



TUGAS AKHIR - TL141584

**PENGARUH VARIASI GORESAN LAPIS LINDUNG
DAN VARIASI PH TANAH TERHADAP ARUS
PROTEKSI SISTEM *IMPRESSED CURRENT
CATHODIC PROTECTION (ICCP)* PADA PIPA API
5L GRADE B**

TRENDY LEO PRATAMA
NRP 2711 100 082

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

JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015



FINAL PROJECT - TL141584

***THE INFLUENCE OF VARIATION OF
COATING SCRATCHES AND VARIATION OF
SOIL PH TO THE PROTECTION CURRENT
ON IMPRESSED CURRENT CATHODIC
PROTECTION (ICCP) SYSTEM IN API 5L
GRADE B PIPE***

Trendy Leo Pratama
NRP 2711 100 082

Supervisor Lecturer
Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA
Tubagus Noor R. S.T., M.Sc

MATERIALS AND METALLURGICAL ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2015

**PENGARUH VARIASI GORESAN LAPIS LINDUNG
DAN VARIASI PH TANAH TERHADAP ARUS
PROTEKSI SISTEM *IMPRESSED CURRENT*
CATHODIC PROTECTION (ICCP) PADA PIPA API 5 L
GRADE B**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik**

Pada

**Bidang Studi Korosi dan Analisa Kegagalan
Program Studi-S1 Jurusan Teknik Material Dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Oleh:

**TRENDY LEO PRATAMA
NRP. 2711 100 082**

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir

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

**SURABAYA
Januari 2015**

**PENGARUH VARIASI GORESAN LAPIS LINDUNG
DAN VARIASI PH TANAH TERHADAP ARUS
PROTEKSI SISTEM *IMPRESSED CURRENT*
CATHODIC PROTECTION (ICCP) PADA PIPA API 5L
*GRADE B***

Nama Mahasiswa : Trendy Leo Pratama
NRP : 2711100082
Jurusan : Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS
Dosen Pembimbing :

1. Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA.
2. Tubagus Noor R. S.T., M.Sc.

Abstrak

Korosi merupakan hal yang tidak bisa dihindari dari sistem perpipaan bawah tanah dan menjadi penyebab utama kegagalan dari material pipa tersebut. Upaya pengendalian korosi terhadap pipa-pipa tersebut dapat dilakukan dengan cara memberikan *coating* atau lapis lindung serta menerapkan sistem proteksi katodik, dalam hal ini sistem yang dipakai adalah sistem *Impressed Current Cathodic Protection (ICCP)*. Meskipun *coating* sudah diberikan, kemungkinan terjadi kerusakan pada *coating* tersebut sangatlah besar. Adanya goresan saat proses pengiriman pipa ataupun saat pemasangan pipa menjadi penyebab kerusakan pada *coating*. Dengan adanya kerusakan pada *coating*, maka kemungkinan untuk terjadinya korosi menjadi lebih besar. Hal ini dikarenakan bagian material yang tergores (tidak terlindungi *coating*) akan berinteraksi secara langsung dengan lingkungan. Maka dari itu, diperlukan arus tertentu pada sistem ICCP agar material pipa tetap dalam keadaan terproteksi. Selain faktor adanya goresan yang terdapat pada pipa, faktor lingkungan yang mana dalam hal ini pH tanah juga turut memberikan pengaruh terhadap kebutuhan arus pada sistem proteksi ICCP. Oleh karena itu, sangatlah penting untuk mengetahui besarnya *supply* arus proteksi sistem ICCP ketika dalam sebuah sistem

perpipaan mengalami kerusakan pada *coating* dan berada di lingkungan dengan pH tertentu, sehingga bisa dilakukanantisipasi dengan memberikan arus proteksi yang tepat. Adapun tujuan dari penelitian ini adalah untuk mempelajari pengaruh cacat gores pada *coating* dan pH tanah terhadap kebutuhan arus proteksi pada sistem *Impressed Current Cathodic Protection (ICCP)* pada material pipa API 5L grade B. Penelitian ini menggunakan spesimen berupa pipa API 5L grade B sebagai katoda yang mana spesimen ada yang diberi *coating* dan yang lain tidak diberikan. Adapun *coating* itu diberikan variasi goresan berbentuk lingkaran dan persegi panjang dengan luasan masing-masing adalah 10 mm², 50 mm², 100 mm², 150 mm², 250 mm², dan 500 mm². Sedangkan untuk variasi pH tanah yang diberikan adalah pH 3 (asam), pH 7 (netral), dan pH 11 (basa). Digunakan dua pipa sebagai pembandingan dengan satu pipa tidak diberi goresan dan yang satunya tidak diberi *coating*. Untuk anoda menggunakan grafit dan *rectifier* sebagai penyearah arus. Arus proteksi ICCP diatur hingga mencapai nilai potensial proteksi sebesar -850 mV vs. Cu/CuSO₄. Setelah 8 hari imersi untuk pengondisian awal dan 7 hari untuk pengukuran arus, didapatkan bahwa semakin besar goresan lapis lindung maka semakin besar arus proteksi yang dibutuhkan dalam pH tanah yang sama. Arus proteksi terbesar pada goresan 18934.2 mm² dalam pH tanah 3 dengan rapat arus 318.154 mA/m². Sedangkan arus proteksi terkecil pada goresan 0 mm² dalam pH tanah 11 sebesar 0.422 mA/m². Arus proteksi pada spesimen dengan luas goresan yang sama, arus proteksinya semakin meningkat seiring semakin kecilnya nilai pH (semakin asam) kondisi lingkungan. Arus proteksi terbesar berada pada pH 3 dengan cacat gores lingkaran adalah nilai arus untuk spesimen tanpa goresan hingga tanpa lapis lindung berturut turut 1.318 mA/m², 2.042 mA/m², 4.499 mA/m², 9.117 mA/m², 18.853 mA/m², 42.440 mA/m², 76.015 mA/m², dan 318.144 mA/m². Sedangkan untuk cacat gores berbentuk persegi panjang berturut-turut nilainya 1.318 mA/m², 2.158 mA/m², 4.519 mA/m², 11.129 mA/m², 19.680 mA/m², 43.698 mA/m², 93.242 mA/m², dan 318.144

mA/m². Lalu untuk arus terkecil pada pH 11 untuk cacat gores lingkaran yaitu sebesar 0.397 mA/m², 1.036 mA/m², 1.873 mA/m², 3.538 mA/m², 4.670 mA/m², 5.520 mA/m², 10.311 mA/m², dan 76.203 mA/m². Untuk cacat gores persegi panjang berturut-turut nilainya 0.397 mA/m², 1.063 mA/m², 1.934 mA/m², 3.621 mA/m², 4.748 mA/m², 6.131 mA/m², 11.128 mA/m², dan 76.203 mA/m².

Kata Kunci: Arus Proteksi, Goresan Lapis lindung, ICCP, Pipeline, pH Tanah.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

***THE INFLUENCE OF VARIATION OF COATING
SCRATCHES AND VARIATION OF SOIL PH TO THE
PROTECTION CURRENT ON IMPRESSED CURRENT
CATHODIC PROTECTION (ICCP) SYSTEM IN API 5L
GRADE B PIPE***

Name : Trendy Leo Pratama
Student Number : 2711100082
Subject : *Materials and Metallurgical
Engineering*
Supervisor :
1. Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA.
2. Tubagus Noor R. S.T., M.Sc.

Abstract

Corrosion is inevitable from the underground piping system and a major cause of failure of the pipe material. Corrosion control efforts against these pipes can be done by providing coatings or layers of protection as well as applying cathodic protection system, in this case the system used Impressed Current Cathodic Protection (ICCP). Although the coating has been given, the possibility of damage to the coating is very large. Streaking when the delivery pipe or pipe fitting are moment to cause damage to the coating. With the damage to the coating, then it is likely to be greater corrosion. This is because part of the material is scratched (unprotected coating) will interact directly with the environment. Therefore, it takes a certain flow to the ICCP system in order to remain in a state of pipe material protected. In addition to the presence of scratches found on the pipeline, environmental factors which in this case soil pH also give effect to the current needs of the ICCP protection system.

Therefore, it is important to know the size of the supply current when the ICCP system protection in a piping system suffered damage to the coating and are in an environment with a certain pH, so it can be anticipated to provide proper protection current. The purpose of this research is to study the effect of scratch defects in the coating and the pH of the soil to the current needs of the system protection Impressed Current Cathodic Protection (ICCP) on the API 5L grade B pipe. This study uses the specimens in the form of pipe API 5L grade B as cathode where there is a given specimen coating and the other is not given. The coating was given variation scratches circular and rectangular with each area is 10 mm², 50 mm², 100 mm², 150 mm², 250 mm² and 500 mm². As for the variation of a given soil pH is pH 3 (acid), pH 7 (neutral), and pH 11 (alkaline). Used two pipes as a comparison with a pipe not given scratches and the other was not given coating. To use a graphite anode and a rectifier as a rectifier DC current. ICCP protection flow was adjusted to achieve the potential value of -850 mV vs. protection Cu / CuSO₄. After 8 days of immersion to the initial conditioning and 7 days for flow measurement, it was found that the greater scratch protection layer, the greater the flow of protection required in the same soil pH. Flow greatest protection on scratches 18934.2 mm² in soil pH 3 with a current density of 318.154 mA/m². While the smallest of scratches protection current 0 mm² in soil pH 11 at 0.422 mA/m². Flow protection on specimens with broad strokes the same, the current protection is increasing as more and more small value of pH (more acidic) environment. Flow protection is greatest at pH 3 with a scratch handicap circle is the current value for the specimen without scratching up without protection layer consecutive 1.318 mA/m², 2.042 mA/m², 4.499 mA/m², 9.117 mA/m², 18.853 mA/m², 42.440 mA/m², 76.015 mA/m², and

318.144 mA/m². As for the scratch defects rectangular row value 1.318 mA/m², 2.158 mA/m², 4.519 mA/m², 11.129 mA/m², 19.680 mA/m², 43.698 mA/m², 93.242 mA/m², and 318.144 mA/m². Then for the smallest currents at pH 11 for defective scratch circle is equal to 0.397 mA/m², 1.036 mA/m², 1.873 mA/m², 3.538 mA/m², 4.670 mA/m², 5.520 mA/m², 10.311 mA/m², and 76.203 mA/m². For rectangular scratch defects consecutive worth 0.397 mA/m², 1.063 mA/m², 1.934 mA/m², 3.621 mA/m², 4.748 mA/m², 6.131 mA/m², 11.128 mA/m², and 76.203 mA/m².

Keywords: Protection current, Coating scratch, ICCP, Pipeline, Soils pH.



KATA PENGANTAR

Puji syukur atas kehadiran Allah SWT atas segala nikmat, rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir yang berjudul “**Pengaruh Variasi Goresan Lapis Lindung dan Variasi pH Tanah Terhadap Arus Proteksi Sistem *Impressed Current Cathodic Protection (ICCP)* Pada Pipa API 5 L Grade B.**” Penyusunan laporan ini merupakan salah satu tugas yang harus diselesaikan untuk meraih gelar Sarjana Teknik dan memenuhi mata kuliah Tugas Akhir.

Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada :

1. Kedua Orang tua yang senantiasa mendukung, membimbing, serta memberikan nasehat dan doa demi kebaikan penulis selama ini.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA dan Bapak Tubagus Noor R. S.T., M.Sc selaku dosen pembimbing, yang telah memberikan arahan, bimbingan dan motivasi selama pelaksanaan Tugas Akhir.
3. Seluruh dosen dan karyawan Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
4. Teman-teman seangkatan MT 13 yang telah setia menemani, memberikan saran dan dukungan selama ini.
5. Seluruh keluarga besar HMMT FTI-ITS yang telah memberikan motivasi, semangat, ilmu, dan pembelajaran selama belajar di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
6. Semua pihak yang tidak bisa disebutkan satu per satu.

Penulis menyadari adanya keterbatasan di dalam penyusunan laporan tugas akhir ini. Besar harapan penulis akan saran, dan kritik yang sifatnya membangun. Selanjutnya semoga tulisan ini dapat bermanfaat.

Surabaya, Januari 2015

Penulis



DAFTAR ISI

Halaman Judul	i
Lembar Pengesahan	iii
Abstrak	v
Abstract	ix
Kata Pengantar	xiii
Daftar Isi	xv
Daftar Gambar	xix
Daftar Tabel	xxiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Dasar Korosi	5
2.2 Korosi pada Pipa <i>Pipeline</i> Baja Karbon	6
2.3 Jenis Material Pipa	7
2.4 Lapis Lindung (<i>Coating</i>) pada <i>Pipeline</i>	10
2.4.1 Hubungan antara <i>Coating</i> dan Pipa pada <i>Pipeline</i>	10
2.4.2 Komposisi Lapis Lindung (<i>Coating</i>).....	10
2.4.3 Pemilihan Material untuk Lapis Lindung (<i>Coating</i>).....	13
2.4.4 Lapisan Organik dengan Cat	17
2.4.5 Jenis Lapis Lindung (<i>Coating</i>)	18
2.4.6 Mekanisme Perlindungan Cat.....	21
2.4.7 Degradasi Lapis Lindung (<i>Coating</i>).....	21
2.4.8 Jenis Kerusakan Lapisan Cat.....	23
2.5 Korosi pada Lingkungan Tanah	25
2.6 Proteksi Katodik	27
2.6.1 Prinsip Proteksi Katodik	30

2.6.2 Tipe Proteksi Katodik	31
2.6.3 Sistem <i>Impressed Current Cathodic Protection (ICCP)</i>	34
2.7 Potensial Korosi.....	36
2.8 Elektroda Pembanding Cu/CuSO ₄	38
2.9 Anoda Grafit	40
2.10 Acuan Penelitian.....	42
2.11 Analisis Statistik Hasil Pengujian	45
2.11.1 Persamaan Regresi Linier Sederhana	45
2.11.2 Regresi Linier Berganda	46
2.11.3 Analisa Varians (ANOVA)	46
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	49
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	49
3.2 Standard Penelitian.....	50
3.3 Bahan Penelitian.....	51
3.4 Alat Penelitian	54
3.5 Langkah-Langkah Penelitian.....	57
3.5.1 Preparasi Spesimen (Katoda).....	57
3.5.2 Preparasi Anoda	63
3.5.3 Preparasi Media Elektrolit	64
3.5.4 Pengkondisian Spesimen	64
3.5.5 Pembuatan Rangkaian ICCP.....	64
3.6 Pengukuran Arus Proteksi	65
3.7 Rancangan Penenitian	66
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN...69	69
4.1 Analisa Data	69
4.1.1 Pengujian Spektrometer.....	69
4.1.2 Kondisi Awal Pipa API 5L <i>Grade B</i>	70
4.1.3 Pengukuran Arus Proteksi Pipa	75
4.1.4 Perbandingan Hasil Pengukuran Arus Proteksi dalam Tanah dengan pH 3, pH 7, dan pH 11	76

4.1.4.1 Perbandingan Arus Proteksi Pipa dalam Media Tanah pH 3.....	77
4.1.4.2 Perbandingan Arus Proteksi Pipa dalam Media Tanah pH 7.....	81
4.1.4.3 Perbandingan Arus Proteksi Pipa dalam Media Tanah pH 11.....	85
4.1.5 Perbandingan Hasil Pengukuran Arus Proteksi berdasarkan Luas Goresan pada Pipa	89
4.1.5.1 Pengukuran Arus Proteksi Pipa Tanpa Goresan.....	89
4.1.5.2 Pengukuran Arus Proteksi Pipa dengan Luas Goresan 10 mm ²	90
4.1.5.3 Pengukuran Arus Proteksi Pipa dengan Luas Goresan 50 mm ²	92
4.1.5.4 Pengukuran Arus Proteksi Pipa dengan Luas Goresan 100 mm ²	94
4.1.5.5 Pengukuran Arus Proteksi Pipa dengan Luas Goresan 150 mm ²	96
4.1.5.6 Pengukuran Arus Proteksi Pipa dengan Luas Goresan 250 mm ²	99
4.1.5.7 Pengukuran Arus Proteksi Pipa dengan Luas Goresan 500 mm ² ..	101
4.1.5.8 Pengukuran Arus Proteksi Pipa Tanpa <i>Coating</i>	103
4.1.6 Rata-Rata Kebutuhan Arus Proteksi.....	104
4.1.7 Analisis Hasil Pengukuran Arus Proteksi Menggunakan Metode Statistika	108
4.1.7.1 Persamaan Regresi Linier Sederhana.	109
4.1.7.2 Regresi Linier Berganda	115
4.1.7.3 Analisa Varians (ANOVA).....	116

4.1.8 Hasil Foto Makro.....	117
4.2 Pembahasan.....	120
4.2.1 Pengukuran Arus Proteksi.....	120
4.2.1.1 Pengukuran Arus Proteksi dalam pH Tanah yang Sama	121
4.2.1.1 Pengukuran Arus Proteksi dalam Luas Goresan yang Sama.....	121
4.2.2 Hasil Foto Makro.....	123
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	125
5.1 Kesimpulan	125
5.2 Saran	125
DAFTAR PUSTAKA	127
LAMPIRAN	129



