



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**EVALUASI KINERJA SISTEM PROTEKSI KATODIK METODE ANODA  
KORBAN PADA JALUR PIPA YANG DIBENAMKAN DI DALAM TANAH  
DAERAH TAMBUN-CILAMAYA DAN CEMARA-BALONGAN  
(JAWA BARAT)**

**SKRIPSI**

**MUKHKHINUR  
04050405011**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL  
DEPOK  
JULI 2009**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**EVALUASI KINERJA SISTEM PROTEKSI KATODIK METODE ANODA  
KORBAN PADA JALUR PIPA YANG DIBENAMKAN DI DALAM TANAH  
DAERAH TAMBUN-CILAMAYA DAN CEMARA-BALONGAN  
(JAWA BARAT)**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik**

**MUKHKHINUR  
04050405011**

**FAKULTAS TEKNIK  
TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL  
DEPOK  
JULI 2009**

**Universitas Indonesia**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

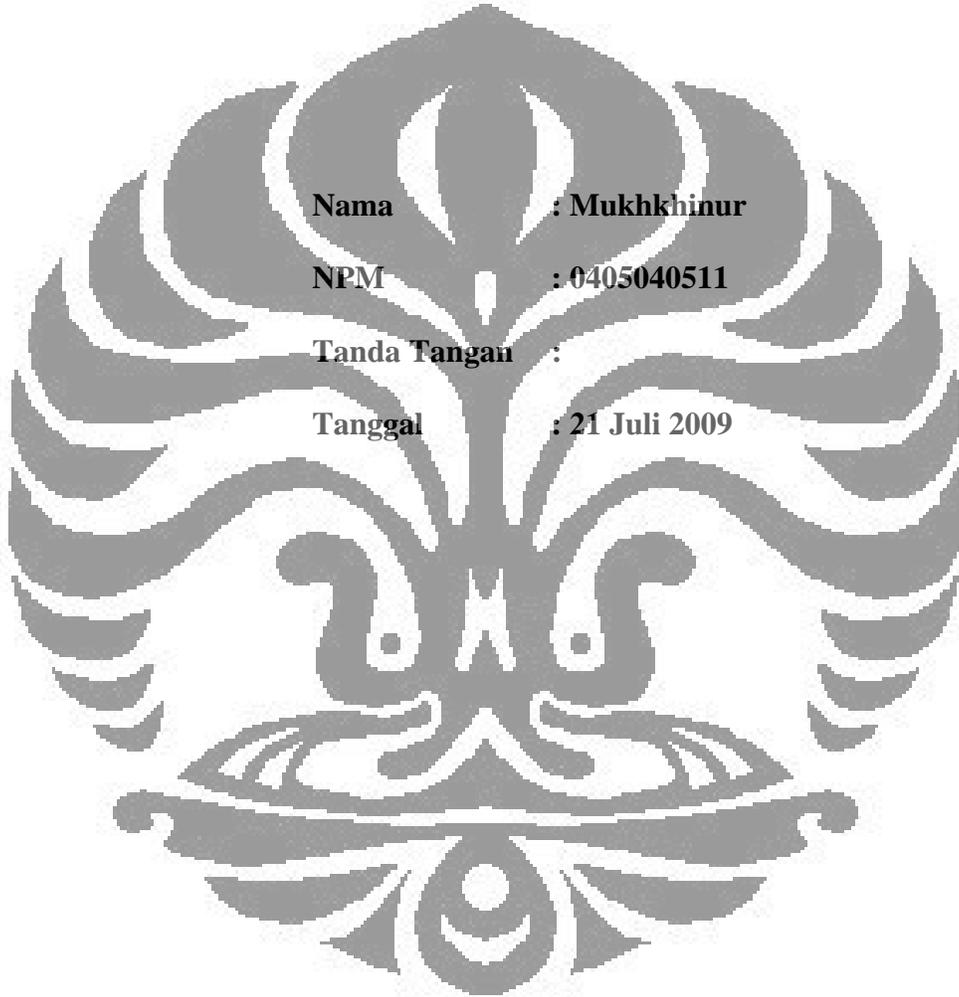
**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri, dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.**

**Nama : Mukhkhinur**

**NPM : 0405040511**

**Tanda Tangan :**

**Tanggal : 21 Juli 2009**



## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi diajukan oleh :  
Nama : Mukhkhinur  
NPM : 0405040511  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul Skripsi : Evaluasi Kinerja Sistem Proteksi Katodik Metode  
Anoda Korban Pada Jalur Pipa Yang Dibenamkan Di Dalam Tanah Daerah Tambun-  
Cilamaya dan Cemara-Balongan (Jawa Barat)

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. Andi Rustandi, MT ( )  
Penguji : Prof. Dr. Ir, Johnny Wahyuadi, DEA ( )  
Penguji : Badrul Munir, Ph.D ( )

Ditetapkan di : .....  
Tanggal : .....

## KATA PENGANTAR

Puji serta syukur saya panjatkan kepada Allah Yang Maha Kuasa karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Metalurgi dan Material pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- 1) Ir. Andi Rustandi, MT., selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini,
- 2) Pihak PT. Pertamina yang telah banyak membantu dalam usaha memperoleh data yang saya perlukan
- 3) Orang tua dan keluarga saya yang telah membantu memberikan dukungan material dan moral; dan
- 4) Sahabat saya Suryadi dan Reza Miftahul Ulum yang telah banyak membantu dalam menyelesaikan skripsi ini

Akhir kata, saya berharap Allah Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 26 Juli 2009

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSUTUJUAN PUBLIKASI  
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Mukhkhinur

NPM : 0405040511

Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material

Departemen : Teknik Metalurgi dan Material

Fakultas : Teknik

Jenis Karya : Skripsi

demikian pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

Evaluasi Kinerja Sistem Proteksi Katodik Metode Anoda Korban Pada Jalur Pipa Yang Dibenamkan Di Dalam Tanah Daerah Tambun-Cilamaya – dan Cemara-Balongan (Jawa Barat)

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini, Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/ pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di :

Pada tanggal :

Yang menyatakan

(.....)

## ABSTRAK

Nama : Mukhkhinur  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul : Evaluasi Kinerja Sistem Proteksi Katodik Metode Anoda Korban Pada Jalur Pipa Yang Dibenamkan Di Dalam Tanah Daerah Tambun-Cilamaya dan Cemara-Balongan (Jawa Barat)

Jalur pipa (pipeline) minyak mentah yang dibenamkan didalam tanah dengan menggunakan sistem proteksi katodik dengan metode *Sacrificial Anode* (anoda korban) haruslah dimonitoring. Monitoring dapat dilakukan dengan dengan metode CIPS (*Close Interval Potensial Survey*) dan DCVG (*Dirrect Current Voltage Gradient*). Hasil survey CIPS digunakan untuk memantau apakah struktur berada dalam kriteria proteksi dengan mengacu pada NACE standard- RP 0169-2002. DCVG digunakan untuk memastikan penyebab tidak terproteksinya struktur apakah dikarenakan cacat *coating* atau tidak berfungsinya sistem proteksi katodik. Pada jalur pipa Cemara-Balongan di kilometer (km) ke 1-7, 12-14, 16-17, 19-24, 25-27 (kecuali 3 m mendekati *Test Point*) dan km ke 28 dan 24% *Test Point* ditemukan dalam keadaan baik. Pada km ke 4-5 (meter ke 600-750) memiliki potensial berkisar -0,45 V sampai dengan -0,775 V dan km 9-10 (600 meter menuju TP-10) dengan potensial berkisar -0,270 V sampai dengan -0,800 V. Sedangkan pada jalur pipa Tambun-Cilamaya, sistem poteksi katodik secara keseluruhan mengalami *over protection* dengan potensial berkisar -1,1 V sampai dengan -1,6 V. Oleh karena itu perlu adanya perbaikan terhadap sistem proteksi pada jalur ini karena menyebabkan *disbonding coating*.

Kata Kunci: Jalur pipa, Anoda Korban, *CIPS*, *DCVG*, *NACE Standard*, *Disbonding Coating*

## ABSTRACT

Name : Mukhkhinur

Study Program: Metallurgy and Materials Engineering

Judul : Evaluation of Performance Sacrificial Anode Cathodic Protection System in Pipeline Buried at Tambun-Cialamaya and Cemara-Balongan (West Java)

Crude Oil Pipeline in Underground using Sacrificial Anode Cathodic Protection System have to be monitored. It can be done by CIPS (Close Interval Potential Survey) and DCVG (Direct Current Voltage Gradient) methods. Result survey of CIPS used to evaluation whether pipeline include criteria protection reference to NACE Standard –RP 0169-2002. DCVG used to ensure whether a cause of unprotected structure because of coating defect or dysfunctional systems. In Cemara-Balongan Pipeline, at kilometer (km) of 1-7, 12-14, 16-17, 19-24, 25-27 (except 3 m closed to Test Point) and km of 28 (except 100 m closed to TP 57) or as long as 21,641 m (77,28%) structure unprotected and 24% of test point found in good condition. In km of 4-5 (meter of 600-750) have potensial in range -0,45 V to -0,775 V and km of 9-10 (600 closed to TP 10) in range -0,270 to 0,800 V. So, in these location prefer to be renovaton of its cathodic protection system. In Tambun-Cilamaya Pipeline, Generally, overall of cathodic protection system is overprotection in range -1,1 to -1,6 V potensial reduction. Therefore, it is have to be repair because it can bring about of *disbonding coating*.

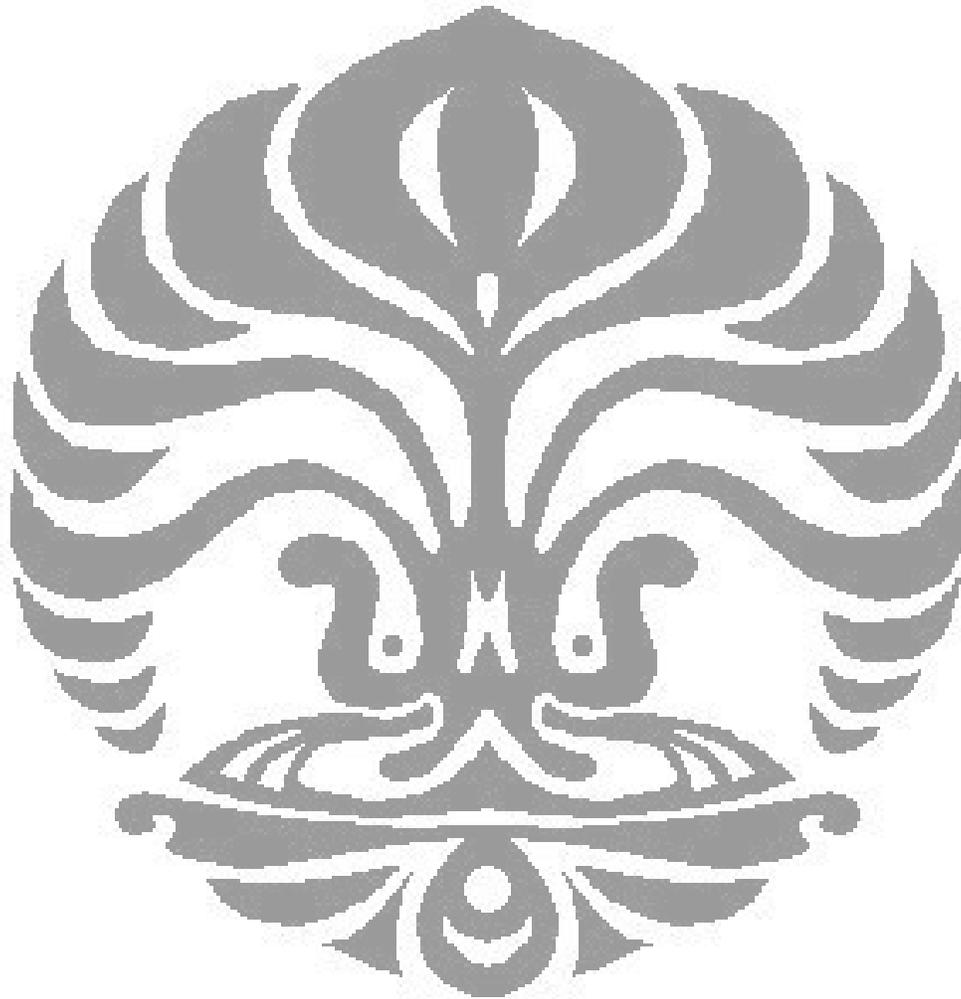
Keywords: Pipeline, Sacrificial Anode, CIPS, Disbonding Coating, DCVG, NACE Standard

## DAFTAR ISI

	Halaman
PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
PENGESAHAN	iv
KATA PENGANTAR	v
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xiv
<b>BAB 1 PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang Penelitian	1
1.2 Tujuan Penelitian	2
1.3 Ruang Lingkup Penelitian	2
1.4 Sistematika Penulisan	3
<b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1 Proteksi Katodik	
2.1.1 Sejarah Proteksi Katodik	4
2.1.2 Prinsip Proteksi Katodik	4
2.1.3 Dasar Elektrokimia Proteksi Katodik	9
2.1.4 Dasar Termodinamika Proteksi Katodik	12
2.1.5 Kriteria Proteksi Katodik	14
2.1.6 Karakteristik Proteksi Metode Sacrificial Anode	16
2.1.7 Distribusi Potensial Proteksi Katodik	19
2.2 Jalur Pipa	
2.2.1 Jalur Pipa yang Panjangnya Tak Hingga	20
2.2.2 Jalur Pipa yang Panjangnya Tak Hingga	22

2.3 Korosivitas Tanah	24
<b>BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN</b>	
3.1 Diagram Alir Penelitian	35
3.2 Prosedur Penelitian	
3.2.1 Pengukuran Soil Resistivity	36
3.2.2 Pengukuran Potensial Pipa, Anoda dan Proteksi	39
3.2.3 Monitoring Performa Sistem Proteksi Katodik	41
<b>BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN</b>	
4.1 Jalur Pipa Cemara-Balongan	
4.1.1 Karakteristik Soil Resistivity	50
4.1.2 <i>Close Interval Potential Survey (CIPS)</i>	51
4.1.3 <i>Direct Current Voltage Gradient (DCVG)</i>	53
4.1.4 Evaluasi Sistem Proteksi Katodik	54
4.1.5 Perhitungan	55
4.2 Jalur Pipa Tambun-Cilamaya	
4.2.1 Karakteristik Soil Resistivity	59
4.2.2 <i>Close Interval Potential Survey (CIPS)</i>	62
4.2.3 <i>Direct Current Voltage Gradient (DCVG)</i>	63
4.2.4 Evaluasi Sistem Proteksi Katodik	63
4.2.5 Perhitungan	64
<b>BAB 5 KESIMPULAN</b>	68
<b>DAFTAR ACUAN</b>	69
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>	70
LAMPIRAN 1. Pengukuran Potensial Pipa, Anoda dan Proteksi Jalur Pipa Cemara-Balongan	70
LAMPIRAN 2. Soil Resistivity Jalur Pipa Cemara-Balongan	72
LAMPIRAN 3. Rekap Kondisi Proteksi Struktur Pipa Sepanjang Jalur Cemara-Balongan	79
LAMPIRAN 4. Hasil Survey DCVG Jalur Pipa Cemara-Balongan	81
LAMPIRAN 5. Kondisi Test Point Pada Jalur Tambun-Cilamaya	82

LAMPIRAN 6. Karakteristik Nilai Tahanan Tanah Untuk Jalur Pipa Tambun-Cilamaya	86
LAMPIRAN 7. Hasil Pengukuran CIPS pada Jalur Pipa Tambun-Cilamaya	108
LAMPIRAN 8. Hasil Pengukuran DCVG Pipa Jalur Tambun-Cilamaya	111



## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
<b>Gambar 2.1</b> Proteksi Katodik dengan Menggunakan Suplai Energi dari Luar	5
<b>Gambar 2.2</b> Proteksi Katodik dengan Anoda Korban	6
<b>Gambar 2.3</b> Pengukuran Potensial Struktur yang Diproteksi dengan Mengacu Elektrode Referensi	7
<b>Gambar 2.4</b> Analisi Proteksi Katodik berdasarkan Teori Kinetik	10
<b>Gambar 2.5</b> Diagram Pourbaix yang Memperlihatkan Stabilitas Air dan Hasil Dekomposisinya	13
<b>Gambar 2.6</b> Diagram Pourbaix (E vs pH) untuk Besi/Baja Dilingkungan Air pada Suhu 25 °C	14
<b>Gambar 2.7</b> Skematik Ilustrasi nilai IR-Drop	16
<b>Gambar 2.8</b> Polarisasi pada Pasangan Galvanik yang menunjukkan Sifat Proteksi Katodik dengan Anoda Korban	17
<b>Gambar 2.9</b> Distribusi Potensial antara Groundbed dan Struktur yang Diproteksi yang Menunjukkan bagaimana Potensial Tanah menjadi Lebih Positif dan Menjadi Lebih Negatif ketika Groundbed dan Struktur Masing-masing berdekatan	19
<b>Gambar 2.10</b> Teoritis Distribusi Potensial Pipa/ tanah pada Jalur Tak Hingga	21
<b>Gambar 2.11</b> Kurva Atenuasi antara Dua Titik Pengaliran	22
<b>Gambar 2.12</b> Teoritis Distribusi Potensial Pipa/Tanah pada Jalur Pemipaan dengan Stasiun atau Titik Pengalirannya yang berjarak $2d$	23
<b>Gambar 2.12</b> Variabel yang Mempengaruhi Korosivitas Dalam Tanah	25
<b>Gambar 3.1</b> Mesin Pengukur Resistivitas AEMC Tanah	36
<b>Gambar 3.2</b> Skema Pengukuran Soil/Mud Resistivity	37
<b>Gambar 3.3</b> Persiapan Sample Dengan Metode Soil Box	38
<b>Gambar 3.4</b> Pengujian Resistivitas Tanah dengan metode soil box	38
<b>Gambar 3.5</b> Prinsip pengukuran Potensial (a) Protekso (b)Pipa (c) Andoa Korban	40
<b>Gambar 3.6</b> Pengukuran Potensial (a) Anoda Korban (b) Proteksi (c) Pipa	40

<b>Gambar 3.7</b> Contoh tipe <i>Test-Point</i>	41
<b>Gambar 3.8</b> Ilustrasi Metodologi CIPS	42
<b>Gambar 3.9</b> Peralatan CIPS dan operator pada survey lapangan	43
<b>Gambar 3.10</b> Tipikal Peralatan pada survey DCVG	45
<b>Gambar 3.11</b> Ilustrasi Metode DCVG	46
<b>Gambar 4.1</b> Peta Satelit dan Plot Jalur Pipa Cemara-Balongan	48
<b>Gambar 4.2</b> Berbagai kondisi <i>test point</i> yang ditemui pada jalur pipa Cemara-Balongan. A. <i>Tes Point</i> masih lengkap B. <i>Test Point</i> kosong C. <i>Test Point</i> Hilang	49
<b>Gambar 4.3</b> Profil pengukuran Soil Resistivity jalur pipa Cemara-Balongan	51
<b>Gambar 4.4</b> Pelaksanaan <i>Close Interval Potensial Survey</i> (CIPS) dilapangan	52
<b>Gambar 4.5</b> Peta Satelit dan Plot Jalur Pipa Tambun-Cilamaya	59
<b>Gambar 4.6</b> Profil Pengukuran <i>soil resistivity</i> jalur pipa Tambun-Cilamaya	60
<b>Gambar 4.7</b> Profil <i>soil resistivity</i> Tambun Cilamaya Km 31-60	60
<b>Gambar 4.8</b> Profil Pengukuran soil resistivity jalur pipa Tambun-Cilamaya Km 61-90	61
<b>Gambar 4.9</b> Profil Pengukuran soil resistivity jalur pipa Tambun-Cilamaya Km 90-102	61
<b>Gambar 4.10</b> Jalur SUTET yang crossing dengan jalur pipa	62

## DAFTAR TABEL

	Halaman
<b>Tabel 2.1</b> Tingkat Korosivitas Tanah dari Pengaruh Resistivity Tanah	26
<b>Tabel 2.2</b> Klasifikasi Tanah, Air dan Batuan Secara Kasar Berdasarkan Nilai Resistivitas	26
<b>Tabel 2.3</b> Nilai Resistivitas Tanah Berdasarkan Kelembaban Tanah	28
<b>Tabel 2.4</b> Nilai Resistivitas Tanah Berdasarkan Perubahan Temperatur	29
<b>Tabel 2.5</b> Nilai Resistivitas Mineral didaalam tanah	30
<b>Tabel 2.6</b> Pengaruh Klorida, Sulfur dan pH pada Korosi Jalringan Pipa yang Ditanam	34
<b>Tabel 4.1</b> Hubungan Potensial dan Resiko Korosi	50
<b>Tabel 4.2</b> Kategori Korosivitas tanah berdasarkan nilai tahananannya	50



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 LATAR BELAKANG PENELITIAN

Setelah sistem proteksi katodik dipasang dibutuhkan evaluasi kinerja dari sistem proteksi katodik secara berkala. Ada metode tertentu yang bisa digunakan untuk mengevaluasi kinerja sistem proteksi katodik tersebut. Tujuan utama dari metode tersebut digunakan adalah bagaimana pencegahan korosi bisa dilakukan. Kegagalan total atau parsial dari sistem proteksi katodik tidak bisa dilihat tandanya dengan jelas. Jika pompa rusak, sewaktu-waktu ada tanda seperti tekanan naik atau tekanan turun dan kondisi ini akan menarik perhatian untuk segera ditangani. Sama halnya dengan sistem elektrik atau mekanik yang dipasang pada berbagai macam peralatan. Tetapi jika ada kegagalan pada sistem proteksi katodik dengan jatuhnya potensial pipa terhadap tanah, jika tidak dipasang alat-alat khusus untuk monitoring atau tidak dilakukan evaluasi berkala, dengan proses yang relatif lambat korosi akan menghancurkan segala aktivitas sistem proteksi katodik yang sudah dipasang.

Hancurnya lapisan coating pipa, habisnya anoda yang telah dikonsumsi, hilangnya arus keluar (*output current*) karena tidak normalnya tanah kering yang disebabkan oleh keringnya anoda atau terputusnya koneksi elektrik antara struktur yang diproteksi dan anoda merupakan berbagai macam fenomena kegagalan yang terjadi pada sistem proteksi katodik dengan metode anode korban. Macam-macam kegagalan ini jika tidak dihindari dan tidak ditangani akan berdampak pada rusak atau gagalnya sistem proteksi katodik. Hancurnya sistem proteksi katodik yang jauh lebih cepat dari umur yang dirancang akan merugikan dari segi finansial.

Dengan demikian, dibutuhkan suatu metode untuk monitoring performa dari suatu sistem proteksi katodik. Metode tersebut diantaranya adalah CIPS (*Close Interval Potential Survey*) dan DCVG (*Direct Current Voltage Gradient*). CIPS adalah pengukuran potensial struktur sepanjang jalur terbenam untuk *assessment*

terhadap performa sistem proteksi katodik dan kondisi jalur perpipaan yang terproteksi. Potensial pipa terbenam umumnya dapat diukur melalui test point. DCVG merupakan metode lapangan yang lebih baru untuk melokalisir cacat yang terdapat pada lapisan *coating* pipa yang terpendam.

