lubang jarum atau kerusakan pada lapisan film yang dapat menyebabkan masuknya kelembaban ke dalam substrat pipa.

Cacat ini tidak dapat dilihat oleh mata telanjang dan harus dilihat dengan instrumen elektrik yang disebut holiday detector.



Terdapat 2 tipe holiday detector, tipe tegangan tinggi dan tipe tegangan rendah yang dijelaskan dalam standard ASTM D 5162. Holiday detector tegangan rendah dipakai untuk lapisan coating yang mempunyai ketebalan sampai 20 mils atau 500 μm . Perangkat yang dapat dibawa kemana-mana ini mempunyai sumber tenaga berupa baterai, electrode spons untuk mendeteksi cacat, sebuah kabel tembaga dengan penghantar yang berhubungan dengan pipa. Saat cacat terdeteksi, sirkuit elektrik akan mengakibatkan alarm berbunyi. Cacat tersebut harus ditandai setelah terdeteksi oleh perangkat holiday tester.

Holiday detector tegangan tinggi (dibawah 800 volt) biasanya digunakan untuk coating yang ketebalannya lebih dari 20 mils (500 μm). Elektrodanya dapat berupa kuas atau sikat. Jika electrode mendeteksi adanya cacat, maka akan timbul percikan listrik yang loncat dari electrode ke daerah cacat yang terdeteksi.

2.20 Lapisan Pelindung

Lapisan pelindung merupakan lapisan film koontinyu dari material penyekat listrik di atas permukaan logam yang diproteksi. Material ini mengisolasi logam dari kontak langsung dengan elektrolit di sekelilingnya (mencegah elektrolit terhubung dengan logam) sekaligus sebagai penghalang yang memberikan hambatan listrik tinggi sehingga reaksi-reaksi elektrokimia tidak dapat terjadi. Fungsi primer lapis lindung pada pipa yang terproteksi katodik adalah mengurangi luasan permukaan logam yang terekspos pada pipa sehingga arus proteksi katodik yang diperlukan untuk melindungi logam dapat dikurang. (Peabody, 2001)

Coating adalah sebuah penutup yang diterapkan pada permukaan suatu benda, biasanya disebut sebagai substrat. Tujuan dari menerapkan lapisan yaitu dekoratif, fungsional, atau keduanya. Lapisan dapat berupa lapisan all over, meliputi substrat, atau hanya menutupi bagian substrat. Lapisan fungsional dapat diterapkan untuk mengubah sifat permukaan substrat, seperti adhesi, wetability, ketahanan korosi, atau ketahanan aus. Sebagai contoh pembuatan perangkat semikonduktor, lapisan

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



menambahkan properti benar-benar baru seperti respon magnetik atau konduktivitas listrik dan merupakan bagian penting dari produk. Sebuah pertimbangan utama bagi sebagian besar proses pelapisan adalah bahwa lapisan diterapkan pada ketebalan terkontrol, dan sejumlah proses yang berbeda yang di gunakan untuk mencapai kontrol ini, mulai dari sikat sederhana untuk lukisan dinding, beberapa mesin sangat mahal menerapkan pelapis di industri elektronik. Banyak proses pelapisan industri meliputi aplikasi film tipis bahan fungsional untuk substrat, seperti kertas, kain, film, atau foil.

Menurut NACE Standards RP0169-96 Section 5, lapis lindung sebagai sarana pengendali korosi yang efektif memiliki karakteristik sebagai berikut:

1. Penyekat listrik yang efektif
2. Penghalang uap (kelembapan) efektif
3. Mampu diaplikasikan
4. Sejalan dengan waktu mampu menahan perkembangan *holidays*
5. Memiliki adhesi yang baik terhadap permukaan pipa
6. Mampu menahan kerusakan akibat perawatan normal, penyimpanan (degradasi sinar ultra violet), dan pemasangan
7. Sejalan dengan waktu, mampu memelihara tahanan jenis listrik secara konstan
8. Ketahanan terhadap *disbonding*
9. Mudah diperbaiki
10. Interaksi dengan lingkungan tidak menghasilkan zat beracun

2.20.1 Coating primer

Primer diterapkan langsung ke permukaan baja yang telah dibersihkan. Tujuannya adalah untuk membasahi permukaan dan untuk menyediakan adhesi yang baik untuk dilakukan coating selanjutnya. dalam kasus primer untuk permukaan baja, ini juga



biasanya diperlukan untuk memberikan inhibisi korosi. (National Corrosion Service. 2000)

2.20.2 Coating Sekunder/ Intermediate

Sebuah cat lapisan sekunder adalah lapisan pelindung tambahan yang diterapkan pada permukaan rawan korosi untuk memulihkan kegagalan potensi lapisan primer. Ini memberikan lapisan kedap air untuk kapal yang diberikan untuk mencegah pencemaran lingkungan atau tumpahan. Disebut juga sebagai body coat untuk menambah tebal dan ketahanan. Formulasi intermediate sangat penting, utamanya untuk meningkatkan ketebalan yang dapat meningkatkan sifat-sifat utama dari coating. Body coat ini harus menempel kuat pada primer dan juga pada top coat.

Adapun fungsi dari coating sistem sekunder/ intermediate, yaitu: tebal sistem coating, mempunyai ketahanan yang kuat terhadap kimia, tahan terhadap uap air, strong cohesion, strong bond to primer and topcoat. Pelapis proteksi sekunder yang sering digunakan biasa pada tangki tanah bawah tanah dan di atas yang mengandung zat-zat seperti minyak mentah, produk minyak bumi atau bahan kimia yang berbahaya bagi lingkungan ketika dirilis. (National Corrosion Service.2000)

2.20.3 Top Coating

Topcoat merupakan suatu lapisan resin penyekat (a resinous seal) di atas intermediet dan primer. Ini merupakan pertahanan pertama terhadap chemical yang agresif, air, atau lingkungan, yang berfungsi sebagai barrier pertama dalam coating sistem. Top coat lebih padat dibanding intermediate coat karena jumlah pigmentnya lebih kecil. Adapun fungsi dari coating sistem topcoat, yaitu, sebagai lapisan penyekat dalam sistem coating, membentuk lapisan pertahanan pertama terhadap lingkungan, memberikan ketahanan terhadap chemical, air, dan cuaca, membuat permukaan menjadi tangguh dan tahan aus, memberikan keindahan.



2.21 Potensial Proteksi

British Standard Institute (BSI) Code of Practice For Cathodic Protection memberikan nilai-nilai tegangan perlindungan logam terhadap elektrolit yang diukur terhadap bermacam-macam elektroda referens.

Tabel 2.8 Nilai Elektroda Acuan

Elektrode Reference	Lingkungan Aerobik	Lingkungan Anaerobic
Cu/CuSO ₄	-0.85 mV	-0.95 mV
Ag/AgCl Air Laut	-0.80 mV	-0.90 mV
Ag/AgCl Jenuh	-0.75 mV	-0.85 mV
Zn/ Air Laut	+0.25 mV	+0.15 mV

Sumber: BS 7361 Part 1 Cathodic Protection. Part 1 Code of Practice for Marine and Land Application

Kriteria potensial proteksi katodik -850 mV atau disebut juga on potensial sudah menjadi perdebatan bertahun – tahun antara para *engineer* dan industriawan di bidang korosi. Kriteria ini terus berubah hingga akhirnya NACE mengeluarkan *Standard Practice* NACE SP 0169 pada tahun 2007 yang mengakomodir 3 nilai *criteria* potensial proteksi katodik.

Nilai kriteria potensial proteksi katodik “*on Potential*” - 850 mV diperkenalkan oleh Robert J. Kuhn pada sebuah paper tahun 1933 berdasarkan pengalamannya melakukan instalasi proteksi katodik untuk pipa air di New Orleans Amerika Serikat pada tahun 1920. Judul paper tersebut adalah “Cathodic Protection of Underground Pipe Lines from Soil Corrosion”. Nilai -850 mV untuk pipa air di daerah New Orleans masuk akal melihat kondisi air tanah yang berlimpah, tahanan tanah yang rendah dan kedalaman pipa yang dangkal.

Tetapi nilai potensial proteksi -850 mV ternyata tidak bisa mengakomodir proteksi katodik untuk kondisi tanah diluar new Orleans, pada tahun 1950 Kuhn menggunakan nilai -1000 mV untuk pipa gas yang dicoating didaerah Texas Amerika Serikat.



Perubahan nilai criteria potensial proteksi katodik yang signifikan ini menjadi pertanda tidak cukupnya nilai -850 mV (on Potensial)

2.22 Resistivitas Tanah

Resistivitas suatu jenis tanah adalah kemampuan tanah tersebut untuk menghambat aliran listrik. Jika resistivitas tanah rendah maka arus listrik semakin mudah mengalir begitu juga sebaliknya. Tanah mempunyai karakter kimiawi dan fisik yang bervariasi dan dapat mempengaruhi tingkat korosi pada logam. Pada umumnya tanah mengandung empat unsur utama, yaitu bahan mineral, bahan organik air dan udara. Karakteristik tanah yang berpengaruh terhadap tingkat korosi yang dihasilkan adalah resistivitas tanah.

Resistivitas jenis suatu tanah ditentukan oleh jumlah ion dalam tanah sebagai elektrolit karena arus listrik mengalir dalam elektrolit melalui mekanisme perpindahan ion-ion tersebut. Jika jumlah ion yang terdapat dalam tanah banyak maka komponen pembawa aliran listrik semakin banyak dan arus mudah mengalir. Dengan kata lain resistivitas tanah semakin rendah, proses korosi semakin meningkat dan sebaliknya. Survey tahanan jenis (resistivitas) tanah mutlak dilakukan pada tahap awal perencanaan teknis system proteksi katodik.

Tahanan jenis tanah merupakan fungsi dari kandungan kelembaban, kandungan garam, jenis garam dan temperature tanah. Secara umum, terdapat pertalian antara tahanan jenis tanah dengan laju korosi. Hal ini disebabkan korosi merupakan suatu fenomena elektrokimia sehingga semakin rendah tahanan jenis tanah, hambatan sirkuit yang dihasilkan juga semakin kecil. Akibatnya, sel-sel korosi mampu mengalirkan arus korosi dengan lebih mudah dan laju korosi dipercepat. (Arnoux, 2002)



Tabel 2.9 Klasifikasi Resistivitas Tanah

Rentang Resistivitas (Ohm-Cm)	Klasifikasi Resistivitas	Antisipasi Aktivasi Korosi
0 – 2,000	Rendah	Sangat Tinggi
2,000 – 10,000	Sedang	Tinggi
10,000 – 30,000	Tinggi	Sedang
Lebih dari 30,000	Sangat Tinggi	Rendah

Sumber : A. Sulaiman, Karyanto H. 1992. “Corrosion Control dan Monitoring”. Jakarta: Workshop Pertamina

Nilai hasil pengukuran mencerminkan sifat kelistrikan dari media elektrolit yang mempengaruhi kemampuan arus korosi untuk mengalir melalui media tersebut. Oleh karena itu pada perancangan system proteksi katodik, tujuan dan dai survey resistivitas tanah adalah untuk mengetahui tingkat kekorosifan masing-masing lingkungan tanah yang dilalui struktur. Selanjutnya dari nilai tersebut dapat ditentukan tipe sistem proteksi katodik yang akan diaplikasikan, arus perlindungan yang diperlukan, jumlah anoda, dan lokasi pemasangan anoda groundbed. (Parker. 1984)

Tujuan survei tahanan jenis tanah dengan menggunakan metode Wenner adalah :

- Mengetahui tingkat korosi masing-masing lingkungan tanah yang dilalui struktur
- Menentukan besar densitas arus yang diperlukan pada perhitungan total arus proteksi,
- Menentukan lokasi penempatan anoda dengan tepat, sehingga diperoleh proteksi yang maksimal terhadap struktur.

Untuk mendukung survei tahanan jenis tanah maka digunakan peralatan adalah sebagai berikut.

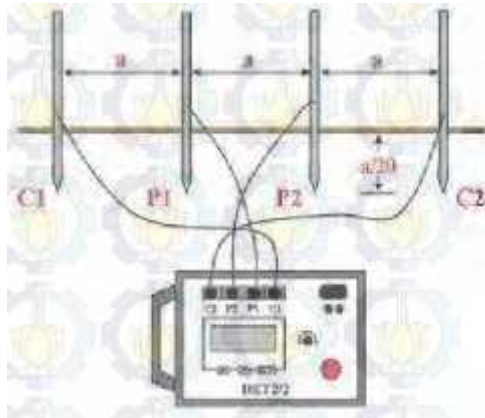
- Sel aki. Berfungsi memberikan supply arus pada pin
- Kabel tembaga merek Eterna 2.5 mm² (SNI). Berfungsi menghubungkan arus dan tegangan antar pin



3. Empat buah pin tembaga dengan dimensi sama. Ujung pin pada kedalaman tertentu tertanam dalam tanah.
4. Multitester. Berfungsi mengukur arus dan tegangan pada elektrolit yang terhubung sistem

Adapun prosedur pengukurannya sebagai berikut:

- a) Memasukkan empat pin baja ke dalam tanah pada jarak yang tetap dalam satu garis lurus. Selanjutnya hubungkan masing-masing pin pada instrumen pengukur seperti gambar berikut:



Gambar 2.33 Konfigurasi metode Werner

Jarak antar pin dapat ditentukan menggunakan meteran. Jarak ini mewakili pengukuran tahanan jenis dari kedalaman tanam dengan variasi 2 dan 3 meter.