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Komposisi Kimia Pipa API 5 L <i>Grade B</i>	9
Tabel 2.2 Material dan Spesifikasi Pipa API 5L	9
Tabel 2.3 Sistem Cat untuk Beberapa Kategori Korosi	14
Tabel 2.4 Jenis Cat, diperlukan Pre-Treatment, Aplikasi Temperatur, Batas Waktu untuk <i>Over</i> <i>Painting</i> , dan Kondisi Aktual Lingkungan	15
Tabel 2.5 Keuntungan dan Kerugian dalam Penggunaan Metode <i>Coating</i> untuk Proteksi Korosi	16
Tabel 2.6 Kecepatan Tembus Uap Air untuk Berbagai Ukuran Lubang	18
Tabel 2.7 Kecepatan Tembus Cairan Air	18
Tabel 2.8 Korosi pada Baja, Tembaga, Timah Hitam dan Seng. Kedalaman Korosi Maksimum setelah Beberapa Waktu	27
Tabel 2.9 Kriteria untuk Proteksi Katodik	29
Tabel 2.10 Perbandingan diantara Sistem Anoda Tumbal dengan Arus Paksa	33
Tabel 2.11 Elektroda Pembanding	38
Tabel 2.12 Kriteria Potensial Korosi	40
Tabel 2.13 Laju Konsumsi Material Anoda pada Sistem ICCP	41
Tabel 2.14 Tabel Analisa Varians	47
Tabel 3.1 Komposisi Kimia Pipa API 5L <i>grade B</i>	51
Tabel 3.2 Spesifikasi Anoda Grafit	51
Tabel 3.3 Rencana Pengukuran Arus Proteksi	67
Tabel 4.1 Hasil Pengujian Spektrometer Pipa API 5L <i>grade B</i>	69
Tabel 4.2 Kondisi Awal setelah Imersi Pipa dalam Elektrolit Tanah (a) pH 3, (b) pH 7, dan (c) pH 11 tanpa Instalasi ICCP selama 7 hari untuk Cacat Gores Lingkaran	71
Tabel 4.3 Kondisi Awal setelah Imersi Pipa dalam Elektrolit Tanah (a) pH 3, (b) pH 7, dan	

(c) pH 11 tanpa Instalasi ICCP selama 7 hari
untuk Cacat Gores Persegi Panjang72

Tabel 4.4 Perbandingan Hasil Pengukuran Rata-Rata
Arus Proteksi pada Pipa dalam pH Tanah (a) 3,
(b) 7, dan (c) 11 dengan Cacat Gores
Berbentuk Lingkaran105

Tabel 4.5 Perbandingan Hasil Pengukuran Rata-Rata
Arus Proteksi pada Pipa dalam pH Tanah (a) 3,
(b) 7, dan (c) 11 dengan Cacat Gores
Berbentuk Persegi Panjang106

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Contoh Sel Korosi	6
Gambar 2.2 Proteksi Katodik pada Pipa dengan Anoda Magnesium	28
Gambar 2.3 Pergeseran Potensial dari Potensial Korosi Bebas E_{corr} ke Potensial yang lebih rendah E_c dengan sarana Arus Eksternal I_e	30
Gambar 2.4 (a) <i>Sacrificial Anodes</i> (b) <i>Impressed Current</i>	32
Gambar 2.5 Sistem proteksi <i>Impressed Current</i> <i>Cathodic Protection (ICCP)</i> pada <i>pipeline</i> yang tertanam dalam tanah menggunakan anoda grafit	35
Gambar 2.6 Potensial Korosi dari Logam	37
Gambar 2.7 Elektroda Standar Cu/CuSO ₄	39
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	50
Gambar 3.2 Bahan-Bahan Penelitian yang Digunakan	54
Gambar 3.3 Alat-Alat Penelitian yang Digunakan	57
Gambar 3.4 Spesimen Katoda	57
Gambar 3.5 Ilustrasi Spesimen Katoda dengan Goresan Berbentuk Lingkaran Seluas: (a) 0 mm ² (<i>Full Coating</i>), (b) 10 mm ² , (c) 50 mm ² , (d) 100 mm ² , (e) 150 mm ² , (f) 250 mm ² , (g) 500 mm ² , (h) Tanpa <i>Coating</i>	59
Gambar 3.6 Ilustrasi Spesimen Katoda dengan Goresan Berbentuk Persegi Panjang Seluas: (a) 0 mm ² (<i>Full Coating</i>), (b) 10 mm ² , (c) 50 mm ² , (d) 100 mm ² , (e) 150 mm ² , (f) 250 mm ² , (g) 500 mm ² , (h) Tanpa <i>Coating</i>	61
Gambar 3.7 Langkah Preparasi Spesimen	61
Gambar 3.8 Langkah Preparasi Anoda	63
Gambar 3.9 Skema Rangkaian Sistem ICCP	65

Gambar 3.10	Pengukuran Arus Proteksi	66
Gambar 4.1	Grafik Potensial Awal Imersi Pipa dalam Elektrolit Tanah dengan Goresan Lingkaran	74
Gambar 4.2	Grafik Potensial Awal Imersi Pipa dalam Elektrolit Tanah dengan Goresan Persegi Panjang	75
Gambar 4.3	Arus Proteksi Pipa dalam Media Tanah pH 3 untuk Cacat Gores Lingkaran	77
Gambar 4.4	Arus Proteksi Pipa dalam Media Tanah pH 3 untuk Cacat Gores Persegi Panjang	79
Gambar 4.5	Arus Proteksi Pipa dalam Media Tanah pH 7 untuk Cacat Gores Lingkaran	81
Gambar 4.6	Arus Proteksi Pipa dalam Media Tanah pH 7 untuk Cacat Gores Persegi Panjang	83
Gambar 4.7	Arus Proteksi Pipa dalam Media Tanah pH 11 untuk Cacat Gores Lingkaran	86
Gambar 4.8	Arus Proteksi Pipa dalam Media Tanah pH 11 untuk Cacat Gores Persegi Panjang	87
Gambar 4.9	Grafik Perbandingan Arus Proteksi Pipa Tanpa Goresan dalam Media Tanah pH 3, pH 7, dan pH 11	89
Gambar 4.10	Grafik Perbandingan Arus Proteksi Pipa dengan Goresan Lingkaran Seluas 10 mm ² dalam Media Tanah pH 3, pH 7, dan pH 11	90
Gambar 4.11	Grafik Perbandingan Arus Proteksi Pipa dengan Goresan Persegi Panjang Seluas 10 mm ² dalam Media Tanah pH 3, pH 7, dan pH 11	91
Gambar 4.12	Grafik Perbandingan Arus Proteksi Pipa dengan Goresan Lingkaran Seluas 50 mm ² dalam Media Tanah pH 3, pH 7, dan pH 11	92
Gambar 4.13	Grafik Perbandingan Arus Proteksi	

	Pipa dengan Goresan Persegi Panjang Seluas 50 mm ² dalam Media Tanah pH 3, pH 7, dan pH 11	93
Gambar 4.14	Grafik Perbandingan Arus Proteksi Pipa dengan Goresan Lingkaran Seluas 100 mm ² dalam Media Tanah pH 3, pH 7, dan pH 11	94
Gambar 4.15	Grafik Perbandingan Arus Proteksi Pipa dengan Goresan Persegi Panjang Seluas 100 mm ² dalam Media Tanah pH 3, pH 7, dan pH 11	95
Gambar 4.16	Grafik Perbandingan Arus Proteksi Pipa dengan Goresan Lingkaran Seluas 150 mm ² dalam Media Tanah pH 3, pH 7, dan pH 11	97
Gambar 4.17	Grafik Perbandingan Arus Proteksi Pipa dengan Goresan Persegi Panjang Seluas 150 mm ² dalam Media Tanah pH 3, pH 7, dan pH 11	98
Gambar 4.18	Grafik Perbandingan Arus Proteksi Pipa dengan Goresan Lingkaran Seluas 250 mm ² dalam Media Tanah pH 3, pH 7, dan pH 11	99
Gambar 4.19	Grafik Perbandingan Arus Proteksi Pipa dengan Goresan Persegi Panjang Seluas 250 mm ² dalam Media Tanah pH 3, pH 7, dan pH 11	100
Gambar 4.20	Grafik Perbandingan Arus Proteksi Pipa dengan Goresan Lingkaran Seluas 500 mm ² dalam Media Tanah pH 3, pH 7, dan pH 11	101
Gambar 4.21	Grafik Perbandingan Arus Proteksi Pipa dengan Goresan Persegi Panjang Seluas 500 mm ² dalam Media Tanah pH 3, pH 7, dan pH 11	102

Gambar 4.22	Grafik Perbandingan Arus Proteksi Pipa Tanpa <i>Coating</i> dalam Media Tanah pH 3, pH 7, dan pH 11	103
Gambar 4.23	Grafik Pengaruh Luas Goresan Lingkaran terhadap Rata-rata Arus Proteksi	107
Gambar 4.24	Grafik Pengaruh Luas Goresan Persegi Panjang terhadap Rata-rata Arus Proteksi	108
Gambar 4.25	Grafik Pengaruh Luas Goresan Berbentuk Lingkaran terhadap Arus Proteksi dalam Bentuk Persamaan Regresi Linier	109
Gambar 4.26	Grafik Pengaruh Luas Goresan Berbentuk Persegi Panjang terhadap Arus Proteksi dalam Bentuk Persamaan Regresi Linier	110
Gambar 4.27	Grafik Pengaruh pH Tanah terhadap Arus Proteksi dalam Bentuk Persamaan Regresi Linier pada Goresan Lingkaran	113
Gambar 4.28	Grafik Pengaruh pH Tanah terhadap Arus Proteksi dalam Bentuk Persamaan Regresi Linier pada Goresan Persegi Panjang	115
Gambar 4.29	Kondisi Spesimen dalam pH 3 setelah Running selama 7 hari	117
Gambar 4.30	Kondisi Spesimen dalam pH 7 setelah Running selama 7 hari	118
Gambar 4.31	Kondisi Spesimen dalam pH 11 setelah Running selama 7 hari	119
Gambar 4.32	Kurva Hubungan pH dengan Laju Korosi	122



(Halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dewasa ini kebutuhan akan energi di dunia, terkhusus minyak bumi terus meningkat. Tidak terpenuhinya kebutuhan energi dalam suatu negara atau bahkan hanya terlambat dalam proses distribusi akan bisa menyebabkan suatu negara tersebut lumpuh tidak bisa beraktivitas. Oleh karena itu, peran dari industri yang bergerak dibidang energi terutama industri minyak dan gas sangatlah vital dalam menjaga kelangsungan suatu negara.

Industri minyak dan gas sangat memperhatikan jaringan pipa bawah tanah (*Onshore Pipeline*). Hal ini dikarenakan *onshore pipeline* memiliki peranan yang sangat penting terutama dalam hal kelancaran proses produksi dan pendistribusian minyak maupun gas. Dalam memasang *onshore pipeline* tidaklah boleh dilakukan sembarangan, apalagi fluida yang dialirkan adalah minyak dan gas yang mana sangat korosif. Umumnya, *onshore pipeline* didesain dengan usia antara 10 sampai 40 tahun. Namun, sering kali desain *onshore pipeline* yang sudah direncanakan tidak sesuai dengan realita yang ada. Kebanyakan umur pakai yang pipa kurang atau tidak bisa mencapai dengan umur yang sudah didesain. Korosi menjadi penyebab utama dari kegagalan ini, yang mana bisa menyebabkan kualitas dari suatu material itu menurun akibat berinteraksi dengan lingkungannya. Oleh karena itu, dalam perancangan *onshore pipeline* harus memperhatikan banyak faktor dan dengan beberapa pertimbangan agar bisa dihasilkan rancangan yang sedemikian rupa yang memiliki umur pakai yang lebih lama serta sesuai dengan standar yang ada.

Korosi dalam industri minyak dan gas sangatlah besar kemungkinannya. Fluida yang dialirkan, belum lagi faktor lingkungan, semuanya bersifat korosif dan bisa mengancam desain *onshore pipeline* yang sudah dirancang. Maka dari itu, sangat penting untuk melakukan perlindungan yang



sedemikian rupa supaya jaringan pipa aman, mulai dari pemilihan material sampai dengan instalasi pipa. Material yang biasa digunakan di industri minyak dan gas adalah Pipa API 5L *Grade B*. Pipa ini sangat cocok dipakai untuk mengalirkan fluida minyak dan gas karena sudah sesuai dengan standar dari *American Petroleum Institute*.

Selain faktor fluida, kondisi lingkungan tanah yang ekstrem juga semakin memperparah kecenderungan korosi untuk terjadi. Tidak hanya korosi internal yang disebabkan oleh fluida yang mengalir didalam pipa, namun korosi eksternal juga bisa terjadi. Perlindungan korosi dengan cara pelapisan (*coating*) menjadi sebuah kewajiban untuk dilakukan guna menanggulangi masalah ini. Pelapisan (*coating*) merupakan salah satu cara yang efektif untuk mencegah terjadinya korosi pada pipa. Lapisan *coating* ini akan melindungi pipa dari korosi dengan cara mencegahnya untuk berinteraksi dengan lingkungan karena terhalang oleh adanya lapisan-lapisan *coating* ini. Namun demikian, kemungkinan untuk terjadinya kerusakan pada *coating* tetaplah selalu ada, seperti saat pemasangan dan saat pengiriman (*shipping*), bahkan dalam kondisi kerja pun juga demikian. Dari sini bisa dilihat bahwasanya meskipun sudah dilakukan *coating*, tidaklah bisa menjamin suatu material bisa terbebas dari serangan korosi.

Banyak cara dilakukan untuk menghambat terjadinya korosi pada *onshore pipeline*, seperti yang sudah disebutkan diatas yaitu dengan dimulai dari pemilihan material pipa yang memiliki ketahanan tinggi terhadap korosi yaitu dengan pipa API 5L *grade B*, lalu dengan teknologi pelapisan (*coating*). Namun ternyata, masih ada cara lain yang juga biasa digunakan oleh perusahaan untuk melindungi jaringan pipa bawah tanah terhadap korosi, yaitu dengan menggunakan proteksi katodik. Ada dua macam proteksi katodik, namun yang biasa digunakan adalah metode sistem *Impressed Current Cathodic Protection* (ICCP). Sistem ICCP ini sanggup memberikan jangkauan perlindungan yang relatif besar terhadap jaringan pipa serta arus yang diberikan bisa



diatur sedemikian rupa dengan sebuah alat yang bernama *rectifier*. Sistem ICCP ini menggunakan arus dari luar yang mana akan disearahkan oleh *rectifier*. Umumnya anoda yang dipakai adalah material dengan laju konsumsinya yang rendah, dimana material itu lebih mulia daripada material pipa.

Sistem ICCP ini bisa digunakan untuk melindungi struktur baik yang diberi *coating* ataupun tidak. Tingkat fleksibilitas dari sistem ini juga cukup baik karena bisa didesain dengan rentang kapasitas output arus yang luas. Artinya, kebutuhan arus dapat diatur baik secara manual maupun secara otomatis dengan merubah tegangan output sesuai dengan kebutuhan. Dengan tingkat fleksibilitas yang tinggi tersebut, yang mana kita bisa menentukan kebutuhan arus proteksi dapat dimanfaatkan untuk mengendalikan korosi pada jaringan pipa baik yang memiliki *coating* yang bagus ataupun dalam kondisi yang rusak. Hal inilah yang melatar belakangi penulis melakukan penelitian dengan menggunakan metode ICCP untuk struktur pipa dengan kondisi *coating* yang rusak atau cacat menggunakan anoda grafit dalam lingkungan tanah (*onshore*) dengan kondisi keasaman (pH) tanah yang berbeda.

1.2 Perumusan Masalah

Perumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh luas goresan lapis lindung terhadap arus proteksi sistem ICCP pada pipa API 5L grade B?
2. Bagaimana pengaruh tingkat keasaman (pH) tanah terhadap arus proteksi sistem ICCP pada pipa API 5L grade B?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Memahami pengaruh luas goresan lapis lindung terhadap arus proteksi sistem ICCP pada pipa API 5L grade B.



2. Memahami pengaruh tingkat keasaman (pH) tanah terhadap arus proteksi sistem ICCP pipa API 5L *grade B*.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dan asumsi dalam penelitian ini adalah:

1. Material baja karbon rendah API 5L *grade B* homogen.
2. Diasumsikan spesimen berada pada kondisi atmosfer yang sama (konsentrasi O₂ sama).
3. Kelembapan udara pada lingkungan sama.
4. Nilai resistivitas tanah diabaikan.
5. Perubahan temperatur dan pH pada lingkungan diabaikan.
6. Lapis lindung yang digunakan menutup permukaan spesimen dengan sempurna, selain goresan yang sengaja dibuat.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari dilakukannya penelitian ini yaitu dapat menjadi referensi untuk menentukan arus proteksi yang harus diberikan agar sesuai dengan kondisi *pipeline* dengan kondisi *coating* yang memiliki goresan. Selain itu, kita dapat mengembangkan keilmuan mengenai proteksi katodik khususnya ICCP dalam aplikasinya di industri minyak dan gas.