## 1.2 TUJUAN PENELITIAN

Tujuan dari penelitian ini adalah:

Mengevaluasi jaringan sistem proteksi katodik metode anoda korban jalur pipa minyak mentah yang dibenamkan di dalam tanah daerah Cemara-Balongan dan Tambun-Cilamaya (Jawa Barat)

## 1.3 RUANG LINGKUP PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan terhadap jalur pemipaan minyak mentah dengan karakteristik pipa:

**a. JALUR PIPA : CEMARA-BALONGAN**

TAHUN DIBANGUN : 2003  
KONSTRUKSI : WELDED, UNDERGROUND  
SPESIFIKASI PIPA : API 5L, GR.B  
DIA. & PANJANG : 8", 28.000 METER  
PROTEKSI KATODIK : Mg SACRIFICIAL ANODE  
COATING : Wrapping Tape

**b. JALUR PIPA : TAMBUN-CILAMAYA**

TAHUN DIBANGUN : 2005  
KONSTRUKSI : WELDED, UNDERGROUND  
SPESIFIKASI PIPA : API 5LX-42  
DIA. & PANJANG : 8", 102.000 METER  
PROTEKSI KATODIK : SACRIFICIAL ANODE  
COATING : PE Coaring + Field Joint Coating

Lingkup pekerjaan yang dilakukan dalam penelitian ini adalah :

1. Melaksanakan survey potensial pipa terhadap tanah, potensial anoda, dan potensial proteksi pipa dengan metode CIPS (*Close Interval Potensial Survey*) di sepanjang jalur pipa

2. Melaksanakan survey DCVG (*Direct Current Voltage Gradient*) untuk menentukan lokasi, ukuran dan besaran dari cacat *coating* di sepanjang jalur pipa
3. Melakukan penggalian pada lokasi yang dinyatakan terdapat cacat *coating*
4. Mengukur tahanan listrik dalam tanah (*soil resistivity*)
5. Melakukan evaluasi dan analisa sistem proteksi katodik berdasarkan data-data hasil survey dan perhitungan yang dilakukan

Data hasil survey jalur pipa Cemara-Balongan merupakan data primer penulis sedangkan untuk jalur pipa Tambun-Cilamaya merupakan data sekunder yang diterima dari peneliti langsung

#### **1.4 SISTEMATIKA PENULISAN**

Sistematika diuraikan dalam bentuk bab-bab yang saling berkaitan satu sama lain, antara lain:

##### **BAB 1. PENDAHULUAN**

Membahas mengenai latar belakang penelitian, tujuan penelitian, ruang lingkup penelitian dan sistematika penulisan

##### **BAB 2 TEORI PENUNJANG**

Membahas mengenai dasar teori yang berkaitan dengan proteksi katodik dan bagaimana merancang sistemnya di dalam tanah

##### **BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN**

Membahas diagram alir penelitian dan prosedur penelitian

##### **BAB 4 HASIL PENELITIAN & PEMBAHASAN**

Membahas mengenai pengolahan data yang didapat dari hasil penelitian, baik berupa angka, grafik maupun gambar menganalisa dari hasil penulisan dan membandingkannya dengan teori serta hasil penelitian lain sebelumnya.

##### **BAB 5 KESIMPULAN**

Membahas mengenai kesimpulan dari hasil penelitian yang telah dilakukan

## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Proteksi Katodik

##### 2.1.1 Sejarah Proteksi Katodik

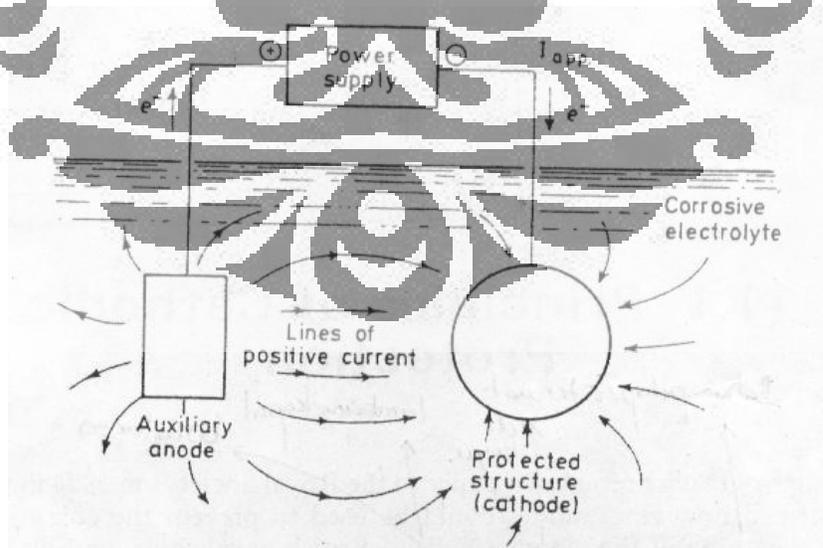
*Sir Humphry Davy* mempresentasikan papernya pada *Royal Society* pada tahun 1824 yang menjelaskan bagaimana anode *zinc* dapat digunakan untuk mencegah korosi pada pelapis tembaga (*copper sheathing*) lambung kapal yang terbuat dari kayu pada kapal angkatan laut Inggris. Dari papernya ini menarik perhatian dan memunculkan prinsip yang dikenal dengan proteksi katodik. Beberapa pengujian praktis telah dilakukan pada *vessel* kapal besar pengangkut barang di pelabuhan dan laut dan dihasilkan kesimpulan bahwa ada pengaruh rapat arus pada proteksi tembaga. *Davy* juga telah melakukan investigasi penggunaan sistem arus tanding menggunakan baterai volta (*voltaic battery*), tetapi ia tidak memikirkan metode untuk aplikasinya.

Instalasi atau pemasangan pertama secara penuh pada lambung kapal di *vessel* dilakukan pada kapal perang kecil *Samarang* pada tahun 1824; empat grup anode *Cast Iron* disetel dan nyaris memberikan perlindungan secara sempurna pada pelapis tembaga. Namun sayang sekali, pencegahan korosi tembaga menghasilkan kegagalan pada tembaga itu sendiri karena tembaga bersifat racun atau toksik pada pertumbuhan laut dan dapat meningkatkan pencemaran laut. Karena alasan ini lah ketertarikan terhadap proteksi katodik menjadi menurun. Oleh karena itu metode ini hampir 100 tahun diabaikan, dan berhasil pertama kali digunakan oleh perusahaan minyak di Texas untuk memproteksi pipa di dalam tanah.

##### 2.1.2 Prinsip Proteksi Katodik

Ada dua metode yang dapat diaplikasikan pada proteksi katodik yaitu, *impressed current* (arus tanding) atau *sacrificial anode* (anoda korban). Pada gambar

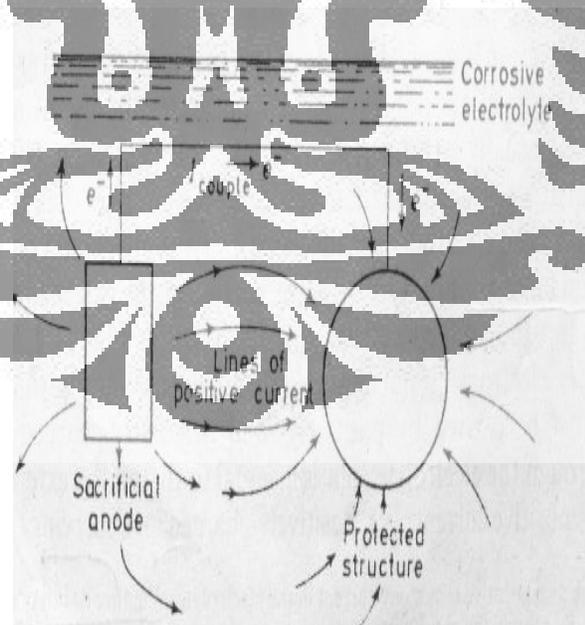
2.1 dibawah ini mengilustrasikan penggunaan sumber arus listrik dari luar, biasanya *rectifier*, yang biasa mengubah arus *ac* menjadi *dc*. Struktur yang diproteksi dibuat secara elektrik menjadi negatif sehingga ia bertindak sebagai katoda. Elektroda yang kedua dibuat menjadi positif untuk melengkapi rangkaian dan bertindak sebagai anoda. Arus yang dibawa atau berjalan pada rangkaian eksternal sebagai elektron-elektron, dan arus yang dipakai  $I_{app}$  seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.1 adalah sebagai arus elektron. Elektron-elektron bebas tidak berada pada larutan elektrolit; oleh karena itu, arus harus dibawa dengan ion-ion yang bermuatan positif dan negatif. Arus yang melalui larutan elektrolit sama dengan arus yang ada pada rangkaian eksternal, yang ditunjukkan sebagai arus positif. Arus yang melalui larutan elektrolit sama dengan yang ada pada rangkaian eksternal, pada gambar ditunjukkan sebagai arus positif, ion-ion yang bermuatan positif membawa arus (baik ion positif dan ion negatif membawa arus pada elektrolit, apakah yang dibawa itu ion-ion itu banyak atau sedikit dari total arus bergantung kepada jumlah transport atau perpindahan dari ion-ion tersebut, untuk penyederhanaan hanya arah aliran ion-ion positif yang ditunjukkan pada gambar yang diperoleh dari konduksi ion-ion positif).



**Gambar 2.1** Proteksi Katodik dengan Menggunakan Suplai Energi dari Luar [1]

Ditekankan bahwa proteksi katodik hanya mungkin terjadi ketika pada struktur yang diproteksi dan anoda ada kontak elektronik dan elektrolit. Kemungkinan proteksi ini dicapai dengan konduktor metallik dan larutan elektrolit pada struktur yang diproteksi dan anode yang dipendam.

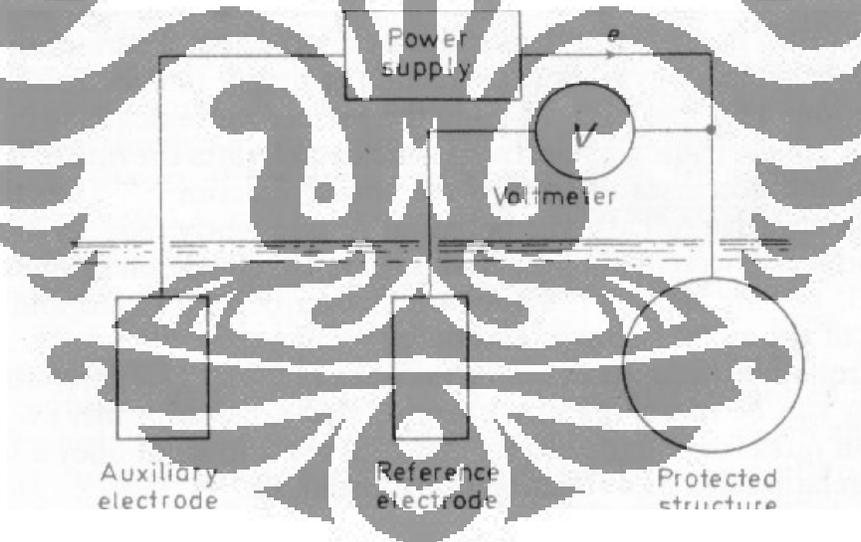
Gambar 2.2 menunjukkan metode kedua proteksi katodik. Ketika ada dua logam yang berbeda terhubung secara listrik pada sebuah larutan elektrolit, arus mengalir di antara kedua logam tersebut karena adanya perbedaan potensial elektrokimia. Logam dengan potensial yang lebih elektropositif (noble atau mulia) menjadi katoda dan terproteksi dari korosi (struktur yang terproteksi pada gambar 2.2), logam yang memiliki potensial elektronegatif (aktif) menjadi anode. Arus yang mengalir antara dua logam mempercepat larutnya (korosi) anode, yang menjadi korban, dan harus diganti secara periodik. Aliran arus yang mengalir pada gambar 2.2 sama dengan yang yang terjadi pada gambar 2.1 yaitu elektron mengalir menuju katoda pada rangkaian listrik eksternal dan ion-ion membawa arus pada elektrolit yang korosif



**Gambar 2.2** Proteksi Katodik dengan Anoda Korban [2]

Distribusi arus pada katoda menjadi rendah pada daerah yang jaraknya jauh dari anode sehingga pada beberapa kasus dibutuhkan *multiple anode* (anoda ganda) untuk menyamakan distribusi arus.

Proteksi katodik dimonitoring dengan mengukur potensial electrode dari struktur yang dilindungi untuk menentukan *e.m.f* antara antara elektode dengan elektode referensi yang cocok (seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.3). Elektode referensi yang mungkin dengan mudah logam terkorosi (seperti zinc murni) yang mencapai keadaan potensial yang stabil selama korosinya. Lebih sering setengah sel (*half cell*) khusus (*copper* pada larutan jenuh  $\text{CuSO}_4$ ) digunakan sebagai elektode referensi. Voltmeter, V, pada gambar 2.3 harus memiliki resistensi yang sangat tinggi untuk mencegah *drawing current* (perebutan arus) yang dapat menyebabkan polarisasi pada electrode referensi; sebagai alternatif dapat digunakan *electrometer*.



**Gambar 2.3** Pengukuran Potensial Struktur yang Diproteksi dengan Mengacu Elektode Referensi [1]

Dalam pelaporan atau pembacaan potensial struktur haruslah spesifik seperti -0,85 V vs Cu/CuSO<sub>4</sub> elektode yang menunjukkan bahwa potensial struktur 0,85

lebih negatif daripada electrode referensi, atau dengan pendekatan SHE (standar hydrogen electrode) senilai dengan  $-0,55V$ .

Potensial antara electrode referensi dan struktur yang diproteksi diukur dengan V (voltmeter) pada gambar 2.3 termasuk kontribusi *ohmic*,  $IR$ , ketika arus katodik,  $I$  mengalir melalui resistensi (tahanan) efektif  $R$ , antara electrode referensi dan struktur yang diproteksi,  $R$  dan kontribusi *ohmic*  $IR$ , akan menjadi lebih besar ketika electrode referensi jaraknya lebih jauh dari struktur yang diproteksi (ketika electrode referensi ditempatkan jauh dari struktur yang diproteksi, resistensi efektif akan meningkat. Akan tetapi,  $I$ , yang merupakan bagian dari total dari arus yang dipakai  $I_{app}$ , yang melalui  $R$ , juga menurun, sehingga  $IR$  mendekati nol, karena Nilai  $I$  mendekati nol. Namun hal ini tidak begitu jelas apakah ya atau tidak pengukuran electrode referensi yang jauh mengukur secara akurat potensial permukaan yang memaksa polarisasi arus,  $I_{app}$  yang tinggi). Hanya polarisasi pada permukaan struktur yang diproteksi yang efektif pada proteksi katodik.

Jadi untuk memonitor potensial permukaan secara akurat dan menghilangkan kontribusi *ohmic* sebanyak mungkin, electrode referensi ditempatkan sangat dekat permukaan struktur yang diproteksi. Hal ini bisa tidak mungkin untuk struktur yang besar dan kompleks seperti yang dibanam atau di pasang didalam air laut.

Proteksi katodik memerlukan arus tertentu untuk memproteksi permukaan logam dasar pada daerah yang penting. Proteksi katodik yang digunakan sering kali dihubungkan dengan *coating* permukaan sehingga daerah yang diproteksi terlindungi atau terhambat dari *holiday* atau cacat pada *coating*. *Coating* permukaan mengurangi arus yang dibutuhkan dengan besaran tertentu, tetapi karena *coating* akan hancur ketika melewati periode waktunya, arus katodik mesti ditingkatkan untuk menjaga proteksi pada daerah yang terkelupas atau terekspos tersebut. Akan tetapi proteksi katodik lingkungan tertentu dapat diaplikasikan pada struktur yang telanjang (yang tidak dilapisi *coating*)

### 2.1.3 Dasar Elektrokimia Proteksi Katodik

Korosi pada larutan berair (*aqueous solution*) terjadi dengan mekanisme elektrokimia yang melibatkan pertukaran atau perpindahan elektron-elektron pada permukaan logam yang terkorosi. Elektron-elektron  $e^-$  dibebaskan oleh reaksi anodik (oksidasi) dan diserap oleh reaksi katodik (reduksi)



Dimana persamaan 2.1 di atas menunjukkan oksidasi atom logam M yang dapat larut menjadi ion positif  $M^+$  dan persamaan 2.2 menunjukkan reduksi dengan larutnya ion  $Z^{2+}$  menjadi  $Z^+$ . Kedua reaksi terjadi secara simultan pada permukaan dengan menghasilkan logam yang terkorosi dengan melarutnya atom-atom permukaan logam.

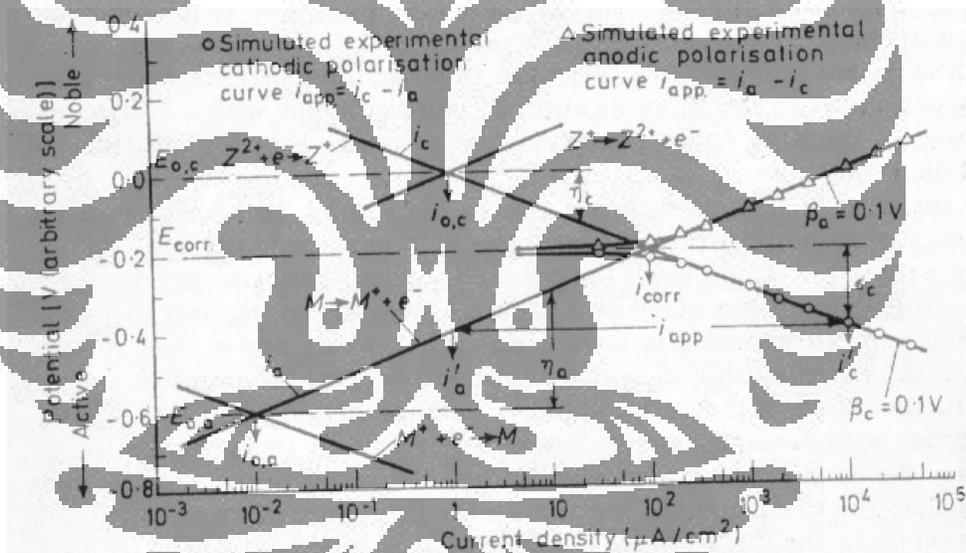
Mekanisme proteksi katodik secara sederhana dapat dipahami dengan merujuk pada persamaan 2.1 dan 2.2 di atas. Membuat permukaan menjadi lebih negative meningkatkan akses atau konsentrasi elektron mempercepat laju reaksi katodik dan menurunkan laju reaksi anodik. Jadi, aplikasi dari potensial negative atau katodik mengakibatkan berkurangnya laju korosi, dan jika penurunan pada potensial cukup, korosi secara sempurna dapat tertahan misalkan ketika laju reaksi anodik menjadi nol dan ketika seluruh permukaan logam menjadi katodik.

Elektron adalah reaktan-reaktan kedua persamaan 2.1 dan 2.2 di atas, oleh karena itu masing- masing laju dapat diukur sebagai arus, (elektron/satuan waktu, misalkan C/s atau A). Laju reaksi dari persamaan 2.1 dan 2.2 dapat diketahui dengan hubungan logaritmik (Tafel) sebagai fungsi potensial

$$\eta_a = \beta_a \log i_a / i_{o, a} \quad (2.3)$$

$$\eta_c = \beta_c \log i_c / i_{o,c} \quad (2.4)$$

Dimana  $\eta_a$  dan  $\eta_c$  adalah perubahan pada potensial (overvoltage atau overpotensial) yang disebabkan oleh masing-masing rapat arus,  $i_c$  dan  $i_a$ . Sedangkan nilai konstanta  $\beta_a$ ,  $\beta_c$ ,  $i_{o,a}$ ,  $i_{o,c}$  dapat dipahami dengan melihat atau memeriksa plot diagram logaritma arus vs potensial. Garis lurus pada gambar 2.4 merepresentasikan laju reaksi masing-masing sebagai fungsi potensial, sesuai dengan persamaan 2.3 dan 2.4 diatas. Dimana  $i_a = i_c$ , laju kelarutan sama dengan laju reduksi dan logam M mengalami korosi dan mencapai dalam keadaan potensial stabil  $E_{corr}$ . Secara sederhana, laju  $i_a$  adalah laju korosi  $i_{corr}$  pada logam, yaitu pada  $i_a = i_c = i_{corr}$  di  $E_{corr}$



Gambar 2.4 Analisis Proteksi Katodik berdasarkan Teori Kinetik [1]

Memahami pertukaran aatau perpindahan rapat arus  $i_{o,a}$  dan  $i_{o,c}$  dapat terlihat dengan mudah, misalnya pada  $i_{o,c}$  reaksi maju pada persamaan 2.2  $Z^{2+} + e^- \rightarrow Z^+$  tepat sama dengan laju reaksi kebalikannya  $Z^+ \rightarrow Z^{2+} + e^-$ . Jadi, laju yang terjadi  $i_{o,c}$  pada dua reaksi diatas adalah sama dan berlawanan tanda pada saat kesetimbangan. penjelasan sama untuk  $i_{o,a}$ , dan pada persamaan 2.1.  $E_{o,a}$  dan  $E_{o,c}$

adalah kesetimbangan atau potensial redoks untuk masing-masing reaksi anodik dan katodik pada persamaan 2.1 dan 2.2. Kemiringan (*slope*) kurva semi-logaritmik untuk persamaan 2.1 dan 2.2 masing-masing ditandai dengan  $\beta_a$  dan  $\beta_b$ .

Tanda ini umumnya dikenal sebagai konstanta Tofel untuk reaksi-reaksi dan diekspresikan dalam satuan  $V/\log i$

Ketika katodik *overvoltage*  $\epsilon_c$  (*overvoltage* dinotasikan disini dengan dengan  $\epsilon$  dan  $\eta$ ) yang terpasang (*impressed*) pada logam melewati arus  $I_{app}$ , seperti pada persamaan 2.1, arus korosi berkurang dari  $i_{corr}$  menjadi  $i_a$ . Untuk menjaga netralitas pada permukaan,  $I_{app} = i_c - i_a$  pada 2.4 menunjukkan  $I_{app}$  vs potensial. Titik-titik ini merupakan kurva polarisasi yang ideal mendekati yang sering diamati pada logam yang terkorosi. Kurva polarisasi untuk struktur yang sebenarnya tidak muncul atau dalam keadaan linear, pada gambar 2.4 bersifat semi-log, karena membatasi akses pada bagian atau unsur yang dapat tereduksi (contoh  $Z^{2+}$ ) dan interferensi ohmic,  $IR$

Pada keadaan sebenarnya, reaksi reduksi katodik yang terjadi pada umumnya melibatkan ion-ion hidrogen atau ion-ion oksigen yang terlarut, yaitu:



kedua reaksi diatas akan menghasilkan peningkatan pH baik dengan kehilangan ion-ion hidrogen seperti pada persamaan 2.5 atau dengan menghasilkan ion-ion  $OH^-$  pada persamaan 2.6. dan pH meningkat ini dapat dicapai jika transport atau perpindahan dan difusi dibatasi misalkan pada tanah atau lingkungan air statis. Pada logam yang amfoterik seperti aluminium dan timbal (*lead*), peningkatan pH dapat menyebabkan korosi katodik, jadi hal ini sangat penting untuk diperhatikan pada proteksi katodik pada logam-logam ini tidak dianjurkan untuk logam yang potensialnya terlalu negatif. Serupa dengan hal ini, alkalinitas yang berlebih dapat mengakibatkan saponifikasi

pada lapisan cat *coating* yang konsekuensinya peningkatan pada daerah yang diproteksi dan menurunkan efisiensi proteksi katodik.