- b) Dua pin terluar merupakan elektrode arus, sedang dua pin pada bagian dalam merupakan elektrode potensial yang mengukur penurunan potensial karena adanya hambatan dari elektrolit (tanah) ketika arus AC dilewatkan diantara pin-pin terluar.



- c) Mengukur nilai hambatan secara langsung pada instrumen Megger dan menghitung nilai tahanan jenisnya sesuai.
- d. Harus diperhatikan bahwa pengukuran yang dilakukan dengan cara ini menunjukkan nilai rata-rata tahanan jenis tanah pada kedalaman tertentu terkait dengan jarak antara pin-pin yang berdekatan. Kedalaman pin (electrode) tidak boleh melebihi nilai $a/20$.

Hasil survei ini berupa nilai tahanan jenis tanah yang menggambarkan tingkat korosifitas dari lokasi tanah yang akan menjadi media elektrolit. Sehingga perencanaan jenis anoda tumbal yang digunakan akan menyesuaikan dengan hasil survei ini.

2.23 Densitas Arus

Nilai densitas arus diperlukan untuk mempolarisasikan struktur yang dilindungi pada suatu nilai potensial perlindungan proteksi katodik. Densitas arus dalam sistem proteksi katodik arus paksa merupakan fungsi dari nilai rata-rata tahanan jenis tanah yang diukur. Selanjutnya, nilai ini akan mencerminkan sifat kekorosifan dari tanah. Tipe tanah pada akhirnya akan menentukan densitas arus yang diperlukan.

Tabel 2.10 Klasifikasi Tingkat Densitas Arus

Tahanan Jenis Tanah (Ohm-Cm)	Tingkat Korosifitas	Densitas Arus Proteksi (mA/ m ²)
0 – 1000	Sangat korosif	20
1000 – 5000	Korosif	10
5000 – 10000	Cukup korosif	5
>10000	Kurang korosif	2

Sumber: BS 7361 : Part 1 : 1991 Cathodic Protection Code of Practice for Land and Marine Application



2.24 Overprotection

Perlindungan berlebih pada struktur baja biasanya tidak berbahaya, hanya meningkatkan laju konsumsi anoda dan penggunaan daya listrik secara percuma. Pada tingkat yang berlebih menyebabkan terjadinya coating disbondment dan hydrogen embrittlement (perapuhan hydrogen), terutama pada material High Strength Steel. (Uhlig, 1985)

1. Coating disbondment

Potensial proteksi katodik berlebih menghasilkan gas hydrogen. Mekanisme demikian disebut *hydrogen over-voltage potensial*. Proses ini terbentuk ketika potensial polarisasi mencapai -1.12 volt (instant off) terhadap electrode referensi Cu/CuSO₄. Gas yang terbentuk sering terperangkap di Antara lapis lindung dengan permukaan logam dan dapat menyebabkan *blistering* atau *disbanding* pada lapis lindung. Selanjutnya elektrolit mengisi kesenjangan Antara lapis lindung selaku penyekat listrik mengakibatkan arus proteksi tidak dapat menjangkau luasan yang terpengaruh.

2. Hydrogen embrittlement

Hydrogen juga dapat dihasilkan dari arus proteksi berlebih yang mengakibatkan menurunnya keuletan baja. Penyerapan ion-ion hidrosil oleh permukaan logam terjadi melalui proses difusi atom-atom hydrogen yang sangat kecil ke dalam Kristal lattice logam atau paduan. Ikatan antar atomnya membentuk gas hydrogen, dimana gelembung-gelembung gas ini merupakan tekanan yang dahsyat. Tekanan yang tinggi akan memutuskan ikatan antar logam untuk menghasilkan *internal voids*. Berikutnya surface blister akan menurunkan kualitas lapis lindung secara cepat (US ACE, 1997)

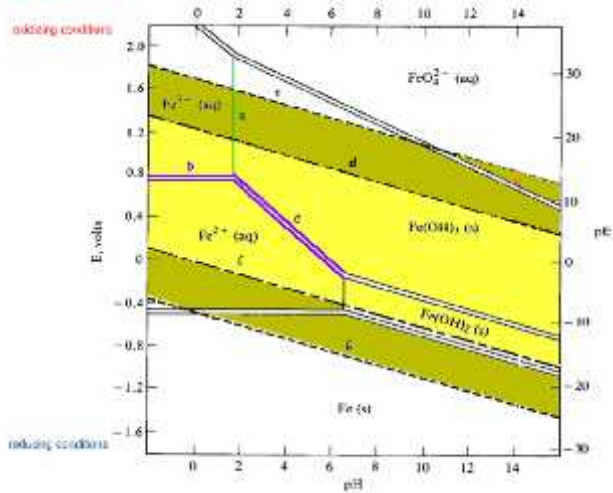


2. 25 Diagram Pourbaix

Diagram Pourbaix adalah diagram yang dapat menunjukkan suatu reaksi korosi yang terjadi secara termodinamika, atau dapat dikenal juga dengan diagram kesetimbangan E-pH. Diagram ini disusun berdasarkan kesetimbangan termodinamika antara logam dengan air dan dapat menunjukkan kestabilan dari beberapa fasa secara termodinamika. Diagram ini sangat berguna untuk memprediksi reaksi dan produk korosi dari suatu material pada lingkungan dengan derajat keasaman tertentu. Namun, diagram ini tidak dapat menyajikan informasi untuk laju korosi dari material tersebut. Dalam suatu diagram pourbaix, keadaan suatu logam terbagi 3, yaitu:

1. Imun. Daerah dimana logam berada dalam keadaan aman dan terlindungi dari peristiwa korosi.
2. Passive. Daerah dimana logam akan membentuk suatu lapisan pasif pada permukaan dan terlindung dari peristiwa korosi.
3. Corrosion. Daerah dimana logam akan mengalami peristiwa korosi

Diagram potensial-pH atau diagram Pourbaix memetakan fasa-fasa stabil logam dan senyawanya dalam larutan dengan pelarut air, yang berada dalam kesetimbangan termodinamika, sebagai fungsi dari potensial elektroda dan pH larutan. Dalam diagram potensial pH untuk besi terdapat zona korosi, yaitu daerah reaksi pelarutan besi yang terletak dalam daerah asam dan di daerah sempit pada kondisi sangat basa; zona pasif, yaitu daerah terbentuknya selaput tak larut di permukaan logam yang menghalangi proses korosi lebih lanjut; dan zona kebal, yaitu daerah yang secara termodinamika keadaan sebagai logam adalah fasa paling stabil. Gambar 1 memperlihatkan diagram Pourbaix sederhana untuk besi pada keadaan standar pada suhu 25 °C.



Gambar 2.34 Diagram pourbaix

Kegunaan diagram Pourbaix terutama adalah untuk memperkirakan arah reaksi spontan; komposisi produk korosi; dan perubahan lingkungan yang akan mencegah atau menurunkan laju serangan korosi. Diagram Pourbaix adalah diagram yang menggambarkan keadaan suatu bahan dengan potensial tertentu dalam derajat keasaman (pH) tertentu. Sumbu vertikal menunjukkan potensial bahan, sedangkan sumbu horisontal menunjukkan pH. Potensial (E) mengacu pada elektroda standar hidrogen yang dihitung dengan menggunakan persamaan Nernst.

$$Eh = E^{\circ} - \frac{0.0592}{n} \lg \frac{[C]^c [D]^d}{[A]^a [B]^b} \dots\dots\dots (7)$$

Dimana:

[C]^c[D]^d adalah hasil reaksi

[A]^a[B]^b adalah reaktan

E^o adalah potensial reduksi standar

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



Penelitian mengenai criteria potensial proteksi juga dilakukan oleh Pourbaix pada tahun 1974 dalam jurnalnya yang berjudul “*Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions*” Penelitian beliau mengenai korelasi antara PH dan nilai potensial proteksi. Elektroda standard yang digunakan adalah elektroda hydrogen dan nilai criteria potensial proteksi minimal yang digunakan sebesar $-0,59$ V SHE atau jika dikonversi menjadi $-0,9$ V dengan elektroda Cu/CuSO₄. Nilai ini lebih negative -50 mV dari hasil eksperimen Kuhn.

Maksud dari grafik pourbaix ini adalah terdapat 3 lokasi yaitu:

1. Pada daerah A (daerah korosi dimana terjadi proses korosi pada struktur logam didaerah ini)
2. Pada daerah B (Daerah imun, atau lebih dikenal dengan proteksi katodik)
3. Pada daerah C (daerah Passivasi atau daerah proteksi anodic)

Maksud dari pourbaix mengatakan bahwa potensial proteksi minimum adalah $-0,59$ V SHE atau -900 mV CSE adalah membawa sebuah logam yang semula berada daerah korosi (daerah A) menuju daerah *immunity* (Daerah B) sehingga proses korosi berhenti. Untuk memudahkan pembacaan maka pourbaix menyusun sebuah tabel pada suhu 25 oC dan tekanan 1 atm untuk PH 1 sampai dengan 14 sebagai berikut:



Tabel 2.11 Tabel Pourbaix (A. Gummow, 2010)

Electrolyte pH	Oxygen Reduction Potential (V)	Potensial air (V)	Fe ₂ (V)
1	1.1689	-0.0591	-0.626
2	1.1098	-0.1182	-0.62
3	1.0507	-0.1773	-0.62
4	0.9916	-0.2364	-0.62
5	0.9325	-0.2955	-0.62
6	0.8734	-0.3546	-0.62
7	0.8143	-0.4137	-0.62
8	0.7552	-0.4728	-0.62
9	0.6991	-0.5319	-0.62
10	0.6961	-0.591	-0.67
11	0.5579	-0.6501	-0.729
12	0.5188	-0.7092	-0.788
13	0.4597	-7.683	-0.847
14	0.4006	-0.8274	-1.263



Tabel 2.12 Tabel Pourbaix (A. Gummow, 2010)

Electrolyte pH	Beda oksigen dan Iron (V)	Beda Air dan besi (V)
1	-1.7949	-0.5669
2	-1.7298	-0.5018
3	-1.6707	-0.4427
4	-1.6116	-0.3836
5	-1.5525	-0.3245
6	-1.4934	-0.2654
7	-1.4343	-0.2063
8	-1.3752	-0.1472
9	-1.3161	-0.0881
10	-1.307	-0.079
11	-1.3069	-0.0789
12	-1.3068	-0.0788
13	-1.3067	-0.0787
14	-1.6636	-0.4356

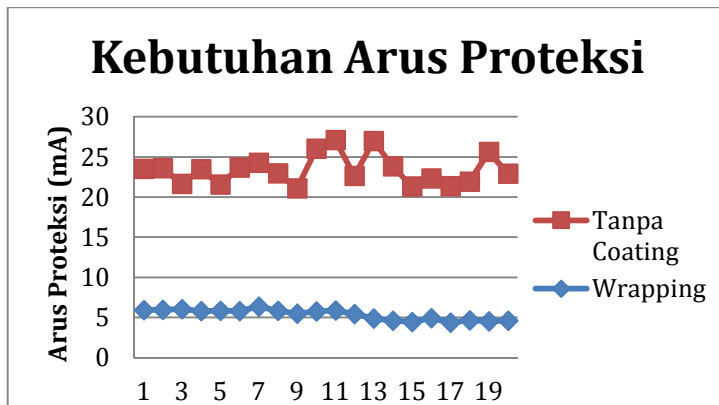
Nilai praktis terdapat pada kolom iron immunity potential dimana untuk setiap pH maka batas minimal sebuah besi masuk daerah imun adalah berdasarkan nilai potensial proteksi yang tertera di kolom tersebut pada skala SHE, Untuk mendapatkan nilai pada skala CSE harus ditambahkan -316 mV. Sebagai contoh pada pH 7 di tabel tersebut tertulis nilai -0.62 V SHE maka dikonversi menjadi -0,936 V CSE. (A. Gummow,2010)

Dikarenakan ketidak pastian pada criteria -850 mV on potential ini, maka banyak perusahaan mengaplikasikan nilai yang lebih negative dari -850 mV dengan variasi -900 mV, -950 mV bahkan sampai -1000 mV. Namun berdasarkan penelitian Brian Holtsbaum dalam sebuah jurnal yang berjudul “Use of Historical IR drops for Interpretation of “ON” Potential Criterion” pada tahun 2000 menyatakan bahwa nilai variasi tersebut tidak bisa mengakomodir nilai criteria minimal negative polarized potential proteksi berdasarkan criteria NACE point 2. (Zaki.2006)



2.26 Penelitian Sebelumnya

Pada Penelitian sebelumnya yang dilakukan berkaitan tentang Proteksi katodik pipa dengan sistem proteksi katodik arus paksa yang dilakukan oleh Azmi Mahiri dalam Tugas Akhir yang berjudul “*Perancangan Sistem Proteksi Katodik Arus Paksa Pada Pipa Baja API 5L Grade B Dengan Coating dan Tanpa Coating di Dalam Tanah*”. Pipa yang ditanam dalam tanah harus memiliki potensial sebesar -850 sampai -1100 mv agar terhindar dari korosi eksternal. Apabila pipa yang ditanam memiliki potensial kurang dari nilai tersebut maka perlu dilakukan proteksi katodik untuk mencapai nilai tersebut. Pengukuran potensial pipa dapat diketahui dengan menggunakan elektroda referensi Cu/CuSO₄ yang dihubungkan ke kutub negatif multimeter dan test point yang dihubungkan ke kutub positif multimeter.