BAB II

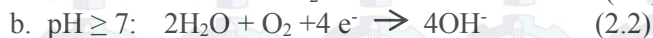
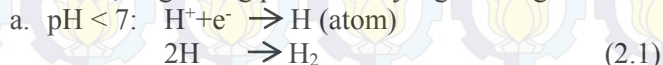
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Dasar Korosi

Menurut E. Bardal (2003), korosi didefinisikan dengan cara yang berbeda, tetapi secara umum diinterpretasikan sebagai serangan pada material logam karena bereaksi dengan lingkungannya. Konsep dari korosi dapat juga digunakan dalam arti yang lebih luas dimana ini termasuk pada serangan pada material non-logam. Sedangkan menurut Callister (2006), korosi didefinisikan sebagai serangan yang merusak dan tidak disengaja pada suatu logam, yang mana itu adalah reaksi elektrokimia dan biasanya dimulai dari permukaan. Untuk material logam, korosi normalnya berlangsung dengan proses elektrokimia, dimana itu adalah reaksi kimia yang mana terjadi transfer elektron dari jenis material satu ke yang lain. Proses ini terjadi bila ada reaksi setengah sel yang melepaskan elektron (reaksi oksidasi pada anoda) dan reaksi setengah sel yang menerima elektron tersebut (reaksi reduksi pada katoda). Kedua reaksi ini akan terus berlangsung sampai terjadi kesetimbangan dinamis dimana jumlah jumlah elektron yang dilepas sama dengan jumlah elektron yang diterima. Korosi dapat terjadi jika 4 syarat dibawah ini terpenuhi, yaitu :

1. Adanya Katoda

Katoda merupakan tempat terjadinya reaksi reduksi dimana ion positif berkumpul. Pada katoda biasanya tidak terjadi korosi, walaupun demikian mungkin menderita kerusakan dalam kondisi tertentu. Dua reaksi penting yang umum terjadi pada katoda, tergantung pH larutan yang bersangkutan adalah :



2. Adanya Anoda

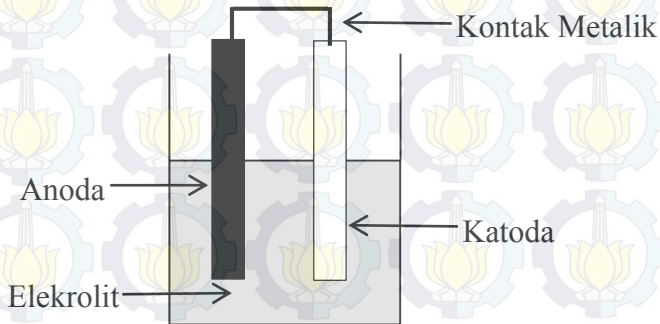
Anoda merupakan tempat terjadinya reaksi oksidasi dimana ion negatif berkumpul. Anoda biasanya terkorosi dengan melepaskan elektron-elektron dari atom-atom logam netral untuk membentuk ion-ion yang berangkutan. Ion-ion ini

mingkin tetap tinggal dalam larutan atau bereaksi membentuk produk korosi yang tidak larut. Reaksi ini bias menghalangi pelarutan logam lebih lanjut yang disebut pemasifan (*passivasi*) dimana reaksi korosi berhenti. Reaksi oksidasi logam M biasanya dinyatakan dalam persamaan:



Dengan banyak elektron yang diambil dari masing-masing atom yang ditentukan oleh valensi logam yang bersangkutan. Umumnya $z = 1, 2,$ atau 3 .

3. Elektrolit sebagai media korosi, penghantar elektron antara katoda dan anoda (*conductive electrolyte*).
4. Kontak metalik sebagai penghubung anoda dan katoda (*electrically connecting*).



Gambar 2.1 Contoh Sel Korosi (Callister, 2006)

Dalam sistem seperti gambar 2.1, korosi bisa terjadi pada anoda (Fe) jika antara anoda (Fe) dan katoda (Cu) terdapat selisih energi bebas atau ada perbedaan potensial. (Callister, 2006:622-626)

2.2 Korosi pada Pipa Pipeline Baja Karbon

Penggunaan material pipa pada *pipelin* di industri minyak dan gas didominasi oleh pipa baja karbon. Pipa baja karbon memiliki banyak kelebihan, diantaranya adalah harganya yang relatif lebih murah, mudah diaplikasikan di lapangan dan sifat mekaniknya yang bagus. Adapun pengoperasian pipa pada



pipeline di industri minyak dan gas membutuhkan proteksi pada permukaan eksternal pipa, karena pipa pada *pipeline* kerap terekspos lingkungan dan cenderung berinteraksi dengan lingkungan. Pada akhirnya, akan timbul korosi pada pipa *pipeline* (Rafferty, 1989).

Korosi merupakan penyebab utama terjadinya kegagalan pada pipa *pipeline*. Korosi yang terjadi pada *pipeline* di industri minyak dan gas antara lain adalah korosi atmosferik untuk pipa *above ground* dan korosi tanah untuk *buried pipe* (Harris, dkk. 2006).

Korosi atmosferik merupakan korosi yang terjadi akibat pipa berinteraksi dengan lingkungannya di udara, contohnya elevasi temperatur, kecepatan angin, dan kelembaban. Korosi atmosferik ini menyebabkan terjadinya oksidasi pada pipa yang terekspos pada lingkungan atmosfer. Korosi tanah terjadi pada material yang berada dalam tanah (*buried*). Tanah merupakan media elektrolit yang menyebabkan pipa menjadi korosi. Tanah bersifat korosif karena mengandung beberapa material seperti air, mineral, dan adanya mikroorganisme di dalam tanah. Tidak hanya itu, adapun kelembapan serta keberadaan oksigen dalam tanah juga menjadi faktor korosi untuk baja karbon (Muhlbauer, 2004).

2.3 Jenis Material Pipa

Menurut standar API 5L (2004), terdapat beberapa macam tipe material pipa yang biasa digunakan, yaitu A25, A, B, X42, X46, X52, X56, X60, X64, X70 dan X80. Setiap tipe material mempunyai karakteristik zat dan material penyusun masing-masing. Spesifikasi material baja yang digunakan tergantung pada komposisi kimiawi, kekuatan material, dan toleransi pipa dalam industri dan manufaktur. Beberapa material harus ditentukan untuk mendapatkan material pipa yang tepat sesuai kebutuhan sistem perpipaan.

Material yang sering digunakan dalam dunia migas, industri, dan manufaktur terdiri dari dua macam, yaitu :

a) *Carbon Steel*



Material pipa jenis ini adalah yang paling banyak digunakan, spesifikasinya banyak ditemukan dalam ASTM (*American Society of Testing and Materials*) dan ASME (*American Society of Mechanical Engineering*).

Ada 3 jenis material pipa yang paling sering digunakan :

1. ASTM A106. Terbagi dalam 3 grade, tergantung *Tensile Strength*nya; Grade A (48 ksi), Grade B (60 ksi), dan Grade C (70 ksi).
2. ASTM A53. Material pipa ini yang biasanya dilapisi oleh *zinc (galvanized)*, yang biasanya merupakan alternatif dari ASTM A106. Material ini juga terbagi dalam 3 Grade, A, B dan C, dan memiliki 3 tipe; Tipe E (*Electrical Resistance Weld*), Tipe F (*Furnace Butt Weld*), dan Tipe S (*Seamless*). Grade A dan B pada ASTM 106 memiliki *Tensile Strength* yang sama dengan Grade A dan B pada ASTM A53.
3. ASTM A333. Material ini biasa digunakan pada fluida yang memiliki temperatur rendah, mulai dari -50°F .

b) *Stainless steel*

Material pipa ini dinamakan *austenitic stainless steel*. Namun secara umum biasanya disebut *stainless steel*. *Stainless steel* mempunyai grade 108, tetapi yang biasa digunakan adalah tipe 304L. Sesuai kode L dibelakang nama 304L, tipe ini mengandung cukup sedikit campuran karbon daripada tipe 304, tetapi memiliki kekuatan yang tinggi dan ketahanan terhadap korosi yang cukup baik.

Pada dunia industri yang sebenarnya, ada dua jenis pipa *stainless steel* yang paling sering dipakai, yaitu:

1. ASTM A312, untuk pipa berukuran dibawah 8 inci.
2. ASTM A358, untuk pipa berukuran diatas 8 inci.

Dalam penelitian ini, material pipa yang digunakan adalah baja karbon rendah API 5 L *grade B*. Spesifikasinya dapat dilihat pada tabel 2.1.



Tabel 2.1 Komposisi Kimia Pipa API 5 L Grade B
(Specification for Line Pipe API 5L Standard 43rd Edition)

Elemen	Kadar (%)
Carbon	0.24
Mangan	1.2
Phospor	0.025
Sulfur	0.015
Others (Columbium/Niobium, vanadium, titanium or combination)	0.04

Pipa API 5L banyak digunakan dalam industri minyak dan gas baik *onshore* maupun *offshore*. Adapun maksud dari API 5L Grade B adalah :

- API : American Petroleum Institute
- 5 : Seri yang digunakan untuk *Tubular Goods*
- L : Line Pipe
- B : Grade yang berhubungan dengan sifat mekanik material dan komposisi kimianya

Tabel 2.2 Material dan Spesifikasi Pipa API 5L
(API Specification for Line Pipe 43rd Edition, table 2 and 3)

Standard Spec.	Grade	Chemical Composition (%)				Mechanical Strength	
		C Max	Mn Max	P Max	S Max	Yield Strength (MPa)	Ultimate Tensile Strength (MPa)
API 5L	A25	0,21	0,60	0,03	0,03	172	310
	A25	0,21	0,60	0,08	0,03	210	335
	B	0,28	1,20	0,03	0,03	241	414
	X42	0,28	1,30	0,03	0,03	290	414
	X46	0,28	1,40	0,03	0,03	317	434
	X52	0,28	1,40	0,03	0,03	359	455
	X56	0,28	1,40	0,03	0,03	386	490
	X60	0,28	1,40	0,03	0,03	414	517
	X65	0,28	1,40	0,03	0,03	448	531
	X70	0,28	1,65	0,03	0,03	483	565



2.4 Lapis Lindung (*Coating*) pada *Pipeline*

2.4.1 Hubungan antara *Coating* dan Pipa pada *Pipeline*

Spesifikasi *coating* ini menyatakan bahwa fungsi lapisan *coating* tersebut adalah untuk mengendalikan korosi dengan mengisolasi permukaan luar dari pipa bawah tanah atau yang terendam dari lingkungan, untuk mengurangi kebutuhan perlindungan katodik, dan untuk meningkatkan (pelindung) saat distribusi. *Coating* harus dipilih dan diterapkan dengan baik, serta harus berhati-hati dalam memasang untuk memenuhi fungsi tersebut. (ASM Metals Handbook Vol. 13, 1987)

Coating merupakan pelindung atau *shield* untuk pipa dari berbagai jenis elektrolit yang dapat membahayakan fungsi pipa tersebut. Tidak semua pipa dalam suatu sistem dalam *oil and gas service* menggunakan *coating* karena beberapa material pipa tersebut tidak bekerja dalam kondisi atau ancaman degradasi material yang berbahaya, misalnya korosi. Jenis *coating* yang diaplikasikan untuk pipa cukup banyak dan bervariasi. Aplikasi jenis *coating*nya pun bergantung pada permukaan pipa yang akan dilindungi. Pipa memiliki 2 permukaan (*surface*), yakni internal dan eksternal. Adapun sistem *coating* pada *pipeline* terbagi menjadi 2 macam berdasarkan jenis permukaannya (*surface*), yakni internal dan eksternal *surface*.

Penggunaan *coating* untuk eksternal *surface* dikondisikan dari penempatan pipa suatu sistem. Adapun beberapa kondisi tertentu yang menggunakan *coating* eksternal *surface* adalah :

- a. *Buried Steel Facilities* : Korosi pada pipa yang dipasang di dalam tanah.
- b. *Atmospheric Corrosion* : Korosi yang terjadi karena pipa berada di lingkungan atmosferik.
- c. *Other Materials* : Korosi yang terjadi karena pipa berada di lingkungan yang sangat korosif, contohnya *splash zone*.



2.4.2 Komposisi Lapis Lindung (*Coating*)

Lapis lindung (*coating*) merupakan produk yang paling banyak digunakan untuk kontrol korosi. *Coating* ini digunakan untuk memberikan perlindungan jangka panjang di bawah berbagai kondisi korosif. *Coating* sebagai pelindung pada dasarnya memberikan efek penguatan yang sedikit pada struktur material, namun mereka melindungi bahan lain untuk menjaga kekuatan dan integritas mereka. Fungsi utama dari *coating* adalah untuk mengisolasi unsur reaktif dari lingkungan korosif. *Coating* harus memberikan penghalang yang kontinu pada substrat, dan sedikit saja ada titik kerusakan (*imperfection*) bisa menjadi titik fokus degradasi dan korosi pada substrat.

Cat anti korosi terdiri dari pengikat, pigmen, pelarut/pengencer, extenders dan sejumlah variabel aditif lain seperti antioksidan, zat aktif permukaan, pengering, pengental dan agen antisetling. Sebuah cat terutama ditandai oleh pigmen atau dengan pengikatnya. Pada umumnya dibedakan antara primer, yang biasanya mengandung pigmen yang mana menyebabkan beberapa hambatan atau perlindungan katodik substrat, dan cat untuk finishing dalam pelapisan, yang mengandung pigmen warna dan extenders, yang dapat meningkatkan efek penghalang dari lapisan sistem. Lapisan *coating* dalam sistem cat yang tebal dapat dibagi menjadi primer, menengah atau *coating* tubuh dan *coating*. Perkembangan terakhir dari cat film tebal berarti kurang perlu untuk membedakan antara *coating* menengah dan *coating*. (Bardal, 2003)

Berdasarkan definisi ASTM D16-47, cat yaitu larutan dispersi yang dapat diubah menjadi larutan padat yang relative tidak tembus cahaya setelah digunakan sebagai lapisan tipis pada suatu permukaan bahan dasar. Atau bisa dikatakan bahwa cat adalah suspensi fluida yang dapat disebarkan diatas permukaan sebagai lapisan tipis dan bila mengering membentuk lapisan padat dan kenyal serta berfungsi sebagai pelindung atau memperindah permukaan material yang dicat.

Bahan-bahan utama yang digunakan untuk membuat lapis lindung dapat ditempatkan ke dalam salah satu dari enam dasar



kategori yaitu wahana (*vehicle*), pigmen, *solvent*, *extender*, binder, dan aditif. Masing-masing kategori memiliki fungsi khusus dalam pembuatan lapis lindung.

- a. Wahana (*vehicle*), yaitu zat campur yang membuat cat untuk *coating* memiliki fluiditas dan bila mengering atau menguap akan meninggalkan selaput padat.
- b. Pigmen, tersuspensi dalam wahana. Pigmen ini merupakan partikel-partikel kristalin yang tidak larut didalam *solvent*. Pigmen di dalam lapisan cat berfungsi untuk:
 1. Memberi warna dan menutup permukaan.
 2. Melindungi lapisan dan permukaan dari efek sinar UV dan cuaca.
 3. Mengurangi permeabilitas lapisan.
 4. Memberikan sifat daya tahan terhadap karat (*rust inhibitive*).
 5. Untuk mengentalkan cat sehingga lapisan yang lebih tebal dapat dicapai.

Kebanyakan pigmen adalah garam-garam atau oksida logam seperti besi oksida, titanium oksida, timbal oksida, *zinc chromate*, dan lain-lain.

- c. Aditif, berfungsi untuk mempercepat proses pengeringan atau memungkinkan lapisan cat kering lebih tahan terhadap lingkungan kerja. Selain itu, aditif juga ditambahkan untuk memperbaiki sifat-sifat lapisan cat. Bahan aditif ini antara lain terdiri dari *plasticiser emulsifying agent*, *dryer*, anti *fouling*, anti fungsi, dan lain sebagainya.
- d. Binder (Bahan Pengikat)

Binder adalah cairan yang mempunyai fungsi yang sangat penting di dalam pembentukan lapisan. Diantara sifat-sifat penting yang dimiliki oleh binder antara lain :

1. Sebagai media dimana pigmen dapat menyebar merata dalam cat.
2. Untuk melekatkan cat ke permukaan yang dicat.
3. Memberikan sifat-sifat mekanik yang baik, seperti: kekerasan, kekenyalan, daya tahan abrasi, dan lain-lain.



Bahan pengikat terdiri dari minyak atau resin atau campuran dari minyak dan resin yang dapat mengering karena proses oksidasi dengan udara atau penguapan solvent.

e. Solvent

Umumnya merupakan pelarut organik seperti terpenin, terpin, keton-keton, ester-ester, hidrokarbon aromatik dan lain-lain. Solvent berfungsi untuk melarutkan dan mengencerkan bahan pengikat dan selama pegeringan cat, solvent ini akan menguap.

f. *Extender* (Bahan Pengisi)

Sebagai bahan pengisi digunakan pigmen yang tidak memiliki daya tutup dan biasanya dicampur dengan pigmen lain. Contohnya adalah CaCO_3 , *talk*, *china clay*, *barit*, *mica*, dan lain-lain.