Pada kasus logam *ferreous* peningkatan pH dapat bermanfaat, karena efisiensi proteksi katodik akan meningkat dengan meningkatnya pH. Akan tetapi, pada kasus *high-strength steel* memungkinkan adanya hidrogen yang masuk pada baja yang berbahaya dan dapat mengakibatkan *hydrogen embrittlement* pada daerah yang memiliki ketegangan (stress) seperti pada weld (las-lasan) dan pada keadaan ini potensial sebaiknya tidak dianjurkan menjadi terlalu negatif.

Faktor tambahan pada saat terjadinya peningkatan pH pada air yang mengandung *calcium bicarbonate* yang terlarut dan *magnesium sulphate* akan menghasilkan presipitasi *calcium carbonate* dan *magnesium hydroxide*. Jika garam-garam ini berdeposit pada permukaan logam dengan membentuk *scale* yang koheren dan adheren, luas permukaan pada logam yang diproteksi, dengan begitu akan mengurangi biaya proteksi katodik.

#### 2.1.4 Dasar Termodinamika Proteksi Katodik

Kesetimbangan elektrokimia antara logam dengan air murni pada seluruh daerah pH menghasilkan penggambaran secara umum dalam bentuk diagram potensial elektroda dengan pH ( $E_h$  vs pH) atau dikenal dengan diagram Pourbaix. Kesetimbangan elektrokimia dari air berdasarkan persamaan Nerst, yaitu untuk reaksi penguraian air:



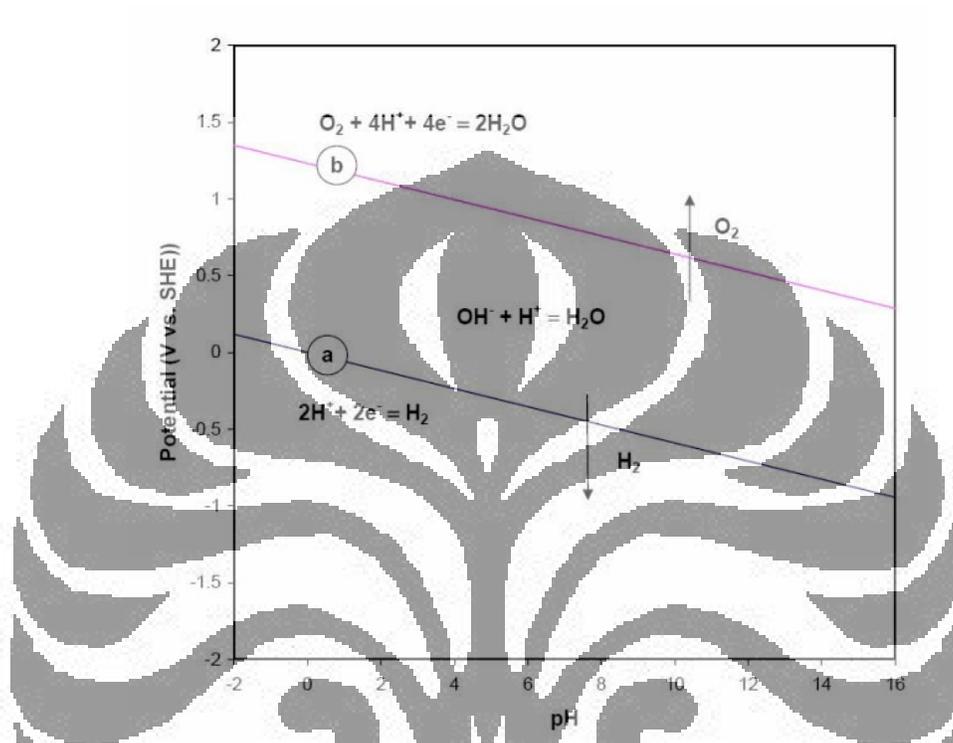
$$E_h = 0,059/2 \log (a^2\text{H}^+ / p \text{H}_2) \quad (2.8)$$

Karena  $\text{pH} = -\log a\text{H}^+$ , maka

$$E_h = -0,059 \text{pH} - 0,30 \log p \text{H}_2 \quad (2.9)$$

$$E_{O_2} = 1,23 + 0,059/2 (1/2 \log p_{O_2} + 2 \log a_{H^+}) \quad (2.10)$$

$$= 1,23 + 0,15 \log p_{O_2} - 0,059 \text{ pH}$$



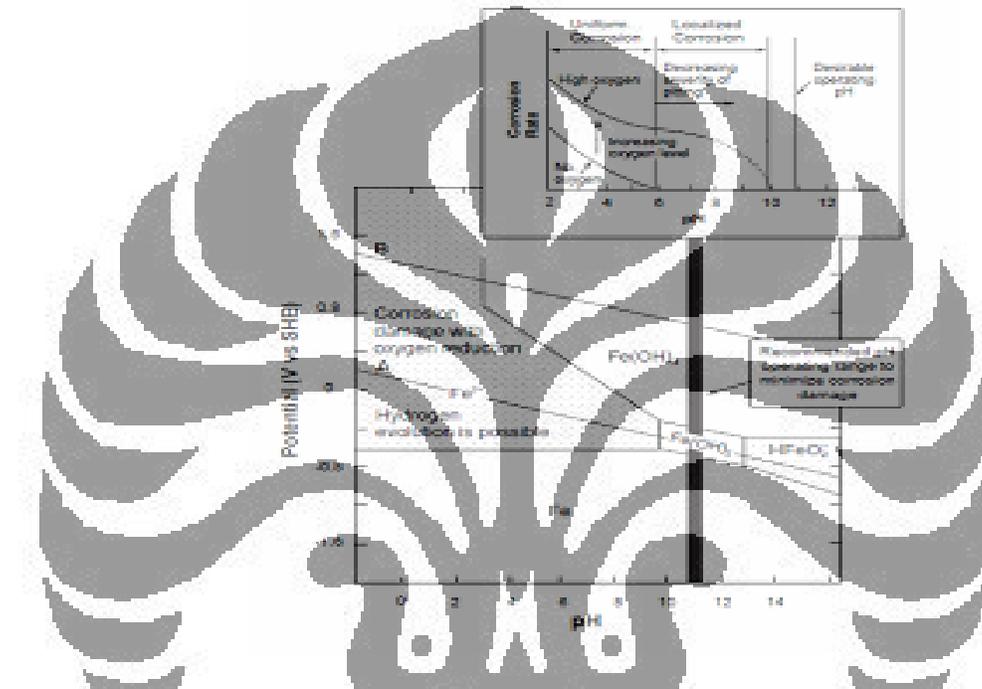
**Gambar 2.5** Diagram Pourbaix yang Menunjukkan Stabilitas Air dan Hasil Dekomposisinya [3]

Sehingga potensial elektroda dari kondisi kesetimbangan dari air murni akan bergantung pada pH dan tekanan parsial  $O_2$  dan  $H_2$ .

Dengan mengambil keadaan standar, maka tekanan  $O_2$  dan  $H_2$  akan sama dengan 1, sehingga diagram Pourbaix untuk air akan berbentuk garis lurus dan pada nilai pH, garis penguraian air menjadi oksigen dan hidrogen akan terpisah oleh potensial sebesar 1,23 volt.

Baja yang sebagian besar komposisinya adalah besi (Fe) dapat dicegah dan dikurangi laju korosinya dalam larutan yang mendekati netral dengan jalan menurunkan potensialnya dibawah -0,62 volt (berada pada daerah *immunity*). Hal ini

dapat kita lihat pada diagram Pourbaix untuk besi seperti pada gambar 2.5. Pada kondisi normal, potensial reduksi baja adalah sebesar -0,440 volt terhadap SHE (*Standard Hydrogen Electrode*), sehingga diperlukan nilai potensial sebesar 0,18 volt dan keadaan ini dapat dicapai dengan menerapkan sistem proteksi katodik pada baja tersebut.



Gambar 2.6 Diagram Pourbaix (E vs pH) untuk Besi/Baja Dilingkungan Air pada Suhu 25°C [4]

### 2.1.5 Kriteria Proteksi Katodik

Kriteria proteksi katodik direkomendasikan oleh NACE (*National Association of Corrosion Engineers*) Standard RP 0169, tentang *Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping*

Dari segi praktis, terlebih dahulu harus ditentukan level proteksi dari system proteksi katodik yang akan diaplikasikan. Arus proteksi yang tidak memadai akan menghasilkan level proteksi yang rendah sementara arus proteksi yang berlebihan akan menghasilkan kerusakan pada lapisan *coating* serta memungkinkan terjadinya

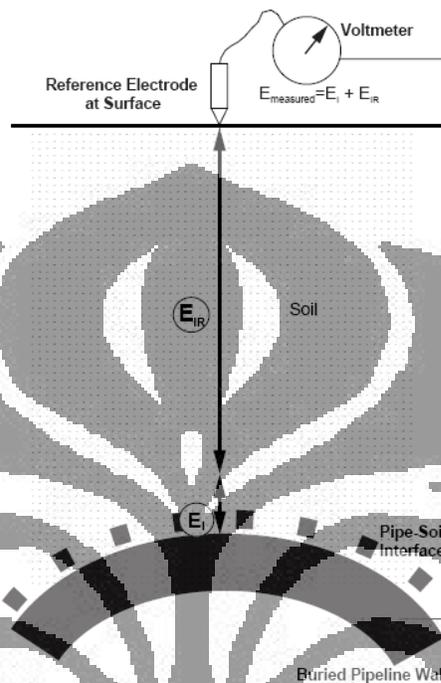
pelepasan lapisan *coating*. Struktur yang lebih jauh tidak lagi memiliki potensial korosi dan level proteksi yang seragam pada area permukaannya. Kriteria proteksi praktis kemudian dibutuhkan untuk optimalisasi performa proteksi. Berikut merupakan kriteria proteksi yang diajukan untuk aplikasi struktur baja yang terpendam,

- Potensial struktur senilai -850 mV dengan elektroda standar saturated Cu/CuSO<sub>4</sub> (pada kondisi aerobik)
- Potensial struktur senilai -950 mV dengan elektroda saturated Cu/CuSO<sub>4</sub> (pada kondisi anaerobik dimana korosi akibat pengaruh mikroba dapat muncul)
- Perubahan potensial negatif sebesar 300 mV ketika arus proteksi diaplikasikan.
- Perubahan potensial positif sebesar 100 mV ketika arus diputus.

Kriteria pertama merupakan batasan yang paling umum diketahui dan digunakan dalam industri, hal ini berkaitan dengan kemudahan dalam pengaplikasian. Menggunakan persamaan Nernst dan konsentrasi ion Fe sebesar  $10^{-6} M$  (kriteria umum digunakan untuk mendefinisikan area non korosif secara termodinamika), diperoleh potensial batas sebesar 930 mV dengan elektroda standar. Cu/CuSO<sub>4</sub>, yang mana lebih negatif dibandingkan dengan nilai pada kriteria pertama diatas. Performa operasional yang cukup memadai pada nilai potensial yang berada pada nilai yang tidak seketat nilai hasil perhitungan dapat dihubungkan dengan pembentukan lapisan protektif ferrous hydroxide pada permukaan

Kriteria potensial proteksi yang tertera diatas berkaitan dengan potensial structure-to-soil. Begitupun dalam prakteknya, adalah tidak mudah untuk melakukan pengukuran dalam hal ini jalur perpipaan yang melingkupi jalur perpipaan, dengan jarak yang susahakan sekecil mungkin dari struktur pipa. Ketika elektroda standar diposisikan pada aplikasi pengukuran struktur pipa yang telah diproteksi katodik, pengukuran yang dilakukan akan mendapatkan hasil yang mengandung 2 komponen

1. Potensial pipe-to-soil
2. IR-drop



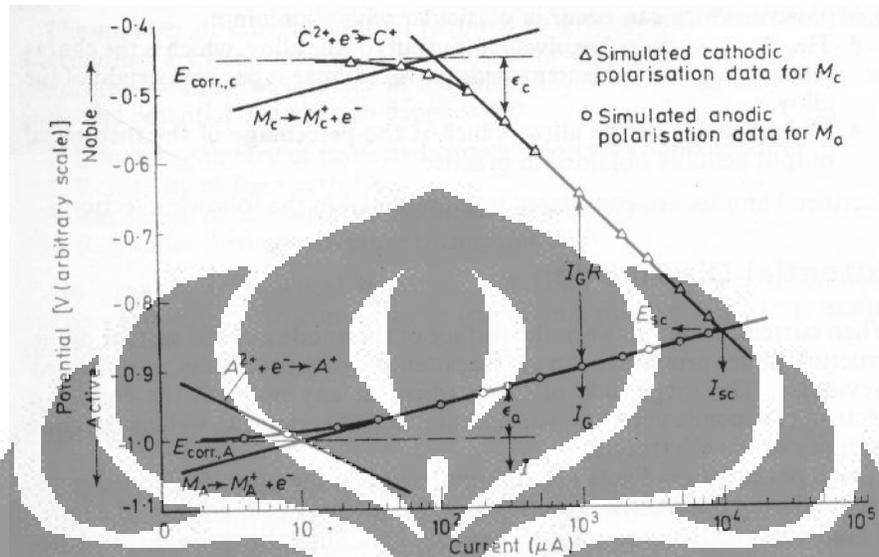
**Gambar 2.7** Skematik Ilustrasi nilai IR-Drop [2]

Nilai error oleh IR drop muncul dari fakta bahwa arus mengalir melalui tanah diantara struktur pipa dan elektroda standar tentunya memiliki tahanan listrik

### 2.1.6 Karakteristik Proteksi Katodik dengan *Sacrificial Anode* (Anode Korban)

Pasangan galvanic dibentuk ketika anoda korban dipasang pada struktur yang diproteksi seperti pada gambar 2.2. Jadi, untuk menggunakan metode ini anode harus memiliki potensial yang lebih elektronegatif daripada struktur yang diproteksi. Ketika dihubungkan, struktur ( $M_{c,katode}$ ) terpolarisasi secara katodik, dan anoda korban ( $M_{a,antode}$ ) terpolarisasi secara anodik, dan keduanya akan mencapai potensial yang sama  $E_{sc}$  (pada gambar 2.8) menunjukkan ketahanan terhadap elektrolit cukup rendah. Menghasilkan arus galvanic rangkaian arus pendek,  $I_{sc}$ . Titik-titik data pada

gambar 2.8 mensimulasikan gambar 2.4 dengan mengambil perbedaan  $i_c - i_a$  untuk katode dan  $i_a - i_c$  untuk anode.



**Gambar 2.8** Polarisasi pada Pasangan Galvanik yang Menunjukkan Sifat Proteksi Katodik dengan Anoda Korban [1]

Anoda “korban” yang dikonsumsi dengan melarutkannya selama proteksi katodik dan membutuhkan penggantian secara periodic. Untuk efisiensi yang maksimum proteksi korosi, anoda sebaiknya seminimum mungkin, dan semua proses korosi sebaiknya digunakan dalam rangka menurunkan potensial katode dengan transfer electron.

Jika elektrolit memiliki konduktivitas yang rendah atau jika anode korban jauh dari struktur yang diproteksi, ohmic  $I_G R$  potensial meningkat antara struktur dan anoda korban, dimana R adalah tahanan efektif diantara keduanya dan  $I_G$  adalah arus galvanic pada pasangan anoda-struktur yang diproteksi.  $I_G$  adalah arus maksimum yang dapat mengalir ketika struktur (katode) dan anoda korban dipisahkan dengan potensial  $I_G R$  seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.7

Anoda korban dikarakterisasi dengan empat sifat elektrokimia:

1. Potensial korosi paduan harus cukup negative untuk menggerakkan arus proteksi melalui elektrolit misalnya elektrolit, misalkan elektrolit yang resistansinya lebih tinggi dan jarak anoda dari struktur yang diproteksi yang lebih jauh atau besar maka potensial anode harus lebih negative
2. Tingkat polarisasi anode, yang hal ini penting karena anode sebaiknya tidak menjadi pasif, seperti yang terjadi pada anode-anode tertentu seperti aluminium
3. Output elektrokimia pada paduan, yang muataannya secara teoritis tersedia atau mampu untuk memberikan arus galvanic tiap satuan berat paduan
4. Efisiensi paduan, yang secara teoritis dan pada praktiknya dapat diaplikasikan

Berikut merupakan keuntungan dari aplikasi sistem proteksi katodik anoda korban:

1. Tidak memerlukan sumber arus eksternal
2. Kemudahan dalam hal instalasi dan relatif murah
3. Low Maintenance cost
4. Distribusi arus relatif seragam
5. Overproteksi cenderung tidak terjadi

Namun begitu terdapat kekurangan dalam pengaplikasian metode proteksi anoda korban

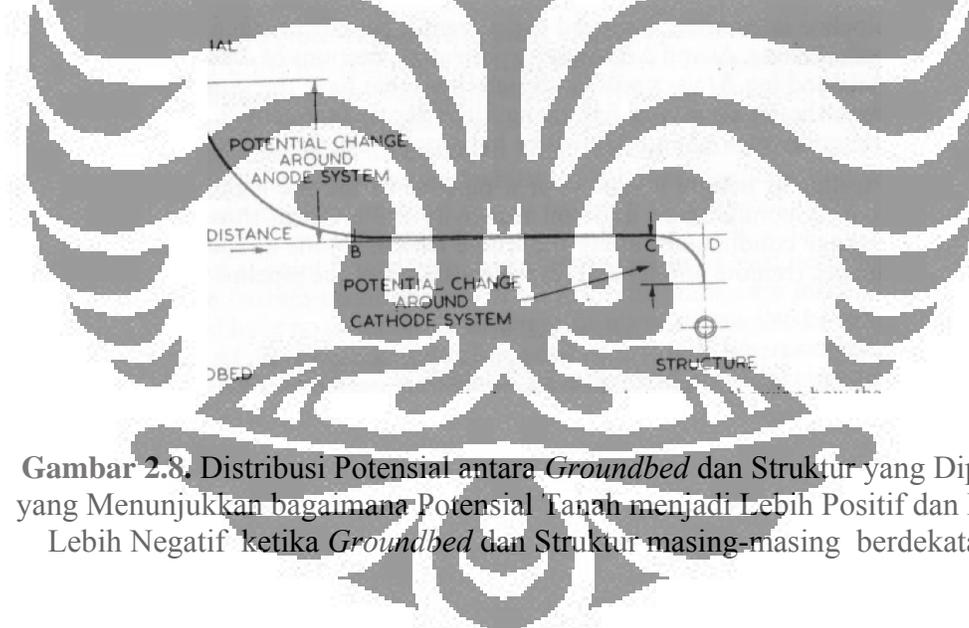
1. Daya dan arus keluaran terbatas
2. Area dengan tahanan lingkungan yang sangat tinggi akan memerlukan anoda dalam jumlah yang sangat banyak
3. Maksimum tahanan tanah sebesar 6000-10000  $\Omega$ -cm
4. Anoda kadang harus diganti berulang kali dikarenakan kebutuhan arus yang besar

5. Anoda dapat menambah beban mekanik jika dilekatkan langsung dengan ke struktur

### 2.1.7 Distribusi Potensial Proteksi Katodik

Ketika arus melewati antara permukaan anoda dan permukaan struktur yang diproteksi, maka akan menghasilkan gradient (perubahan) potensial. Besarnya gradien pada titik tertentu pada elektrolit yang korosif bergantung ukuran dan jumlah anode dan seberapa besar konduktivitas elektrolit.

Sangat penting untuk memperhatikan gradien potensial untuk jalur pemipaan yang dipendam atau struktur asing lainnya yang dipendam dalam tanah dimana biasanya konduktivitasnya rendah. Jenis-jenis gradien ditunjukkan pada gambar 2.9



**Gambar 2.8.** Distribusi Potensial antara *Groundbed* dan Struktur yang Diproteksi yang Menunjukkan bagaimana Potensial Tanah menjadi Lebih Positif dan Menjadi Lebih Negatif ketika *Groundbed* dan Struktur masing-masing berdekatan [1]

Karena katode (struktur) yang biasanya memiliki luas daerah yang lebih besar dibandingkan anode, gradient potensialnya lebih curam dibandingkan anode. Total arus yang mengalir dibagi kedalam 3 bagian, yaitu AB, dimana terjadi perubahan potensial yang besar disekitar *groundbed* (anode yang dibenam); BC dimana arus yang mengalir melalui daerah tanah yang luas sehingga perubahan potensialnya sangat

kecil; dan CD daerah dimana yang arus yang mengalir menurun dan potensialnya *drop* atau turun karena arus mendekati struktur. Potensial antara A dan B biasanya berkisar (tergantung ukuran anode dan *soil resistivity*) 10-50 V dan potensial C-D 1-2 V. Potensial CD tidak sama karena perubahan atau perpindahan potensial protektif, yang diukur dengan menempatkan setengah sel pada posisi tertentu, misalkan secara vertical diatas pipa. Puncak kurva potensial ketika *groundbed* sangat dekat ke struktur karena gradient potensial pada *groundbed* memotong jaringan pemipaan.

Jumlah sumber arus yang dibutuhkan untuk memproteksi permukaan, dan distribusinya, ditentukan oleh kebutuhan potensial minimum untuk proteksi yang harus dicapai pada semua titik permukaan dengan biaya yang minimum. Distribusi potensial tergantung kepada:

1. Geometri umum permukaan yang diproteksi, elektrolit dan anode
2. Resistivitas dari elektrolit
3. Resistansi *coating* pada antarmuka logam/elektrolit
4. Resistansi melalui struktur oleh aliran logam

#### 2.1.8 Jalur Pipa (*Pipeline*) Proteksi Katodik

Ketika arus dialiri dari sebuah titik pada jalur pemipaan dan diputus terhadap tanah, baik perubahan arus  $\Delta I$  maupun perubahan potensial  $\Delta E$  akan maksimum pada titik pengaliran (*drainage point*) dan akan menurun dari jarak  $x$  dari titik tersebut. Hubungan antara  $\Delta I$ ,  $\Delta E$  dan  $\Delta i$  (perubahan rapat arus) dengan jarak tertentu disebut sebagai *kurva atenuasi*. Jika jalur pemipaan panjangnya tak berhingga dan arus yang diberikan jauh dari *groundbed*, kemudian,  $\Delta I$ ,  $\Delta E$  dan  $\Delta i$  akan memiliki fungsi yang eksponensial terhadap jarak, dan  $\log \Delta E$  vs  $x$  dan  $\log \Delta I$  vs  $x$  akan berupa garis lurus yang memiliki kemiringan yang sama. Akan tetapi, jika jalur pemipaan memiliki panjang tertentu hubungan eksponensial seperti diatas tidak akan terjadi dan  $\Delta I$  dan  $\Delta E$  akan memiliki fungsi hiperbolik terhadap  $x$ .