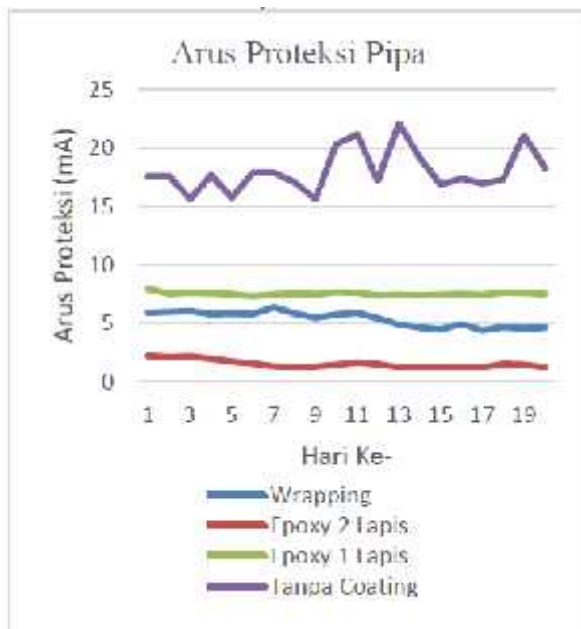
Gambar 2.35 Kebutuhan Arus proteksi (TA)

Pengukuran ini dilakukan agar mengetahui potensial pipa ke tanah atau potensial pipa sebelum dilakukan proteksi katodik. Dari grafik di atas diketahui pipa yang diberikan coating/ lapisan membutuhkan lebih sedikit arus dibandingkan dengan pipa tanpa lapisan. Pengukuran diameter pipa juga dilakukan, untuk mengetahui seberapa besar korosi mengurangi dimensi dari pipa,



setelah diukur maka didapat hasil yang sama seperti sebelum pipa ditanam, dapat disimpulkan bahwa pipa setelah 30 hari tidak mengalami perubahan dimensi, hanya pada pipa yang tidak dicoating mengalami korosi yang berada di permukaan pipa.

Pada Penelitian lain yang dilakukan oleh Tubagus Noor R, dkk dalam Jurnal Ilmiah Prosiding Seminar Nasional Fisika (E-Journal) SNF2016 VOLUME V, OKTOBER 2016 berjudul “Perancangan Proteksi Arus Paksa Pada Pipa Baja Api 5l Dengan Coating Dan Tanpa Coating Di Dalam Tanah” dapat dilihat bahwa penelitian dilakukan dengan membandingkan variabel coating yaitu pipa dengan wrapping, pipa dengan epoxy 2 lapis, pipa dengan epoxy 1 lapis, dan pipa tanpa coating.



Gambar 2.36 Kebutuhan Arus Proteksi pada Pipa



Dari grafik pada penelitian dapat disimpulkan bahwa pengaruh ketebalan coating dapat mempengaruhi besar arus proteksi yang diperlukan untuk memproteksi, pada pipa yang diberi coating epoxy sebanyak 2 lapis memerlukan arus proteksi yang lebih kecil, sementara pipa yang tidak diberi coating memerlukan arus proteksi yang besar. Pada penelitian sebelumnya, nilai arus proteksi tidak stabil dikarenakan faktor resistivitas tanah yang berubah setiap harinya. Nilai resistivitas atau kelembaban tanah mempengaruhi besar arus proteksi yang digunakan untuk memproteksi pipa, saat resistivitas tanah menurun kondisi tanah menjadi lebih lembab sehingga memerlukan arus proteksi yang lebih besar, sementara saat resistivitas tanah meningkat atau kelembaban berkurang arus proteksi yang diperlukan akan menurun.

Penelitian mengenai ICCP ini mengalami perkembangan ke arah desain yang disesuaikan dengan keadaan katoda dan lingkungan, ini disebabkan pada katoda dan jenis lingkungan tertentu maka membutuhkan desain yang berbeda. Pada penelitian ini dilakukan desain ICCP pada katoda API 5L grade B dengan perbedaan coating dalam kondisi kelembaban tanah yang berbeda. Pada katoda dengan ketebalan coating yang berbeda menunjukkan bahwa semakin tebal coating maka arus proteksi yang diperlukan akan menurun, Sementara pada kondisi lingkungan dengan kelembaban yang berbeda, semakin tinggi kelembaban tanah maka mengakibatkan kebutuhan arus proteksi juga meningkat. Berdasarkan dari hasil penelitian dalam perancangan proteksi katodik arus paksa dapat disimpulkan bahwa:

1. Pengaruh ketebalan coating dapat mempengaruhi besar arus proteksi yang diperlukan untuk memproteksi, pada pipa yang diberi coating epoxy sebanyak 2 lapis memerlukan arus proteksi yang lebih kecil, sementara pipa yang tidak diberi coating memerlukan arus proteksi yang besar.
2. Nilai resistivitas atau kelembaban tanah mempengaruhi besar arus proteksi yang digunakan untuk memproteksi

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



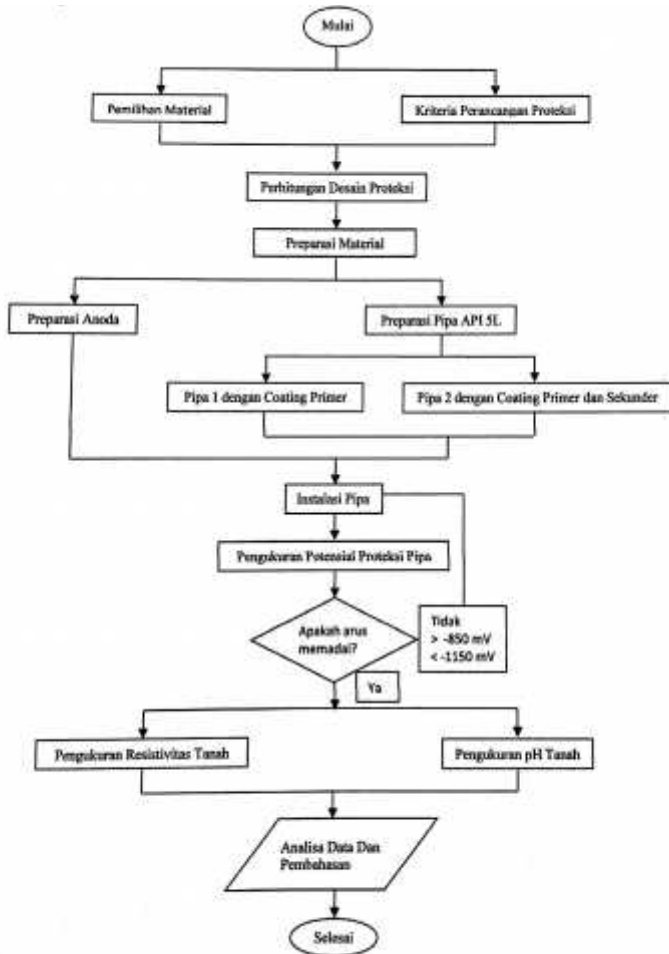
pipa, saat resistivitas tanah menurun kondisi tanah menjadi lebih lembab sehingga memerlukan arus proteksi yang lebih besar, sementara saat resistivitas tanah meningkat atau kelembaban berkurang arus proteksi yang diperlukan akan menurun.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Diagram Alir



Gambar 3.1 Diagram Alir



3.2. Bahan

Bahan yang digunakan pada Perancangan Proteksi Katodik Arus Paksa pada Pipa Baja API 5L Grade B dengan Coating Primer dan Coating Sekunder di dalam tanah yaitu:

1. Pipa Baja API 5L Grade B
2. Anoda Grafit
3. Serbuk Grafik
4. Coating Primer (Cat dasar besi)
5. Coating Sekunder (Cat luar besi)
6. Kabel Tembaga

3.3. Peralatan

Peralatan yang digunakan pada Perancangan Proteksi Katodik Arus Paksa Pada Pipa Baja API 5L Grade B dengan Coating Primer dan Coating Sekunder di dalam tanah yaitu:

1. Transformator Rectifier
2. Electrode Reference Cu//CuSO₄
3. Kabel tembaga
4. Multitester

3.4. Langkah Perancangan

Langkah-langkah yang digunakan untuk mendukung perancangan tersebut antara lain,

1. Pengumpulan data
2. Melakukan kriteria desain
Kriteria Desain yang digunakan adalah
Umur desain : 2 tahun
Limit positif : -850 mV
Limit negatif : -1100 mV
Elecrode Reference : Cu/CuSO₄

3. Standart perancangan
Desain sistem proteksi katodik arus paksa mengikuti standart :



- NACE Standart SP-0169-2013 Control of External Corrosion of Underground or Submerged Metallic Piping System
- NACE Standart RP-0286-97 Electrical Isolation of Cathodically Protected Pipelines
- DNV-RP-B401 Cathodic Protection Design
- A. W. Peabody, Control of Pipeline Corrosion (Second Edition), NACE International The Corrosion Society

4. Pengujian resistivitas tanah

Pengujian dan pengukuran resistivitas tanah mengikuti standart ASTM G57 Standart Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using The Wenner Four – Electrode Methode. Tujuan survei tahanan jenis tanah dengan menggunakan metode Wenner adalah :

- a. Mengetahui tingkat korosi masing-masing lingkungan tanah yang dilalui struktur
- b. Menentukan besar densitas arus yang diperlukan pada perhitungan total arus proteksi,
- c. Menentukan lokasi penempatan anoda dengan tepat, sehingga diperoleh proteksi yang maksimal terhadap struktur.

Untuk mendukung survei tahanan jenis tanah maka digunakan peralatan adalah sebagai berikut.

1. Sel aki. Berfungsi memberikan supply arus pada pin



Gambar 3.2 Sel Aki

2. Kabel tembaga merek Eterna 2.5 mm² (SNI). Berfungsi menghubungkan arus dan tegangan antar pin



Gambar 3.3 Kabel Tembaga

3. Empat buah pin tembaga dengan dimensi sama. Ujung pin pada kedalaman tertentu tertanam dalam tanah.



Gambar 3.4 Pin Tembaga

4. Multitester. Berfungsi mengukur arus dan tegangan pada elektrolit yang terhubung sistem



Gambar 3.5 Multitester

Adapun prosedur pengukurannya sebagai berikut:

- a) Memasukkan empat pin baja ke dalam tanah pada jarak yang tetap dalam satu garis lurus. Selanjutnya hubungkan masing-masing pin pada instrumen pengukur seperti gambar berikut:



Gambar 3.6 Pengukuran Resistivitas Tanah

Jarak antar pin dapat ditentukan menggunakan meteran. Jarak ini mewakili pengukuran tahanan jenis dari kedalaman tanam dengan variasi 2 dan 3 meter.

- b) Dua pin terluar merupakan elektrode arus, sedang dua pin pada bagian dalam merupakan elektrode potensial yang mengukur penurunan potensial karena adanya hambatan dari elektrolit (tanah) ketika arus AC dilewatkan diantara pin-pin terluar.
- c) Mengukur nilai hambatan secara langsung pada instrumen Megger dan menghitung nilai tahanan jenisnya sesuai persamaan berikut:

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot A \cdot R \quad (3.1)$$

Dengan :

ρ = Tahanan Jenis Tanah (Ohm-cm)



$$\pi = 3.14$$

a = Jarak antar pin (cm)

R = Hambatan yang terukur (ohm)

Hasil pengukuran berada di bagian lampiran, sehingga untuk rata-rata dari pengukuran adalah

$$\rho_{\text{rata-rata}} = \frac{\sum \rho}{N} \quad (3.2)$$

Dimana:

$\sum \rho$ = Jumlah hasil pengukuran tahanan

N = Jumlah pengukuran yang dilakukan

- d. Harus diperhatikan bahwa pengukuran yang dilakukan dengan cara ini menunjukkan nilai rata-rata tahanan jenis tanah pada kedalaman tertentu terkait dengan jarak antara pin-pin yang berdekatan. Kedalaman pin (electrode) tidak boleh melebihi nilai $a/20$.

Hasil survei ini berupa nilai tahanan jenis tanah yang menggambarkan tingkat korosifitas dari lokasi tanah yang akan menjadi media elektrolit. Sehingga perencanaan jenis anoda tumbal yang digunakan akan menyesuaikan dengan hasil survei ini.

5. Pengujian pH tanah

Pengujian dan pengukuran pH tanah mengikuti SOP Scientific Engineering Response and Analytical Services (SERAS) number 1844 Standart Operation Procedure pH Soil Determination.