2.4.3 Pemilihan Material untuk Lapis Lindung (*Coating*)

Sebelum melakukan pemilihan material untuk lapis lindung, perlu diketahui terlebih dahulu karakteristik dari pelindung tersebut. Lapisan *coating* memiliki beberapa macam sistem. Jenisnya dapat dibagi menjadi beberapa kelompok generik besar yang masing-masing dinamai berdasarkan penggunaan cat atau bahan kimia pengikatnya. Misalnya, vernis, alkid, resin epoksid, epoksid ter batubara, poliuretan, vinil, dan lain-lain.

Kemampuan menahan serangan alkali merupakan sifat paling penting pada cat yang digunakan untuk struktur-struktur yang terendam yang dilindungi dengan proteksi katodik arus paksa. Reaksi katoda pada permukaan logam melepaskan ion-ion hidroksil yang dapat melunakkan beberapa cat dan mengakibatkan pengelupasan. Ini selanjutnya akan memperluas permukaan logam yang memerlukan perlindungan melalui sistem arus paksa. Beberapa tipe material *coating* beserta karakteristiknya dapat dilihat pada tabel 2.3.



Tabel 2.3 Sistem Cat untuk Beberapa Kategori Korosi
(Standar ISO 1294-2)

Corrosivity Category	Environment	Pre-Treatment	Paint System	No. of Coats	Thickness (µm)
C2	Unheated interiors where Condensation may occur. Exteriors with little pollution. Mainly rural atmosphere	Sa 2 1/2	Alkyd	2-3	120
C3	Interiors with high relative humidity, some air pollution. Exteriors in urban and industrial atmosphere, moderately SO ₂ polluted. Coast climate with little salt content	Sa 2 1/2	Zinc-rich primer. Finishing coats: vinyl, chlorinated rubber or epoxy plus polyurethane	3-4	175-240
C4	Interiors in chemical industry, swimming pools, shipyards. Exteriors in industrial and marine atmosphere with moderate content of salt	Sa 2 1/2	Zinc rich primer. Finishing coats: vinyl, chlorinated rubber or epoxy plus polyurethane	4-5	250-275
C5-M (Marine)	Interiors with almost continuous condensation, heavily polluted.	Sa 2 1/2	Zinc-rich primer. Finishing coats:	4-5	325-400



	Exteriors in coast and offshore climate with high salt content.		vinyl, chlorinated rubber, epoxy, polyurethane, coal tar vinyl or coal tar epoxy	
C5-1 (Industry)	Interiors with almost continuous condensation, heavily polluted. Exteriors in aggressive industrial atmosphere with high relative humidity	Sa 2 1/2	Glass flake polyester or vinyl ester	1 1000-1500

Keterangan: C2: Low Corrosivity. C5: Very High Corrosivity

Tabel 2.4 Jenis Cat, diperlukan Pre-Treatment, Aplikasi Temperatur, Batas Waktu untuk *Over Painting*, dan Kondisi Aktual Lingkungan (*ISO Standard 8501*)

Type of Paint	Pre-Treatment ¹	Application Temperature	Can be Over-Painted after, min/max	Corrosivity Category ²
Alkyd	St 2-3 ; Sa 2,5		8 h/~	C1-C4
Vinyl Chlorinated rubber	Sa 2,5	Min 10-15°C	2h/~	C4-C5
Epoxy	Sa 2-Sa 2,5	Min 10°C	4h/~	C4-C5
Coal tar epoxy	Sa 2,5-Sa 3		18h/3d	C4-C5
	St 2 ; Sa 2,5		16h/3d	C4-C5



Epoxy mastic	Sa 2,5-Sa 3	C4-C5
Polyurethane	Sa 2,5-Sa 3	C4-C5
Polyester	Sa 2,5	C5
Zinc silicate	Sa 2,5-Sa 3	24h C4

Keterangan:

1 ISO 8501-1: St = wire brushing, Sa = blast cleaning

2 Categories: C0: very low corrosivity, C5: very high corrosivity

Selain memiliki banyak keuntungan dengan adanya lapis lindung (*coating*) sebagai proteksi korosi, ada beberapa kerugian yang bisa menjadi bahan pertimbangan agar dapat memaksimalkan peran dan fungsi *coating*. Keuntungan dan kerugian penggunaan *coating* dapat dilihat pada tabel 2.5.

Tabel 2.5 Keuntungan dan Kerugian dalam Penggunaan Metode *Coating* untuk Proteksi Korosi (*Balai Besar Bahan dan Barang Teknik*)

No	Keuntungan	Kerugian
1	Mudah diaplikasikan	<i>Lifetime</i> lapisan pelapis terbatas (<i>coating breakdown</i>)
2	Mudah dirawat / diperbaiki	Sifat mekanik relatif rendah
3	Tersedia dalam jumlah yang melimpah (bahan pelapis)	Mengalami degradasi, khususnya oleh sinar Ultraviolet
4	Relatif murah	Ketahanan terhadap temperatur relatif rendah, maksimal 200°C
5	Efektif dalam pencegahan korosi	Dengan persiapan permukaan yang kurang baik dapat mengarah ke



*Corrosion under insulation
(CUI)*

- 6 Dapat diaplikasikan bersama-sama dengan proteksi katodik
-

2.4.4 Lapisan Organik dengan Cat

Pelapisan dengan cat sering dijumpai. Biasanya lapisan *cat protective* mempunyai lapisan utama primer (*under coat*) dan lapisan luar (*top coat*). Lapisan primer mempunyai adhesi yang tinggi serta mengandung inhibitor, sedang top (*finishing coat*) bagian luar terutama ditekankan pada sifat tahan gores dan dekoratif (warna dan rupa).

Inhibitor dalam primer antara lain berbentuk *red-lead* (2PbO.Pb_2), *white-lead* (Pb Karbonat), *calcium-plumeate* (2CaO.PbO_2), *zinc-chromate* dan serbuk logam Zn. Selain Zn-Cr sebagai inhibitor, Zn dan Al digunakan dalam cat sebagai proteksi galvanis, sedang Cu ditambahkan untuk cat anti *fauling*. Pigmen pewarna adalah *red-oxide* (besi oksida, atau oksida sintesis) dan titanium oksida. Selain senyawa-senyawa tersebut diatas dalam cat mengandung juga pengikat (*oil varnish, resin* dan sebagainya) dan pengencer (*thinner*).

Adapun lapisan organik atau cat yang digunakan pada penelitian ini adalah cat *zinc-chromate*. Cat Zn-Cr ini termasuk dalam kategori cat alkyd. Cat alkyd menggunakan binder jenis alkyd resin. Binder ini paling banyak digunakan karena mempunyai sifat mudah diaplikasikan dan dapat dilapis ulang, mengering karena oksida dengan udara. Sedangkan pelarut yang banyak digunakan adalah senyawa hidrokarbon alifatik seperti mineral spirit.

Lapisan cat sebagaimana lapisan-lapisan lain harus merupakan *barrier* pemisah logam dan lingkungannya supaya mencegah terjadinya korosi. Daya tembus dari media korosi merupakan sesuatu yang penting, seperti halnya uap air dalam udara (*humid*). Apalagi air tersebut mengandung unsur-unsur kimia yang sangat korosif. Dengan demikian porosity dari cat



perlu diperhatikan. Lapisan tipis uap air dipermukaan dibawah lingkungan udara lembab, kira-kira hanya 150-180 kali diameter molekulnya ($500-600 \text{ \AA} = \frac{1}{2} \text{ mikron}$) yang cukup untuk menurunkan konduktif listrik permukaan logam. Lapisan cat harus dapat menahan tembusnya uap air tersebut. Tabel 2.6 berikut ini menunjukkan kecepatan tembus uap air untuk berbagai ukuran lubang.

Tabel 2.6 Kecepatan Tembus Uap Air untuk Berbagai Ukuran Lubang
(Balai Besar Bahan dan Barang Teknik)

Diam Lubang (μ)	Kecepatan Tembus (mg/hari)
0,1	0,000001
0,5	0,000042
1,0	0,000100
2,0	0,000400
5,0	0,006000

Sedangkan untuk tabel 2.7 berikut ini menunjukkan kecepatan tembus cairan berupa air.

Tabel 2.7 Kecepatan Tembus Cairan Air
(Balai Besar Bahan dan Barang Teknik)

Diam Lubang (μ)	Kecepatan Tembus (mg/hari)
0,5	0,03
0,1	0,05
2,0	0,10
55,0	0,40
10,0	1,00

2.4.5 Jenis Lapis Lindung (*Coating*)

Meskipun cat memiliki bahan utama pigmen, binder, dan solvent, tetapi biasanya dari binder kita mengambil nama yang digunakan untuk menyebutkan jenis cat. Saat ini, dikenal beberapa jenis cat, seperti :



a. Cat Minyak (*Drying Oils*)

Cat ini menggunakan binder jenis minyak yang dapat mengering karena reaksi oksidasi dengan udara seperti minyak lena (*linseed*), minyak tung, dan lain-lain.

Kelemahan dari cat ini adalah :

1. Lama mengering
2. Kurang tahan terhadap perlakuan mekanik
3. Kurang tahan terhadap senyawa kimia, air dan cuaca
4. Dapat disabunkan

Adapun kelebihan dari cat jenis ini adalah :

1. Relatif lebih murah
2. Bisa disimpan lama
3. Mudah diaplikasikan karena tidak memerlukan persiapan permukaan yang berat

b. Cat *Alkyd*

Cat ini menggunakan binder jenis alkyd resin. Binder ini paling banyak digunakan karena mempunyai sifat mudah diaplikasikan dan dapat dilapis ulang, mengering karena oksidasi dengan udara. Pelarut yang banyak digunakan adalah senyawa hidrokarbon alifatik seperti mineral spirit.

c. Cat *Bitumen*

Cat yang menggunakan bitumen mempunyai sifat tahan terhadap di lingkungan air dan dapat diaplikasikan dengan lapisan yang tebal. Jenis cat ini tidak cocok dilapis ulang dengan cat lain. Penggunaan pigmen aluminium banyak digunakan untuk lingkungan dibawah air.

d. Cat *Chlorinated Rubber* (Karet Terklorinasi)

Binder yang digunakan terbuat dari karet alam yang mengalami klorinasi sekitar 67%. Cat ini termasuk *heavy duty coating*, mengalami pengeringan karena penguapan bahan pelarutnya. Tahan terhadap lingkungan asam, basa, air, dan cuaca. Tidak dapat disabunkan dan tidak tahan pelarut. Untuk mendapatkan hasil yang baik maka cat ini memerlukan persiapan permukaan yang sempurna (*blast cleaning*). Pelarut yang cocok untuk jenis cat ini adalah senyawa hidrokarbon aromatik seperti xylene atau toluene.

e. Cat *Vinyl*



Cat ini mengalami pengeringan karena penguapan pelarut dan termasuk *heavy duty coating*. Sifat-sifat ketahanannya hampir sama dengan cat chlorinated rubber, lebih ulet, tahan lama dan lebih bersifat dekoratif. Pelarut yang cocok untuk jenis cat ini adalah senyawa-senyawa ester dan beton, dengan pelarut senyawa hidrokarbon aromatik.

f. Cat *Polyurethan*

Cat ini mengalami pengeringan karena reaksi kimia antara senyawa isocyanate dan hardener dengan senyawa polyester atau senyawa polyether. Cat ini termasuk *heavyd duty coating* yang sifatnya sebagian besar sama dengan cat epoxy.

g. Cat *Silicate*

Cat ini menggunakan binder jenis silicate dan mengandung pigmen serbuk seng atau aluminium. Mengalami pengeringan karena reaksi antara binder dengan pigmennya. Pengeringan yang sempurna memerlukan waktu yang relatif lama. Untuk mendapatkan hasil pelapisan yang baik cat ini memerlukan persiapan permukaan yang sempurna. Saifat anti korosi dari cat *zinc-silicate* lebih baik daripada *zinc-epoxy*. Cat ini lebih tahan terhadap gesekan, panas dan cuaca tetapi tidak tahan terhadap asam atau basa.

h. Cat *Epoxy*

Cat *epoxy* mengalami pegeringan karena reaksi kimia, dimana hardener (senyawa poliamin atau poliamid) ditambahkan sebelum diulaskan. Cat *epoxy* ini termasuk *heavy duty coating*, memiliki kekerasan yang baik, tahan terhadap senyawa kimia, air, minyak dan pelarut. Sebelum diaplikasikan, permukaan yang akan dicat memerlukan persiapan permukaan yang sempurna. Binder ini juga banyak dikombinasikan dengan binder lain (*drying oil, coal tar*) untuk memperoleh sifat-sifat tertentu yang diinginkan lainnya. (Departemen Perindustrian dan Perdagangan, Balai Besar Bahan dan Barang Teknik)



2.4.6 Mekanisme Perlindungan Cat

Di lingkungan industri, penggunaan cat lebih diutamakan untuk melindungi permukaan daripada lebih digunakan sebagai dekorasi. Dengan demikian, cat merupakan benteng penghalang antara permukaan yang dicat dengan lingkungan. Oleh karena itu, cat dirancang untuk mencegah berlalunya air dan oksigen bersama-sama dengan kontaminan lain.

Lapisan cat dapat melindungi permukaan dengan salah satu atau lebih dari mekanisme berikut ini :

- a. Membatasi kontak antara lingkungan dengan substrat
- b. Melepaskan zat yang bersifat melindungi atau menahan serangan lingkungan, misalnya: *chromate* primer, cat meni timbal.
- c. Menghasilkan arus listrik yang bersifat melindungi, misalnya cat *zinc rich* primer. Dalam hal ini, zinc berfungsi sebagai anoda yang dapat memberikan perlindungan terhadap baja.

2.4.7 Degradasi Lapis Lindung (*Coating*)

Pada dasarnya sebuah lapis lindung yang diberikan untuk melindungi substrat yang ada dibawahnya akan mengalami degradasi dengan sendirinya seiring berjalannya waktu dan karena faktor lingkungan lainnya. Degradasi ini mengakibatkan turunnya tingkat proteksi suatu lapis lindung, baik melalui delaminasi, blistering, hingga pengelupasan lapisan pelindung. Sehingga korosi tetap menjadi factor yang harus diperhatikan meskipun telah dilakukan *coating*.

Penyebab utama terjadinya degradasi yang berujung pada kegagalan *coating* adalah tegangan (*stress*). Stress dapat berasal dari adanya beban mekanik, serangan zat kimia, degradasi oleh sinar UV, dan kecenderungan sistem menuju kesetimbangan.

Tegangan juga bisa bersumber dari dalam material itu sendiri (*internal stress*). *Internal stress* terjadi pada saat *coating* mengalami curing, mereka mengalami penyusutan (*shrinkage*) karena terjadi penguapan solvent dan/atau pembentukan *crosslinking* polimer. Pada awal tahap penguapan solvent, temperatur transisi (T_g) polimer berada di bawah temperatur



kamar sehingga pada temperatur kamar ini rantai polimer mempunyai cukup mobilitas untuk mengalami penyusutan. Akan tetapi seiring berjalannya waktu, nilai Tg akan semakin besar sehingga rantai polimer akan mengalami penurunan mobilitas. Akibatnya muncul *internal stress* dari ketidakmampuan *coating* untuk mengalami penyusutan selanjutnya. Jadi bukan penyusutan yang menyebabkan stress, namun justru karena tidak mampu mengalami penyusutan lagi maka *coating* mengalami stress.

Internal stress juga menyebabkan kegagalan jika substratnya adalah *coating* lain seperti *coating* primer. Jika *coating* primer keras dan kuat maka peristiwa yang terjadi seperti pada baja. Namun jika *coating* primer mempunyai gaya kohesi yang rendah (mungkin karena pigmentasi berlebih) maka akan terjadi splitting kohesif. Disini yang terjadi adalah gaya penyusutan top *coating* menyebabkan stress pada lapisan *coating* primer.

Air merupakan molekul kecil yang dapat menembus lapisan *coating* dengan kecepatan yang berbeda pada tiap *coating*. Air mampu menembus lapisan dalam *coating* yang menempel dengan substrat dan melarutkan zat yang dapat larut dalam air diantara *coating* dan substrat. Jika ada zat yang sama di permukaan luar *coating*, maka sel osmosis akan terjadi. Karena ada perbedaan potensial kimia maka akan lebih banyak air yang mengalami permeasi ke dalam *coating*. Konsekuensinya adalah terbentuk blister yang terisi air.

Salah satu spesies yang dapat menyebabkan blister ini adalah garam. Ada berbagai cara garam dapat menempel pada baja atau substrat lain. Pada lingkungan laut, penempelan garam dapat terjadi baik melalui kontak langsung dengan air garam atau melalui angin yang sarat akan garam.