### 2.2.1 Jalur Pemipaan yang Panjangnya Tak Hingga

Untuk pipa yang panjangnya tak hingga, dimana:

1. Konduktansi *coating* dan *soil resistivity* nya seragam sehingga memberikan kebocoran konduktansi yang seragam sepanjang pipa
2. Medan atau daerah anode tidak berpengaruh (pada anode yang jauh)
3. Resistansi jalur pemipaan seragam, kemudian

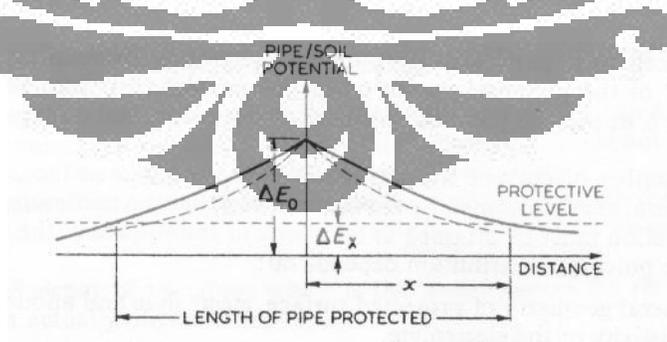
$$\Delta E_x = \Delta E_0 e^{-\alpha x} \quad (2.11)$$

$$\text{atau } x = \frac{2.3 (-\log \Delta E_x + \log \Delta E_0)}{\alpha} \quad (2.12)$$

$$\text{dan } \Delta I = \Delta I_0 e^{-\alpha x} \quad (2.13)$$

$$\text{atau } x = \frac{2.3 (-\log \Delta I_x + \log \Delta I_0)}{\alpha} \quad (2.14)$$

dimana  $\Delta E_0$  dan  $\Delta I_0$  berturut-turut adalah perubahan pada potensial dan arus, pada titik pengaliran (*drainage point*);  $\Delta E_x$  dan  $\Delta I_x$  adalah nilai pada jarak  $x$  dari titik dan  $\alpha$  adalah konstanta atenuasi. Dari persamaan ini menunjukkan bahwa ketika  $x$  meningkat, maka besarnya dari  $\Delta E_x$  dan  $\Delta I_x$  mundur secara eksponensial, pada gambar 2.9 dibawah ini menunjukkan jenis atau tipe kurva yang mungkin bisa dihasilkan dengan jalur pemipaan yang di-*coating* dengan baik (garis penuh) dan jalur pemipaan yang di-*coating* kurang baik (garis putus-putus).



**Gambar 2.10** Teoritis Distribusi Potensial Pipa/Tanah pada Jalur yang Tak Hingga [1]

Konstanta atenuasi didefinisikan dengan

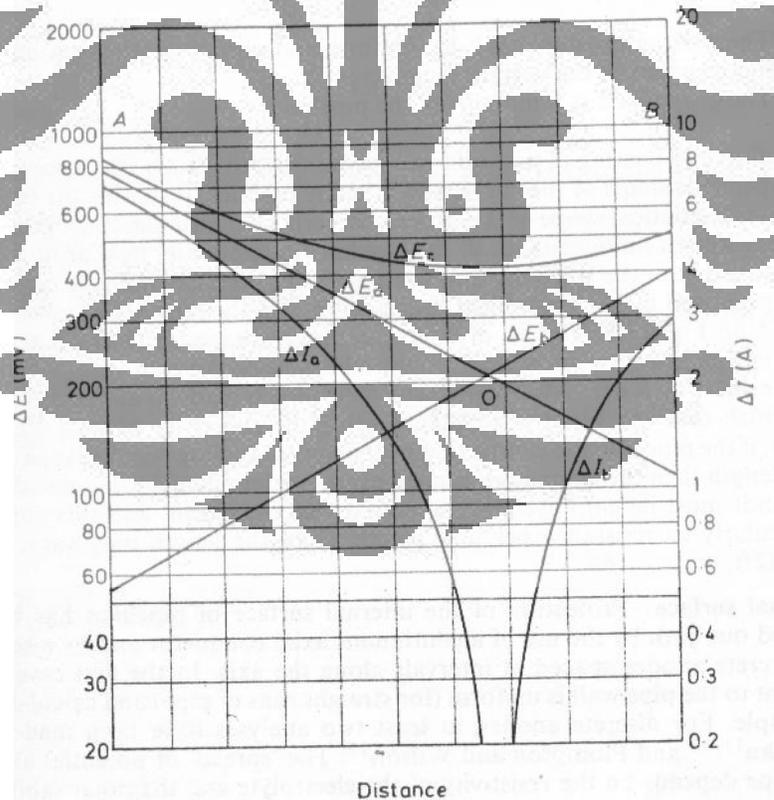
$$\alpha = \frac{R_S}{R_K} \quad (2.15)$$

Dimana  $R_S$  adalah resistansi longitudinal pipa ( $\Omega$ -satuan panjang), yang dapat dihitung dari resistivitas khusus (*specific resistivity*) dari baja atau besi dan dengan memperhatikan jalur pemipaian sebagai silinder *annular* (berbentuk seperti gelang) dan  $R_K$  karakteristik resistansi dari jalur dan diberikan dengan:

$$R_K = (R_S R_L)^{1/2} \quad (2.16)$$

Dimana  $R_L$  adalah kebocoran resistansi untuk tanah yang jauh dari jalur pemipaian ( $\Omega$ -satuan panjang) pada titik pengaliran dan  $R_L = \Delta E_o / \Delta I_o$

### 2.2.2 Jalur Pemipaian yang Panjangnya Hingga (Tertentu) yang Diproteksi oleh Dua atau Lebih Titik Pengaliran (*Drainage Points*)



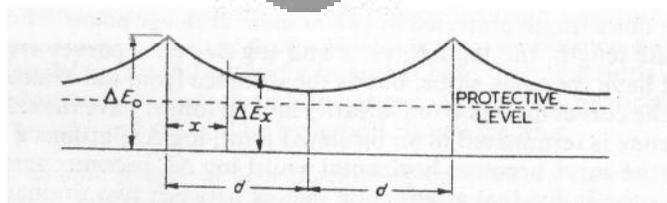
**Gambar 2.11** Kurva Atenuasi antara Dua Titik Pengaliran [1]

Untuk jalur pemipaan yang panjangnya tertentu,  $\log \Delta E_x$  vs  $x$  dan  $\Delta I_x$  vs  $x$ , kurva awalnya linear dan memiliki kemiringan yang sama, tetapi ketika jarak dari titik pengaliran semakin meningkat kurva menyimpang dari linear nya dan tidak lagi memiliki kemiringan yang sama. Jika jalur pemipaan berhenti atau putus pada sambungan yang terisolasi (*joint insulated*) atau disekat,  $\log \Delta E_x$  mencapai nilai yang konstan dan kurva menjadi horizontal sedangkan  $\log \Delta I_x$  menjadi nol. Gambar 2.11 menunjukkan masing-masing kurva atenuasi antara dua titik pengaliran A dan B. dan dari gambar ini dapat terlihat bahwa  $\log \Delta E_a$  vs  $x$  dan  $\log \Delta E_b$  vs  $x$  keduanya linear dan berpotongan di titik O, pada yang potensialnya mencapai nilai negatif terkecilnya, dan garis arusnya menjadi nol.

Jika sambuangan yang tersekat atau *insulated joint* disisipkan pada titik O hal ini tidak akan berdampak pada kurva atenuasi. Hal ini juga dapat dilihat pada kurva  $\Delta E_x$  dan  $\Delta I_x$  vs jarak memiliki kemiringan yang berbeda, sedangkan pada pipa yang panjangnya tidak tertentu memiliki kemiringan yang sama.

Perubahan potensial masing-masing yang dihasilkan oleh dua titik pengaliran A dan B dapat dikombinasikan untuk mendapatkan kurva  $\log \log \Delta E_c$  vs  $x$ , yang memberikan petunjuk perubahan potensial yang terjadi pada pelaksanaannya.

Pada gambar 2.11 bagian garis yang panjangnya  $2d$  yang berada diantara titik pengaliran vertikal potensial dan arus dapat dievaluasi dari dua persamaan simultan yang terbentuk seperti yang ditunjukkan pada persamaan 2.17 dan 2.18



**Gambar 2.12** Teoritis Distribusi Potensial Pipa/Tanah pada Jalur Pemipaan dengan Stasiun atau Titik Pengalirannya yang berjarak  $2d$  [1]

$$\Delta E_x = \Delta E_o \cosh \alpha (d-x) / \cosh \alpha d \quad (2.17)$$

$$\Delta I_x = \Delta I_x \sinh \alpha (d-x) / \sinh \alpha d \quad (2.18)$$

Atau persamaan 2.17 diatas dapat disederhanakan dengan pendekatan yang bentuknya sederhana menjadi

$$\Delta E_x \approx \Delta E_o \cosh (d-x) \quad (2.19)$$

Persamaan 2.17 dan 2.118 digunakan untuk menggambarkan kurva atenuasi pada gambar 2.10 dan mempresentasikan keadaan sebenarnya pada gambar 2.11

Persamaan ini valid hanya ketika:

1. Resistansi *Coating* tinggi, seragam dan *Ohmic* misalkan resistansi tidak bergantung dari *drop* atau turunnya tegangan yang melintas
2. *Groundbed* jauh dari jalur pemipaan

Pengaruh dari *coating* yang resistansinya tidak seragam adalah mendistorsikan bentuk kurva menjadi eksponensial atau hiperbolik, dan sering kali dalam pelaksanaannya bentuk kurva nya secara matematis sulit atau hampir tidak bisa diperkirakan. Dan jika *groundbed* berada dalam jarak tertentu (dekat) dari jalur pemipaan, medan atau daerah potensial (*field potensial*) memotong jalur pemipaan dan potensial pipa/tanah menjadi lebih negatif dari yang diprediksi menurut persamaan secara teoritis, menghasilkan jenis kurva (yang berupa garis putus-putus) seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.9. Hal ini tentu tidak menguntungkan, karena distribusi potensial menjadi kurang seragam daripada yang semestinya.

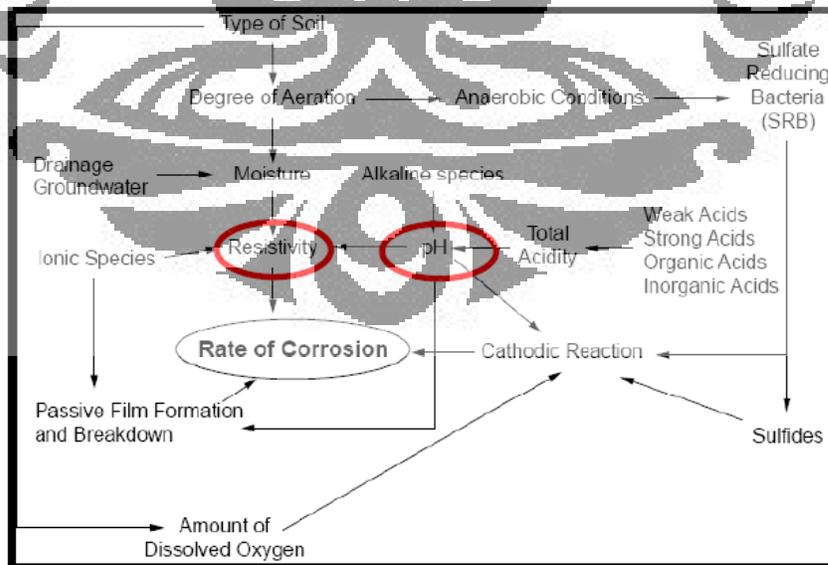
Nilai R bergantung kepada apakah pipa dibuat dari abaja yang semuanya dilas (*all-welded steel*) yang dalam kasus ini nilai resistansi menggunakan resistivity dari *mild steel*; tetapi jika pipa dibuat dengan disambung dengan menggunakan ikatan kawat (*bonding wire*) antara setiap panjang pipanya maka rata-rata resistansi tiap panjang meter termasuk ikatan-ikatannya harus diperhitungkan. Semua satuan harus konsisten, satuan ini diaplikasikan dalam bentuk resistensi per satuan panjang yang satuannya itu bervariasi seperti,  $\Omega m$ ,  $\Omega ft$ , dll.

### 2.3 Korosivitas Tanah

Salah satu variabel penentu agar kita dapat mencegah dan mengontrol terjadinya korosi adalah resistivitas tanah. Hal ini ditunjukkan pada gambar *Handbook of Corrosion* bahwa semua variabel akan mengerucut pada variabel yang berperan besar dalam menentukan korosivitas tanah, yaitu penentuan laju korosi. Tingkat korosivitas tanah mengacu pada nilai dari resistivitas tanah dengan variabel pengikut yang mempengaruhi resistivitasnya seperti pH, kelembaban, *ion species*, jenis-jenis alkalin dan total keasaman.

Korosivitas tanah berpengaruh terhadap komponen logam atau material yang berada didalamnya, termasuk jaringan pipa. Pipa yang terkorosi dapat disebabkan karena lingkungannya yang korosif. Untuk itu, sebelum dilakukan instalasi jaringan pipa harus kita ketahui karakteristik lingkungan termasuk kondisi tanah dimana pipa itu ditanamkan.

Seberapa besar tingkat korosivitas tanah dapat dilakukan dengan 2 cara yaitu: dengan melihat besarnya resistivitas atau tahanan listrik dalam tanah dan potensial redoks tanah



**Gambar 2.12** Variabel yang Mempengaruhi Korosivitas Dalam Tanah [5]

### 2.2.1 Resistivitas Tanah

Resistifitas tanah adalah besarnya karakteristik tanah sebagai media elektrolit untuk menghantarkan arus listrik yang menyebabkan terjadinya korosi. Telah diketahui bahwa tingkat korosifitas tanah akan meningkat saat arus yang mengalir meningkat yang menyebabkan nilai resistifitas dari tanah menurun. Nilai resistifitas sangat dipengaruhi oleh kandungan air baik dalam bentuk uap air atau cairan didalam tanah.

Resistifitas tanah adalah faktor terpenting dalam mengukur tingkat korosifitas tanah. Setiap tanah memiliki tingkat korosif yang berbeda dengan tanah yang lain karena nilai resistifitasnya yang berbeda. Tanah berpasir (*sandy soil*) memiliki korosifitas yang rendah akibat nilai resistifitasnya tinggi sedangkan tanah liat (*clay*) memiliki korosifitas yang tinggi akibat nilai resistifitasnya rendah. Tinggi dan rendahnya korosifitas tanah ini memiliki range nilai yang dapat dilihat sebagai berikut :

**Tabel 2.1** Tingkat Korosivitas Tanah dari Pengaruh Resisitivity Tanah [5]

Resistivity Tanah (ohm.m)	Tingkat Korosivitas	
> 200	Tidak Korosif	0
100 - 200	Korosif Rendah	1
50 - 100	Korosif Rendah	2
30 - 50	Korosif	3
10 - 30	Sangat Korosif	4

Pada umumnya, kebanyakan tanah dan batuan mineral memiliki resistivitas yang tinggi. Arus listrik mengalir melalui uap air (kelembaban) yang mengisi celah-celah didalam pori tanah dan pasir dan melalui retakan tanah dan batuan. Oleh karena itu nilai resistifitas tanah dan batuan sangat dipengaruhi oleh pori tanah, jarak pori, retakan, komposisi dan konsentrasi kimia dari uap air dan temperatur. Tanah dapat dibedakan dari air dan batuan berdasarkan nilai resistivitas.

**Tabel 2.2** Klasifikasi Tanah, Air Dan Batuan Secara Kasar Berdasarkan Nilai Resistifitas [5]

<b>Reoginal Resistivitas Tanah</b>	<b>Resistivitas (Ohm.m)</b>
Tanah Basah	50 – 200
Tanah Kering	100 – 200
Tanah Gersang	200 – 1000 atau lebih
<b>Air</b>	
Air Tanah	1- 10
Air Hujan	30 – 1000
Air Laut	± 0.2
Air Es	105 – 108
<b>Jenis Batuan dibawah Tabel Air</b>	
Batuan beku perapian dan metamorpik	100 – 10.000
<i>Consolidated sediments</i>	10 – 100
<i>Unconsolidated sediment</i>	1 – 10

Pada tabel 2. 2 dapat dilihat bahwa tanah basah (*wet region*) memiliki resistifitas yang rendah. Tanah basah terletak dipermukaan bumi, seperti halnya, tanah lempung atau tanah liat. Nilai resistifitas yang rendah dari tanah basah dikarenakan kandungan uap air dan mineral yang ada pada tanah basah. Sedangkan tanah kering dan tandus (*dry dan arid region*) memiliki resistifitas yang tinggi. Nilai resistifitas yang rendah dari tanah basah dikarenakan kandungan uap air dan mineral yang ada di tanah basah.

Kemampuan tahanan (*resistance*) tanah dipermukaan bumi sebagai media elektrolit yang dapat diwakili oleh resistifitas tanah, dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu, kelembaban, temperatur tanah, kelarutan garam (*dissolved salt*), kandungan mineral atau kimia didalam tanah, keadaan tanah dan kedalaman tanah. Pengukuran resistifitas tanah pada daerah tertentu bertujuan untuk mengetahui seberapa besar tahanan yang dapat dihasilkan dan dijaga agar biaya pengeluaran dari penginstalasi benda kerja diupayakan serendah mungkin.

Resistifitas tanah memiliki nilai yang beraneka ragam tergantung dari jenis tanahnya sendiri, misalnya daerah endapan lumpur berbeda dengan daerah pinggiran sungai serta tanah kering berbeda dengan tanah berbatu granit di pegunungan. Perbedaan nilai resistifitas ini dipengaruhi oleh beberapa faktor akan tetapi faktor yang paling mempengaruhi adalah kandungan uap air atau kelembaban. Faktor-faktor yang dimaksud, yaitu :

**a. Kandungan uap air atau kelembaban**

Daerah dengan kelembaban tinggi dapat menyebabkan nilai resistifitas tanah suatu daerah akan kecil sehingga daerah itu memiliki tingkat korosi yang tinggi. Hal ini disebabkan uap air adalah salah satu pemicu atau media elektrolit dalam peristiwa korosi dan uap air dalam jumlah banyak berakibat daerah itu sangat rentan akan korosi. Fungsi uap air ( $H_2O$ ) adalah media elektrolit yang dapat mengalirkan elektron. Sudah dijelaskan diatas bahwa peristiwa korosi memerlukan media elektrolit dan uap air dengan jumlah banyak akan memperbanyak jumlah media elektrolitnya sehingga mempercepat korosi. Dengan jumlah uap air yang banyak maka semakin banyak pula elektron sehingga peristiwa korosi semakin sering. Dibawah ini adalah nilai resistifitas pada berbagai kondisi jenis tanah.

**Tabel 2.3** Nilai Resistivitas Tanah Berdasarkan Kelembaban Tanah [6]

Kandungan Uap Air (% berat diatmosfer)	Nilai Resistivitas (Ohm-meter)
--	--------------------------------

Permukaan		Sandy Loam
0	>107	>107
2.5	2.500	1.500
5	1.650	430
10	530	185
15	190	105
20	240	63
30	64	42

### b. Temperatur atau Suhu Lingkungan

Nilai resistifitas tanah juga dipengaruhi oleh temperatur lingkungan. Jika temperatur lingkungan tanah tinggi maka nilai resistifitas tanah tersebut rendah sebaliknya jika temperatur lingkungan tanah rendah maka nilai resistifitas tanah tinggi. Saat temperatur naik, air akan menguap. Jika temperatur lingkungan terus menerus meningkat maka semua air akan menjadi uap air. Seiring meningkatnya temperatur dipermukaan tanah maka akan meningkatkan tekanan sehingga terjadi perbedaan tekanan antara permukaan tanah dan atmosfer udara sehingga uap air akan mengalir dari permukaan tanah yang bertekanan tinggi menuju atmosfer (awan) yang bertekanan rendah. Kenaikan temperatur yang sangat ekstrim seperti halnya gurun pasir akan mengakibatkan uap air akan terus menerus naik ke awan dan tidak turun ke bawah permukaan bumi lagi. Oleh karena itu, dilingkungan dengan temperatur yang sangat tinggi, jarang ada bahkan tidak ada uap air atau kandungan air dipermukaan tanah yang mengakibatkan nilai resistifitas meningkat. Dibawah ini adalah berbagai nilai resistifitas berbagai kondisi temperatur pada tanah lempung berpasir dengan kandungan uap air 15,2% uap air.

**Tabel 2.4** Nilai Resistivitas Tanah Berdasarkan Perubahan Temperatur [6]

Temperatur	Resistivitas (Ohm-meter)

°C		°F
20	68	72
10	50	90
0 (air)	32 (air)	138
0 (es)	32 (es)	300
- 5	23	790
- 15	14	3300

### c. Kandungan garam

Kandungan garam bisa bermacam-macam, misalnya, tembaga/copper sulfat ( $\text{CuSO}_4$ ), sodium karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) dan lain-lain. Ion-ion yang ada dalam garam berperan penting sebagai alat transportasi elektron. Kandungan ion berpengaruh besar untuk resistifitas. Jika semakin banyak kandungan garam maka semakin banyak pula alat transportasi untuk menghantarkan elektron. Saat semakin banyak elektron karena alat transportasinya semakin banyak yang dapat dihantarkan mengakibatkan semakin memudahkan elektron bergerak dalam arus listrik.

### d. Komposisi dan konsentrasi kimia/ mineral terlarut.

Dibawah ini adalah pembagian material berdasarkan resistivity :

**Tabel 2.5** Nilai Resistivitas mineral didalam tanah [5]

Material	Resistivitas (ohm-meter) pada 20o C
Silver	$1.63 \times 10^{-8}$
Copper, annealed	$1.72 \times 10^{-8}$
Copper, hard drawn	$1.77 \times 10^{-8}$
Gold,pure	$2.44 \times 10^{-8}$
Aluminium	$2.82 \times 10^{-8}$
Zinc	$5.68 \times 10^{-8}$
Brass	$7.14 \times 10^{-8}$

Iron, pure	1.00 x 10 <sup>-7</sup>
Tin	1.15 x 10 <sup>-7</sup>
Lead	2.20 x 10 <sup>-7</sup>
Steel, Structural	3.00 x 10 <sup>-7</sup>
Constantan	4.90 x 10 <sup>-7</sup>
Mercury	9.62 x 10 <sup>-7</sup>
Carbon	3.00 x 10 <sup>-5</sup>
Sea Water	0.22

#### e. Potensial Reduksi-Oksidasi

Potensial redoks adalah beda potensial dari potensial reduksi dan oksidasi dalam korosi. Potensial redoks berhubungan dengan derajat aerasi didalam tanah. Hal ini dikarenakan oksigen berperan penting dalam reaksi reduksi di katoda. Nilai potensial redoks yang tinggi menunjukkan derajat aerasi tinggi atau kandungan oksigen didalam tanah tinggi.