Gambar 3.7 Pengukuran pH Tanah

6. Desain proteksi arus paksa

Untuk mengetahui arus dan tegangan yang diperlukan. Maka perhitungan dimulai dengan:

1. Luas permukaan struktur yang akan dilindungi

$$A = \pi \times D \times L \quad (3.3)$$

Dengan :

D = diameter luar pipa (m)

L = panjang pipa (m)

$\pi = 3.14$

A = luas permukaan yang diproteksi (m²)

2. Konduktansi Lapis Pelindung

$$g = \frac{1}{\rho} \times D \quad (3.4)$$

Dengan :

g = konduktansi lapis lindung pipa (ohm-m⁻¹)



$$\begin{aligned} D &= \text{diameter luar pipa (m)} \\ &= \text{tahanan lapis lindung pipa (ohm-m}^2\text{)} \\ &= 3,14 \end{aligned}$$

3. Tahanan Pipa

$$r = P_{\text{pipa}} / (t (D-t)) \quad (3.5)$$

Dengan :

$$\begin{aligned} r &= \text{tahanan pipa (ohm-m}^{-1}\text{)} \\ P_{\text{pipa}} &= \text{tahanan spesifik pipa (ohm-m)} \\ t &= \text{tebal pipa (m)} \\ D &= \text{diameter luar pipa (m)} \end{aligned}$$

4. Konstanta Atenuasi

$$= (r \times g) \quad (3.6)$$

Dengan :

$$\begin{aligned} &= \text{konstanta attenuasi (ohm-m}^{-1}\text{)} \\ r &= \text{tahanan pipa (ohm-m}^{-1}\text{)} \\ g &= \text{konduktansi lapis lindung pipa (ohm-m}^{-1}\text{)} \end{aligned}$$

5. Tahanan Karakteristik Pipa

$$r_p = (r/g) \quad (3.7)$$

Dengan :

$$\begin{aligned} r_p &= \text{tahanan karakteristik pipa (ohm)} \\ r &= \text{tahanan pipa (ohm-m}^{-1}\text{)} \\ g &= \text{konduktansi lapis lindung pipa (ohm-m}^{-1}\text{)} \end{aligned}$$

6. Pergeseran Potensial Pipa

$$E_o = E \cosh L \quad (3.8)$$



Dengan :

E_o = pergeseran potensial pipa (volt)

E = pergeseran potensial pipa minimum (volt)
 = konstanta attenuasi

L = jarak pipa terproteksi (m)

7. Kebutuhan Arus Proteksi

$$I_o = E_o/rp \times \tanh \quad \times L \quad (3.9)$$

Dengan :

I_o = keperluan arus proteksi (Ampere)

E_o = pergeseran potensial pipa (volt)

rp = tahanan karakteristik pipa (ohm)
 = konstanta attenuasi

8. Keperluan Arus DC Minimum

$$IR \quad I_o \times Sf \quad (3.10)$$

Dengan :

IR = keperluan arus DC minimum (ampere)

I_o = keperluan arus proteksi (ampere)

Sf = safety factor (1,25)

9. Berat Anoda

$$W_o = (Y \times C \times IR)/U \quad (3.11)$$

Dengan :

W_o = berat anoda (Kg)

Y = lama proteksi (tahun)

C = laju konsumsi anoda (kg/Ampere tahun)

IR = keluaran arus DC (ampere)

U = faktor guna (80%)



10. Jumlah Anoda yang dibutuhkan

$$n = \frac{W}{w} \times S \quad (3.12)$$

Dengan:

n = jumlah anoda

W_o = berat anoda total (Kg)

W = berat anoda standar (Kg)

Sf = safety factor (1,25)

11. Tahanan Anoda Tunggal

$$R_h = \frac{\rho}{\pi \times \pi \times L} \left(\ln \frac{4L}{d} - 1 \right) \quad (3.13)$$

Dengan:

R_h = tahanan anoda tunggal (ohm)

ρ = resistivitas tanah rata-rata (ohm-m)

L = panjang anoda (m)

d = diameter anoda (m)

12. Faktor Interferensi Anoda

$$F = 1 + \frac{\rho}{\pi \times S \times R} (\ln 0.66 - n) \quad (3.14)$$

Dengan :

F = Faktor interferensi anoda (volt)

R_h = tahanan anoda tunggal (ohm)

S_a = jarak pemasangan anoda

n = jumlah anoda

= resistivitas tanah

13. Tahanan groundbed

$$R_n = R_h \times F / n \quad (3.15)$$



Dengan :

R_n = tahanan groundbed (ohm)

R_h = tahanan anoda individual (ohm)

n = jumlah anoda

F = faktor interferensi anoda

14. Tegangan yang diperlukan

$$V_o = IR \times (R_n \times S_f + r_p) + e \quad (3.16)$$

Dengan:

V_o = tegangan yang diperlukan (volt)

IR = keluaran arus DC (ampere)

R_n = tahanan groundbed (ohm)

S_f = safety facor

R_p = tahanan karakteristik pipa (ohm)

e = tegangan dalam (volt)

7. Instalasi peralatan

a. Preparasi Pipa

Pipa yang digunakan adalah pipa baja API 5L grade B, pengukuran pipa digunakan agar dapat mengetahui luas permukaan yang akan dilindungi. Dari pengukuran didapat panjang sebesar 150cm, diameter pipa sebesar 7.36 cm, dan tebal pipa sebesar 1.05 cm.



Gambar 3.8 Pengukuran Pipa Baja API 5L Grade B

Pipa juga dibersihkan dari pengotor yang menempel agar cat yang akan melapisi pipa dapat melekat dengan baik



Gambar 3.9 Pembersih Pipa dari pengotor

Pipa baja diberikan pengait kabel berupa baut yang dilas pada permukaan pipa, agar pemasangan kabel menjadi lebih mudah.



Gambar 3.10 Pengait kabel pada pipa baja

b. Pemberian Coating

Pipa dibagi menjadi dua, pipa pertama dilapisi oleh cat dasar besi (coating primer) sebanyak dua kali pelapisan. Adapun pipa kedua dilapisi dengan cat dasar besi dan cat luar besi (coating primer dan sekunder). Untuk pipa kedua, pelapisan coating primer sebanyak satu lapis kemudian setelah cat primer, diberikan tambahan satu lapis cat sekunder. Sehingga masing-masing pipa mendapat dua lapis perlindungan pipa dengan variasi tertentu.



Gambar 3.11 Pemberian Coating Primer



Gambar 3.12 Pemberian Coating Ganda (Primer dan Sekunder)

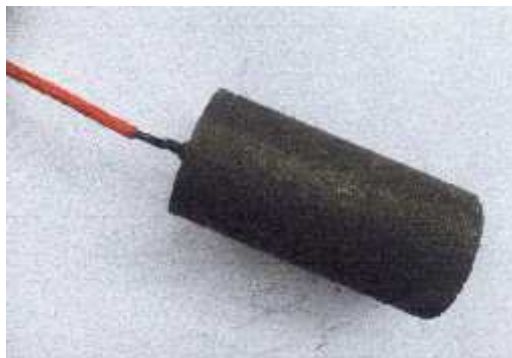
c. Preparasi anoda

Anoda yang digunakan adalah anoda grafit. Dengan dimensi anoda adalah panjang 8 cm dan diameter 4 cm



Gambar 3.13 Pengukuran anoda grafit

Bagian atas dari anoda kemudian sedikit dilubangi sebagai tempat sambungan kabel, Anoda kemudian diberikan backfill yang berasal dari serbuk grafit dan diberikan casing yang berasal dari logam.



Gambar 3.14 Anoda yang telah diberi sambungan kabel



Gambar 3.15 Anoda yang akan diberikan backfill

d. Instalasi Pipa

Pipa kemudian dikaitkan kabel pada tempat pengait yang sudah dilas pada pipa, kabel yang digunakan adalah kabel tembaga sehingga menghantarkan listrik dengan baik. Agar tidak terjadi kebocoran arus saat pemeroteksian maka sambungan diberi isolator. Isolator ini juga dapat melindungi daerah sambungan kabel dari serangan korosi.



Gambar 3.16 Pemberian kabel pada pipa

Kabel yang berasal dari pipa dihubungkan dengan kutub negatif dari rectifier, sementara kabel yang berasal dari anoda dihubungkan menuju kutub positif rectifier.



Gambar 3.17 Instalasi sambungan kabel pada Rectifier

- e. Penanaman pipa dan grafit
Pipa dan grafit ditanam di dalam tanah hingga kedalaman sekitar 50 cm dengan jarak antara grafit dengan pipa adalah 30 cm.



Gambar 3.18 Pipa ditanam di kedalaman 50 cm

- f. Pemberian arus proteksi
Setelah pipa dan grafit tertanam, rectifier dinyalakan dan tegangan dari rectifier diatur hingga pipa terproteksi



Gambar 3.19 Pemberian arus proteksi oleh rectifier

8. Pengujian tegangan proteksi
Pengujian yang dilakukan adalah menguji apakah tegangan sistem proteksi tersebut sudah masuk kedalam area proteksi yaitu sekitar -850 mV sampai dengan -1100

mV dengan menggunakan elektrode Cu/CuSO₄ sebagai reference.



Gambar 3.20 Pengukuran tegangan proteksi

9. Analisa hasil

Analisa yang dilakukan adalah melihat bagaimana pengaruh lingkungan dalam hal ini resistivitas tanah dan pH memengaruhi keperluan arus proteksi. Kemudian membandingkan dengan teori yang sudah ada.

10. Evaluasi

Evaluasi yang dilakukan adalah dengan melihat hasil pipa yang telah diberikan proteksi katodik arus paksa selama selang waktu yang telah ditentukan dan melihat anoda yang digunakan dalam proteksi arus paksa. Hal ini dapat menjadi acuan saat instalasi sistem proteksi katodik arus paksa berikutnya.

11. Kesimpulan

Sistem proteksi katodik arus paksa pada pipa baja API 5L Grade B dinyatakan berhasil apabila tegangan sistem proteksi tersebut sudah masuk ke dalam area proteksi yang sudah ditentukan dan tidak terjadi kegagalan pada sistem proteksi tersebut dengan memerhatikan factor lingkungan.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV

ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Perencanaan Perancangan

4.1.1 Kriteria Desain

Perancangan proteksi katodik pada desain dilakukan dengan menerapkan kriteria desain, yaitu:

- Umur Desain : 2 tahun
- Limit Positif : -850 mV
- Limit Negatif: - 1100mV

4.1.2 Standar Desain Perancangan

Standar yang digunakan pada Desain mengacu pada:

- *NACE RP-B401*
“*Cathodic Protection Design*”
- *ASTM G-57*
“*Field Measurement of Soil Resistivity using the Wenner Four- Electrode Method*”
- *NACE RP-0177*
“*Mitigation of Alternating Current and Lightning Effects on Metallic Structures and Corrosion Control Systems*”
- *NACE RP-0169*
“*Standard Practice Control of External Corrosion*”

4.2 Pengumpulan Data

4.2.1 Data Material

Berikut adalah data spesifik dari material yang dilindungi:

Material pipa	: Baja karbon rendah
Jenis Pipa	: Spiral pipe welding API 5L Grade B
Panjang pipa	: 1.5 meter
Diameter luar	: 0.0736 meter
Tahanan jenis baja	: 2.2×10^{-7} Ohm-m
Tebal dinding	: 0.00635 m
Kedalaman tanam	: 0.5 m



Tabel 4.1 Komposisi Kimia Baja API 5L Grade B

C (Max)	Mn (Max)	P (Max)	S (Max)	Ti (Max)	V (Max)	Ni (Max)
0.22 %	1.20%	0.025 %	0.015%	0.04%	0.15%	0.15%

Sumber : Specification for Line Pipe American Petroleum Institute, 2004

4.2.2 Data Anoda

Perancangan sistem proteksi katodik arus paksa ini menggunakan anoda grafit. Pemilihan grafit sebagai anoda karena nilai *consumption rate*-nya yang cukup rendah dan merupakan salah satu jenis anoda semi inert yang membuatnya cukup sulit terkorosi dan dapat bertahan dalam jangka waktu yang lama sehingga lebih ekonomis.

Berikut adalah data spesifik dari anoda grafit

Jenis Anoda : Carbon-graphite (Hot Molded Carbon)
 Bentuk : Tubular
 Diameter : 4 cm
 Panjang : 8 cm
 Densitas : > 1.65 gram/cm³
 Berat : 187.983
 Temperatur : 180 °C
 Laju konsumsi rata-rata : 0.1 -1.0 kgA⁻¹y⁻¹

4.2.3 Data Lapis Lindung

Pada penelitian ini, pipa yang digunakan ada 2 yaitu pipa yang dilapisi coating primer (Sintetic enamel) dan pipa yang dilapisi coating primer dan sekunder (Sintetic enamel dan high gloss enamel). Dalam perencanaan, lapis lindung diasumsikan mengalami penurunan kualitas selama masa pakainya.