Penyebab stress tidak hanya dari gaya fisik mekanik yang dapat menyebabkan deformasi. Semua hal yang dapat menyerang atau mendegradasi integritas *coating* juga dapat disebut stress. Degradasi kimia termasuk dalam jenis stress ini. Unsur-unsur cuaca sederhana seperti panas, cahaya dan kelembaban dapat bersifat destruktif terhadap *coating*. Namun



di antara unsur-unsur cuaca tersebut, sumber utama penyebab degradasi *coating* adalah radiasi UV energetik dari sinar matahari. Radiasi UV ini menyebabkan pemutusan rantai dan kemudian membentuk radikal bebas yang menginisiasi perusakan cross linking polimer. Kejadian ini menyebabkan perubahan-perubahan fisik *coating*, ke arah yang lebih buruk.

2.4.8 Jenis Kerusakan Lapisan Cat

Jenis-jenis kerusakan lapisan cat yang umum terjadi dapat dilihat dibawah ini :

1. Perubahan Warna

Warna berubah menjadi kekuningan, abu-abu atau menjadi gelap, perubahan ini dapat dilihat jelas dengan membandingkan lapisan cat yang diekspose dengan yang tidak diekspose.

2. Pengapuran

Permukaan lapisan menjadi lunak dan menyerbuk serta dapat menyebabkan terjadinya perubahan warna dan penurunan kilap. Adanya pengapuran dapat dilihat dengan cara mengusapkan kapas basah ke permukaan lapisan cat, tetesan air yang keruh dari kapas menunjukkan adanya pengapuran.

3. Retak Permukaan (*Checking*)

Dicirikan oleh adanya retakan yang tidak linier dan tidak kontinu. Retakan ini hanya terjadi pada permukaan dan tidak menembus ke substrat.

4. Retak Tembus (*Cracking*)

Retakan-retakan kecil terjadi pada lapisan yang menembus sampai ke substrat. Bentuk dari cacat ini mungkin linier, menyilang atau melengkung. Retakannya bisa kontinu dan bisa tidak kontinu.

5. Retak Kulit Buaya (*Alligatoring*)

Jenis retakan ini merupakan makro-*checking* umumnya berbentuk seperti lubang-lubang jendela.

6. *Mud-Cracking*



Merupakan makro-*cracking* yang biasanya menembus ke substrat. Hal ini dapat menyebabkan cepatnya timbul korosi dan pengelupasan lapisan.

7. Pengerutan (*Wrinkling*)
Pembentukan garis-garis kerutan pada permukaan lapisan cat bisa merupakan garis-garis lurus atau tidak menentu mulai dari yang kecil-kecil atau besar.
8. Pelepuhan (*Blistering*)
Pembentukan gelembung-gelembung besar atau kecil pada lapisan cat, didalamnya berisi gas atau cairan.
9. Kerusakan oleh Mikroorganisme
Terjadinya pelunakan atau adanya bintik-bintik coklat atau hitam pada permukaan lapisan yang menyebabkan penampilan menjadi kotor.
10. Erosi
Sering terjadi pada lapisan cat yang dikuas dimana pada daerah-daerah yang banyak terdapat bekas-bekas kuas lapisan cat akan mengelupas.
11. Pengelupasan (*Peeling*)
Kerusakan lapisan cat berupa irisan-irisan yang tergantung karena mengelupas.
12. Menyempit (*Flaking*)
Lapisan cat terkelupas, mengkerut pada tepinya, mudah dilepas dari permukaan sehingga substratnya kelihatan.
13. *Undercutting*
Adanya korosi yang mengembang dibawah lapisan yang dimulai dari daerah pecahan, tepi atau lubang-lubang.
14. *Pinhole*
Lubang-lubang kecil yang terlihat oleh mata pada permukaan lapisan.
15. *Holiday*
Daerah-daerah kosong yang tidak terlapsi cat karena sukarnya untuk dilapsi.
16. *Bleeding*
Penodaan karena terjadi pemindahan pigmen berwarna yang dapat larut dari lapisan kering (lapisan sebelumnya).
17. *Runs/Sags*



Lapisan cat bergerak turun, biasanya terjadi pada permukaan yang vertikal dan akan memberikan efek *curtain*.

18. Karat (*Rusting*)

Terjadinya bintik-bintik karat karena lapisan cat rusak sehingga substrat yang tidak tertutup lagi oleh lapisan cat diserang korosi akibat kontak dengan udara luar.

2.5 Korosi pada Lingkungan Tanah

Menurut E. Bardal (2003), tanah dapat diklasifikasikan berdasarkan ukuran partikel. Kerikil mengandung partikel yang kasar (> 2 mm) dan tanah liat ($< 0,002$ mm), sedangkan pasir dan lumpur di antaranya. Tanah yang baik mengandung partikel yang kecil dengan distribusi yang cukup dan sangat padat sehingga mencegah suplai oksigen (tapi bukan dari air), sedangkan kerikil memungkinkan oksigen dapat diangkut dengan mudah. Kebanyakan bahan logam yang digunakan dalam tanah terjadi korosi walaupun dibawah kendali proteksi katodik, yang mana hal tersebut berhubungan dengan transportasi oksigen. Dengan demikian, kepadatan tanah sangat penting. Laju korosi sering lebih rendah dalam tanah yang berpori daripada tanah yang lebih kompak. Dimana kepadatan bervariasi sepanjang permukaan logam, sel aerasi diferensial dapat dibentuk dengan korosi terkonsentrasi di daerah dengan tanah padat.

Ada juga beberapa faktor lingkungan yang penting, seperti: kondisi lain yang mempengaruhi air dan suplai oksigen, resistivitas, garam yang terlarut, pH, aktivitas mikrobiologi dan adanya arus listrik dari luar. (Bardal, 2003)

Pada umumnya, tanah yang agresif memiliki resistivitas yang rendah. Pada sedimen korosif bisa sampai 2000-4000 ohm.cm, untuk di daerah yang rendah atau non-korosif adalah sekitar 4000-6000 ohm.cm atau lebih. Resistivitas yang rendah pada suatu saat tertentu menyumbangkan kontribusi dalam terbentuknya sel makro galvanik (dengan jangkauan sampai berkilometer). (Bardal, 2003)

Beberapa faktor biologis juga mempengaruhi korosi dalam tanah. Asam organik yang murni berasal dari humus sangat



korosif terhadap baja, seng, timah hitam, dan tembaga. Pada tanah pasti ada partikel tanah liat asam yang mana laju korosifnya sangat tinggi berdasarkan pengalaman dari situasi anaerob. Hal ini pada umumnya disebabkan oleh sulfat-pengurangan bakteri, yang mana mengindikasikan ferrous sulphide ditemukan sebagai salah satu bagian dari produk korosi. (Bardal, 2003)

Arus yang nyasar atau dari luar juga bisa muncul. Pada area permukaan yang kritis pada pipa, arus mengalir dari material logam ke lingkungan dengan pemutusan / disolusi anodik dari logam, dimana hal tersebut memberikan laju korosi yang tinggi dalam kondisi tidak menguntungkan. Arus luar ini bisa berasal dari jalur kereta, elektrolisis *plant*, kabel listrik dan *plant* listrik yang besar. Umumnya, arus secara langsung (DC) menyebabkan masalah yang besar. Arus AC biasanya hanya memberikan efek yang kecil pada baja, tapi sangat berbahaya pada timah hitam. (Bardal, 2003)

Menurut Bardal (2003), komposisi dari baja karbon dan atau baja paduan rendah adalah hanya memiliki pengaruh yang tidak signifikan untuk korosi yang terjadi pada tanah, seperti halnya pada kasus korosi pada lingkungan air laut atau air yang lain. *The National Bureau of Standard* di USA telah menginvestigasi korosi dari berbagai jenis material pada beberapa lingkungan yang berbeda. Berikut ini hasil atau ranking hubungan antara lingkungan dengan beberapa jenis material mengenai tingkat korosivitasnya pada tabel 2.8.



Tabel 2.8 Korosi pada Baja, Tembaga, Timah Hitam dan Seng.
 Kedalaman Korosi Maksimum setelah Beberapa Waktu

(E. Bardal, 2003: 211)

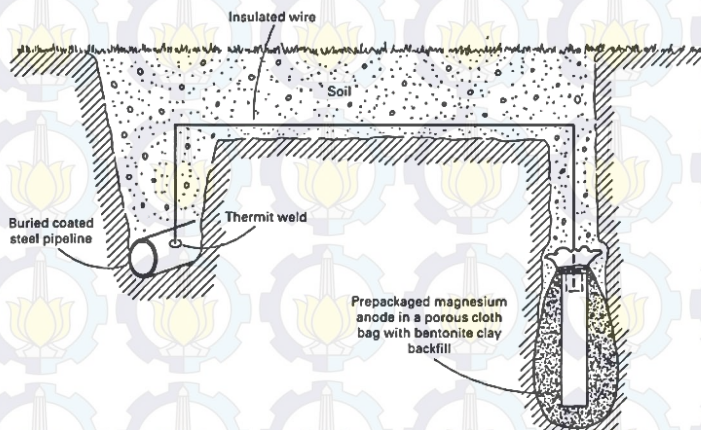
Soils	3 diff. Iron/steel (12 years exp.)	Copper (8 years exp.)	Lead (12 years exp.)	Zinc (11 years exp.)
Average of several soils	1.5-1.8 (44 soils)	<0.15 (29 soils)	>0.8 (21 soils)	>1.3 (12 soils)
Tidal marsh, Elizabeth, N.J.	2.0-2.5	<0.15	0.33	0.9
Montezuma clay, Adobe, San Diego, Cal	<3.3	<0.15	0.25 (9.6 years)	-
Merrimac gravel-sandy loam, Norwood, Mass	0.5-0.7	<0.15 (13.3 years)	0.48	-

2.6 Proteksi Katodik

Menurut Bardal (2003), proteksi katodik sudah dikenal sejak 170 tahun. Intinya proteksi ini biasa digunakan untuk memproteksi struktur baja pada lingkungan tanah dan air laut, atau situasi lingkungan tertentu (dibawah kondisi spesial) untuk baja yang tidak terlindung dari udara lingkungan. Material lain juga bisa dilindungi dengan proteksi katodik, sebagai cara instan untuk mengurangi korosi lokal pada *stainless steel* dan aluminium.

Adapun proteksi katodik itu sendiri menurut ASM Metals Handbook (1987), adalah sebuah sarana atau cara yang digunakan untuk mengontrol korosi dimana reaksi oksidasi pada sel galvanik dikonsentrasikan di anoda dan menekan atau menahan korosi pada katoda di sel yang sama. Proteksi katodik berbeda dengan proteksi anodik. Pada sistem proteksi katodik, objek material yang dilindungi ditempatkan sebagai katoda,

tetapi pada sistem proteksi anodik, objek material yang dilindungi adalah ditempatkan sebagai anoda. Sistem proteksi anodik hanya bisa digunakan pada paduan yang terbatas di lingkungannya, tapi untuk sistem proteksi katodik sebaliknya, pada prinsipnya diaplikasikan pada berbagai logam. Dalam kenyataannya, proteksi katodik banyak digunakan pada baja karbon. Sistem proteksi katodik paling efektif digunakan untuk melindungi baja karbon, dimana hanya memiliki anti korosi yang kecil, untuk digunakan pada lingkungan seperti air laut, tanah asam, beton yang sarat akan garam, dan lingkungan korosif lainnya. Dibawah ini diberikan contoh sistem proteksi katodik secara sederhana, yaitu pipa baja yang dilindungi dengan sistem proteksi katodik dengan anoda magnesium yang dikorbankan pada elektrolit tanah, seperti terlihat pada gambar 2.2 berikut ini.



Gambar 2.2 Proteksi Katodik pada Pipa dengan Anoda Magnesium (*ASM Metals Handbook, Vol.13, 1987*)

Menurut Bardal (2003), pada kebanyakan kasus sistem proteksi katodik ini digunakan dengan kombinasi pelapisan atau *coating*, dengan tujuan untuk melindungi baja pada saat bebas



dan area yang mengalami perusakan pada *coating*. Pada dekade baru-baru ini, teknologi proteksi yang demikian meningkat penggunaannya dalam hubungannya dengan ekspansi eksplorasi dan produksi baik secara *onshore* maupun *offshore* di industri *oil and gas*. Perlindungan dengan cara seperti ini sudah mendominasi pada industri minyak dan gas.

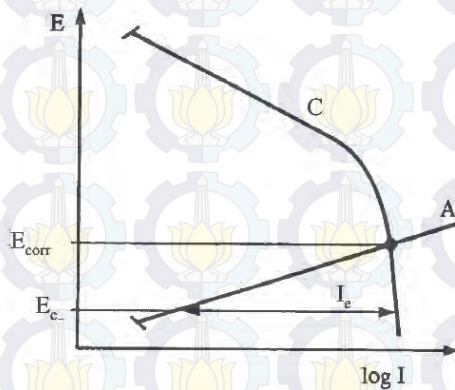
Hal serupa juga dijelaskan pada ASM Metals Handbook (1987), bahwasanya semua jaringan *pipeline* modern dilapisi dengan organik protektif *coating* yang ditambah dengan sistem proteksi katodik agar lebih kuat untuk mengurangi korosi pada sistem yang terlapisi. Berikut ini merupakan kriteria dari proteksi katodik seperti ditunjukkan oleh tabel 2.9 berikut ini.

Tabel 2.9 Kriteria untuk Proteksi Katodik
(D.A. Jones, Principles and Prevention of Corrosion)

Kriteria	Kondisi Ukuran	Keterangan
1. Potensial < -0.85 V vs Cu-saturated CuO_4 untuk baja	Arus mengalir (IR_Ω ada)	Sangat berarti dibeberapa lingkungan. Tidak pasti terkait IR_Ω
2. Polarisasi katodik lebih dari 300 Mv aktif ke potensial korosi struktur	Arus mengalir (IR_Ω ada)	Tidak pasti terkait interferensi IR_Ω
3. Polarisasi katodik lebih dari 100 Mv aktif ke potensial korosi struktur	Arus terganggu (IR_Ω tidak ada)	Teknik pengganggu susah diterapkan
4. Polarisasi katodik ke sebuah potensial dimana Tafel diterima	Variabel arus (IR_Ω ada)	Susah menentukan adanya IR_Ω
5. Aliran arus proteksi bersih dari elektrolit ke permukaan struktur	Tidak menentu	Benar secara teori tapi sukar dalam penerapannya

2.6.1 Prinsip Proteksi Katodik

Menurut Bardal (2003), prinsip utama dari sistem proteksi katodik adalah untuk memberikan arus listrik dari luar pada material, yang mana gaya dari potensial elektroda mengarah pada daerah imun, atau, untuk perlindungan korosi lokal, dibawah sebuah potensial proteksi. Atau bisa dikatakan, material adalah sebagai katoda pada sel elektrokimia. Sistem ini terpolarisasi secara katodik sebagaimana diilustrasikan dengan kurva potensial-log arus pada gambar kurva 2.3 berikut ini.



Gambar 2.3 Pergeseran Potensial dari Potensial Korosi Bebas E_{corr} ke Potensial yang lebih rendah E_c dengan sarana Arus Eksternal I_e (Bardal, 2003: 267)

Arus eksternal I_e adalah berbeda diantara arus katodik dan arus anodik pada kondisi potensial yang sebenarnya E_c . Pada potensial ini, arus anoda pada material yang dilindungi sangatlah rendah, sedangkan arus eksternal besarnya mendekati sama dengan arus pada katoda. Arus eksternal bisa dihasilkan dengan dua jalan yang berbeda, yaitu :

- Dengan cara menggunakan material yang kurang mulia pada anoda korban, yang mana dihubungkan dengan kontak metalik pada struktur yang dilindungi.



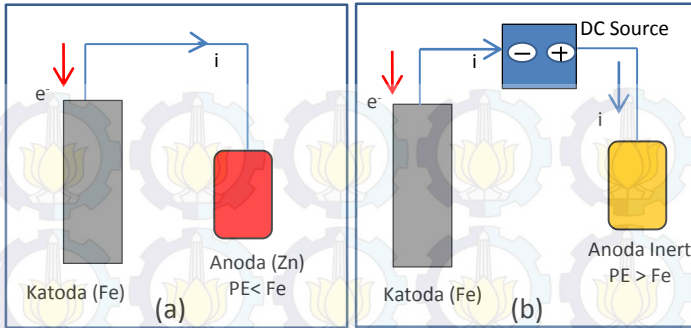
b) Dengan cara sumber arus dari luar, biasanya menggunakan rectifier. Elektroda referens mungkin digunakan untuk mengontrol potensial pada rectifier.

Menurut ASM Metals Handbook Vol. 43 (1987), bahwa *National Association of Corrosion Engineers (NACE)* menjelaskan spesifikasi untuk *pipeline* yang tertimbun mengikuti kriteria ketika suatu baja atau struktur besi cor terproteksi secara katodik, seperti :

- Tegangan sebesar $-0,85$ V relatif terhadap elektroda Cu/CuSO₄.
- Perubahan atau pergeseran tegangan negatif (Katodik) sekurang-kurangnya 300 mV yang mana disebabkan oleh aplikasi arus proteksi katodik.
- Perubahan atau pergeseran tegangan (Katodik) minimum terhitung 100 mV diakibatkan terganggu oleh arus dan kerusakan pada perhitungan tegangan.
- Tegangan setidaknya senegatif (Katodik) seperti yang semula berasal dari segmen kurva Tafel E -log I .
- Arus proteksi secara keseluruhan mengalir dari elektrolit ke permukaan.