#### f. Kandungan Garam

Ada beberapa kandungan garam-garaman yang mempengaruhi tingkat korosifitas tanah seperti ion klorida dan ion sulfat. Ion klorida sangat berbahaya dalam peristiwa korosi sebab klorida dapat mempercepat korosi pada logam. Kehadiran ion klorida akan mempengaruhi nilai resistifitas menjadi lebih kecil.

Ion klorida didalam tanah berasal dari air di dalam tanah (*groundwater*) dan aliran air laut yang merembes ke dalam tanah dan ke lingkungan air tawar baik dipermukaan atau di dalam tanah. Ion klorida juga bisa berasal dari industri pertanian, kendaraan bermotor dan lain-lain. Kandungan sulfat juga tidak kalah berpengaruhnya dengan ion klorida. Kandungan sulfat bisa berasal bakteri anaerob SRB yang menghasilkan sulfide di lingkungan sekitarnya.

#### g. Mikroorganisme [7]

Bakteri secara garis besar digolongkan menjadi dua golongan yaitu bakteri aerob dan anerob.

- Bakteri Aerob artinya bakteri tersebut membutuhkan oksigen untuk hidup

- Bakteri Anaerob artinya bila ada oksigen bakteri tersebut akan mati, namun akan tumbuh subur dan gemuk bila kandungan oksigen di lingkungannya sangat kecil.

Sedangkan hubungannya dengan istilah pengoksidasi dan pereduksi di atas, maka bakteri pengoksidasi sulfat adalah bakteri aerob, sedangkan bakteri pereduksi sulfat adalah bakteri anaerob. SRB (*Sulphate Reduction Bacteria*) termasuk dalam golongan bakteri anaerob.

### **Mekanisme Korosi akibat adanya Bakteri SRB**

Besi dan baja karbon biasanya mempunyai laju korosi yang rendah dalam air netral terdeaerasi (oksigen tidak ada) dan di dalam larutan garam karena hanya terjadi reaksi reduksi katodik :



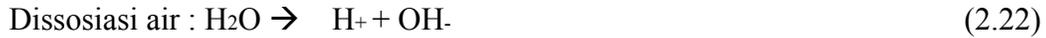
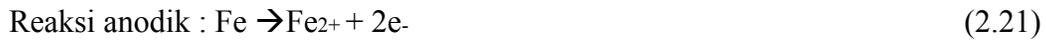
Bakteri anaerob pereduksi sulfat (*sulphate reducing bacteria* / SRB) akan menyebabkan korosi pada struktur baja yang ditimbun dalam tanah, dengan pembentukan lapisan tak protektif seperti FeS dan Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.H<sub>2</sub>O, bila SRB pada awalnya tidak aktif. Bila SRB aktif sejak awal, maka produk korosi yang terbentuk adalah FeS dan sedikit FeCO<sub>3</sub>, pada pH 7.

Mikroba ini menyebabkan terjadinya proses korosi dengan bentuk serangan korosi merata, sumuran, ataupun sel konsentrasi. Mekanisma korosi oleh bakteri dapat dikelompokkan dalam proses-proses berikut :

1. Memproduksi sel aerasi diferensial.
2. Memproduksi metabolit korosif.

Interferensi terhadap proses katodik dalam kondisi bebas oksigen. Mekanisme korosi oleh SRB dikemukakan oleh banyak ahli antara lain oleh *Kuhr* dan *Vlugt*, *Sharpley*, *Dexter*, *Booth* dan *Tiller* dan sebagainya. *Kuhr* dan *Vlugt* menyebutkan bahwa korosi oleh SRB dalam lingkungan anaerob dan netral[8], reaksi katodiknya tidak mungkin berupa reduksi O<sub>2</sub> ataupun reduksi H<sup>+</sup>. Namun serangan korosi yang terjadi bisa sangat parah, berarti ada reaksi katodik lain yang berlangsung, yang melibatkan SRB.

*Kuhr* dan *Vlugt* menyatakan bahwa SRB menggunakan hidrogen katodik untuk reduksi dissimilasi sulfat menurut reaksi sebagai berikut :



Depolarisasi Katodik oleh Bakteri Pereduksi Sulfat :



Produk Korosi :



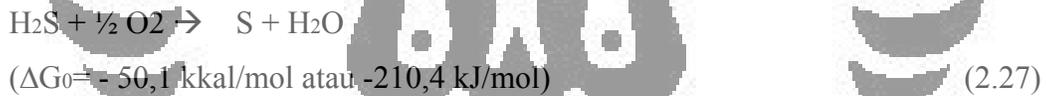
Reaksi Keseluruhan :



Salah satu spesies pendukung korosivitas SRB adalah bakteri besi berfilamen. Organisme ini mengoksidasi besi yang terlarut di dalam larutan menjadi *ferric hydrate* yang tak larut yang membentuk sarung yang menutupi sel-sel dan memproduksi semacam batang yang berbentuk filamen.

### **Siklus Sulfur**

Reaksi:



Dilakukan oleh mikroorganisme mikroaerofilik *Beggiatoa*, *Thioploca*, *Thiothrix*

Ciri khas mikroorganisme ini merupakan mikroorganisme gradien, yaitu hidup pada daerah antara (*interface*) lingkungan anaerob, sedimen, dan air yang mengandung oksigen.

Unsur S kemudian dapat mengalami oksidasi:

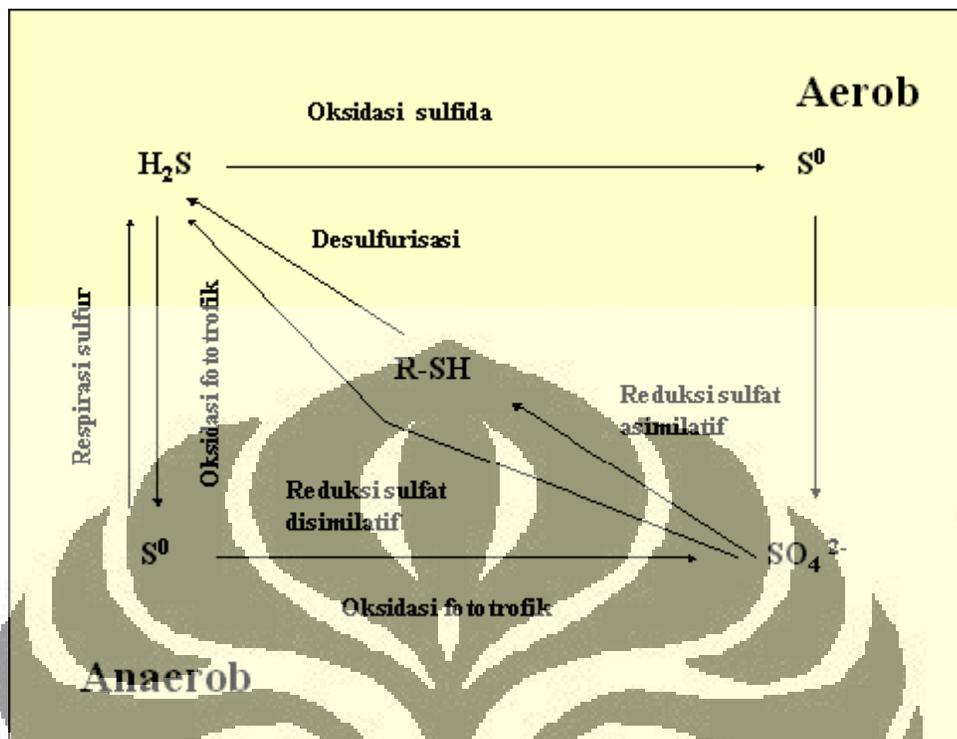


Mikroorganisme yg berperan: genus *Thiobacillus*

Oksidasi H<sub>2</sub>S Fototrofik:



Mikroorganisme yg berperan: *Chromatiaceae*, *Ectothiorhodospiraceae*



Gambar 2.13 Oksidasi Sulfida []

### Reduksi Sulfur

Unsur S dapat digunakan oleh sejumlah mikroorganisme untuk respirasi, misal oleh *Desulfuromonas acetoxidans*



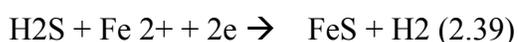
$$(\Delta G = -5,7 \text{ kkal/mol} = -23,9 \text{ kJ/mol}) \quad (2.36)$$

Bakteri lain yg dpt menggunakan S untuk respirasi: *Thermoproteus*, *Pyrobaculum*, *Pyrodictium*

### Interaksi siklus S & Fe

Salah satu implikasi dari siklus S adalah peristiwa korosi pada pipa-pipa besi yang diletakkan di tanah yang mengandung S

Reaksi:



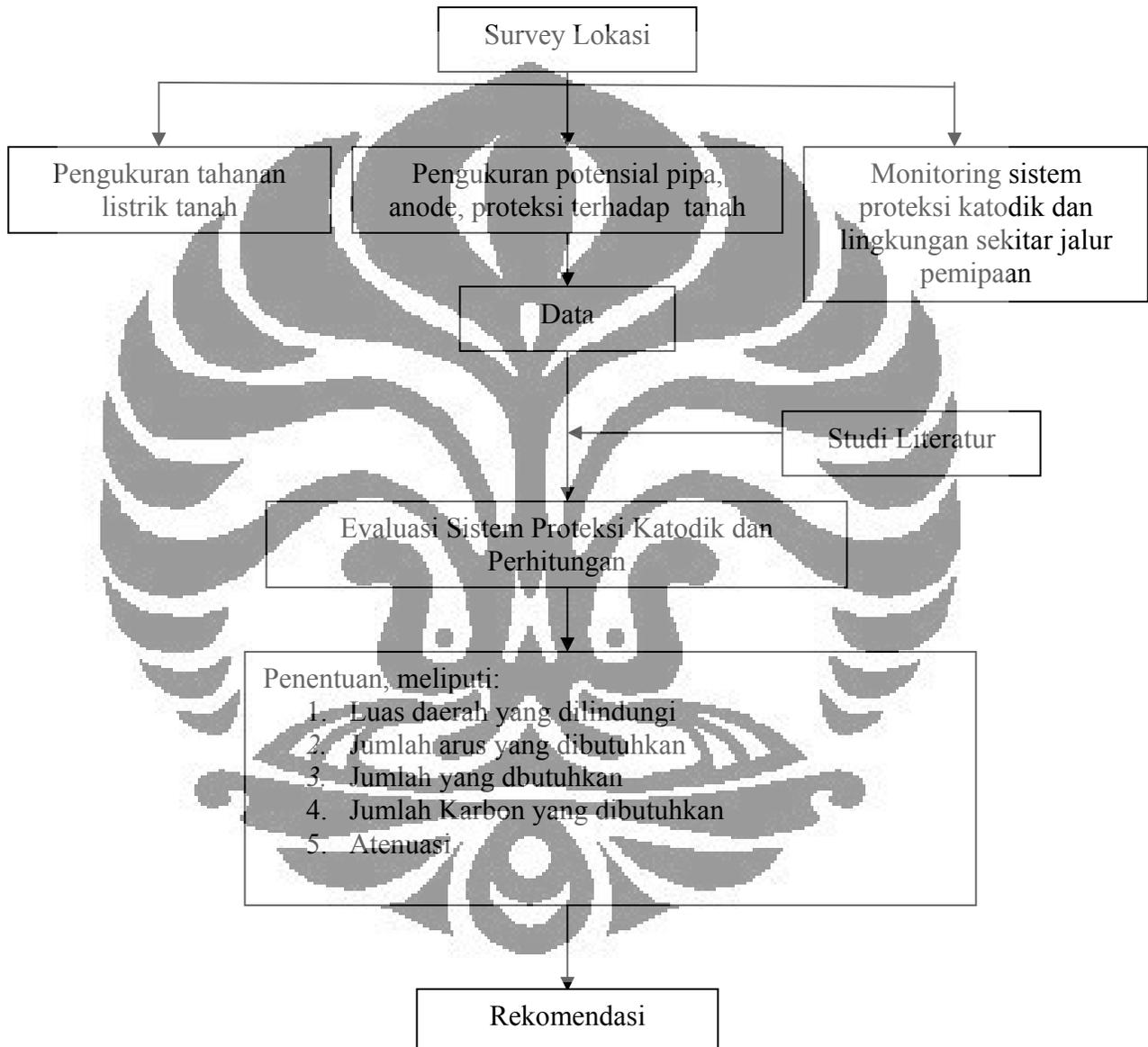
**Tabel 2.6** Pengaruh Klorida, Sulfur dan pH pada Korosi Jaringan Pipa yang ditanam[6]

<b>Concentration</b>	<b>Degree of corrosivity</b>
<b>Chloride</b>	
>5,000	Severe
1,500-5000	Considerable
500-1.500	Corrosive
<500	Threshold
<b>Sulphate</b>	
>10.000	Severe
1.500-10.000	Considerable
150-1.500	Positive
0-150	Negligible
<b>pH</b>	
<5.5	Severe
5.5-6.5	Moderate
6.5-7.5	Netral
>7.5	None(alkaline)

## BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Diagram Alir Penelitian

Berikut ini diagram alir yang menggambarkan kegiatan penelitian



### 3.2 Prosedur Penelitian

Penelitian dilakukan diawali dengan melakukan survey terhadap kondisi lokasi dimana struktur yang diproteksi ditempatkan dengan melakukan pengukuran *soil resistivity*, potensial anode, pipa terhadap tanah, dan proteksi pipa serta yang terakhir adalah monitoring lokasi sekitar struktur yang akan diproteksi.

#### 3.2.1 Pengukuran *Soil Resistivity* (Resistivitas Tanah)

Pengujian resistivitas tanah berdasarkan ASTM G57

Terdapat dua cara pengujian yaitu di lapangan dengan menggunakan wenner four pin dan dilaboratorium dengan soil box

##### 1. Pengujian Lapangan

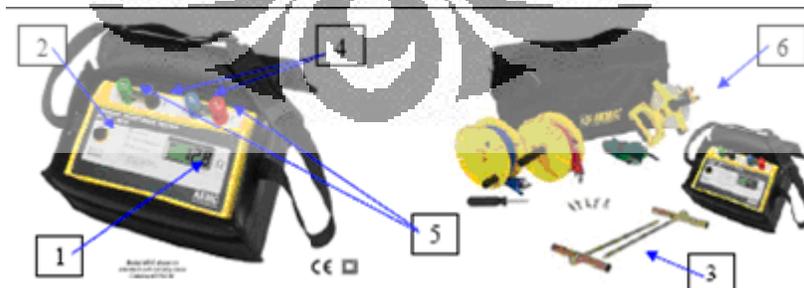
Pengujian resistivitas di lapangan menggunakan Wenner four pin metode dengan menggunakan mesin resistivitas AEMC 4610. Standard yang digunakan untuk wenner four pin metode adalah ASTM G-57.

##### Persiapan Sampel :

- Pilih dan tuliskan koordinat tanah yang akan diukur berdasarkan garis lintang dan bujur atau UTM
- Ukur titik jarak antar pin (a) sepanjang 1m menggunakan meteran
- Tancapkan pin dengan jarak antar pin 1m ( $a = 1$ ). Setelah dilakukan pengukuran 1meter maka dilanjutkan dengan pengukuran 2m, 3m dan 4m

##### Pengujian Sampel :

- Sambungkan kabel C1, C2, P1, dan P2 di alat pengukur resistivitas dengan tiang pin



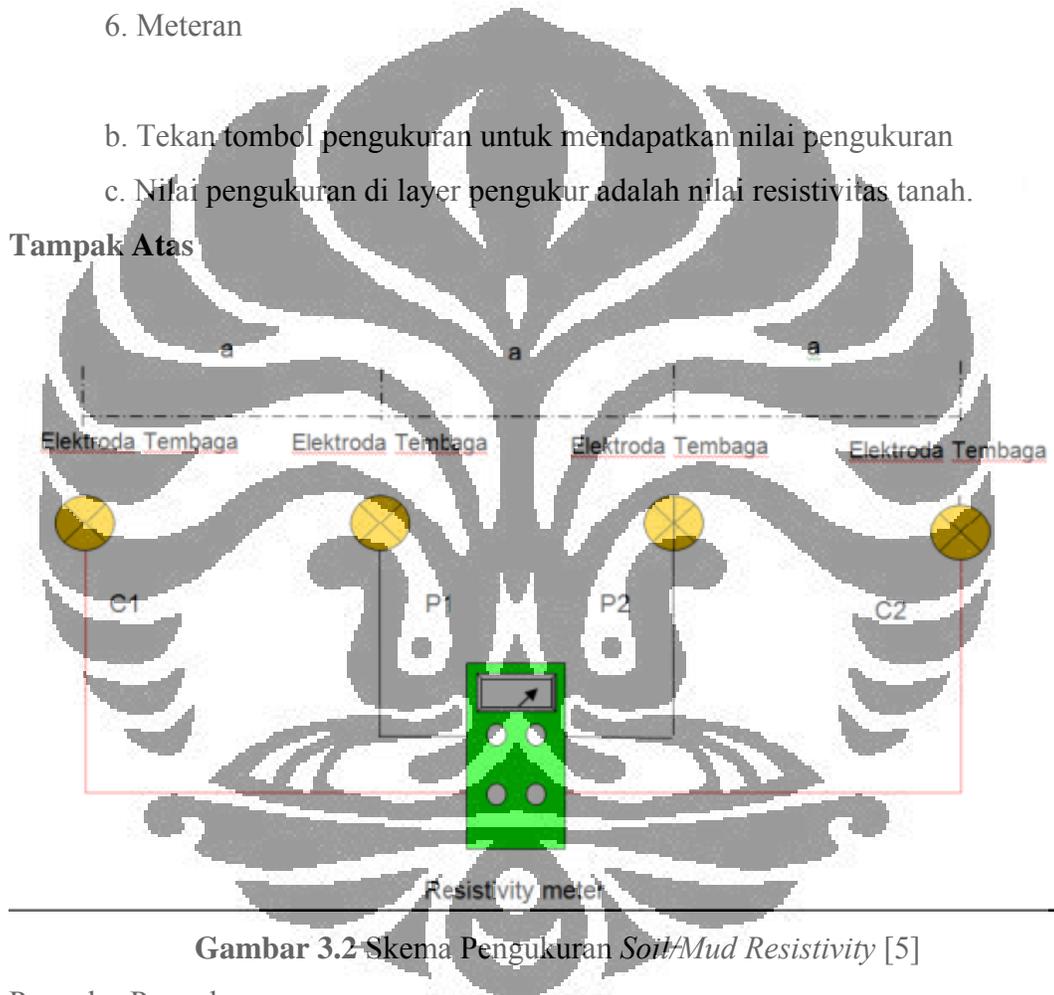
**Gambar 3.1** Mesin Pengukur Resistivitas AEMC Tanah

Keterangan:

1. Layar pengukur
2. Tombol pengukur
3. Pin Cu (c1 dan c2)
4. Pin Terdalam (p1 dan p2)
5. Pin terluar
6. Meteran

- b. Tekan tombol pengukuran untuk mendapatkan nilai pengukuran
- c. Nilai pengukuran di layar pengukur adalah nilai resistivitas tanah.

Tampak Atas



Gambar 3.2 Skema Pengukuran Soil/Mud Resistivity [5]

Prosedur Pengukuran:

- a. Kondisi baterai Resistivity meter diperiksa
- b. Empat elektroda tembaga masing-masing ditancapkan di tanah dengan jarak 100 cm
- c. Masing-masing elektroda tembaga dihubungkan dengan terminal Resistivity meter yaitu : C1,P1 dan C2,P2

- d. Jarum Galvanometer diatur dengan potensio meter hingga ke posisi nol
- e. Nilai tahanan yang terukur pada Resistivity meter (R) ( $\Omega$ ) dicatat
- f. Perhitungan Nilai Resistivity:

$$\rho = 2\pi aR (\Omega\text{cm})$$

a = jarak antar elektroda (cm)

## 2. Pengujian laboratorium

Pengujian resistivitas di laboratorium menggunakan soil box methode dengan menggunakan mesin resistivitas AASHTO T 288. Standard yang digunakan untuk alat soil box adalah ASTM G-57. Cara kerja pengujian resistivitas laboratorium adalah :

### Persiapan Sampel :

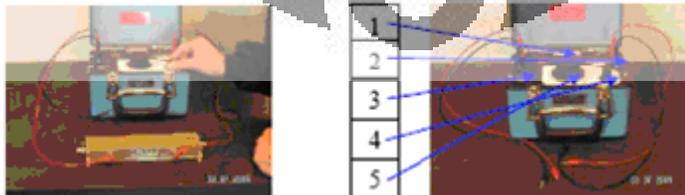
- o. Masukkan sampel tanah kedalam soil box dan ratakan sampel. Hal ini bisa dilihat pada gambar dibawah ini



**Gambar 3.3** Persiapan Sample Dengan Metode Soil Box

### Prosedur pengujian :

- a. Sambungkan kabel C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, P<sub>1</sub>, dan P<sub>2</sub> di alat pengukur resistivitas dengan soil box seperti pada gambar dibawah.



**Gambar 3.4** Pengujian Resistivitas Tanah dengan metode soil box

Keterangan:

- 1. Layar Pengukuran

2. Tombol pengecekan Baterai
3. Tombol sensitivitas
4. Tombol Skala Ukur
5. Tombol Nilai Pengukuran

b. Lakukan pengecekan baterai. Baterai harus dalam keadaan terisi penuh

c. Tentukan sensitivitas. Untuk pengujian laboratorium gunakanlah low sensitivitas.

d. Putar tombol skala pengukuran dengan skala pengukuran yang diinginkan

e. Putar tombol nilai pengukuran hingga garis nilai dilayar pengukuran sejajar dengan garis merah.

f. Lihat nilai pengujian dan kalikan dengan nilai skala yang digunakan.

Dengan jenis alat yang berbeda memiliki karakteristik yang berbeda pula.