4.2.4 Data Tanah

4.2.4.1 Pengukuran Resistivitas Tanah

Pengukuran resistivitas tanah dilakukan untuk mengetahui seberapa besar resistansi tanah dalam menghantarkan aliran listrik, hasil pengujian resistivitas tanah dapat mengelompokkan tanah menjadi beberapa bagian sesuai dengan tingkat korosifitasnya. Pengujian resistivitas tanah dilakukan secara konvensional dengan menggunakan standar ASTM G 57-58 atau lebih dikenal dengan *Wenner Four-Pins Method*. Prinsip metode ini adalah memberikan suplai arus AC pada pin-pin terluar dan secara simultan mengukur penurunan tegangan di antara pin-pin bagian dalam akibat timbulnya tahanan pada elektrolit. Pengukuran resistivitas tanah dilakukan dengan kedalaman dan jarak yang berbeda untuk mendapatkan nilai tanah yang menyeluruh. Jarak dan kedalaman yang digunakan pada pengukuran ini adalah jarak (a_1) 200 cm, kedalaman (d_1) 10 cm, dan (a_2) 300 cm, (d_2) 15 cm. Pengukuran resistivitas tanah dilakukan setiap hari selama 28 hari, kemudian nilai tahanan jenis dihitung sesuai rumus (3.1) dan (3.2)



Tabel 4.2 Hasil Pengukuran Resistivitas Tanah

Hari ke-	Nilai Resistivitas (Ohm.Cm)	Hari ke-	Nilai Resistivitas (Ohm.Cm)
1	120.233	15	116.479
2	125.130	16	116.823
3	129.263	17	123.407
4	130.385	18	129.781
5	131.461	19	144.843
6	134.814	20	133.212
7	138.103	21	106.814
8	125.899	22	125.683
9	118.064	23	125.072
10	117.082	24	130.890
11	114.740	25	128.436
12	119.562	26	125.310
13	140.917	27	117.526
14	128.112	28	122.156
Rata-rata			125.721

Dengan mengukur resistivitas tanah setiap harinya, kemudian pada hari terakhir didapat seluruh perkembangan resistivitas tanah, bahwa rata-rata resistivitas sebesar 125.721 Ohm. Cm dengan mengetahui tahanan jenis tanah tersebut dapat digolongkan menjadi golongan tanah korosif. Nilai resistivitas tanah terbesar terjadi pada hari ke-19 sebesar 144.84 Ohm. Cm dan nilai resistivitas tanah terkecil terjadi pada hari ke-20 sebesar 106.8 Ohm.Cm. Dengan melihat nilai resistivitas tanah yang ada, perancangan proteksi katodik arus paksa ini setidaknya menjadi acuan apa yang terjadi jika dalam jangka waktu yang lama perubahan lingkungan berubah-ubah dari musim hujan, pertengahan, sampai kering. Hal tersebut dapat dilihat dari perubahan dan naik turunnya nilai resistivitas tanah dapat menunjukkan kondisi saat musim hujan, dan perubahan yang fluktuatif atau naik turun menunjukkan kondisi musim pertengahan.

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN



4.2.4.2 Pengukuran pH Tanah

Pengukuran pH tanah dilakukan untuk mengetahui tingkat keasaman tanah yang dapat mempengaruhi tingkat korosifitas. Metode yang telah diterima secara umum untuk mendaatkan keasaman adalah metode pH. Dalam metode ini keasaman diukur dengan skala 0 hingga 14. Tanah biasanya memiliki pH Antara 5-8. Pada range tersebut secara umum pH bukanlah sebagai variabel utama penyebab korosi. Tanah yang lebih asam akan menyebabkan resiko korosi yang besar pada material konstruksi seperti baja, besi mineral, dekomposisi tanaman asam (coniferous tree needles), sampah industry, hujan asam, aktivitas mikrobiologi.

Pengujian pH tanah dilakukan sesuai dengan Standart Operasional Procedure (SOP) Scientific Engineering Response and Analytical Services (SERAS) number 1844 Standart Operation Procedure pH Soil Determination. Sampel tanah kering diambil sebesar 10gram, kemudian diberi air sebanyak 10 mL. Sample tersebut kemudian diaduk agar tercampur dan dibiarkan sekitar 1 jam. Setelah itu sampel tanah diukur dengan pH meter yang sebelumnya telah dikalibrasi dengan larutan buffer (pH 7). Pengujian pH tanah dilakukan setiap hari selama 28 hari agar dapat mengetahui perkembangan kondisi pH tanah. Dari hasil pengujian pH tanah yang terlihat dari grafik dapat dilihat bahwa kondisi pH tanah cenderung stabil dibesaran sekitar 8.22



Tabel 4.3 Hasil pengukuran pH

Hari Ke-	Ph	Hari Ke-	pH
1	7.9	15	8.3
2	8.2	16	8.4
3	8.2	17	8
4	8.4	18	7.8
5	8.2	19	7.9
6	8.5	20	8.2
7	8.4	21	8
8	8.1	22	8.3
9	8	23	8.3
10	8.1	24	8.2
11	8.3	25	8.4
12	8.4	26	8.3
13	8.2	27	8.4
14	8.4	28	8.4
Rata-rata			8.22

Dari tabel dan grafik dapat dilihat bahwa kondisi pH pada lingkungan tersebut fluktuatif diantara pH 7.8 hingga 8.5. Hal tersebut disebabkan kondisi tanah cenderung berubah-ubah sesuai lingkungannya, namun kondisi tanah yang berada di pH 7.8 hingga 8.5 mengindikasikan bahwa kondisi tanah tidak memiliki kandungan asam atau basa yang berlebih. Pengaruh pH dalam perancangan ini tidak dapat menjadi suatu acuan apakah pH tanah yang ada mempengaruhi perancangan dan kebutuhan arus yang diperlukan dalam perancangan proteksi arus paksa.

4.3 Perhitungan Desain

Perhitungan desain dilakukan untuk mendapatkan nilai yang diharapkan dalam pengujian sistem proteksi sehingga ketika dalam perancangan pipa berhasil terproteksi sesuai nilai standar



4.3.1 Luas permukaan yang diproteksi

Pada pipa yang terpendam dalam tanah, luas permukaan yang hendak dilindungi adalah luas permukaan pipa yang kontak langsung dengan tanah. Perhitungan luas permukaan luar dapat diperoleh dengan melibatkan diameter luar dan keseluruhan panjang pipa yang dipendam yaitu sepanjang 1.5 meter menggunakan persamaan (3.3) berikut:

Luas permukaan struktur yang akan dilindungi

$$\begin{aligned} A &= \pi D \times L \\ &= 3.14 \times 0.0736 \text{ m} \times 1.5 \text{ m} \\ &= 0.346656 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Dengan

D = diameter luar pipa (m)

L = panjang pipa (m)

$$= 3.14$$

A = luas permukaan yang diproteksi (m²)

4.3.2 Konduktansi Lapis Lindung Pipa

Untuk menentukan konduktansi lapis lindung pipa, terlebih dahulu diketahui nilai tahanan lapis lindung pipa dimana disini digunakan coaltar enamel yang menurut bukuehandbook of cathodic corrosion protection oleh Von Baeckmann dapat diambil rumus perhitungan yang seperti terdapat pada persamaan (3.4) berikut ini :

1. Konduktansi lapis pelindung pada pipa coating primer

$$\begin{aligned} g &= (\pi \times D) / \\ &= \frac{3.14 \times 0.0736}{130} \\ &= 0.001778 \text{ Ohm. m}^{-1} \end{aligned}$$



2. Konduktansi lapis pelindung pada pipa coating ganda (primer dan sekunder)

$$\begin{aligned}
 g &= (\rho \times D) / \\
 &= \frac{3.14 \times 0.0736}{750} \\
 &= 0.00031 \text{ Ohm. m}^{-1}
 \end{aligned}$$

Dengan :

$$\begin{aligned}
 g &= \text{konduktansi lapis lindung pipa (ohm-m-1)} \\
 D &= \text{diameter luar pipa (m)} \\
 &= \text{tahanan lapis lindung pipa (ohm-m}^2\text{)} \\
 &= 3,14
 \end{aligned}$$

4.3.3 Tahanan Pipa

Dari data yang didasarkan pada buku Peabody, didapatkan tahanan spesifik pipa yang mempunyai diameter 2.5 inch atau 0.0736 meter adalah 0.0586 ohm.meter⁻¹. Dalam menentukan tahanan pipa yang akan diproteksi, menggunakan tebal pipa sebesar 0.0064 meter. Maka dapat digunakan rumus persamaan (3.5) sebagai berikut

1. Tahanan pipa pada pipa coating primer

$$\begin{aligned}
 r &= P_{\text{pipa}} / (\rho (D-t)) \\
 &= \frac{0.0000792}{3.14 \times 0.0064 (0.0736 - 0.0064)} \\
 &= 0.0586 \text{ Ohm. m}^{-1}
 \end{aligned}$$

2. Tahanan pipa pada pipa coating ganda (primer dan sekunder)

$$\begin{aligned}
 r &= P_{\text{pipa}} / (\rho (D-t)) \\
 &= \frac{0.0000792}{3.14 \times 0.0064 (0.0736 - 0.0064)} \\
 &= 0.0586 \text{ Ohm. m}^{-1}
 \end{aligned}$$



Dengan :

r = tahanan pipa (ohm-m-1)

P_{pipa} = tahanan spesifik pipa (ohm-m)

t = tebal pipa (m)

D = diameter luar pipa (m)

4.3.4 Konstanta Atenuasi

Berdasarkan referensi dari buku *Examples of design for cathodic protection system* oleh Peabody, didapatkan rumus perhitungan untuk mendapatkan konstanta atenuasi atau kelipatan pertambahan tahanan pipa, dengan menghitung akar dari perkalian tahanan pipa dan konduktansi lapis lindung pipa yang telah dihitung sebelumnya, atau dengan menggunakan persamaan (3.6) yaitu

1. Konstanta Atenuasi pada pipa coating primer

$$\begin{aligned} &= (r \times g) \\ &= \sqrt{0.0586 \times 0.001778} \\ &= 0.01021 \text{ ohm-m}^{-1} \end{aligned}$$

2. Konstanta Atenuasi pada pipa coating ganda (primer dan sekunder)

$$\begin{aligned} &= (r \times g) \\ &= \sqrt{0.0586 \times 0.00031} \\ &= 0.00425 \text{ ohm-m}^{-1} \end{aligned}$$

Dengan :

= konstanta atenuasi (ohm-m⁻¹)

r = tahanan pipa (ohm-m⁻¹)

g = konduktansi lapis lindung pipa (ohm-m⁻¹)



4.2.5 Tahanan Karakteristik Pipa

Untuk Berdasarkan referensi dari buku *Examples of design for cathodic protection system* oleh Peabody, didapatkan rumus perhitungan untuk mendapatkan tahanan pipa yang telah diproteksi oleh lapis lindung atau tahanan karakteristik pipa, yang dihitung dengan mengakarkan pembagian tahanan pipa dengan konduktansi lapis lindung pipa, atau dapat juga menggunakan rumus persamaan (3.7) yaitu

1. Tahanan karakteristik pipa pada pipa coating primer

$$\begin{aligned} r_p &= (r/g) \\ &= \sqrt{\frac{0.0586}{0.001778}} \\ &= 5.7437 \text{ Ohm} \end{aligned}$$

2. Tahanan karakteristik pipa pada pipa coating ganda (primer dan sekunder)

$$\begin{aligned} r_p &= (r/g) \\ &= \sqrt{\frac{0.0586}{0.00031}} \\ &= 13.8 \text{ Ohm} \end{aligned}$$

Dengan :

r_p = tahanan karakteristik pipa (ohm)

r = tahanan pipa ($\text{ohm}\cdot\text{m}^{-1}$)

g = konduktansi lapis lindung pipa ($\text{ohm}\cdot\text{m}^{-1}$)

4.2.6 Pergeseran Potensial Pipa

Berdasarkan referensi dari buku *Examples of design for cathodic protection system* oleh Peabody pada halaman 15, didapatkan rumus perhitungan untuk mendapatkan potensial perlindungan pipa dari sistem anoda sampai ujung pipa yang telah direncanakan akan diproteksi, dengan memasukkan potensial



proteksi minimal yaitu -0,85 volt, lalu dimasukkan juga jarak yang akan dihitung yang telah dikalikan dengan konstanta attenuasi yang telah dihitung sebelumnya, dan dapat pula menggunakan rumus persamaan (3.8) yaitu

Pergeseran Potensial Pipa

$$\begin{aligned} E_o &= E \cosh L \\ &= 0.45 \times (\cosh 0.01021) \times 1.5 \\ &= 0.675 \text{ Volt} \end{aligned}$$

Dengan :

$$\begin{aligned} E_o &= \text{pergeseran potensial pipa (volt)} \\ E &= \text{pergeseran potensial pipa minimum (volt)} \\ &= \text{konstanta attenuasi} \\ L &= \text{jarak pipa terproteksi (m)} \end{aligned}$$

4.3.7 Kebutuhan Arus Proteksi

Berdasarkan buku *Examples of design for cathodic protection system* oleh Peabody chapter 11, dapat dihitung kebutuhan arus awal yang diperlukan untuk melindungi pipa dari serangan korosi, dengan membagi pergeseran potensial pipa dengan tahanan karakteristik pipa, yang dapat ditentukan melalui persamaan (3.9) dibawah ini:

1. Kebutuhan arus proteksi pada pipa coating primer

$$\begin{aligned} I_o &= \frac{E_o / r_p \times \tanh \times L}{5.7437} \\ &= \frac{0.675 \times (\tanh 0.01021) \times 1.5}{5.7437} \\ &= 0.0018 \text{ A} \\ &= 1.80 \text{ mA} \end{aligned}$$



2. Kebutuhan arus proteksi pada pipa coating ganda (primer dan sekunder)

$$\begin{aligned}
 I_o &= E_o/r_p \times \tanh \quad \times L \\
 &= \frac{0.675 \times (\tanh 0.00425) \times 1.5}{13.8} \\
 &= 0.00031 \text{ A} \\
 &= 0.31 \text{ mA}
 \end{aligned}$$

Dengan :

I_o = keperluan arus proteksi (Ampere)
 E_o = pergeseran potensial pipa (volt)
 r_p = tahanan karakteristik pipa (ohm)
= konstanta attenuasi

4.3.8 Keperluan Arus DC minimum

Dari referensi buku Corrosion oleh L.L.Shreir didapatkan perumusan untuk menentukan berapa arus searah (DC) minimum yang dibutuhkan untuk memproteksi pipa. Sebelumnya harus diketahui dulu kebutuhan arus proteksi (I_o) yaitu 0,17 ampere dan memasukkan safety fakto, maka dapat digunakan pula perhitungan pada persamaan (3.10) yaitu

1. Keperluan arus DC minimum pada pipa coating primer

$$\begin{aligned}
 IR &= I_o \times Sf \\
 IR &= 0.0018 \times 1.25 \\
 IR &= 0.00225 \text{ A} = 2.25 \text{ mA}
 \end{aligned}$$

2. Keperluan arus DC minimum pada pipa coating ganda (primer dan sekunder)

$$\begin{aligned}
 IR &= I_o \times Sf \\
 IR &= 0.00031 \times 1.25 \\
 IR &= 0.00039 \text{ A} = 0.39 \text{ mA}
 \end{aligned}$$



Dengan :

IR = keperluan arus DC minimum (ampere)

Io = keperluan arus proteksi (ampere)

Sf = safety factor (1,25)

Dalam sistem proteksi katodik arus paksa, densitas arus merupakan fungsi dari nilai tahanan jenis tanah rata-rata hasil pengukuran. Nilai tersebut disesuaikan dengan tingkat kekorosifan tanah yang dilalui pipa. Tipe tanah ini selanjutnya menentukan densitas arus yang dibutuhkan untuk mempolarisasikan pipa pada suatu nilai potensial perlindungan.