2.6.2 Tipe Proteksi Katodik

Dalam proteksi katodik, ada dua metode yang dilakukan, pertama dengan menghubungkan struktur dengan logam yang lebih reaktif (potensial lebih rendah) sehingga logam teroksidasi (anoda) disebut anoda tumbal (*sacrificial anode*). Kedua, dengan menghubungkan struktur dengan logam yang lebih pasif (potensial lebih tinggi) ditambahkan dengan arus terpasang dari sumber arus DC sehingga struktur tetap akan terproteksi tanpa menghabiskan anoda (inert), disebut arus paksa (*impressed current*). Kedua metode proteksi tersebut dapat dilihat pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 (a) *Sacrificial Anodes* (b) *Impressed Current*

Arus akan mengalir diantara dua buah logam selama ada beda potensial diantara keduanya dan akan berhenti jika telah mengalami kesetimbangan (potensialnya sama). Logam yang lebih rendah potensial elektrokimianya akan menjadi anodik dan mengalami oksidasi (terkorosi). Sedangkan logam yang lebih tinggi potensial elektrokimianya akan menjadi katodik, mengalami reaksi reduksi sehingga terproteksi dari korosi. Prinsip ini ada pada tipe anoda tumbal yang tidak lain adalah prinsip sel galvanik. Dalam hal proteksi katodik pada baja, berdasarkan deret galvanik, Al, Mg, dan Zn yang dapat digunakan untuk *Sacrificial Anode* ini. Berikut ini ditampilkan perbandingan antara sistem anoda tumbal dengan sistem arus paksa seperti pada tabel 2.10 berikut ini.



Tabel 2.10 Perbandingan diantara Sistem Anoda Tumbal dengan Arus Paksa (*ASM Metals Handbook Vol. 13, 1987*)

Sacrificial Anode System	Impressed Current System
Simple	Complex
Low/no maintenance	Requires maintenance
Works best in conductive electrolytes	Can work in low conductivity electrolytes
Lower installation costs for smaller installations	Remote anodes possible
Higher capital investment for large systems	Low capital investment for large system
-	Can cause the following problems: stray current corrosion, hydrogen embrittlement, coating debonding, cathodic corrosion of aluminum

Adapun berikut merupakan kelebihan dan kelemahan dari masing-masing sistem menurut Popov Branko & Kumaraguru Swaminatha () :

1. Sistem Anoda Tumbal (*Sacrificial Anode*)

Kelebihan :

- Tidak memerlukan power atau tenaga dari luar
- Instalasi sederhana, tidak terlalu kompleks
- Distribusi arus seragam
- Perawatan sedikit
- Campur tangan dari katodik relatif kecil

Kelemahan :

- Arus keluaran relatif kecil. Arus hanya memiliki driving potensial yang terbatas, oleh karena cakupan daerah perlindungan pada material terbatas untuk masing-masing anoda.
- Sangat buruk jika hanya mengandalkan *coating*, lebih banyak membutuhkan anoda yang digunakan sebagai tumbal.



- Sangat tidak efektif untuk daerah yang memiliki resistivitas yang tinggi.

2. Sistem Arus Paksa (*Impressed Current*)

Kelebihan :

- Sangat aplikatif untuk range tegangan dan arus yang besar.
- Arus yang besar bisa dihasilkan dengan hanya satu *ground bed*.
- Satu instalasi sistem bisa melindungi permukaan yang lebih luas dari struktur.
- Untuk material yang memiliki *coating* yang buruk, bahkan sangat buruk sekalipun bisa terlindungi dengan sistem ini.
- Tegangan dan arus bisa diatur sedemikian rupa sewaktu-waktu sesuai kondisi yang diperlukan.

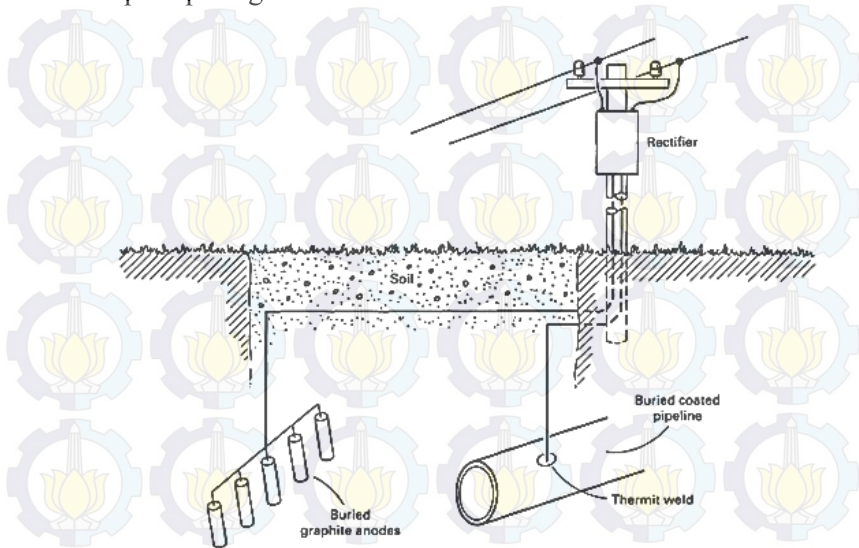
Kelemahan :

- Overproteksi bisa menyebabkan kerusakan pada *coating* dan memicu hidrogen embrittlement.
- Sistem ini dipengaruhi oleh masalah campuran tangan sistem lain.
- Tenaga dari luar (*external power*) sangat dibutuhkan, maka dari itu sistem ini mudah terserang kegagalan pembangkit dari luar jika mengalami masalah.

2.6.3 Sistem *Impressed Current Cathodic Protection (ICCP)*

Impressed Current Cathodic Protection (ICCP) adalah proteksi katodik yang menggunakan sumber arus dari luar, biasanya berasal dari arus AC yang dilengkapi dengan penyearah arus (*rectifier*), sehingga menjadi arus DC. Menurut Bardal (2003), keuntungan terbesar sistem ICCP daripada sistem anoda korban adalah bobot anoda yang lebih rendah dan kekuatan drag yang lebih kecil dari laut, serta hanya dibutuhkan anoda yang relatif sedikit. Secara teori, hal tersebut lebih menguntungkan secara ekonomi jika dibandingkan dengan sistem anoda korban, tapi pengalaman ketika dipraktekkan dengan kasus kerusakan mekanik yang serius maka sistem ICCP tidak banyak diaplikasikan. Biasanya sistem ICCP ini

sering digunakan dengan kombinasi teknologi pelapisan (*coating*). Berikut ini merupakan sistem proteksi katodik ICCP seperti pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 Sistem proteksi *Impressed Current Cathodic Protection (ICCP)* pada *pipeline* yang tertanam dalam tanah menggunakan anoda grafit (ASM *Metals Handbook, Vol 13, 1987*)

Seperti terlihat pada gambar anoda yang tertimbun dan *pipeline* terhubung dengan sebuah rectifier elektrik, dimana memberikan suplai arus DC ke elektroda (anoda dan katoda yang terproteksi) dari sistem. Tidak seperti sistem anoda korban, sistem ICCP ini tidak butuh secara alami anodik seperti baja, dan faktanya sangat jarang. Kebanyakan anoda dari sistem ICCP terbuat dari material elektroda non-konsumabel yang seharusnya sebagai katoda (bersifat katodik) untuk baja. Jika elektroda ini dihubungkan ke sistem, mereka akan berperan seperti katoda dan akan menyebabkan akselerasi korosi pada struktur sebagaimana yang dimaksudkan. Arus DC menyediakan polaritas bolak-balik dan memberikan peran material seperti layaknya anoda. Malahan korosi pada anoda,



beberapa reaksi oksidasi lain, evolusi oksigen atau klorin, terjadi pada anoda, dan anoda tersebut tidak terkonsumsi. (ASM Metals Handbook Vol.43: 1987)

- Kelebihan Sistem ICCP
 1. Kapasitas output yang sangat tinggi.
Jumlah arus yang dapat dirancang pada sistem bervariasi mulai dari ampere yang kecil hingga ratusan ampere. Sehingga jangkauan proteksi yang diberikan besar.
 2. Fleksibilitas kapasitas output.
Output dari sumber arus/*rectifier* dapat diatur dengan mudah untuk mengakomodasi perubahan tahanan sirkuit atau kebutuhan arus (*automatic control circuitry*). Sehingga level proteksi juga dapat dikontrol sesuai kebutuhan.
 3. Jumlah anoda yang digunakan lebih sedikit, bahkan untuk elektrolit dengan tahanan yang tinggi.
 4. Cocok untuk semua nilai resistivitas.
 5. Sistem dapat didesain untuk masa guna lebih dari 20 tahun.
 6. Biaya awal lebih murah.
- Kekurangan Sistem ICCP
 1. Resiko yang didapatkan relatif tinggi yang dapat menyebabkan efek interferensi arus. Biasa terjadi pada struktur terproteksi yang berdekatan.
 2. Biaya instalasi peralatan listrik lebih mahal dan membutuhkan perlengkapan yang kompleks.
 3. Pengaruh *supply* energi dari *rectifier* yang vital. Kerusakan sedikit saja akan berakibat fatal pada kinerja sistem proteksi.
 4. Biaya perawatan lebih tinggi dibanding sistem anoda korban.

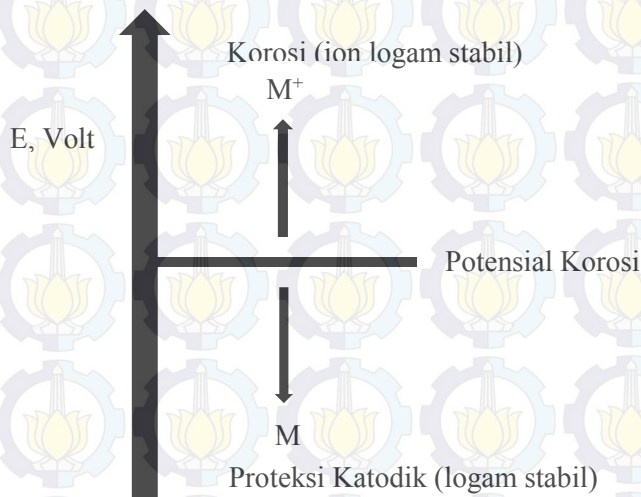
2.7 Potensial Korosi

Suatu logam yang terkorosi dalam lingkungan basah, mempunyai suatu nilai potensial tertentu, yang merupakan potensial campuran (*mixed potential*) antara potensial anodik dan katodiknya pada rangkaian terbuka (*open circuit*)



potentials). Pada nilai potensial ini pada umumnya logam akan terkorosi, dan nilai potensial tersebut dinamakan potensial korosi.

Dengan memberlakukan struktur sebagai katoda (memproteksi katodik), mengakibatkan potensial logam turun menjadi lebih rendah dari potensial korosinya, seperti diilustrasikan pada gambar 2.6 berikut.



Gambar 2.6 Potensial Korosi dari Logam

Apabila potensial logam diturunkan, maka logam akan cenderung bertahan sebagai logam, karena ia lebih stabil, dan sebaliknya bila potensial dinaikkan logam akan cenderung menjadi ion (ion stabil) atau terkorosi. Dari uraian tersebut berarti setiap penurunan potensial dari potensial korosi berarti sudah suatu perlakuan proteksi katodik, dimana logam cenderung lebih stabil dan laju korosinya berkurang. Makin besar arus listrik yang dialirkan, makin besar penurunan potensialnya dan logam makin stabil atau tingkat laju korosinya makin rendah.



Dalam praktek kita tidak dapat menurunkan potensial secara sembarangan. Penurunan yang berlebihan akan menjadi suatu kerugian ditinjau dari segi biaya dan kadang juga dari segi teknis. Oleh karena itu, ada suatu kriteria proteksi yang perlu diketahui dan diperhatikan. Kriteria ini umumnya berbeda untuk tiap logam dan lingkungan.

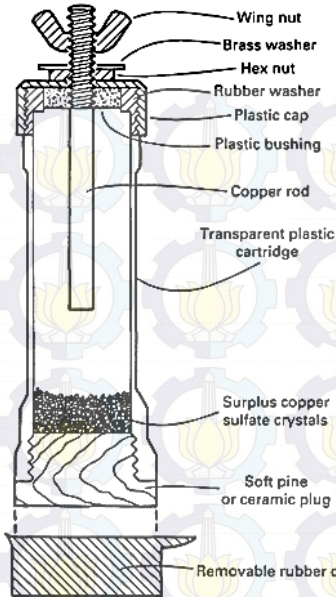
2.8 Elektroda Pembanding (*Reference Electrode*) Cu/CuSO₄

Potensial suatu logam dapat diukur dengan elektroda standar. Elektroda standar yang dapat digunakan untuk pengukuran potensial diantaranya adalah tercantum pada tabel 2.11 sebagai berikut ini.

Tabel 2.11 Elektroda Pembanding
(Balai Besar dan Barang Teknik)

Jenis Elektroda Standar	Potensial terhadap Potensial Standar Hidrogen, V
Cu/CuSO ₄ (CSE)	0,33 (lingkungan tanah)
Ag/AgCl	0,25 (lingkungan laut)
Hg/Hg ₂ Cl ₂ (<i>SCE</i>) Jenuh	0,24 (lingkungan klorida lab)
Hidrogen (<i>SHE</i>)	0,00 (hanya untuk arbitrase)
Zn	-0,76 (lingkungan laut, bila untuk tanah dengan <i>backfill</i>)

Untuk sistem ICCP di media tanah seperti sudah dijelaskan pada tabel 2.10 yaitu menggunakan elektroda standar Cu/CuSO₄. Berikut ini adalah gambar 2.7 merupakan elektroda standar Cu/CuSO₄.



Gambar 2.7 Elektroda Standar Cu/CuSO₄
(*ASM Metals Handbook, Vol 13: 1987*)

Jika voltmeter dihubungkan dengan elektroda acuan dan baja, maka potensial yang terbaca sesungguhnya merupakan gabungan dari dua jenis potensial. Masing-masing potensial itu disebut potensial Half Cell (Gurrappa, 2005). Berdasarkan standar NACE RP 0169-92 dan standar-standar lain, potensial proteksi untuk beberapa logam adalah sebagai berikut dapat dilihat pada tabel 2.12.



Tabel 2.12 Kriteria Potensial Korosi
(Balai Besar Barang dan Bahan Teknik)

Logam	Potensial Proteksi, -V (CSE)
Baja aerobik	0,85
Baja anaerobik	0,95
Timbal	0,60
Tembaga	0,50-0,65
Aluminium	0,95-1,20
Lebih dari satu logam / paduan dalam satu kesatuan	Potensial diturunkan sampai yang diperlukan untuk proteksi katodik yang paling negatif

Untuk besi atau baja ada beberapa kriteria yang dapat diterapkan untuk elektroda yang ditanam dalam tanah, antara lain :

- $\leq -0,85$ V (CSE), diukur dengan meng-kontakkan elektroda pada elektrolit yang berhubungan.
- $\leq -0,85$ V (CSE), polarisasi
- ≥ 100 mV, sisa polarisasi katodik

2.9 Anoda Grafit

Sebagaimana sudah diketahui bahwasanya pada metode ICCP, arus listrik dialirkan dari sumber listrik (rectifier) melalui anoda dan lingkungan ke struktur yang diproteksi. Ada banyak pilihan anoda yang dapat digunakan untuk sistem ICCP, dan pemilihannya tergantung dari banyak faktor, diantaranya: besarnya arus yang diperlukan, lingkungan, efisiensi, umur proteksi, ekonomi, dan lain-lain.

Menurut ASM Metals Handbook Vol. 43 (1987), anoda yang digunakan pada sistem ICCP haruslah bersifat anti korosi dan bisa bertahan lama di lingkungan tempat dia digunakan. Berikut ini pada tabel 2.13 diberikan beberapa macam material yang bisa digunakan sebagai anoda pada sistem ICCP beserta tingkat laju konsumablenya.



Tabel 2.13 Laju Konsumsi Material Anoda pada Sistem ICCP
(ASM Metals Handbook Vol. 43, 1987)

Material	Tipe Densitas Arus pada Anoda		Laju Konsumsi per A.Yr
	A/m ²	A/ft ²	
Pb-6Sb-1Ag	160-220	15-20	0,045-0,09 kg (0,1-0,2 lb)
Pt (Plat pada substrat)	540-1080	50-100	0,006 g
Pt (Kawat atau Clad)	1080-5400	100-500	0,01 g
Grafit	10,8-40	1-4	0,225-0,45 kg (0,5-1,0 lb)

Untuk kebanyakan kasus pada sistem ICCP adalah menggunakan anoda grafit, terkhusus pada dan sangat cocok pada sistem perpipaan *onshore*. Namun demikian, anoda grafit juga banyak digunakan untuk lingkungan laut karena sifatnya yang imun terhadap klorida. Sejarah anoda grafit sangat panjang, karena grafit telah lama digunakan sebagai anoda dalam industri kimia. Tapi, karena sifat bawaannya yang relatif getas, maka grafit harus disimpan dan diperlakukan dengan hati-hati. (ASM Metals Handbook Vol. 43: 1987)

Pada metode ICCP ini, anoda yang digunakan memiliki potensial elektroda yang lebih positif (*less active metal*). Arus elektron seharusnya mengalir dari struktur pipa ke anoda inert yang digunakan. Namun arus searah (DC) dari *transformer rectifier* memaksa arus elektron tetap menuju ke struktur (pipa). Karena arus terpasang memiliki tegangan dorong yang besar, maka metode ini dapat digunakan untuk luasan proteksi yang besar dengan anoda tunggal meski ditempatkan jauh dari struktur.