### 3.2.2 Pengukuran Potensial Pipa, Anoda dan Proteksi

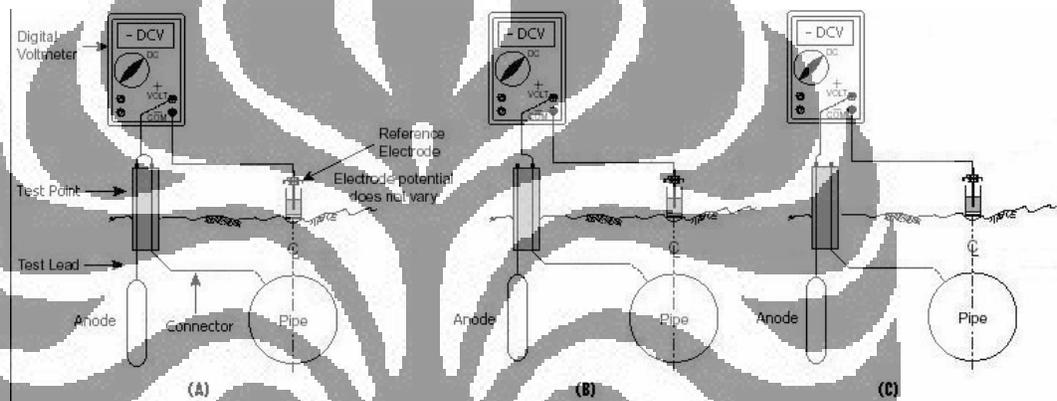
Untuk pipa yang dilindungi oleh proteksi katodik, arus mengalir menuju pipa untuk melindungi pipa dari lingkungan akan menyebabkan perubahan potensial. Hambatan antara pipa dan lingkungan termasuk hambatan *coating* pipa.

Sebagai hasilnya potensial pipa akan lebih negatif terhadap lingkungan. Jika area katodik pada pipa dipolarisasikan terhadap potensial dari daerah anodik maka korosi dapat dihindari. Berdasarkan konsep tersebut, potensial seharusnya diukur tepat pada *interface* antara pipa dan lingkungan. Bagaimanapun hal tersebut akan sulit diaplikasikan untuk pipa yang berada pada tanah. Pada prakteknya pengukuran potensial pipa dilakukan antara pipa dengan permukaan tanah yang berada tepat di atas pipa.

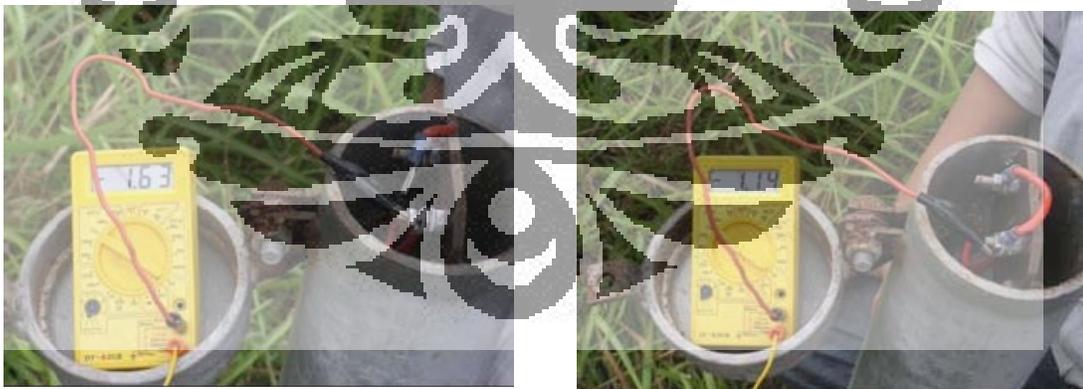
Pengukuran potensil pipa biasanya dilakukan dengan membandingkan dengan elektroda *Copper Sulfate*. Pengukuran potensial pipa terhadap lingkungan dilakukan dengan membandingkan pipa dengan lingkungan sekitar pipa yang diukur. Berdasarkan teori, potensial proteksi pipa diharapkan bernilai  $-0.85V$  yang diukur dengan elektroda *Copper Sulfate* terhadap lingkungan yang berdekatan dengan daerah anodik. Pada pelaksanaannya, sulit untuk melakukan pengukuran pada daerah

tersebut, sehingga elektroda ditempatkan pada permukaan tanah di atas pipa. Oleh karena penurunan potensial antara permukaan tanah dan pipa maka potensial proteksi pipa setidaknya bernilai  $-0.85\text{V}$  untuk pengukuran pada kondisi tersebut.

Selain melakukan pengukuran terhadap potensial proteksi, juga dilakukan pengukuran potensial anoda dan potensial pipa. Ilustrasi ketiga pengukuran tersebut diperlihatkan pada gambar dan pelaksanaan dilapangan diperlihatkan pada gambar



**Gambar 3.5** Prinsip Pengukuran Potensial (a) Proteksi (b) Pipa (c) Anoda Korban[2]



(a)

(b)



(c)

**Gambar 3.6** Pengukuran Potensial (a) Anoda Korban (b) Proteksi (c) Pipa [8]

### 3.2.4 Monitoring Performa Sistem Proteksi Katodik pada Struktur Jalur Pipa Terpendam

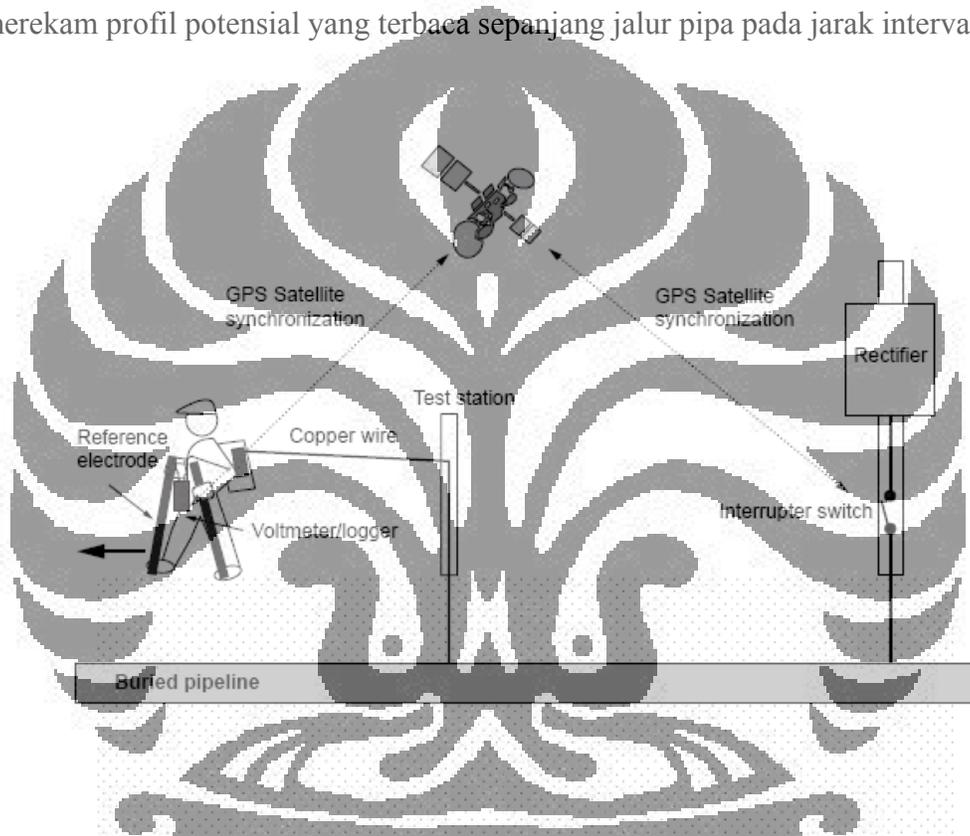
Monitoring proteksi katodik, dapat diidentifikasi dua area utama secara garis besar. Pertama, kondisi dan performa perangkat keras system proteksi katodik. Monitoring dilakukan pada *output rectifier*, pengukuran potensial *pipe-to-soil* dan pengukuran arus pada anoda terpendam tanah, inspeksi terhadap *bonds*, *fuses*, *insulator*, *test point* dan peralatan lainnya. Sementara pembahasan kedua adalah mengenai kondisi dari jalur pipa tersebut dan lebih banyak berhubungan dengan survey sepanjang jalur perpipaan untuk *assessment* kondisi pipa tersebut dan identifikasi area – area yang beresiko terhadap korosi.



**Gambar 3.7** Contoh tipe Test – Point [8]

### a. *Close Interval Potential Survey*

*Close Interval Potential Survey* (CIPS) merujuk pada pengukuran potensial struktur sepanjang jalur terbenam untuk *assessment* terhadap performa sistem proteksi katodik dan kondisi jalur perpipaan yang terproteksi. Potensial pipa terbenam umumnya dapat diukur melalui test point pada gambar 3.7. Prinsipnya, CIPS merekam profil potensial yang terbaca sepanjang jalur pipa pada jarak interval 1 m.

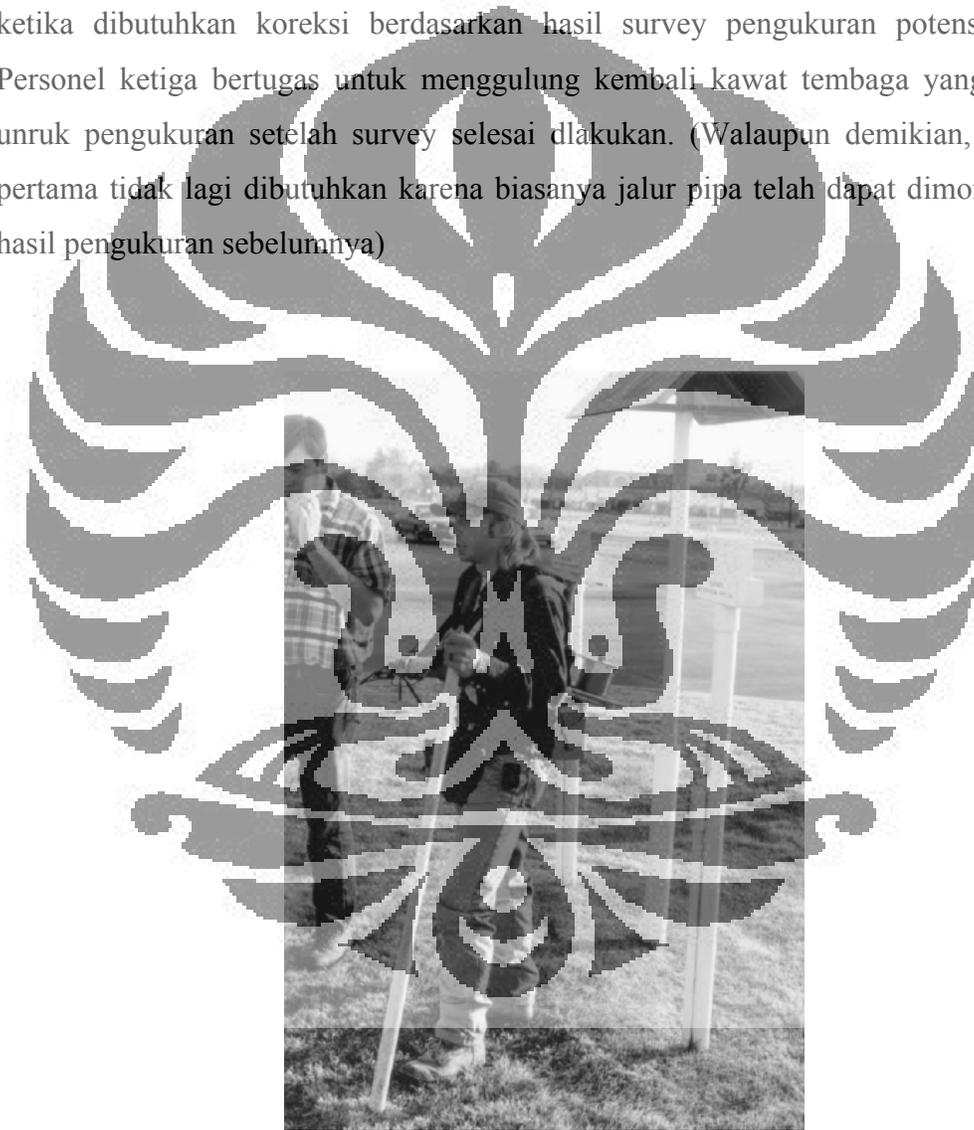


**Gambar 3.8** Ilustrasi Metodologi CIPS. [2]

#### **Metodologi.**

Dalam prinsipnya, pengukuran dengan metode CIPS relatif praktis. Elektroda standar dihubungkan dengan struktur pipa terpendam melalui test poin, dan elektroda standar ini diposisikan pada tanah melintasi sepanjang pipa dengan interval tetap (sekitar 1 m) untuk pengukuran perbedaan potensial antara elektroda standar dengan struktur pipa. Dalam prakteknya personel sebanyak tiga orang dibutuhkan untuk melakukan aktivitas pengukuran. Satu personel berjalan melintasi jalur pipa dengan *pipe locator*

untuk memastikan pengukuran potensial dilakukan tepat diatas jalur perpipaan. Personel ini juga membawa marka penanda tiap daerah interval regular yang akan dilakukan pengukuran. Personel kedua membawa sepasang elektroda yang dihubungkan ke *test point* melalui kawat tembaga tipis yang kemudian di ulurkan sepanjang jalur pipa untuk pengukuran potensial pipa. Personel juga bertanggung jawab untuk menandai daerah-daerah tertentu yang digunakan sebagai referensi ketika dibutuhkan koreksi berdasarkan hasil survey pengukuran potensial pipa. Personel ketiga bertugas untuk menggulung kembali kawat tembaga yang dipakai unruk pengukuran setelah survey selesai dlakukan. (Walaupun demikian, personel pertama tidak lagi dibutuhkan karena biasanya jalur pipa telah dapat dimonitor dari hasil pengukuran sebelumnya)



**Gambar 3.9.** Peralatan CIPS dan operator pada survey lapangan [2]

Dalam prakteknya, pengukuran CIPS sangat membutuhkan dukungan tenaga lapangan dan kebutuhan logistik, untuk mengatasi hambatan-hambatan di daerah-daerah tertentu, seperti pemukiman, jalan raya, dan halangan lainnya yang timbul pada saat survey pengukuran. Cara-cara harus ditempuh untuk membantu kelancaran survey, misalkan dengan merekatkan kawat tembaga ke jalan untuk menghindari putus. Oleh karena itu, kecepatan pergerakan survey sangat bergantung dari area yang disurvey. Pawson telah mengidentifikasi beberapa hal yang harus dilakukan oleh operator lapangan dalam mempersiapkan survey CIPS:

- Persiapan spesifikasi teknis secara detail untuk pelaksanaan survey
- Menandai dan membersihkan jalur pipa yang akan dilalui (berdasarkan ROW)
- Membuat pemberitahuan kepada para pemilik lahan yang akan disurvey dan pekerja lain yang berada pada jalur pipa
- Menandai ruang dimana terdapat rectifier dan struktur lain yang dapat mempengaruhi pengukuran
- Memeriksa kondisi dan fungsi dari rectifier, sambungan, isolasi yang ada
- Mengkarakterisasi efektivitas sistem proteksi katodik pada daerah-daerah rawan, seperti rawa, dll.
- Mengidentifikasi perubahan cuaca yang terjadi
- Menentukan spesifikasi format laporan survey pengukuran
- Memastikan kemampuan dan ketersediaan setiap personel

Laporan NACE International memberikan informasi tambahan sebagai panduan bagi para operator dan kontraktor. Hal penting yang harus diperhatikan dalam pembacaan potensial adalah mengenai IR drop, yang termasuk dalam pengukuran selama proteksi katodik beroperasi. Seperti disebutkan bahwa criteria voltase untuk proteksi didasarkan pada hasil pengukuran pipa pada antarmuka dengan tanah. Pengukuran potensial ON yang diambil di permukaan tidaklah mewakili potensial antarmuka ini, termasuk IR drop yang didapat berdasarkan polarisasi proteksi katodik. Dengan adanya IR drop, hasil pengukuran potensial menjadi cenderung negative dibandingkan dengan potensial antarmuka yang actual (bukan ON).

**b. Direct current voltage gradient (DCVG).**

Survey DCVG merupakan metode lapangan yang lebih baru untuk melokalisir cacat yang terdapat pada lapisan *coating* pipa yang terpendam tanah. Teknik dasar yang dipakai juga bersandar akibat adanya lapisan permukaan logam yang terekspos ke permukaan tanah. Secara umum, semakin besar area permukaan logam yang terekspos dengan media tanah, maka gradien potensial yang diperoleh dari survey DCVG juga semakin besar.

**Metodologi.**

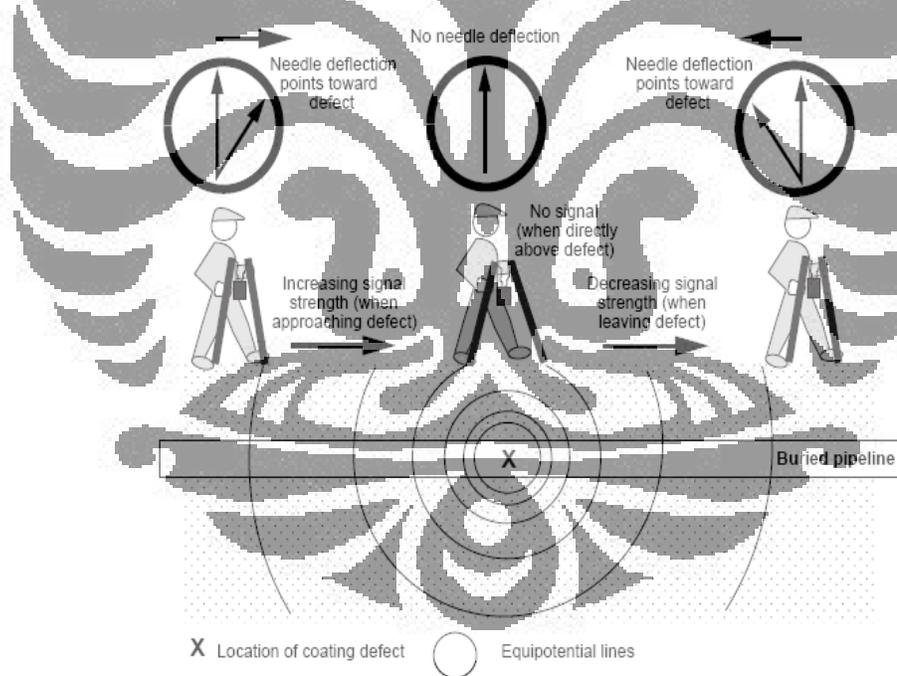
Gradien potensial yang diperoleh oleh operator lapangan menggunakan dua elektroda standar dan dipisahkan jarak yang tipikal sebesar setengah meter. Tampilan dari elektroda standar Cu/CuSO<sub>4</sub> menyerupai *pole ski cross country*, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.9 berikut,



**Gambar 3.10** Tipikal Peralatan pada Survey DCVG [2]

Pulsa sinyal DC dipaparkan pada struktur pipa untuk pengukuran DCVG. Sinyal pulsa input dapat meminimalisir interference dari sumber arus lainnya (sistem proteksi katodik asing, jalur rel KA listrik). Sinyal ini dapat diperoleh dengan menggunakan *interrupter* pada *rectifier* terpasang atau menggunakan *secondary current pulse* yang diaplikasikan bersama dengan “*steady*” CP current.

Personel yang berjalan sepanjang jalur pipa mengobservasi jarum millivoltmeter atau display digital untuk mengidentifikasi lokasi cacat pada jalur pipa. Pada peralatan non-digital, pergeseran drastis dari jarum menandakan adanya cacat pada lapisan *coating*. Dari pengalaman lapangan didapat bahwa cacat dapat dilokalisasi dengan akurasi hingga 0.1 – 0.2 m, yang tentunya memberikan keuntungan untuk meminimalisir waktu yang terbuang akibat penggalian di lokasi yang salah.



**Gambar 3.11** Ilustrasi Metode DCVG [2]

Fitur tambahan pada teknik DCVG adalah bahwa cacat dapat dikategorikan dalam faktor pendekatan ukuran. *Sizing* adalah data yang sangat penting untuk mengklasifikasikan prioritas pertama penggalian dan perbaikan/penggantian. *Leeds*

dan *Grapiglia* dalam penelitiannya mendapatkan detail penting dalam prosedur untuk pendekatan penentuan ukuran cacat. Formula empiris yang juga disebut *%IR-value* dapat mewakili untuk memberikan gambaran mengenai ukuran cacat, dengan pembagian klasifikasi sebagai berikut dan telah masuk dalam Standar NACE RP-0502-2002 (*Standard Recommended Practice for Pipeline External Corrosion Direct Assessment Methodology*).

- 0 to 15%IR (“small”) :Relatif tidak memerlukan perbaikan..
- 16 to 35%IR (“medium”) :Kemungkinan rekomendasi untuk diperbaiki.
- 36 to 60%IR (“large”) :Perbaikan direkomendasikan..
- 61 to 100%IR (“extra large”) :Perbaikan secepatnya direkomendasikan.