4.3.9 Berat Anoda

Dengan memasukkan desain lama proteksi yaitu 20 tahun, laju konsumsi anoda yang terdapat pada buku peabody halaman 169 dan arus IR yang digunakan, maka dapat ditentukan berat anoda yang dibutuhkan. Dari rumus yang didasarkan pada buku Cathodic Protection oleh Uhlig halaman 1072 didapatkan perumusan untuk mendapatkan total berat anoda yang dibutuhkan untuk melindungi struktur selama waktu desain, yang dapat dihitung menggunakan persamaan (3.11) berikut ini.

1. Berat Anoda pada pipa coating primer

$$\begin{aligned}W_o &= (Y \times C \times IR)/U \\ &= \frac{2 \times 1 \times 0.00225}{80\%} \\ &= 0.0056 \text{ kg} \\ &= 5.6 \text{ gram}\end{aligned}$$

2. Berat Anoda pada pipa coating ganda (primer dan sekunder)

$$\begin{aligned}W_o &= (Y \times C \times IR)/U \\ &= \frac{2 \times 1 \times 0.00039}{80\%} \\ &= 0.001 \text{ kg} \\ &= 1 \text{ gram}\end{aligned}$$



Dengan :

- W_0 = berat anoda (Kg)
- Y = lama proteksi (tahun)
- C = laju konsumsi anoda (kg/Ampere tahun)
- IR = keluaran arus DC (ampere)
- U = faktor guna (80%)

Faktor guna untuk mengidentifikasi fungsi anoda diasumsikan hanya digunakan sebesar 80 % dari total berat anoda. Dengan tujuan agar rancangan lebih aman dimana arus proteksi anoda memenuhi kebutuhan proteksi selama waktu desain.

4.3.10 Jumlah Anoda yang Dibutuhkan

Setelah mendapatkan berat anoda total yang dibutuhkan, untuk menentukan jumlah anoda yang sesuai dan mencukupi untuk dilakukan proteksi katodik arus paksa pada pipa, terlebih dahulu harus diketahui berat 1 buah anoda yaitu 0.18 Kg dan safety factor yang digunakan adalah 1,25. Untuk mendapatkan jumlah anoda yang dibutuhkan dapat menggunakan perhitungan persamaan (3.12) berikut ini.

1. Jumlah anoda yang dibutuhkan pada pipa coating primer

$$\begin{aligned} n &= \frac{W}{w} \times S \\ &= \frac{0.0056}{0.18} \times 1.25 \\ &= 0.039 \rightarrow 1 \text{ buah} \end{aligned}$$

2. Jumlah anoda yang dibutuhkan pada pipa coating ganda (primer dan sekunder)

$$\begin{aligned} n &= \frac{W}{w} \times S \\ &= \frac{0.001}{0.18} \times 1.25 \\ &= 0.007 \rightarrow 1 \text{ buah} \end{aligned}$$



Dengan:

- n = jumlah anoda
- W_o = berat anoda total (Kg)
- W = berat anoda standar (Kg)
- Sf = safety factor (1,25)

4.3.11 Tahanan Anoda Tunggal

Untuk mencari nilai tahanan 1 buah anoda terlebih dahulu harus diketahui resistifitas tanah di daerah pipa ditanam, panjang dan diameter anoda yang digunakan dalam perancangan. Untuk mendapatkan besar tahanan anoda tunggal dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (3.13) berikut.

$$\begin{aligned} Rh &= \frac{\rho}{2 \pi n x L} \left(\ln \frac{4L}{d} - 1 \right) \\ &= \frac{1.26}{2 x 3.14 x 0.08} \left(\ln \frac{4 x 0.08}{0.04} - 1 \right) \\ &= 2.71 \text{ Ohm} \end{aligned}$$

Dengan:

- Rh = tahanan anoda tunggal (ohm)
- ρ = resistivitas tanah rata-rata (ohm-m)
- L = panjang anoda (m)
- d = diameter anoda (m)

4.3.12 Faktor Interferensi Anoda

Untuk mendapatkan besaran faktor interferensi anoda, harus diketahui resistivitas tanah, jarak pemasangan anoda dan tahanan anoda tunggal yang telah dihitung diatas serta jumlah anoda yang digunakan. Berdasarkan buku Examples of design for cathodic protection system oleh Peabody pada halaman 134 dapat dihitung faktor interferensi anoda yang tertuang dalam persamaan (3.14) berikut ini.



$$F = 1 + \frac{\rho}{\pi \times S \times R} (\ln 0.66 - n) \quad (3.14)$$

Dengan :

- F = Faktor interferensi anoda (volt)
- Rh = tahanan anoda tunggal (ohm)
- Sa = jarak pemasangan anoda
- n = jumlah anoda
- = resistivitas tanah

Karena dalam perancangan ini hanya dibutuhkan 1 buah anoda dalam tiap-tiap sistem, maka perhitungan faktor interferensi anoda tidak digunakan.

Pada metode arus paksa, anoda tidak dipilih dari logam dengan potensial elektrode (emf) lebih negatif dari logam yang dilindungi, tetapi justru dipilih dari logam dengan potensial elektrode sama dengan material pipa atau justru yang lebih positif. Meskipun potensial elektrode anoda High Silicon Cast Iron sama dengan potensial pipa baja, elektron tetap mengalir dari anoda menuju pipa karena dipaksa oleh arus searah (DC) yang diperoleh dari transformer rectifier. Dengan demikian suatu struktur yang memiliki luasan besar dapat dilindungi oleh sebuah anoda tunggal dan karena tegangan dorong yang dimiliki tinggi, anoda dapat ditempatkan jauh dari struktur.

4.3.13 Tahanan groundbed

Untuk menghitung besaran tahanan pada lokasi groundbed yang terdapat anoda terpasang, harus diketahui tahanan anoda tunggal dan faktor interferensi anoda yang telah dihitung diatas. Untuk mendapatkan nilai tahanan groundbed maka digunakan rumus persamaan (3.15) berikut ini

Karena factor interferensi anoda diabaikan maka:

$$\begin{aligned} R_n &= R_h \times F / n \\ &= 2.707 / 1 \\ &= 2.707 \text{ ohm} \end{aligned}$$



Dengan :

- Rn = tahanan groundbed (ohm)
- Rh = tahanan anoda individual (ohm)
- n = jumlah anoda
- F = faktor interferensi anoda

4.3.14 Tegangan yang diperlukan

Untuk menentukan tegangan yang diperlukan dari transformer rectifier maka dapat dihitung dengan memasukkan besar arus IR, tahanan groundbed, tahanan karakteristik pipa serta tegangan dalam yang dimiliki transformer rectifier. Penghitungan tegangan yang diperlukan dari transformer rectifier dapat menggunakan persamaan (3.16) berikut

1. Tegangan yang diperlukan pada pipa coating primer

$$\begin{aligned}V_o &= IR (R_n \cdot S_f + r_p) + e \\ &= 0.0018 (2.707 \times 1.25 + 5.74) + 2.5 \\ &= 2.516 \text{ Volt}\end{aligned}$$

2. Tegangan yang diperlukan pada pipa coating ganda (primer dan sekunder)

$$\begin{aligned}V_o &= IR (R_n \cdot S_f + r_p) + e \\ &= 0.00031 (2.707 \times 1,25 + 13.8) + 2.5 \\ &= 2.505 \text{ Volt}\end{aligned}$$

Dengan :

- V_o = tegangan yang diperlukan (volt)
- IR = keluaran arus DC (ampere)
- R_n = tahanan groundbed (ohm)
- S_{f3} = safety factor
- R_p = tahanan karakteristik pipa (ohm)
- e = tegangan dalam (volt)



4.4 Perhitungan Arus dan Potensial

Pengujian arus dan tegangan proteksi dilakukan untuk mengetahui apakah tegangan dan arus sistem proteksi yang dikeluarkan oleh rectifier sudah memproteksi pipa kedalam area proteksi yaitu sekitar -850 mV sampai -1100 mV dengan menggunakan electrode Cu/CuSO₄ sebagai reference. Pengujian dilakukan dengan membuat test point yang berasal dari rangkaian paralel sistem proteksi, test point yang berasal dari kabel yang terhubung dengan pipa kemudian dihubungkan dengan multimeter yang telah disambung dengan electrode reference Cu/CuSO₄ dan kedalam tanah sehingga tegangan dapat diukur dan terbaca di multimeter. Sebelum proteksi arus paksa dilakukan pipa yang telah ditanam di dalam tanah dilakukan pengukuran potensial pipa untuk mengetahui seberapa besar potensial pipa yang telah ditanam dan sebelum diberi proteksi arus paksa.

Tabel 4.4 Hasil Pengukuran Potensial Pipa Sebelum Proteksi

Jenis Pipa	Potensial Pipa (mV)
Pipa dengan Coating Primer	-701
Pipa dengan Coating Sekunder	-596



Gambar 4.1 Pengukuran potensial awal pipa sebelum diberi arus proteksi



Untuk mengetahui tegangan yang dikeluarkan dari rectifier dapat dibaca langsung pada display rectifier dengan satuan Volt (V), sementara untuk membaca arus yang keluar kabel yang berasal dari kutub positif rectifier dihubungkan dengan multimeter secara seri sehingga arus yang keluar dari rectifier dapat terbaca hingga satuan miliamper (mA). Pengujian tersebut dilakukan dan dikontrol setiap hari selama 28 hari. Dimana dalam setiap hari perkembangan proteksi dilakukan dengan mengontrol tegangan dan arus yang diperlukan untuk memproteksi pipa sehingga tidak terjadi over proteksi atau kurang proteksi.

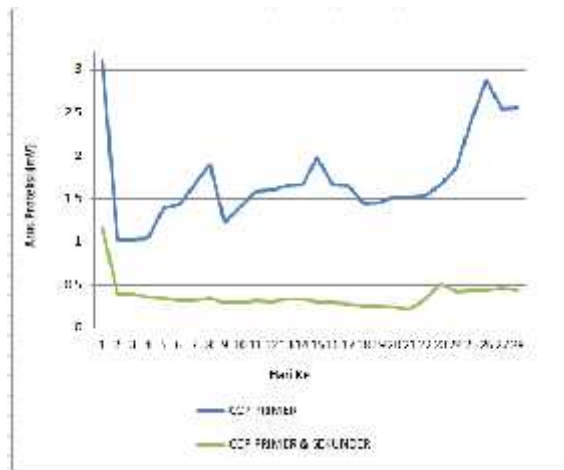
Tabel 4.5 Hasil Pengukuran Arus Proteksi Pipa Coating Primer

Hari Ke-	Arus Proteksi (mA)	Hari Ke-	Arus Proteksi (mA)
1	3.12	15	1.98
2	1.03	16	1.67
3	1.03	17	1.65
4	1.05	18	1.44
5	1.40	19	1.46
6	1.43	20	1.52
7	1.67	21	1.52
8	1.90	22	1.53
9	1.22	23	1.66
10	1.41	24	1.86
11	1.59	25	2.43
12	1.60	26	2.88
13	1.65	27	2.55
14	1.67	28	2.56
Rata-rata			1.73



Tabel 4.6 Hasil Pengukuran Arus Proteksi Pipa Coating Ganda (Primer dan Sekunder)

Hari Ke-	Arus Proteksi (mA)	Hari Ke-	Arus Proteksi (mA)
1	1.17	15	0.31
2	0.4	16	0.29
3	0.4	17	0.28
4	0.36	18	0.26
5	0.34	19	0.25
6	0.32	20	0.24
7	0.32	21	0.21
8	0.34	22	0.33
9	0.30	23	0.51
10	0.30	24	0.42
11	0.32	25	0.44
12	0.31	26	0.44
13	0.33	27	0.46
14	0.33	28	0.43
Rata-rata		0.37	



Gambar 4.2 Grafik Kebutuhan Arus Proteksi Pipa

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN



Dari tabel pengujian di atas dapat diketahui bahwa pengaruh coating sangat mempengaruhi arus yang dibutuhkan untuk memproteksi pipa. Pada pipa yang dicoating primer membutuhkan arus yang lebih besar dibandingkan dengan pipa yang dicoating ganda (Primer dan Sekunder).