2.10 Acuan Penelitian

2.10.1 PENGARUH GORESAN LAPIS LINDUNG DAN SALINITAS AIR LAUT TERHADAP ARUS PROTEKSI SISTEM *IMPRESSED CURRENT CATHODIC PROTECTION (ICCP)* PADA PIPA API 5 L GRADE B

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui bagaimana pengaruh luas goresan lapis lindung dan salinitas air laut sebesar 3.2%, 3.5%, dan 3.8% terhadap arus proteksi sistem proteksi katodik arus paksa (ICCP) pada pipa API 5L grade B. Luas goresan yang digunakan adalah 189 mm², 568 mm², 946.7 mm², 1880 mm², 5640 mm², 9440 mm², dan 13250 mm². Spesimen tanpa goresan dan spesimen tanpa lapis lindung digunakan sebagai pembandingan. Pipa API 5 L Grade B sebagai katoda dan grafit sebagai anoda inert serta *rectifier* sebagai penyearah arus. Arus proteksi ICCP diatur hingga mencapai nilai potensial proteksi sebesar -850 mV vs. SCE. Setelah 8 hari imersi awal dan 15 hari imersi untuk pengukuran arus, didapatkan bahwa semakin besar goresan lapis lindung maka semakin besar arus proteksi yang dibutuhkan dalam salinitas air laut yang sama. Arus proteksi terbesar pada goresan 18934.2 mm² dalam salinitas 3.8% dengan rapat arus 154.8 mA/m². Sedangkan arus proteksi terkecil pada goresan 0 mm² dalam salinitas 3.2% sebesar 7.18 mA/m². Arus proteksi pada spesimen dengan luas goresan yang sama, arus proteksinya semakin meningkat seiring meningkatnya salinitas air laut. Arus proteksi terbesar berada pada salinitas 3.8% dengan nilai arus untuk spesimen tanpa goresan hingga tanpa lapis lindung berturut turut 11.46 mA/m², 12.41 mA/m², 14.25 mA/m², 17.86 mA/m², 43.47 mA/m², 53.34 mA/m², 64.96 mA/m², 77.11 mA/m², dan 154.8 mA/m². Sedangkan arus terkecil pada salinitas 3.2% yaitu sebesar 7.18 mA/m², 8.19 mA/m², 10.52 mA/m², 13.88 mA/m², 24.55 mA/m², 36.34 mA/m², 44.21 mA/m², 58.04 mA/m², dan 89.54 mA/m². Penggunaan lapis lindung pada spesimen memberikan pengaruh yang signifikan pada kebutuhan arus proteksi.



2.10.2 PENGARUH VARIASI BENTUK DAN UKURAN GORESAN PADA LAPIS LINDUNG POLIETILENA TERHADAP SISTEM PROTEKSI KATODIK ANODA TUMBAL PADUAN AI PADA BAJA AISI 1045 DI LINGKUNGAN AIR LAUT

Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh bentuk dan ukuran goresan lapis lindung polietilena terhadap proteksi katodik anoda tumbal paduan aluminium pada baja AISI 1045 di lingkungan air laut. Penelitian dilakukan dengan memberikan goresan pada lapis lindung polietilena baja AISI 1045 dengan variasi bentuk dan ukuran. Hasil yang telah didapatkan adalah pada bentuk goresan persegi panjang dengan pencelupan selama 20 hari, semakin besar ukuran goresan, maka laju korosi anoda semakin naik dari 3,83143 mpy menjadi 12,76827 mpy. Sedangkan pada pencelupan 40 hari, semakin besar ukuran goresan, maka laju korosi pada anoda semakin naik dari 2,58598 mpy menjadi 8,74699 mpy. Pada bentuk goresan lingkaran dengan pencelupan selama 20 hari, semakin besar ukuran goresan, maka laju korosi anoda semakin naik dari 2,25322 mpy menjadi 6,21776 mpy. Sedangkan pada pencelupan selama 40 hari, semakin besar ukuran goresan, maka laju korosi anoda semakin naik dari 2,44812 mpy menjadi 3,50343 mpy. Pada baja berlapis polietilena dengan bentuk goresan persegi panjang mempunyai laju korosi yang lebih tinggi daripada baja berlapis polietilena dengan bentuk goresan lingkaran. Pola korosi yang terlihat pada baja adalah *uniform corrosion* terutama pada area goresan. Sedangkan pola korosi yang terlihat pada anoda adalah cenderung *pitting corrosion*.

2.10.3 PENGARUH ARUS LISTRIK TANDING DAN SALINITAS TERHADAP KINERJA ANODA-ANODA PADA PERLINDUNGAN KOROSI METODE IMPRESSED CURRENT DI LINGKUNGAN LAUT

Penelitian ini bertujuan mengetahui kinerja beberapa anoda untuk perlindungan korosi metode impressed current dan



mengetahui pengaruh arus listrik terhadap kinerja anoda-anoda tersebut di lingkungan laut. Larutan yang digunakan sebagai pengganti air laut memiliki salinitas 3,3%, 3,5%, 3,7%, sedangkan anoda yang dipakai adalah magnesium (Mg), zinc (Zn) dan graphite. Sebagai material yang dilindungi (katoda) menggunakan baja karbon (A53). Hasil penelitian ini menunjukkan graphite sebagai anoda yang paling efektif (laju korosi kecil), Mg dan Zn memiliki laju korosi besar. Pada salinitas 37 (lingkungan paling korosive) dengan injeksi arus sesuai arus terukur laju korosi graphite = 0 mm/year, Zn = 63.53996 mm/year, Mg = 844.0917 mm/year. Hal ini terjadi karena graphite memiliki potensial positif dan Mg paling negatif.

2.10.4 PENGARUH SALINITAS TERHADAP ARUS PROTEKSI SISTEM *IMPRESSED CURRENT CATHODIC PROTECTION* (ICCP) DENGAN ANODA GRAFIT UNTUK *PIPELINE* API 5L GRADE B DI LINGKUNGAN LAUT

Pipeline merupakan komponen utama yang digunakan sebagai sarana distribusi dan transmisi minyak dan gas baik di daratan (*onshore*) maupun di lepas pantai (*offshore*). Permasalahan yang sering dihadapi oleh *pipeline* pada lepas pantai (*offshore*) dan darat (*onshore*) adalah terjadinya korosi. Korosi yang terjadi pada *pipeline* akan mengakibatkan turunnya umur pakai dari *pipeline*. *Pipeline* yang ditempatkan pada lingkungan air laut akan terkorosi akibat konsentrasi dari ion klorida (Cl^-) dalam hal ini NaCl. Oleh karena itu, diperlukan suatu proteksi agar umur pakai *pipeline* menjadi lebih lama.

Dalam penelitian ini, digunakan ICCP (*Impressed Current Cathodic Protection*) untuk melindungi *pipeline* dengan kondisi lingkungan yang berbeda yakni lingkungan dengan konsentrasi 3.2%, 3.4% dan 3.6% NaCl. Nilai ini didasarkan pada salinitas air laut. Setiap kondisi ini dibagi menjadi dua bagian yakni dengan pemasangan sistem ICCP dan tanpa pemasangan sistem ICCP. Hasil dari penelitian menunjukkan potensial proteksi *pipeline* dengan melakukan pengukuran menggunakan



Referensi Elektroda KCl dengan standar potensial proteksi sebesar -0.78 Volt s.d -1.080 Volt. Pada kondisi lingkungan dengan 3.4% NaCl, kebutuhan arus ICCP 1.29 mV dapat bekerja dan memproteksi pipeline paling baik dibandingkan pada 3.2% NaCl dan 3.6% NaCl. Produk korosi yang teridentifikasi pada ketiga kondisi lingkungan yaitu 3.2% NaCl, 3.4% NaCl, dan 3.6% NaCl adalah $\text{Cl}_3\text{FeH}_8\text{O}$, $\text{FeCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, dan Fe_2O_3 .

2.11 Analisis Statistik Hasil Pengujian

2.11.1 Persamaan Regresi Linier Sederhana

Persamaan regresi linier sederhana dilakukan untuk meramalkan nilai arus proteksi (Y) jika diketahui variabel bebasnya (X), pH tanah dan luas goresan. Dalam penelitian ini, persamaan regresi dibagi menjadi dua berdasarkan pH tanah terhadap arus proteksi dan luas goresan terhadap arus proteksi.

Dari persamaan ini dapat diketahui pula koefisien determinasi. Koefisien ini menunjukkan seberapa besar luas variasi variabel bebas yang digunakan dalam percobaan mampu menjelaskan variabel terikat. Jika nilai $R^2 = 0$, maka tidak ada sedikitpun luas pengaruh yang diberikan variabel bebas terhadap variabel terikat, atau variasi variabel bebas yang digunakan dalam percobaan tidak menjelaskan sedikitpun variasi variabel terikat. Sebaliknya, jika nilai $R^2 = 1$, maka luas pengaruh yang diberikan variabel bebas terhadap variabel terikat adalah sempurna, atau variasi variabel bebas yang digunakan dalam percobaan menjelaskan 100% variasi variabel terikat.

$$Y = a + b(X) \quad (2.4)$$

$$b = \frac{n \sum XY - \sum X \cdot \sum Y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (2.5)$$

$$a = \frac{\sum Y - b \sum x}{n} \quad (2.6)$$

2.11.2 Regresi Linier Berganda

Regresi berganda digunakan untuk meramalkan pengaruh nilai variabel terikat (Y) apabila variabel bebasnya (X) berjumlah dua atau lebih untuk membuktikan ada tidaknya hubungan fungsional atau hubungan kausal antara dua atau lebih variabel bebas terhadap variabel terikat. Nilai-nilai pada persamaan regresi berganda untuk dua variabel dapat ditentukan sebagai berikut :

$$Y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n \quad (2.7)$$

Dimana :

Y = Variabel Terikat a = Konstanta
x = Variabel Bebas b = Koefisien Regresi

$$b_1 = \frac{(\sum x_2^2)(\sum x_1y) - (\sum x_1x_2)(\sum x_2y)}{(\sum x_1^2)(\sum x_2^2) - (\sum x_1x_2)^2} \quad (2.8)$$

$$b_2 = \frac{(\sum x_1^2)(\sum x_2y) - (\sum x_1x_2)(\sum x_1y)}{(\sum x_1^2)(\sum x_2^2) - (\sum x_1x_2)^2} \quad (2.9)$$

$$a = \frac{\sum Y}{n} - b_1 \left(\frac{\sum X_1}{n} \right) - b_2 \left(\frac{\sum X_2}{n} \right) \quad (2.10)$$

2.11.3 Analisa Varians (ANOVA)

Analisa ini dilakukan untuk mengetahui seberapa signifikan pengaruh variabel bebas (x) dalam hal ini adalah pH tanah dengan luas goresan terhadap nilai arus proteksi (y). Berikut ini tabel analisa varians seperti ditunjukkan pada tabel 2.14.



Tabel 2.14 Tabel Analisa Varians
 (M. Ross, 3rd Edition, 2004)

Source	Sum of Square	df	Mean Square	F _{ratio}
Treatment	$SS_T = \sum_{t=1}^k n_t (\bar{x}_t - \bar{x})^2$	$k - 1$	$SS_T / k - 1$	MS_T / MS_E
Error	$SS_T = \sum_{t=1}^k \sum_{i=1}^{nt} (x_{it} - \bar{x}_t)^2$	$N - k$	$SS_E / n - k$	-
Total	$SS = \sum_{t=1}^k \sum_{i=1}^{nt} (x_{it} - \bar{x})^2$	$N - 1$	-	-

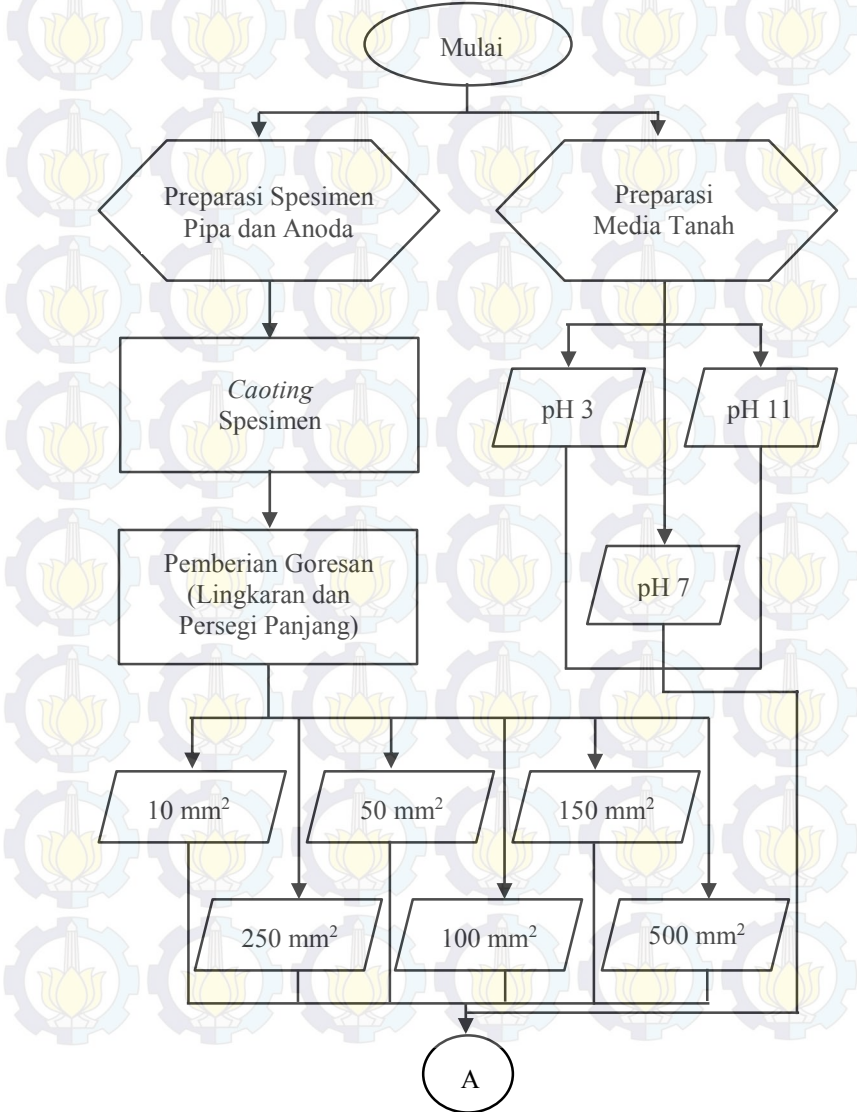
Total SS = Treatment SS + Error SS
 $SS = SS_T + SS_E$

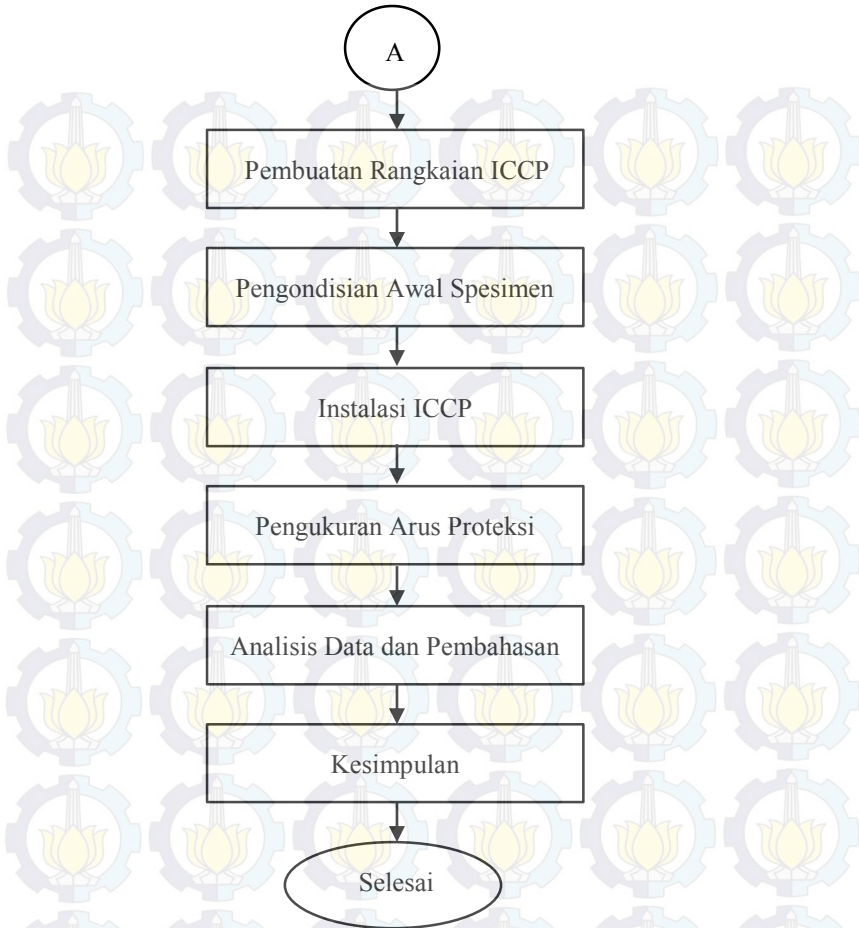




BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian





Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Standard Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan mengikuti beberapa standard, yaitu :

- API 5L *Specification for Line Pipe*
- NACE Standard TM-0169-95 *Laboratory Corrosion Testing of Metals*



3.3 Bahan Penelitian

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini, diantaranya adalah :

1. Pipa API 5L *grade B*.

Beikut ini data lengkap mengenai komposisi kimia dari pipa API 5L *grade B* seperti terlihat pada tabel 3.1

Tabel 3.1 Komposisi Kimia Pipa API 5L *grade B*
(*Specification for Line Pipe*)

Elemen	Kadar (%)
<i>Carbon</i>	0.220
<i>Mangan</i>	1.200
<i>Phospor</i>	0.025
<i>Sulfur</i>	0.015
<i>Titanium</i>	0.040

2. Anoda Grafit

Berikut tabel 3.2 yang berisikan spesifikasi dari anoda grafit.