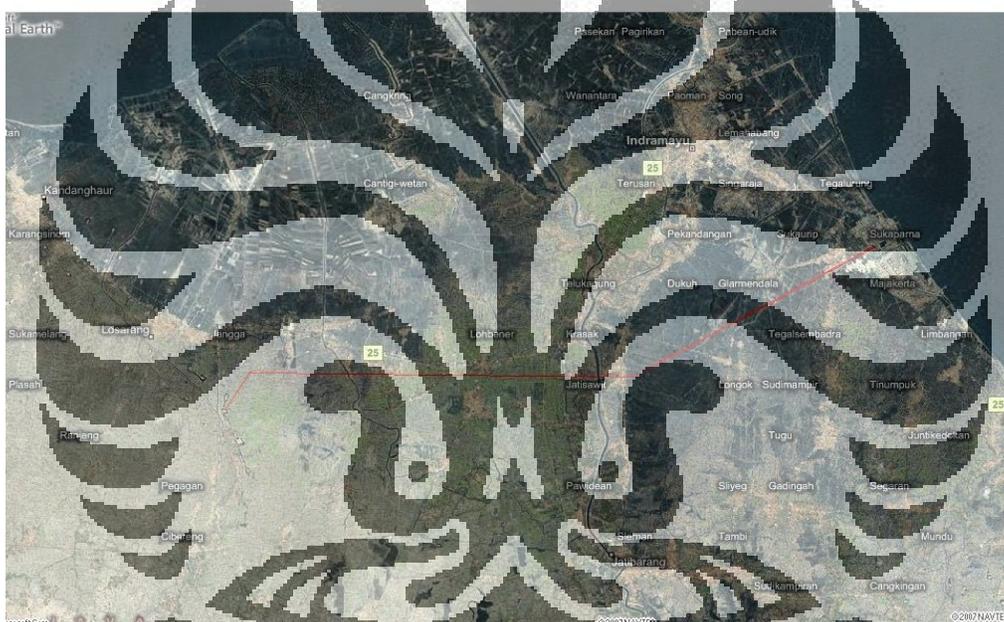
## BAB 4

### HASIL DAN PEMBAHASAN

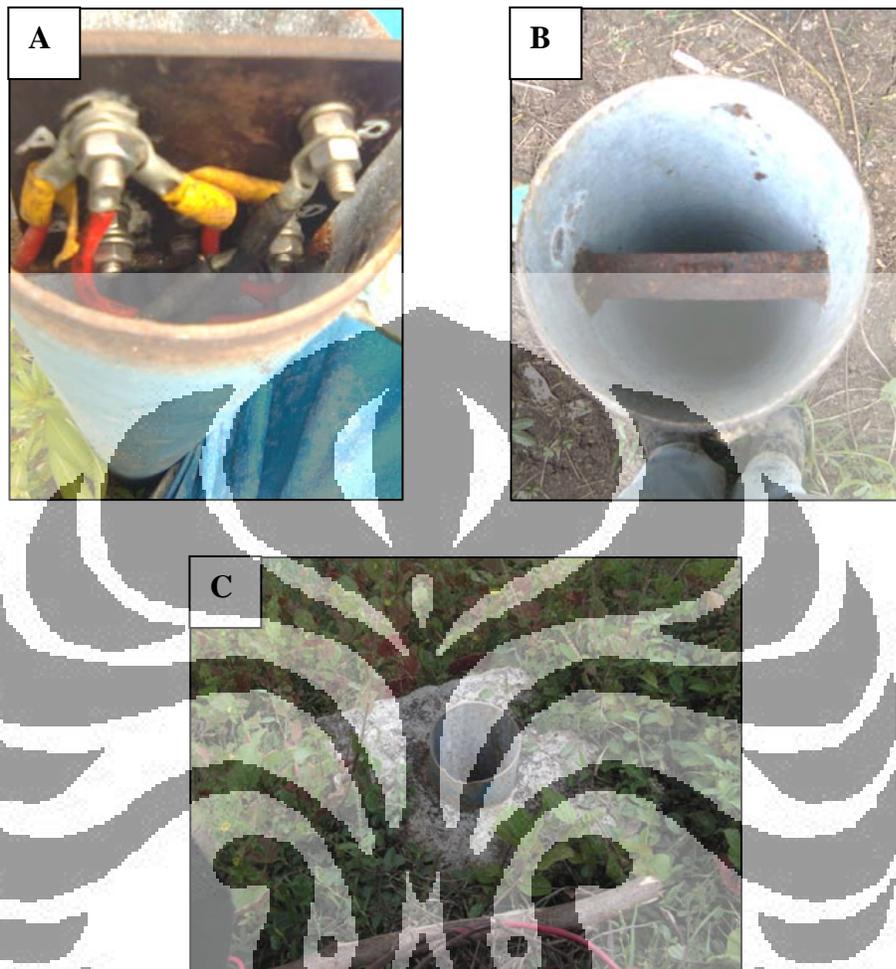
#### 4.1 Jalur Pipa Cemara-Balongan

Jalur pipa Cemara-Balongan merupakan jalur pipa terpendam sepanjang 28 km yang merupakan pipa transport untuk *crude oil* dari SP Cemara menuju fasilitas pengolahan minyak PT. Pertamina di Balongan. Lokasi jalur pipa masih dalam wilayah Kabupaten Indramayu Propinsi Jawa Barat.

**Gambar 4.1** Peta Satelit dan Plot Jalur Pipa Cemara-Balongan [8]



Berdasarkan kondisi sebenarnya dan peta satelit lokasi tempat dimana pipa dipendamnya struktur merupakan kawasan persawahan yang merupakan tanah basah. Dalam sistem proteksi katodik, untuk memonitor kondisi dari sistem tersebut apakah masih berfungsi dengan baik atau tidak bisa dilakukan dengan mengukur nilai tegangan yang terukur pada pipa terproteksi apabila sistem proteksi katodik berfungsi dengan baik, maka nilai yang terbaca pada alat ukur adalah maksimal  $-850$  mV. Nilai diatas  $-850$  mV, menunjukkan bahwa Sistem Proteksi Katodik tidak berfungsi dengan baik.



**Gambar 4.2.** Berbagai kondisi *test point* yang ditemui pada jalur pipa Cemara – Balongan. A. *Test Point* masih lengkap. B. *Test Point* kosong. C. *Test Point* hilang. [8]

Berdasarkan nilai pengukuran potensial proteksi pada *Test Point* yang masih dalam kondisi baik menunjukkan nilai yang lebih rendah dari (-850mV). Hal tersebut menunjukkan bahwa Sistem Proteksi yang terpasang pada *test point-test point* tersebut masih berfungsi dengan baik

Namun berdasarkan data dari hasil pengukuraaan dan literatur tabel 4.1 di daerah tersebut pada *Test Point* (yang ditemukan dalam kondisi baik) mengalami 87,5 % *over protection*. Terjadinya *overprotection* bisa jadi disebabkan oleh anoda korban yang lokasinya berdekatan dengan katoda (struktur pipa yang dilindungi)

yang jumlahnya tersebut bergantung kepada jumlah dan ukuran anoda dan konduktivitas tanah.

**Tabel 4.1** Hubungan Potensial dan Resiko Korosi [2]

Potential (V vs. Cu/CuSO <sub>4</sub> )	Condition of steel
-0.5 to -0.6	Intense corrosion
-0.6 to -0.7	Corrosion
-0.7 to -0.8	Some protection
-0.8 to -0.9	Cathodic protection
-0.9 to -1.0	Some overprotection
-1.0 to -1.1	Increased overprotection
-1.1 to -1.4	Increasingly severe overprotection, coating disbondment and blistering, increasing risk of hydrogen embrittlement

#### 4.1.1 Karakteristik *Soil Resistivity*.

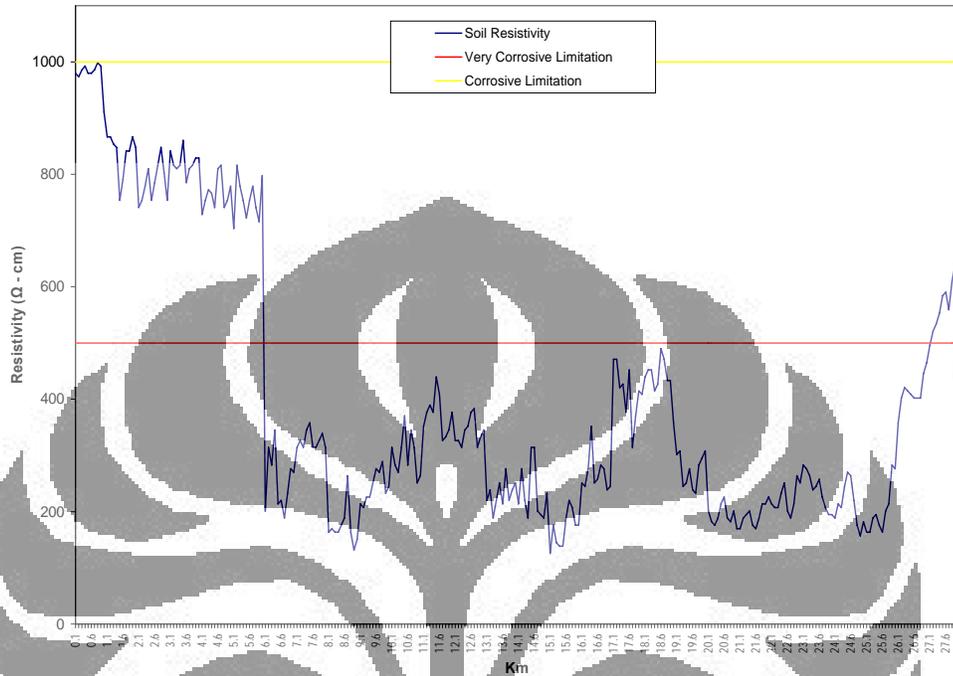
Nilai tahanan tanah (*soil resistivity*) akan menentukan apakah tanah yang menjadi lingkungan dari *undergroun pipe* tergolong korosif terhadap struktur pipa atau tidak. Pengukuran nilai tahanan tanah sendiri dilakukan dengan metode *wenner 4 pin* dengan spasi antar pin berjarak 1 m.

Berikut adalah hasil pengukuran nilai tahanan tanah yang diukur setiap 100 m dari total jalur pipa Cemara – Balongan. Umumnya nilai tahanan dipengaruhi oleh kondisi tanah yang mayoritas merupakan areal persawahan yang basah. Data soil resistivity dilampirkan dalam Lampiran 2.

Karakteristik korosi dari tanah dikategorikan berdasarkan nilai tahanan sebagai berikut:

**Tabel 4.2.** Kategori Korosifitas tanah berdasarkan nilai tahanannya.

Soil resistivity (ohm-cm)	Degree of corrosivity
0-500	Very corrosive
500-1,000	Corrosive
1,000-2,000	Moderately corrosive
2,000-10,000	Mildly corrosive
Above 10,000	Negligible



**Gambar 4.3.** Profil Pengukuran *Soil Resistivity* jalur pipa Cemara – Balongan.

Berdasarkan data hasil pengukuran secara statistik sepanjang 21 Km (dari Km 6- Km 27) atau 75 % daerah Jalur Pipa Cemara-Balongan tingkat korosivitasnya dikategorikan sangat korosif, sisanya (pada km 0-1 dan 27-28) tingkat korosivitasnya dikategorikan korosif.

Dalam proses desain suatu Sistem Proteksi Katodik nilai tahanan tanah akan diperhitungkan untuk menentukan kebutuhan arus (*current density*) yang diperlukan guna melindungi struktur pipa.

#### 4.1.2 *Close Interval Potential Survey (CIPS).*

Untuk mengetahui kondisi Sistem Proteksi Katodik pada struktur pipa terpendam dilakukan pengukuran potensial proteksi dari pipa tersebut di sepanjang jalur. Nilai potensial proteksi terukur dari Sistem Proteksi Katodik yang masih berfungsi baik (struktur pipa terpendam masih terlindungi) akan menunjukkan nilai maksimal -850 mV sesuai dengan desain kriteria Proteksi Katodik pada NACE RP-

0169 - 2002 (*NACE Recommended Practice for Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems*).



**Gambar 4.4.** Pelaksanaan *Close Interval Potential Survey* (CIPS) di lapangan.[8]

CIPS yang dilakukan pada jalur Cemara – Balongan dimulai dari Balongan sebagai titik awal (0 Km) menuju SP Cemara (titik 28 Km). Namun demikian, data hasil survey CIPS yang ditampilkan dalam laporan ini dimulai dari SP Cemara sebagai km 0 sampai di Balongan sebagai km 28. Hasil pengukuran di sepanjang jalur tersebut menunjukkan adanya beberapa bagian dari jalur pipa yang dalam kondisi yang secara ideal tidak terproteksi (ditunjukkan dengan bacaan potensial terproteksi yang lebih besar dari  $-850$  mV).

Rekap kondisi sistem proteksi katodik disepanjang jalur pipa Cemara-Balongan dapat dilihat pada Lampiran 3.

Hasil pengukuran CIPS pada Lampiran 3 dari total 28 Km dapat diketahui bahwa pada km ke 1-7, 12-14, 16-17, 19-24, 25-27 (kecuali 3 m mendekati *Test Point*) dan km 28 (kecuali 100 m menuju TP 57) atau 21.641 m (77,28%) pipa tidak terproteksi dengan baik atau potensial pipa lebih besar dari  $-850$ mV. Pada km ke 4-5

(meter ke 600-750) memiliki potensial berkisar -0,450 V sampai dengan -0,775 V dan km 9-10 (600 meter menuju TP-10) dengan potensial proteksi berkisar -0,270 sampai dengan -0.800 V

Pada km 1-7 yang mencakup TP-1 sampai dengan TP 14 pada daerah yang tidak terproteksi tersebut hanya 2 TP ditemukan dalam kondisi baik yaitu pada TP 8 dan 14, sisanya tidak ditemukan. Kemungkinan besar tidak terproteksinya pada daerah sekitare kilometer disebabkan tidak adanya koneksi antara Anoda dengan struktur pipa yang diproteksi ditambah dengan lokasi pada km 1-6 lingkungannya termasuk dlam kategori korosif sedangkan pada km7 tergolong sangat korosif. Fenomena ini serupa yang terjadi di km 12-14 dan 19-24.

Sedikit berbeda dengan yang terjadi pada km 16-17 dengan daerah TP 32-34, dimana di 2 buah TP ini khususnya baik dengan kondisi lingkungan yang sangat korosif, namun rata-rata potensial tidak terproteksi, hal ini bisa disebabkan oleh kurangnya jumlah anode yang ada untuk mendistribusikan arus atau kemungkinan anode hanya mampu menjangkau daerah yang terbatas ditambah dengan kondisi elektrolit yang sangat korosif.

Radius 3 meter setiap mendekati TP pada km 25-27 dan 100 meter menuju TP-56 struktur terproteksi, sedangkan lewat dari daerah tersebut. Hal ini bisa dimngkinkan bahwa anoda korban berada dekat dengan Tp dan hanya mampu mendistribusikan secara efektif beberapa meter saja, setelah itu berkurang atau hilang.

#### **4.1.3 *Direct Current Voltage Gradient (DCVG) Survey.***

Untuk memastikan apakah tidak terproteksinya struktur disebabkan karena tidak berfungsinya sistem proteksi katodik atau rusaknya lapisan coating dibuttukan survey dengan menggunakan DCVG.

Dengan DCVG ini memberikan hasil yang teliti dari cacat *coating* yang terindikasi dari hasil pengujian CIPS melalui survey sepanjang jalur piipa yang bersangkutan.

Hasil survey DCVG berupa lokasi yang mengalami cacat coatingserta ukuran cacat yang terjadi serta kategori cacat *coating* tersebut berdasarkan standar NACE RP 0502-2002 (*Standard Recommended Practice for Pipeline External Corrosion*

*Direct Assessment Methodology*). Pada Lampiran 4 memperlihatkan bahwa pada umumnya cacat coating yang terjadi disepanjang jalur Cemara-Balongan masuk dalam kategori 1 berdasarkan NACE RP 0502-2002 point A6.4. Dimana pada kategori 1 disebutkan % IR berkisar 1-15 %. Dengan kondisi cacat coating yang masuk dalam kategori 1, maka cacat coating yang terjadi pada jalur pipa Cemara-Balongan merupakan jenis cacat coating ringan, dimana tidak perlu dilakukan perbaikan terhadap coating pada area yang mengalami cacat. Dalam hal ini yang perlu dilakukan adalah memperbaiki sistem proteksi katodik sebagai perlindungan jangka panjang terhadap struktur eksternal pipa yang terbuka.

Contoh Perhitungan % IR dari DCVG.

$$\begin{aligned} \text{Formula \% IR} &= \text{Total mV/IR Drop} \times 100\% \\ \text{Total mV} &= \text{Total Reading Positive Potentials} \\ \text{Contoh: Posisi di Km 4 - 5 (}\pm 40 \text{ m setelah TP 8 Cemara)} & \\ \text{Total mV} &= 15.3 + 12.5 + 10.2 + 2.6 \\ &= 40.6 \\ \text{Additional DC Power Supply} & \\ \text{On Position} &= - 1446 \text{ mV} \\ \text{Off Position} &= - 1121 \text{ mV} \\ \text{IR Drop} &= 325 \text{ mV} \\ \text{\% IR Drop} &= 40.6/325 \times 100\% \\ &= 12.5 \% \end{aligned}$$

#### 4.1.4 Evaluasi Sistem Proteksi Katodik Jalur Pipa Cemara-Balongan

Melihat data hasil pengukuran potensial tiap test point, soil resistivity, kondisi proteksi struktur pipa proteksi dan survey DCVG diketahui secara umum bahwa:

1. Hilangnya test point yang dalam hal ini berfungsi sebagai Test Bonding, sehingga sebagian besar Anoda Korban tidak terhubung lagi dengan struktur pipa.
2. Anoda Korban yang jauh telah berkurang efektivitasnya sehingga arus proteksinya hanya sampai pada radius beberapa meter saja (disekitar area

test point) yang mungkin disebabkan kurangnya jumlah anoda atau penempatan anoda yang kurang tepat.

3. Terjadi overpotensial katodik pada katoda

Idealnya setiap desain sistem proteksi katodik diharapkan terdistribusi dan arus yang tersebar merata diseluruh permukaan struktur. Tetapi, untuk memenuhi hal tersebut tidak mungkin dalam prakteknya dikarenakan berbagai pengaruh fisik antara lain:

1. Arus yang dihasilkan disekitar anoda akan tersebar, kemudian pada titik yang berbeda pada permukaan struktur di dekat anoda akan memiliki suatu variabel arus yang berbeda.
2. Lingkungan yang mengandung berbagai jenis larutan seperti air, air payau, dan polutan yang akan menyebabkan nilai konduktivitas tidak seragam sehingga nilai atenausinya tidak sama pada tiap-tiap tempat yang berbeda kondisi lingkungannya.
3. Struktur yang diproteksi yang mempunyai bentuk kompleks sehingga arus dari anoda susah untuk menembus lapisan permukaan pada struktur katoda

Salah satu pemecahan masalah diatas menggunakan pendekatan analitik untuk memperkirakan arus dan potensial yang terdistribusi dalam struktur sebenarnya dengan asumsi sederhana pada pipa dengan panjang pipa yang tidak terbatas dengan menggunakan persamaan atenuasi.

#### 4.1.5 Perhitungan

##### a. Data Awal dan Asumsi

Pipa [11]	Kabel	Anoda
Panjang = 28 km = 28.000 m	Panjang = 15 meter	Jenis =Mg Sacrificial Anode dengan <i>High Potensial Cast Anode</i>
Diameter (dalam) = 8 inchi Diameter (luar) = 8.625	<b>Ukuran 6 AWG</b>	<b>Panjang = 800 m</b> <b>Berat = 15 kg</b>

inch= 219,1 mm		
Tebal = 15, 88 mm	$\rho$ kabel = $1,3 \times 10^{-3}$ ohm m	Diameter = 200 mm

Rapat Arus Pipa yang berpelindung didalam tanah =  $0,01 \text{ mA/m}^2$

Asumsi *Coating Breakdown* = 10 %

#### Simbol dan Satuan

W = berat anoda (kg)

U = Faktor Utilitas (kg/A. hr)

Ia = Arus Keluaran per Anoda (A)

L = Umur Pakai (hr)

#### b. Perhitungan Luas Daerah yang Diproteksi

$A = \pi \times \text{Diameter (luar) Pipa} \times \text{Panjang Pipa}$

$$= 3,14 \times 0,2191 \times 28.000$$

$$= 19.263, 272 \text{ m}^2$$

#### c. Perhitungan Total Arus yang dibutuhkan

$I = \text{Luas Daerah (m}^2) \times \text{Rapat Arus (mA/ m}^2)$

$$= 19. 263, 272 \text{ m}^2 \times 0,01 \text{ mA/ m}^2$$

$$= 0,192 \text{ A}$$

Safety Factor 25 %, maka arus yang dibutuhkan 0,77A

#### d. Penghitungan jumlah Anoda

Berat Anoda (kg) =  $\frac{I \times \text{Waktu} \times 8760}{\text{Kapasitas Material (A hr}^{kg^{-1}})}$

$$= \frac{0,77 \times 20 \times 8760}{1251}$$

$$= 107,11 \text{ kg}$$

$$= 107,11 \text{ kg}$$

$$= 107,11 \text{ kg}$$

Faktor Utilitis = 0, 85 (diasumsikan bentuk anoda silinder tegak)

Berat anoda yang dibutuhkan =  $107, 11 / 0,85$

$$= 126, 95$$

Berat 1 buah Anoda Mg = 15 kg

Jumlah Anoda yang dibutuhkan =  $126,95 / 15$

= 8,46 dibulatkan 9 buah

#### e. Kebutuhan Karbon Backfill

$W = \text{Laju Konsumsi} \times \text{Arus} \times \text{Umur}$

$W = 0,5 \text{ kg/A th} \times 0,77 \text{ A} \times 20 \text{ th}$

$W = 7,7 \text{ kg}$

#### f. Perhitungan Tegangan Proteksi

Resistensi Anoda terhadap tanah

$$\begin{aligned} R_v &= \frac{0,0171 \rho}{nL} \left[ 2,3 \log \frac{8L}{d} - 1 + \frac{2L}{S} 2,3 \log 0,656 n \right] \\ &= \frac{0,0171 \cdot 417,62}{9 \cdot 0,8} \left[ 2,3 \log \frac{8 \cdot 0,8}{0,2} - 1 + \frac{2 \cdot 15}{15} 2,3 \log 0,656 \cdot 9 \right] \\ &= 2,62 \Omega \end{aligned}$$

Resistensi Anoda terhadap Karbon Backfill

$$\begin{aligned} R_b &= \frac{0,0171 \rho}{L} \left[ 2,3 \log \frac{8L}{d} - 1 \right] \\ &= \frac{0,0171 \cdot 0,45}{0,8} \left[ 2,3 \log \frac{8 \cdot 0,8}{0,2} - 1 \right] \\ &= 0,023671 \Omega \end{aligned}$$

Resistensi Pipa terhadap tanah

$$\begin{aligned} R_a &= \frac{(\text{Potensial setelah proteksi} - \text{potensial sebelum proteksi})}{\text{Arus Proteksi}} \\ &= \frac{(0,85 - 0,760)}{0,77} \\ &= 0,116 \Omega \end{aligned}$$

Resistensi Kabel

$$\begin{aligned} R_c &= L \times \rho \\ &= 150 \text{ m} \times 1,3 \times 10^{-3} \\ &= 0,198 \Omega \end{aligned}$$

## Resistensi Total

$$R = R_v + R_a + R_b + R_c$$

$$R = 2,62 \Omega + 0,116 \Omega + 0,023671 \Omega + 0,198 \Omega$$

$$= 2,96 \Omega$$

## Tegangan Proteksi

$$V = I \times R$$

$$V = 0,77 \text{ A} \times 2,96 \Omega$$

$$V = 2,27 \text{ V}$$

## g. Atenuasi

$$\alpha = R_s / R_k$$

$$R_k = (R_s R_L)^{1/2}$$

$$R_L = \Delta E_o / \Delta I_o$$

## Keterangan :

$R_s$  = Resistensi Longitudinal Pipa

$R_k$  = Resistensi Karakteristik dari Jalur

$R_L$  = Resistensi Kebocoran

$\Delta E_o$  = Perubahan Potensial

$\Delta I_o$  = Perubahan Potensial

$$R_L = \Delta E_o / \Delta I_o \text{ (dari TP 17-18)}$$

$$R_L = 0,145 / 0,3$$

$$R_L = 0,483$$

$$R_k = (R_s R_L)^{1/2} ; R_s = 0,116 \Omega \text{ (resistensi pipa terhadap tanah)}$$

$$R_k = (0,116 \times 0,483)^{1/2}$$

$$R_k = 0,236 \Omega$$

$$\alpha = R_s / R_k$$

$$\alpha = 0,116 \Omega / 0,236 \Omega$$

$$\alpha = 0,49$$

## 4.2 Jalur Pipa Tambun-Cilamaya

Jalur pipa Tambun – Cilamaya merupakan jaringan pipa untuk mengalirkan *crude oil* dari SP Tambun menuju *Booster Compressor Station* di Cilamaya. Total



panjang jalur tersebut adalah  $\pm 102$  Km. Lokasi jalur pipa melewati beberapa Kabupaten di Propinsi Jawa Barat, yaitu Bekasi, Cikarang, Karawang dan Subang.