Pada hari pertama penanaman pipa, kedua pipa membutuhkan arus yang lebih besar yaitu pada pipa coating primer sebesar 3.12 mA dan pipa coating ganda (primer dan sekunder) sebesar 1.17 mA. Dari data hari pertama menunjukkan bahwa pipa dengan lapisan cat primer membutuhkan arus proteksi lebih besar dibandingkan dengan pipa dengan lapisan cat ganda (primer dan sekunder). Pada hari ke-2 sampai hari ke-5 kebutuhan arus proteksi kedua pipa mengalami penurunan. Pada hari ke-6 sampai ke-8 kebutuhan arus proteksi mengalami peningkatan. Sedangkan pada hari ke-9 menurun dan hari ke-10 sampai ke-15 kebutuhan arus proteksi cenderung meningkat. Pada hari ke-16 sampai ke-20 kebutuhan arus proteksi mengalami penurunan dikarenakan nilai resistivitas tanah meningkat. Hari ke-21 sampai ke-28 meningkat secara bertahap.

Kenaikan kebutuhan arus terbesar pada pipa coating primer terjadi pada hari ke-25 dimana kebutuhan arus sebesar 0.57 mA dari kebutuhan arus hari sebelumnya. Kenaikan kebutuhan arus terbesar pada pipa coating sekunder hari ke-23 sebesar 0.18 mA dari kebutuhan arus hari sebelumnya. Seiring berjalannya waktu pipa dengan coating primer mengalami perubahan kenaikan kebutuhan arus proteksi. Hal ini bisa dikarenakan karena lapisan yang melekat pada pipa mulai terkelupas sehingga memerlukan lebih banyak arus untuk memeroteksi pipa dari korosi. Hal berbeda dengan pipa coating ganda. Seiring berjalannya waktu, perubahan kebutuhan arus tidak terlalu signifikan dikarenakan lapisan yang melekat pada pipa masih dalam kondisi yang baik.

Hal ini disebabkan karena nilai resistivitas tanah yang rendah sehingga diperlukan arus yang lebih besar untuk memeroteksi pipa dari serangan korosi.



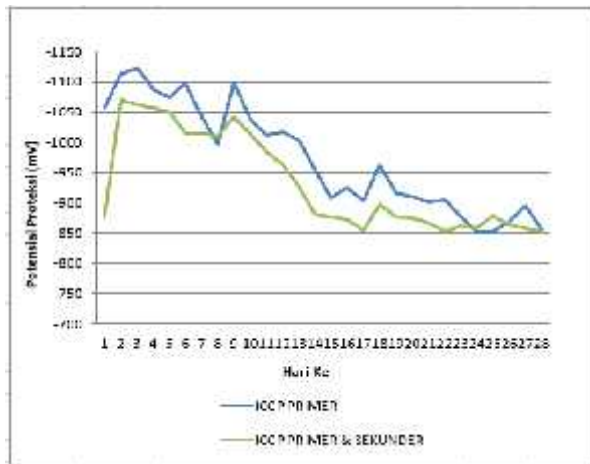
Tabel 4.7 Hasil Pengukuran Tegangan Proteksi Pipa Coating Primer

Hari Ke-	Tegangan Proteksi (mV)	Hari Ke-	Tegangan Proteksi (mV)
1	-1057	15	-908
2	-1012	16	-926
3	-1023	17	-902
4	-1087	18	-962
5	-1073	19	-915
6	-1098	20	-911
7	-1043	21	-900
8	-997	22	-904
9	-1097	23	-879
10	-1037	24	-852
11	-1012	25	-853
12	-1018	26	-869
13	-1003	27	-896
14	-954	28	-855
Rata-rata			-972



Tabel 4.8 Hasil Pengukuran Tegangan Proteksi Pipa Coating Ganda (Primer dan Sekunder)

Hari Ke-	Tegangan Proteksi (mV)	Hari Ke-	Tegangan Proteksi (mV)
1	-878	15	-876
2	-1069	16	-872
3	-1063	17	-854
4	-1056	18	-898
5	-1049	19	-877
6	-1016	20	-874
7	-1015	21	-867
8	-1010	22	-852
9	-1041	23	-861
10	-1013	24	-857
11	-983	25	-878
12	-963	26	-864
13	-925	27	-857
14	-880	28	-853
Rata-rata			-932



Gambar 4.3 Grafik Potensial Proteksi Pipa



Dari tabel di atas dapat dilihat bahwa pemasangan pipa awal memiliki range proteksi yang diharuskan yaitu -850 mV hingga -1100 mV. Setelah pipa tersebut diberi arus proteksi, arus yang diberikan lebih tinggi dibandingkan dengan keperluan arus proteksi seharusnya. Namun seiring berjalan waktu dan pengontrolan arus yang dilakukan pipa coating dapat terus terjaga pada range proteksi.

Tabel 4.9 Hasil Pengukuran Potensial Pipa Setelah Proteksi

Jenis Pipa	Potensial Pipa (mV)
Pipa dengan Coating Primer	-610
Pipa dengan Coating Sekunder	-678



Gambar 4.4 Pengukuran potensial akhir pipa sebelum diberi arus proteksi

4.5 Hasil Proteksi

Setelah 28 hari, pipa yang telah ditanam dan diberi proteksi arus paksa diangkat untuk mengetahui kondisi pipa.



Gambar 4.5 Pipa dengan coating Primer setelah 28 hari pemberian arus proteksi



Gambar 4.6 Pipa dengan coating Primer dan Sekunder setelah 28 hari pemberian arus proteksi





Gambar 4.7 Permukaan pipa coating primer setelah 28 hari



Gambar 4.8 Permukaan pipa coating primer dan sekunder setelah 28 hari



Pada pipa dengan coating primer, permukaan pipa mengalami kerusakan berupa terkelupasnya lapisan coating pada permukaan pipa. Sedangkan pada pipa dengan coating ganda (primer dan sekunder) kondisi lapisan coating cenderung masih baik hanya terkelupas pada beberapa titik.

Pada daerah sambungan mur atau lasan. Korosi atau karat terjadi pada pipa coating primer saja. Sedangkan pada pipa dengan coating ganda (primer dan sekunder) daerah lasan cenderung lebih terlindungi. Hal tersebut dapat terjadi karena pipa yang diberi coating ganda mempunyai daya rekat yang lebih baik dibandingkan dengan pipa coating primer.



Gambar 4.9 Sambungan lasan pada pipa coating primer





Gambar 4.10 Sambungan lasan pada pipa coating primer dan sekunder



Gambar 4.11 Anoda grafit pada pipa coating primer



Gambar 4.12 Anoda grafit pada pipa coating primer dan sekunder



Setelah 28 hari, anoda yang ditanam juga diambil untuk mengetahui perubahan-perubahan apa yang terjadi pada anoda grafit. Pada gambar dapat dilihat bahwa anoda yang digunakan pada pipa coating primer mengalami perubahan warna di beberapa titik permukaan. Anoda grafit tersebut terdapat bercak warna kecoklatan seperti karat lebih banyak di permukaannya. Hal ini terjadi karena pada pipa coating primer sangat memerlukan arus proteksi lebih besar dibanding dengan pipa coating ganda, dimana kebutuhan elektron untuk proteksi pipa berasal dari anoda grafit. Sementara pada anoda grafit yang digunakan pada pipa coating ganda mengalami perubahan warna tidak sebanyak di permukaan anoda coating primer. Hal tersebut disebabkan karena perlindungan coating ganda lebih efektif untuk melindungi pipa sehingga kebutuhan elektron dari anoda tidak terlalu signifikan.

Dalam proteksi katodik arus paksa penggunaan coating tidak hanya mengurangi kebutuhan arus proteksi namun dapat membantu proteksi pipa secara signifikan, sehingga pipa yang ditanam dalam tanah sebaiknya diberikan coating terlebih dahulu, hal tersebut akan membuat permukaan pipa tidak mengalami kontak langsung dengan lingkungan dalam hal ini adalah tanah.

4.6 Faktor yang Memengaruhi Kebutuhan Arus Proteksi

Reaksi korosi terjadi karena adanya daerah-daerah anodic dan katodik dipermukaan logam yang membentuk korosi. Faktor yang mempengaruhi proses korosi baja dalam tanah terutama adalah sifat fisik dan kimia dari tanah maupun komponen lain. Beberapa faktor penting tersebut diantaranya:

1. Keasaman (pH) Tanah

Pada range tersebut secara umum pH bukanlah sebagai variabel utama penyebab korosi. Tanah yang lebih asam akan menyebabkan resiko korosi yang besar pada material konstruksi seperti baja, besi mineral, dekomposisi tanaman asam (coniferous tree needles), sampah industry, hujan asam, aktivitas mikrobiologi. Air adalah molekul netral dengan dua atom hydrogen yang digabungkan dengan



sebuah atom oksigen dan molekul ini terdisosiasi menjadi sebuah ion hydrogen dan sebuah ion hydrogen dan sebuah ion hidroksil.

Faktor yang sama dengan sifat-sifat asam adalah adanya ion-ion hydrogen sedangkan basa dihubungkan dengan adanya ion-ion hidroksil. Air memiliki kuantitas ion hydrogen dan ion hidroksil yang sama sehingga air bersifat netral. Metode yang telah diterima secara umum untuk mendapatkan keasaman adalah metode pH. Dalam metode ini keasaman diukur dengan skala 0 hingga 14. pH bernilai 0 sampai 7 akan bersifat asam sedangkan pH dengan nilai 7 sampai 14 akan bersifat basa.

Pada penelitian ini, tanah memiliki pH Antara 7.8 sampai 8.5. Hal tersebut disebabkan kondisi tanah cenderung berubah-ubah sesuai lingkungannya, namun kondisi tanah yang berada di pH 7.8 hingga 8.5 mengindikasikan bahwa kondisi tanah tidak memiliki kandungan asam atau basa yang berlebih. Pengaruh pH dalam perancangan ini tidak dapat menjadi suatu acuan apakah pH tanah yang ada mempengaruhi perancangan dan kebutuhan arus yang diperlukan dalam perancangan proteksi arus paksa.

2. Resistivitas Tanah

Resistivitas suatu jenis tanah adalah kemampuan tanah tersebut untuk menghambat aliran listrik. Jika resistivitas tanah rendah maka arus listrik semakin mudah mengalir begitu juga sebaliknya. Tanah mempunyai karakter kimiawi dan fisik yang bervariasi dan dapat mempengaruhi tingkat korosi pada logam. Pada umumnya tanah mengandung empat unsur utama, yaitu bahan mineral, bahan organik air dan udara. Karakteristik tanah yang berpengaruh terhadap tingkat korosi yang dihasilkan adalah resistivitas tanah.



Resistivitas jenis suatu tanah ditentukan oleh jumlah ion dalam tanah sebagai elektrolit karena arus listrik mengalir dalam elektrolit melalui mekanisme perpindahan ion-ion tersebut. Jika jumlah ion yang terdapat dalam tanah banyak maka komponen pembawa aliran listrik semakin banyak dan arus mudah mengalir. Dengan kata lain resistivitas tanah semakin rendah, proses korosi semakin meningkat dan sebaliknya. Survey tahanan jenis (resistivitas) tanah mutlak dilakukan pada tahap awal perencanaan teknis system proteksi katodik.

Tahanan jenis tanah merupakan fungsi dari kandungan kelembaban, kandungan garam, jenis garam dan temperature tanah. Secara umum, terdapat pertalian antara tahanan jenis tanah dengan laju korosi. Hal ini disebabkan korosi merupakan suatu fenomena elektrokimia sehingga semakin rendah tahanan jenis tanah, hambatan sirkuit yang dihasilkan juga semakin kecil. Akibatnya, sel-sel korosi mampu mengalirkan arus korosi dengan lebih mudah dan laju korosi dipercepat. (Arnoux, 2002)

Dalam penelitian ini, tanah tergolong memiliki nilai resistivitas berkisar 126 Ohm.Cm sehingga tergolong rendah maka bersifat sangat korosif. Nilai resistivitas tanah terbesar terjadi pada hari ke-19 sebesar 144.84 Ohm. Cm dan nilai resistivitas tanah terkecil terjadi pada hari ke-20 sebesar 106.8 Ohm.Cm.

Kenaikan kebutuhan arus terbesar pada pipa coating primer terjadi pada hari ke-25 dimana kebutuhan arus sebesar 0.57 mA dari kebutuhan arus hari sebelumnya. Kenaikan kebutuhan arus terbesar pada pipa coating sekunder hari ke-23 sebesar 0.18 mA dari kebutuhan arus hari sebelumnya. Hal ini disebabkan karena nilai resistivitas tanah yang rendah sehingga diperlukan arus yang lebih besar untuk memeroteksi pipa dari serangan korosi.



3. Lapisan Coating

Lapisan pelindung merupakan lapisan film koontinyu dari material penyekat listrik di atas permukaan logam yang diproteksi. Material ini mengisolasi logam dari kontak langsung dengan elektrolit di sekelilingnya (mencegah elektrolit terhubung dengan logam) sekaligus sebagai penghalang yang memberikan hambatan listrik tinggi sehingga reaksi-reaksi elektrokimia tidak dapat terjadi. Fungsi primer lapis lindung pada pipa yang terproteksi katodik adalah mengurangi luasan permukaan logam yang terekspos pada pipa sehingga arus proteksi katodik yang diperlukan untuk melindungi logam dapat dikurang. (Peabody, 2001)

Coating adalah sebuah penutup yang diterapkan pada permukaan suatu benda, biasanya disebut sebagai substrat. Tujuan dari menerapkan lapisan yaitu dekoratif, fungsional, atau keduanya. Lapisan dapat berupa lapisan all over, meliputi substrat, atau hanya menutupi bagian substrat. Lapisan fungsional dapat diterapkan untuk mengubah sifat permukaan substrat, seperti adhesi, wetability, ketahanan korosi, atau ketahanan aus. Sebagai contoh pembuatan perangkat semikonduktor, lapisan menambahkan properti benar-benar baru seperti respon magnetik atau konduktivitas listrik dan merupakan bagian penting dari produk. Banyak proses pelapisan industri meliputi aplikasi film tipis bahan fungsional untuk substrat, seperti kertas, kain, film, atau foil.