**Gambar 4.5** Peta Satelit dan Plot Jalur Pipa Tambun – Cilamaya [8]

Seperti halnya pada jalur pipa Cemara – Balongan, prosedur yang sama juga dilakukan untuk jalur pipa Tambun – Cilamaya dalam kaitannya terhadap pemeriksaan kondisi *existing* dari *Test Point* di sepanjang jalur pipa tersebut.

Secara umum, kondisi *test point* pada jalur Tambun – Cilamaya jauh lebih baik dibandingkan pada jalur Cemara – Balongan, dimana jumlah *test point* yang hilang sejumlah 31 dari 127 TP (224,4%) sisanya dalam kondisi baik. Pada Lampiran 5 disajikan data mengenai kondisi *test point* untuk jalur pipa Tambun-Cilamaya sampai TP-127. Berdasarkan data tersebut semua *test point* over potensial < -1200 V.

#### 4.2.1 Karakteristik *Soil Resistivity*.

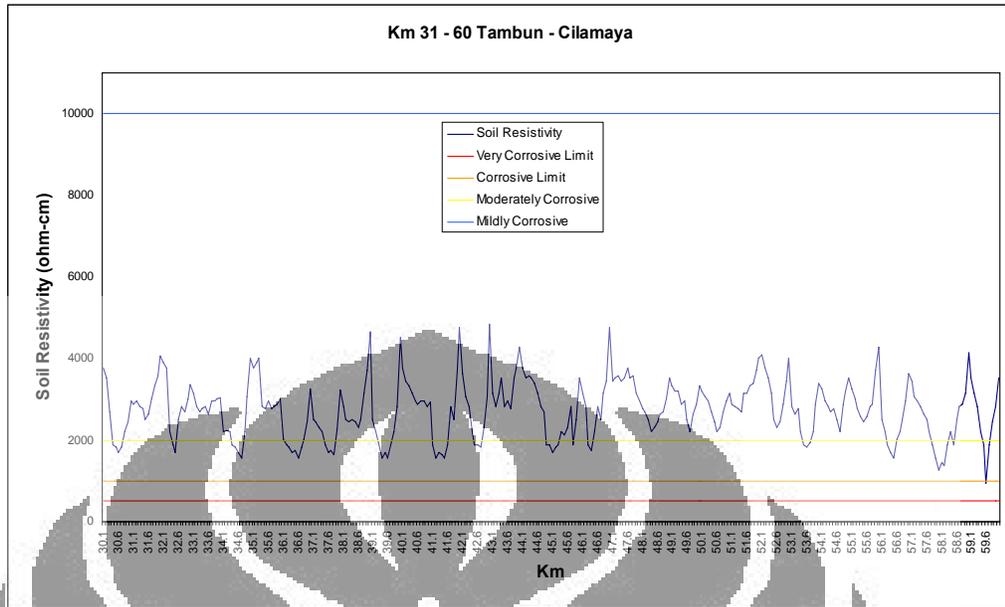
Karakteristik nilai tahanan tanah untuk jalur pipa Tambun – Cilamaya mempunyai tingkat korosifitas yang lebih rendah dibandingkan pada jalur Cemara – Balongan.

Nilai tahanan tanah yang lebih tinggi ini juga akan berpengaruh terhadap tingkat konsumsi anoda pada Sistem Proteksi Katodik dengan metode Anoda Korban. Dimana dengan karakteristik tanah yang nilai tahanannya lebih tinggi, konsumsi anoda akan lebih lambat dibandingkan pada tanah dengan nilai tahanan yang lebih rendah.

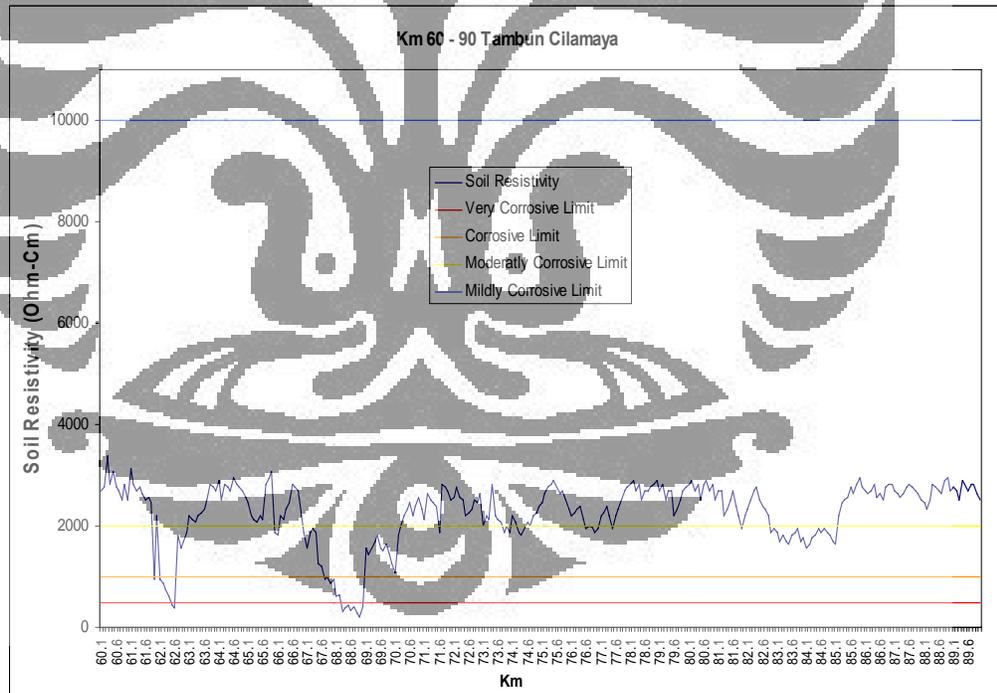
Pengukuran *soil resistivity* dilakukan setiap 100 meter dari total jarak jalur pipa Tambun – Cilamaya.



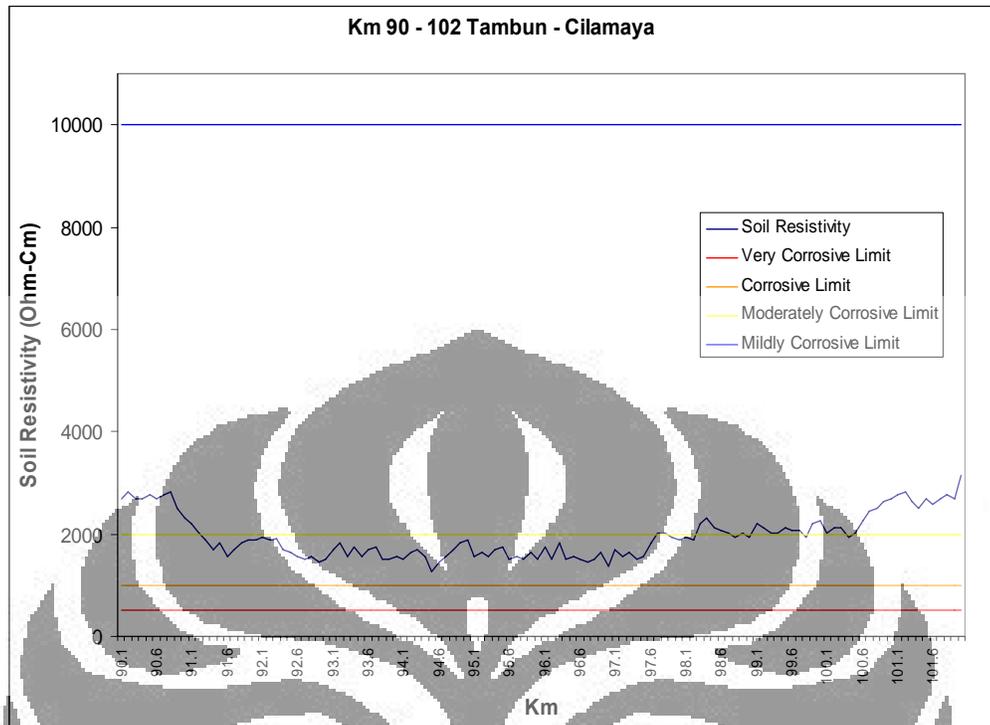
**Gambar 4.6.** Profil Pengukuran *soil resistivity* jalur pipa Tambun – Cilamaya Km 0 – 30 [8]



**Gambar 4.7.** Profil Pengukuran *soil resistivity* jalur pipa Tambun – Cilamaya Km 31 – 60 [8]



**Gambar 4.8.** Profil Pengukuran *soil resistivity* jalur pipa Tambun – Cilamaya Km 61 – 90.



**Gambar 4.9.** Profil Pengukuran *soil resistivity* jalur pipa Tambun – Cilamaya Km 90 - 102

#### 4.2.2 Close Interval Potential Survey (CIPS).

Secara umum hasil pengukuran potensial proteksi dengan metode CIPS pada jalur Tambun – Cilamaya menunjukkan bahwa jalur pipa tersebut masih terproteksi secara katodik, dimana ditunjukkan dengan nilai potensial proteksi yang rata – rata < -850 mV berkisar -1,1 sampai dengan -1,6 V sesuai dengan kriteria proteksi katodik yang berlaku. Hasil pengukuran CIPS dapat dilihat pada Lampiran &

Namun demikian dari hasil survey CIPS diketahui pula adanya indikasi terjadinya *interference* akibat jalur pipa *crossing* dan *paralel* dengan SUTET. Kasus *interference* dengan arus AC tersebut akan berdampak buruk bagi struktur pipa yang terkena, dimana struktur pipa dapat mengalami apa yang disebut dengan *AC Corrosion*.

Area dari pipa yang diperkirakan mengalami kondisi terburuk akibat pengaruh *AC Interference* tersebut adalah terutama pada area *joint* dari pipa. Hal ini terbukti dengan adanya potensial *reading* CIPS dari pipa yang mengalami penurunan potensial yang fluktuatif sekali dalam dua belas *reading*, yang mana menandakan

adanya penurunan potensial pada area – area tertentu saja dari pipa. Gejala penurunan potensial yang fluktuatif tersebut pada *reading* CIPS dimulai pada TP-12 sampai TP-17 dimana jalur pipa pada jarak itu sejajar dengan jalur SUTET.



**Gambar 4.12.** Jalur SUTET yang *crossing* dengan jalur pipa [8]

Adanya indikasi adanya pengaruh *AC Interference* tersebut memerlukan penanganan yang serius, dimana dalam kasus jalur pipa Tambun – Cilamaya ini yang perlu dilakukan adalah penambahan frekuensi inspeksi di sepanjang jalur yang terindikasi mengalami *interference* akibat SUTET.

#### 4.2.3 *Direct Current Voltage Gradient (DCVG) Survey.*

Pengukuran DCVG pada jalur pipa Tambun – Cilamaya mengindikasikan bahwa mayoritas dari jalur pipa tersebut *coating*-nya masih dalam kondisi baik, mengingat tidak terdeteksinya *%IR Drop* pada saat dilakukan pengukuran dengan DCVG.

Pengukuran DCVG pada area dari jalur pipa yang terindikasi mengalami *AC Interference* (menunjukkan adanya penurunan potensial proteksi yang fluktuatif) menghasilkan *%IR Drop* yang relatif sangat kecil. Sehingga bisa diperkirakan keluar masuknya arus *interference* banyak dipengaruhi oleh area *joint*.

Hasil pengukuran DCVG pada jalur Tambun-Cilamaya dapat dilihat pada Lampiran 8

Berdasarkan hasil survey DCVG pada km 7-12 terdapat penurunan potensial IR kategori 1 yang artinya memiliki cacat coating ringan sedangkan pada CIPS pada

daerah ini terproteksi. Hal ini mengindikasikan bahwa kecilnya cacat ini tidak mengganggu terhadap sistem proteksi katodik yang ada. Anoda korban di daerah ini berperan dalam mendistribusiakan arus sehingga mampu menutupi terkelupasnya lapisan tembaga.

#### 4.2.4 Evaluasi Jalur Pemipaan

Dengan mengacu pada kondisi sistem proteksi katodik dan juga *coating* pada jalur pipa Tambun – Cilamaya serta umur dari struktur pipa yang baru dibangun pada tahun 2005 (umur pipa  $\pm$  2,5 tahun), maka bisa disimpulkan bahwa jalur pipa Tambun – Cilamaya masih sangat *reliable* untuk digunakan sebagai jalur transportasi *crude oil*. Kondisi lingkungan sekitar jalur pipa juga tidak mengalami perubahan yang signifikan yang berkaitan dengan desain *existing* dari sistem proteksi katodik dan *coating* pada jalur pipa tersebut.

Namun demikian perlu dilakukan penggantian terhadap beberapa *test point* yang telah hilang sebagai upaya untuk mempertahankan *reliability* dari jalur pipa Tambun – Cilamaya. Selain itu perlu diwaspadai adanya indikasi *AC interference* pada area – area tertentu pada jalur pipa, dengan melakukan penambahan frekuensi inspeksi (mempersingkat interval inspeksi).

Dengan kondisi struktur pipa yang terpendam, maka *reliability* dari jalur pipa sangat tergantung pada efektivitas dari sistem proteksi, baik secara katodik dengan anoda korban maupun secara anodik dengan *coating*.

#### 4.1.5 Perhitungan

##### a. Data Awal dan Asumsi

Pipa [11]	Kabel	Anoda
Panjang = 102 km = 102.000 m	Panjang = 15 meter	Jenis =Mg Sacrificial Anode dengan <i>High Potensial Cast Anode</i>
Diameter (dalam) = 8 inchi Diameter (luar) = 8.625	<b>Ukuran 6 AWG</b>	<b>Panjang = 800 m</b> <b>Berat = 15 kg</b>

inch= 219,1 mm		
Tebal = 15, 88 mm	$\rho$ kabel = $1,3 \times 10^{-3}$ ohm m	Diameter = 200 mm

Rapat Arus Pipa yang berpelindung didalam tanah =  $0,01 \text{ mA/m}^2$

Asumsi *Coating Breakdown* = 10 %

#### Simbol dan Satuan

W = berat anoda (kg)

U = Faktor Utilitas (kg/A. hr)

Ia = Arus Keluaran per Anoda (A)

L = Umur Pakai (hr)

#### b. Perhitungan Luas Daerah yang Diproteksi

$A = \pi \times \text{Diameter (luar) Pipa} \times \text{Panjang Pipa}$

$$= 3,14 \times 0,2191 \times 102.000$$

$$= 70.173,348 \text{ m}^2$$

#### c. Perhitungan Total Arus yang dibutuhkan

$I = \text{Luas Daerah (m}^2) \times \text{Rapat Arus (mA/ m}^2)$

$$= 70.173,348 \text{ m}^2 \times 0,01 \text{ mA/ m}^2$$

$$= 0,702 \text{ A}$$

Safety Factor 25 %, maka arus yang dibutuhkan 2,806 A

#### d. Penghitungan jumlah Anoda

Berat Anoda (kg) =  $\frac{I \times \text{Waktu} \times 8760}{\text{Kapasitas Material (A hr}^{kg^{-1}})}$

Kapasitas Material (A hr<sup>kg<sup>-1</sup></sup>)

$$= \frac{2,806 \times 20 \times 8760}{1251}$$

$$1251$$

$$= 392,97 \text{ kg}$$

Faktor Utilitis = 0, 85 (diasumsikan bentuk anoda silinder tegak)

Berat anoda yang dibutuhkan =  $392,97 / 0,85$

$$= 462,32$$

Berat 1 buah Anoda Mg = 15 kg

$$\begin{aligned} \text{Jumlah Anoda yang dibutuhkan} &= 462,32/15 \\ &= 30,82 \text{ dibulatkan } 31 \text{ buah} \end{aligned}$$

#### e. Kebutuhan Karbon Backfill

$$W = \text{Laju Konsumsi} \times \text{Arus} \times \text{Umur}$$

$$W = 0,5 \text{ kg/A th} \times 2,806 \text{ A} \times 20 \text{ th}$$

$$W = 28,06 \text{ kg}$$

#### f. Perhitungan Tegangan Proteksi

Resistensi Anoda terhadap tanah

$$\begin{aligned} R_v &= \frac{0,0171 \rho}{nL} \left[ 2,3 \log \frac{8L}{d} - 1 + 2L \frac{2,3 \log 0,656 n}{S} \right] \\ &= \frac{0,0171 \cdot 2384,30}{31 \cdot 0,8} \left[ 2,3 \log \frac{8 \cdot 0,8}{0,2} - 1 + 2 \cdot 15 \frac{2,3 \log 0,656 \cdot 31}{15} \right] \\ &= 4,57 \Omega \end{aligned}$$

Resistensi Anoda terhadap Karbon Backfill

$$\begin{aligned} R_b &= \frac{0,0171 \rho}{L} \left[ 2,3 \log \frac{8L}{d} - 1 \right] \\ &= \frac{0,0171 \cdot 0,45}{0,8} \left[ 2,3 \log \frac{8 \cdot 0,8}{0,2} - 1 \right] \\ &= 0,023671 \Omega \end{aligned}$$

Resistensi Pipa terhadap tanah

$$\begin{aligned} R_a &= \frac{(\text{Potensial setelah proteksi} - \text{potensial sebelum proteksi})}{\text{Arus Proteksi}} \\ &= \frac{(0,85 - 0,760)}{2,806} \\ &= 0,032 \Omega \end{aligned}$$

Resistensi Kabel

$$\begin{aligned} R_c &= L \times \rho \\ &= 150 \text{ m} \times 1,3 \times 10^{-3} \\ &= 0,198 \Omega \end{aligned}$$

Resistensi Total

$$R = R_v + R_a + R_b + R_c$$

$$R = 4,57 \Omega + 0,032 \Omega + 0,023671 \Omega + 0,198 \Omega$$

$$= 4,832 \Omega$$

Tegangan Proteksi

$$V = I \times R$$

$$V = 2,806 \text{ A} \times 4,832 \Omega$$

$$V = 13,53 \text{ V}$$

**g. Atenuasi**

$$\alpha = R_s / R_K$$

$$R_K = (R_s R_L)^{1/2}$$

$$R_L = \Delta E_o / \Delta I_o$$

Keterangan :

$R_s$  = Resistensi Longitudinal Pipa

$R_K$  = Resistensi Karakteristik dari Jalur

$R_L$  = Resistensi Kebocoran

$\Delta E_o$  = Perubahan Potensial

$\Delta I_o$  = Perubahan Potensial

$$R_L = \Delta E_o / \Delta I_o \text{ (dari TP 101-102)}$$

$$R_L = 0,010 / 0,038$$

$$R_L = 0,026$$

$$R_K = (R_s R_L)^{1/2} ; R_s = 0,0332 \Omega \text{ (resistensi pipa terhadap tanah)}$$

$$R_K = (0,032 \cdot 0,026)^{1/2}$$

$$R_K = 0,028 \Omega$$

$$\alpha = R_s / R_K$$

$$\alpha = 0,032 \Omega / 0,028 \Omega$$

$$\alpha = 1,14$$

## BAB 5 KESIMPULAN

Berdasarkan kajian evaluasi yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Pada jalur Cemara-Balongan, berdasarkan kriteria proteksi katodik diketahui bahwa pada km ke 1-7, 12-14, 16-17, 19-24, 25-27 (kecuali 3 m mendekati TP) dan km ke 28 (kecuali 100 m menuju TP 57) atau 211.641 m (77,28 %) pipa tidak terproteksi dengan baik atau potensial pipa lebih besar dari -850 mV
2. Pada jalur Tambun-Cilamaya jalur pipa tersebut masih terproteksi secara katodik
3. Nilai tahanan untuk jalur pipa Tambun-Cilamaya mempunyai tingkat korosivitas yang lebih rendah dibandingkan pada jalur Cemara-Balongan
4. Nilai tahanannya lebih tinggi, konsumsi anoda akan lebih lambat dibandingkan pada tanah dengan nilai tahanan yang lebih rendah.
5. Nilai resistivity tanah terbesar pada jalur Cemara-Balongan sebesar 816,4  $\Omega\text{cm}$  dan Tambun Cilamaya 4647,2  $\Omega\text{cm}$  yang lebih kecil daripada 6000  $\Omega\text{cm}$  menunjukkan bahwa Magnesium dapat digunakan sebagai Anoda Korban
6. Aliran arus keluaran yang dihasilkan anoda korban Magnesium pada struktur yang diproteksi dipengaruhi oleh resistivitas elektrolit (tanah )
7. Kondisi Sistem Proteksi Katodik, berupa keberadaan *test point* yang berfungsi pada jalur pipa Tambun-Cilamaya (75,6%) lebih baik dibandingkan pada jalur pipa Cemara-Balongan (26%)
8. Kebutuhan anoda Magnesium untuk melindungi struktur pada dengan area seluas 19.263, 272 m<sup>2</sup> pada jalur pipa Cemara-Balongan sebanyak 126,95 kg sedangkan pada jalur tambun-Cilamaya dengan area seluas 70.173, 348 m<sup>2</sup> sebanyak 392,97 kg
9. Lokasi pemasangan anoda harus tepat agar distribusi arus proteksi merata dengan memperhatikan resistivitas tanah

## DAFTAR ACUAN

1. Jones, DA. Principles of Cathodic Protection (buku yang belum dapat namanya, bab 11 prinsip proteksi katodik)
2. Pierre R Roberge. *Handbook of Corrosion Engineering* (New York: McGraw-Hill, 2000)
3. <http://corrosion-doctors.org/Corrosion-Thermodynamics/Potensial=pH-diagram-water.htm>
4. <http://www.answers.com/topic/passivation>
5. Laboratory Corrosion of Metal for The Process Industries, "NACE standards TM-01-69 (1976-revision). Reprinted by permission, National Association of Corrosion Engineers
6. M.g Fontana, Corrosion Engineering. McGraw-Hill, 3<sup>rd</sup> ed., p172, 1986. Reprinted by permission, McGraw-Hill Book Co.
7. Peabody, A.W., Control of pipeline corrosion, National Association of Corrosion Engineering Press, Texas, 2001
8. UI Consulting. *KAJIAN EFEKTIVITAS COATING DAN SISTEM PROTEKSI KATODIK JALUR PIPA TAMBUN-CILAMAYA DAN CEMARA – BALONGAN DI REGION JAWA, PT. PERTAMINA E&P*. Depok, 2008
9. NACE Standard – RP0502-2002
10. NACE Standard – RP169-2002
11. [http://e-pipe.co.kr/eng/API/aisi\\_no/b36\\_10/b36\\_10\\_5htm](http://e-pipe.co.kr/eng/API/aisi_no/b36_10/b36_10_5htm)
12. <http://www.sargamcp.com/Magnesium%20sacrificial%20anodes.htm>
13. Jones, Denny A. PRINCIPLES AND PREVENTION CORROSION. Singapore: Prentice Hall, 1996.

DAFTAR PUSTAKA  
LAMPIRAN 1  
HASIL PENGUKURAN POTENSIAL PIPA, ANODA DAN PROTEKSI PADA  
TEST POINT JALUR PIPA CEMARA-BALONGAN [8]