Pada penelitian ini, coating primer diterapkan langsung ke permukaan baja yang telah dibersihkan. Tujuannya adalah untuk membasahi permukaan dan untuk menyediakan adhesi yang baik untuk dilakukan coating selanjutnya. dalam kasus primer untuk permukaan baja, ini juga biasanya diperlukan untuk memberikan inhibisi korosi. (National Corrosion Service. 2000)



Sedangkan pada pipa yang lain diberikan tambahan lapisan cat sekunder. Sebuah cat lapisan sekunder adalah lapisan pelindung tambahan yang diterapkan pada permukaan rawan korosi untuk memulihkan kegagalan potensi lapisan primer. Ini memberikan lapisan kedap air untuk kapal yang diberikan untuk mencegah pencemaran lingkungan atau tumpahan. Disebut juga sebagai body coat untuk menambah tebal dan ketahanan. Formulasi intermediate sangat penting, utamanya untuk meningkatkan ketebalan yang dapat meningkatkan sifat-sifat utama dari coating. Body coat ini harus menempel kuat pada primer dan juga pada top coat.

Kenaikan kebutuhan arus terbesar pada pipa coating primer terjadi pada hari ke-25 dimana kebutuhan arus sebesar 0.57 mA dari kebutuhan arus hari sebelumnya. Kenaikan kebutuhan arus terbesar pada pipa coating sekunder hari ke-23 sebesar 0.18 mA dari kebutuhan arus hari sebelumnya. Seiring berjalannya waktu pipa dengan coating primer mengalami perubahan kenaikan kebutuhan arus proteksi. Hal ini bisa dikarenakan karena lapisan yang melekat pada pipa mulai terkelupas sehingga memerlukan lebih banyak arus untuk memeroteksi pipa dari korosi. Hal berbeda dengan pipa coating ganda. seiring berjalannya waktu, perubahan kebutuhan arus tidak terlalu signifikan dikarenakan lapisan yang melekat pada pipa masih dalam kondisi yang baik.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan dari perancangan sistem proteksi arus paksa pada pipa baja API 5L Grade B dengan coating Primer dan coating Sekunder di dalam tanah adalah

1. Pada perancangan sistem proteksi katodik arus paksa kebutuhan arus proteksi untuk pipa yang dilapisi cat primer didapatkan 1.8 mA, sementara pada pipa yang dilapisi cat ganda (primer dan sekunder) sebesar 0.31 mA
2. Kebutuhan arus proteksi pada pipa yang dilapisi cat ganda (primer dan sekunder) lebih kecil dibandingkan dengan pipa yang dilapisi cat primer. Pada penelitian ini, rata-rata kebutuhan arus proteksi pada pipa yang dilapisi cat primer adalah 1.73 mA, sementara pada pipa yang dilapisi cat ganda (primer dan sekunder) sebesar 0.37 mA
3. Lapisan coating dan perubahan lingkungan mempengaruhi kebutuhan arus proteksi yang digunakan.

5.2 Saran

Saran yang penulis berikan setelah proses perancangan proteksi katodik adalah

1. Pengujian resistivitas tanah sebaiknya dilakukan pada seluruh titik daerah penelitian
2. Transformator Rectifier yang digunakan hendaknya disesuaikan dengan standar



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- A.Sulaiman, Karyanto H.1992. *Corrosion control and Monitoring*, Jakarta: Workshop Pertamina.
- ASTM. 2001. *United States of America Patent No. G57 Standard Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four - Electrode Method*.
- Fontana, Mars G. 1987. *CORROSION ENGINEERING INTERNATIONAL EDITION*. Singapore: McGraw-Hill
- Labolatory, B. 2013. *Corrosion and Cathodic Protection*. Denver: Bureau of Reclamation Materials Engineering Research Laboratory, Denver Federal Center
- Mars, G. Fontana. *Corrosion Engineering, 3rd edition*.1967. New York: Mc Graw-Hill Book Company.
- Marshall E.Parker, Edward G. Peatie. *Pipe-line Corrosion dan Cathodic Protection, 3rd edition* 1984. Texas: Gulf Publishing Company.
- McCoy, J. E. Juni 1970 "Corrosion Control by Cathodic Protection". *Transactions of the Institute of Marine Engineering*, Vol. 82, No 6: 82-86.
- NACE. 1997. *Houston, TX Patent No. RP-0268-97 Electrical Isolation of Cathodically Protected Pipelines*
- NACE. 2012. *Houston, TX Patent No. TM0457- 2012 Measurement Techniques Related to Criteria for Cathodic Protection on Underground or Submerged Metallic Piping Systems*
- NACE. 2013. *Houston, TX Patent No. SP0169- 2013 Control of External Corrosion of Underground or Submerged Metallic Piping System*.
- NACE Standard RP0169-2002, *Control of External Corrosion Of Underground or Submerged Metallic Piping System*, Houston, TX: NACE.
- Pasaribu, L. 2011. *Studi Analisis Pengaruh Jenis Tanah, Kelembaban, Temperatur, dan Kadar Garam Terhadap*

- Tahanan Pertanahan Tanah*. Depok: Universitas Indonesia.
- Peabody, A. 2001. *Control of Pipeline Corrosion, Second Edition*. Texas: NACE International.
- Roberge, Pierre R. 2009. *CORROSION ENGINEERING PRINCIPLES AND PRACTICES*. USA: McGraw-Hill
- Roberge, Pierre R. 1999. *Handbook of Corrosion Engineering*. New York: Mc Graw-Hill Book Company
- Schweitzer, Phillip A. *Corrosion Resistant Piping Systems*. 2010. New York: Mc Graw-Hill Book Company.
- Shobah, M. Nurus. 2014. *Pengaruh Goresan Lapis Lindung dan Salinitas Air Laut Terhadap Arus Proteksi Sistem Impressed Current Cathodic Protection (ICCP) pada Pipa API 5L Grade B,*” Tugas Akhir Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
- Shreir, L. L, R. A. Jarman, G. T. Burstein. *Corrosion Control, Vol. 2*. 1994. Oxford: Butter Worth–Heinemann Ltd.
- Sulistijono. *Diktat Kuliah Korosi*, 1999. Surabaya: Fakultas Teknologi Industri ITS
- Trethewey, K.R. dan J. Chamberlain. 1991. *Korosi untuk Mahasiswa dan Rekayasawan*. Jakarta: PT Gramedia Pustaka Utama.
- Tubagus Noor R, dkk. *Pengaruh Kondisi Tanah Asam Dan Cacat Gores Berbentuk Persegi Panjang Pada Lapis Lindung Terhadap Kebutuhan Arus Proteksi Sistem Impressed Current Cathodic Protection (Iccp) Dengan Menggunakan Baja Aisi 1045*. Teknoin Vol. 20 No. 1 Maret 2014: 01-11
- Tubagus Noor R, dkk. *Perancangan Proteksi Arus Paksa Pada Pipa Baja Api 5l Dengan Coating Dan Tanpa Coating Di Dalam Tanah..* Prosiding Seminar Nasional Fisika (E-Journal) SNF2016 VOLUME V, OKTOBER 2016
- Wu, J. Dkk. 2009. *The Influence of Coating Damage on The ICCP Cathodic Protection Effect*. Luoyang Ship Material Research Institute. P.R.China

LAMPIRAN 1

Pengukuran Resistivitas Tanah

Tabel 1 Hasil Pengukuran Resistivitas Tanah

Hari ke-	Nilai Resistivitas (Ohm.Cm)	Hari ke-	Nilai Resistivitas (Ohm.Cm)
1	120.233	15	116.479
2	125.130	16	116.823
3	129.263	17	123.407
4	130.385	18	129.781
5	131.461	19	144.843
6	134.814	20	133.212
7	138.103	21	106.814
8	125.899	22	125.683
9	118.064	23	125.072
10	117.082	24	130.890
11	114.740	25	128.436
12	119.562	26	125.310
13	140.917	27	117.526
14	128.112	28	122.156
Rata-rata			125.721

LAMPIRAN 2

Pengukuran pH Tanah

Tabel 2 Hasil pengukuran pH

Hari Ke-	Ph	Hari Ke-	pH
1	7.9	15	8.3
2	8.2	16	8.4
3	8.2	17	8
4	8.4	18	7.8
5	8.2	19	7.9
6	8.5	20	8.2
7	8.4	21	8
8	8.1	22	8.3
9	8	23	8.3
10	8.1	24	8.2
11	8.3	25	8.4
12	8.4	26	8.3
13	8.2	27	8.4
14	8.4	28	8.4
Rata-rata			8.22

LAMPIRAN 3

Perhitungan Desain Proteksi Katodik Arus Paksa

1. Luas permukaan yang diproteksi

Luas permukaan struktur yang akan dilindungi = 0.346656 m^2

2. Konduktansi Lapis Lindung Pipa

- a. Konduktansi lapis pelindung pada pipa coating primer sebesar $0.001778 \text{ Ohm. m}^{-1}$
- b. Konduktansi lapis pelindung pada pipa coating ganda (primer dan sekunder) sebesar $0.00031 \text{ Ohm. m}^{-1}$

3. Tahanan Pipa

- a. Tahanan pipa pada pipa coating primer sebesar $0.0586 \text{ Ohm. m}^{-1}$
- b. Tahanan pipa pada pipa coating ganda (primer dan sekunder) sebesar $0.0586 \text{ Ohm. m}^{-1}$

4. Konstanta Atenuasi

- a. Konstanta Atenuasi pada pipa coating primer sebesar $0.01021 \text{ ohm-m}^{-1}$
- b. Konstanta Atenuasi pada pipa coating ganda (primer dan sekunder) sebesar $0.00425 \text{ ohm-m}^{-1}$

5. Tahanan Karakteristik Pipa

- a. Tahanan karakteristik pipa pada pipa coating primer sebesar 5.7437 Ohm
- b. Tahanan karakteristik pipa pada pipa coating ganda (primer dan sekunder) sebesar 13.8 Ohm

6. Pergeseran Potensial Pipa

Pergeseran potensial pada kedua pipa sebesar 0.675 Volt

7. Kebutuhan Arus Proteksi

- a. Kebutuhan arus proteksi pada pipa coating primer sebesar 1.80 mA
- b. Kebutuhan arus proteksi pada pipa coating ganda (primer dan sekunder) sebesar 0.31 mA

8. Keperluan Arus DC minimum

- a. Keperluan arus DC minimum pada pipa coating primer sebesar 2.25 mA
- b. Keperluan arus DC minimum pada pipa coating ganda (primer dan sekunder) sebesar 0.39 mA

9. Berat Anoda

- a. Berat Anoda pada pipa coating primer sebesar 5.6 gram
- b. Berat Anoda pada pipa coating ganda (primer dan sekunder) sebesar 1 gram

10. Jumlah Anoda yang Dibutuhkan

- a. Jumlah anoda yang dibutuhkan pada pipa coating primer sebesar 0.039 → 1 buah
- b. Jumlah anoda yang dibutuhkan pada pipa coating ganda (primer dan sekunder) sebesar 0.007 → 1 buah

11. Tahanan Anoda Tunggal

Tahanan anoda tunggal pada kedua pipa sebesar 2.71 Ohm

12. Tahanan groundbed

Tahanan groundbed pada kedua pipa sebesar 2.71 ohm

13. Tegangan yang diperlukan

- a. Tegangan yang diperlukan pada pipa coating primer sebesar 2.516 Volt
- b. Tegangan yang diperlukan pada pipa coating ganda (primer dan sekunder) sebesar 2.505 Volt

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Salatiga pada tanggal 9 Januari 1995 dari ayah bernama Harnoto dan I bu bernama Endang Trie Widayanti. Penulis merupakan anak kedua dari enam bersaudara. Saat ini penulis tinggal di Jalan Bima 45 RT. 01/ IV Grogol, kel. Dukuh, kec. Sidomukti, Kota Salatiga (50722). Pada tahun 2007, penulis telah menyelesaikan pendidikan di SDN Dukuh 1 Salatiga. Tahun 2010 menyelesaikan pendidikan tingkat menengah pertama di SMPN 1 Salatiga. Tahun 2013 berhasil menyelesaikan pendidikan tingkat menengah atas di SMAN 1 Salatiga. Dan sekarang penulis sedang menempuh pendidikan S1 semester 8 di Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS. Semasa kuliah penulis aktif dalam ormawa ITS menjabat sebagai bendahara umum LDJ Ashabul Kahfi DTMM, Formasa (Forum Muda-Mudi Surabaya) sebagai koordinator kemahasiswaan, dan Studi Grup Sepuluh Nopember Surabaya sebagai ketua organisasi. Selain aktif dalam ormawa, penulis juga berperan sebagai asisten Laboratorium Korosi dan Kegagalan Material Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS. Penulis dapat dihubungi melalui alamat e-mail pambudimuhammadrizal@gmail.com.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)