Tabel 3.2 Spesifikasi Anoda Grafit
(*ASM Metals Handbook Vol 13: 1987*)

Kriteria	Keterangan
Kategori	<i>Impregnated Epoxy Resin (H)</i>
Model	M120H
Bentuk	Tubular
Dimensi	P = 138 mm ; D = 36 mm
Masa Pakai	20 Tahun
Komposisi Kimia	99.8% C ; 0.2% Ash
Laju Konsumsi	0.1 – 1 kg / A.Year

3. *Epoxy Coating*

Cat *epoxy* merupakan cat yang biasa digunakan pada logam sehingga menutup rapat pori-pori kasar yang muncul dipermukaan. Cat epoxy ini termasuk *heavy duty coating*, memiliki kekerasan yang baik, tahan terhadap senyawa kimia, air, minyak dan pelarut. Mekanisme penggunaannya



dapat dicampurkan dengan hardener dan thinner A special dengan perbandingan 4:1:1

4. Cat *Zinc Chromate*

Cat Zn-Cr ini termasuk dalam kategori cat alkyd. Cat alkyd menggunakan binder jenis alkyd resin. Binder ini paling banyak digunakan karena mempunyai sifat mudah diaplikasikan dan dapat dilapis ulang, mengering karena oksida dengan udara. Sedangkan pelarut yang banyak digunakan adalah senyawa hidrokarbon alifatik seperti mineral spirit. Cat ini digunakan sebagai cat dasar yang memberikan sifat anti korosi yang baik. Untuk mekanisme penggunaannya dapat dicampurkan langsung dengan thinner B spesial.

5. Aquades

Digunakan sebagai bahan campuran pada HCl dan NaOH untuk mendapatkan derajat keasaman tertentu.

6. Tanah

Merupakan media elektrolit/penghantar arus yang digunakan dalam penelitian ini, sehingga nantinya arus bisa mengalir ke rangkaian sistem yang ada.

7. *Filler* Perekat (*Filler* Lem Tembak)

Fungsi dari bahan ini adalah digunakan sebagai pengisi lem tembak untuk menyambungkan/merekatkan dua benda tertentu sesuai kebutuhan.

8. Asam Klorida (HCl) 1M

Asam klorida termasuk kedalam golongan larutan yang memiliki pH asam yang sangat kuat. Larutan ini digunakan dengan dicampurkan bersama aquades untuk mendapatkan kondisi media tanah dengan pH asam.

9. Natrium Hidroksida (NaOH) 1M

Natrium hidroksida termasuk dalam larutan yang memiliki pH basa kuat. Larutan ini digunakan bersama dengan aquades untuk mendapatkan kondisi media tanah memiliki pH basa.

10. Kertas Ampelas

Kertas ampelas dengan *grade* tertentu ini digunakan untuk menggosok/menggerinding pipa selama tahap preparasi dilakukan.



11. Karet *Sponge*

Bahan ini digunakan sebagai penutup di ujung-ujung pipa supaya media elektrolit (tanah) tidak masuk kedalam pipa. Hal ini dikarenakan pipa bukan benda pejal.



(1)



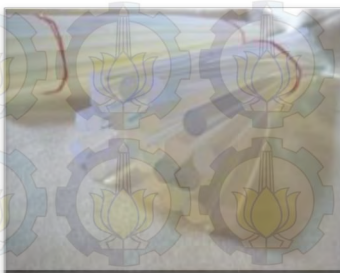
(2)



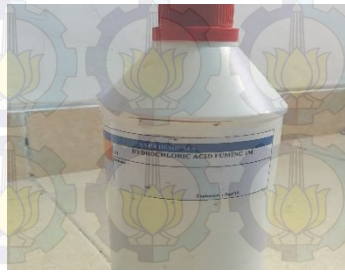
(3)



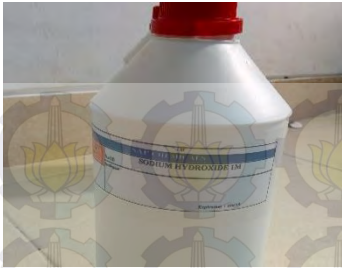
(4)



(7)



(8)



(9)



(10)



(11)

Gambar 3.2 Bahan-Bahan Penelitian yang Digunakan

3.4 Alat Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini diantaranya adalah :

1. Gergaji Mesin
Alat ini digunakan untuk memotong spesimen pipa sebagai katoda untuk mendapatkan dimensi yang diinginkan.
2. Gergaji Tangan
Alat ini digunakan untuk memotong anoda grafit.
3. *Container Box* Plastik
Bak ini digunakan sebagai wadah penampung media tanah yang digunakan dalam penelitian.
4. Kaca Bening sebagai Sekat antar



Kaca ini digunakan sebagai pemisah antar spesimen agar selama penelitian tidak terjadi arus pengganggu yang berasal dari spesimen lain.

5. Multimeter Digital

Alat ini digunakan untuk mengukur beda potensial dari penelitian.

6. Avometer

Alat ini digunakan untuk mengukur arus proteksi pada saat penelitian berlangsung.

7. pH Meter

Alat ini digunakan untuk mengukur nilai pH atau derajat keasamaan larutan yang nantinya akan digunakan sebagai pengatur keasamaan tanah.

8. Rectifier

Alat ini merupakan suatu instrumen yang berguna sebagai catu daya yang mana berfungsi mengubah / menyearahkan arus AC menjadi DC.

9. Rollmeter

10. Lakban

11. Kuas

12. Elektroda Standar Cu/CuSO₄

Alat ini digunakan untuk mendapatkan nilai potensial berdasarkan sistem *half-cell potential* (potensial setengah sel).

13. Mesin Bor

Alat yang digunakan untuk melubangi spesimen Baja API 5L grade B agar bisa dimasuki kabel.

14. Penggaris

15. Gunting

16. Mesin Gerinda

17. Tang

18. Kikir

19. Mur & Baut

20. Kabel

21. Spidol

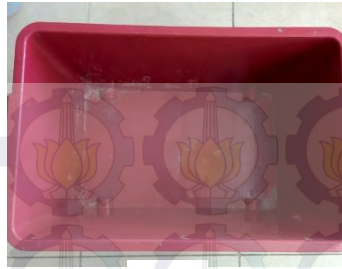
22. *Jack Connector*



Laporan Tugas Akhir Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS



(1)



(3)



(4)



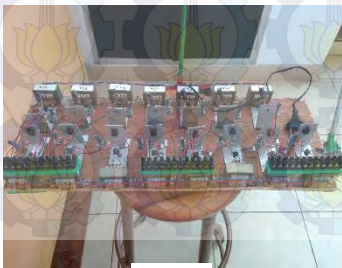
(5)



(6)



(7)



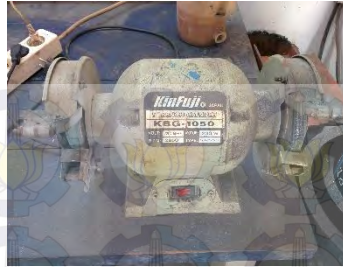
(8)



(12)



(13)



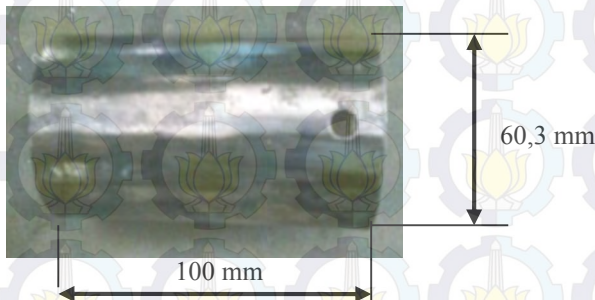
(16)

Gambar 3.3 Alat-Alat Penelitian yang Digunakan

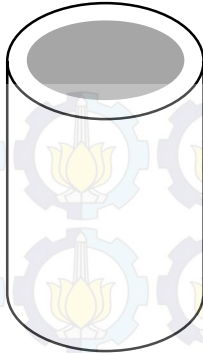
3.5 Langkah-Langkah Penelitian

3.5.1 Preparasi Spesimen (Katoda)

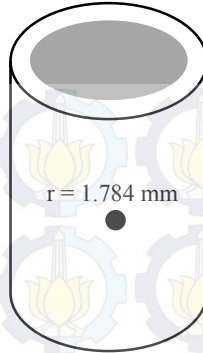
- ✓ Material Pipa : Baja Karbon Rendah
- ✓ Spesifikasi : *Spiral Pipe Welding*
- ✓ Panjang Pipa : 100 mm
- ✓ Diameter Luar : 60.3 mm
- ✓ Diameter Dalam : 52.48 mm
- ✓ Tebal Dinding : 3.91 mm
- ✓ Jumlah : 48 Spesimen
- ✓ *Coating* : *Zinc Chromate dan Epoxy*



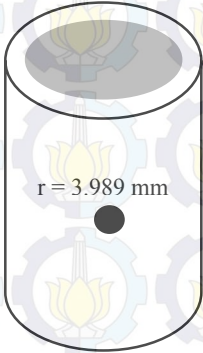
Gambar 3.4 Spesimen Katoda



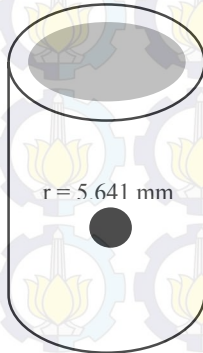
(a)



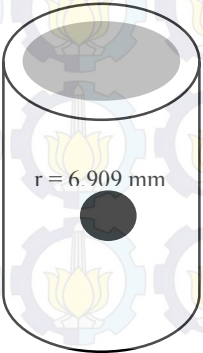
(b)



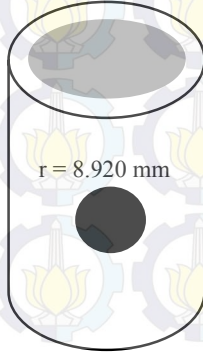
(c)



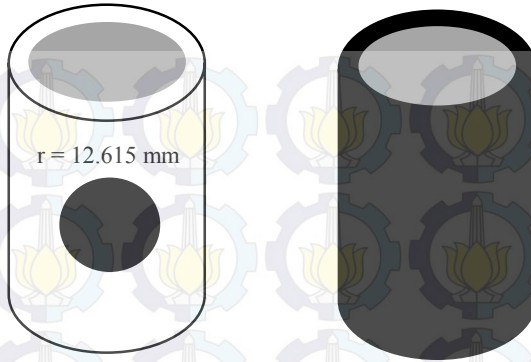
(d)



(e)



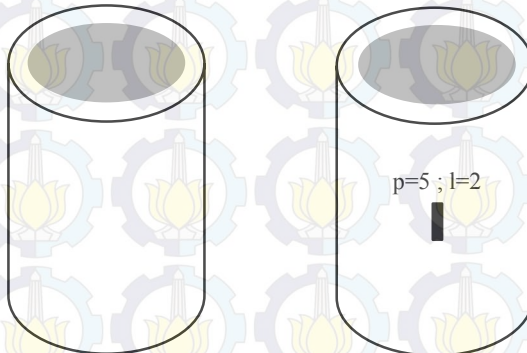
(f)



(g)

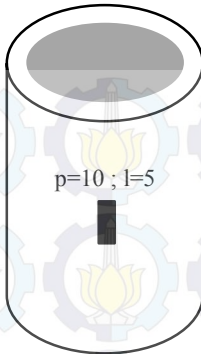
(h)

Gambar 3.5 Ilustrasi Spesimen Katoda dengan Goresan Berbentuk Lingkaran Seluas: (a) 0 mm^2 (*Full Coating*), (b) 10 mm^2 , (c) 50 mm^2 , (d) 100 mm^2 , (e) 150 mm^2 , (f) 250 mm^2 , (g) 500 mm^2 , (h) Tanpa *Coating*

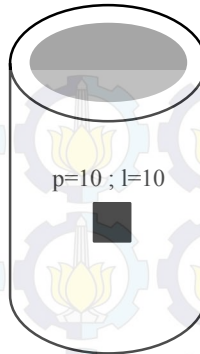


(a)

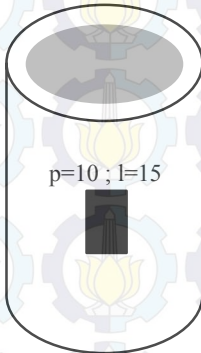
(b)



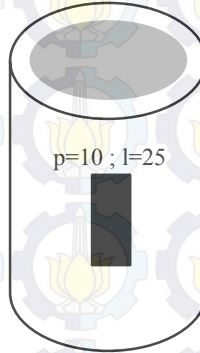
(c)



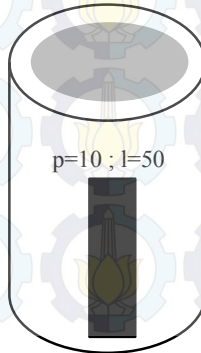
(d)



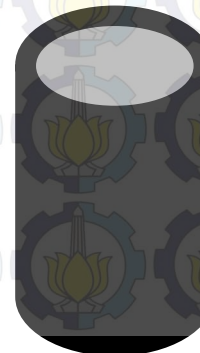
(e)



(f)



(g)



(h)



Gambar 3.6 Ilustrasi Spesimen Katoda dengan Goresan Berbentuk Persegi Panjang Seluas: (a) 0 mm^2 (*Full Coating*), (b) 10 mm^2 , (c) 50 mm^2 , (d) 100 mm^2 , (e) 150 mm^2 , (f) 250 mm^2 , (g) 500 mm^2 , (h) Tanpa *Coating*



Gambar 3.7 Langkah Preparasi Spesimen



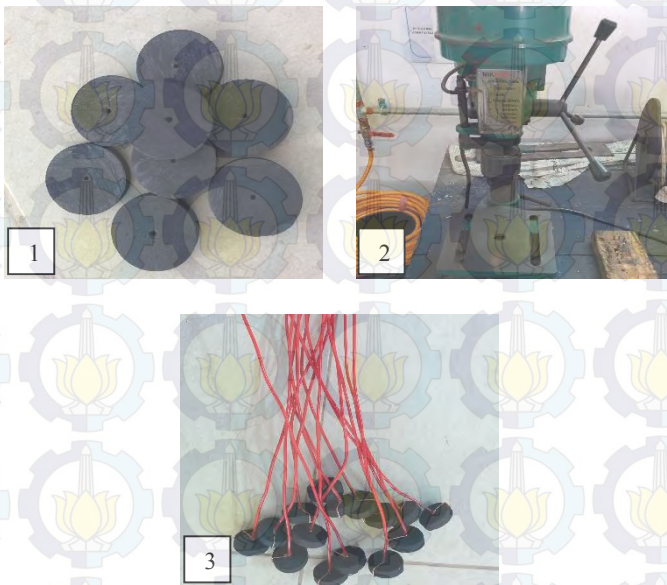
✓ Langkah Preparasi Spesimen Katoda (Pipa) :

1. Memotong pipa menjadi 42 bagian dengan gergaji mesin.
2. Pipa dengan ukuran panjang masing-masing 100 mm dan diameter 60,3 mm.
3. Melubangi spesimen katoda dengan mengebor salah satu ujungnya untuk tempat pemasangan kabel katoda.
4. Membersihkan permukaan luar spesimen katoda dari produk korosi yang ada dengan gerinda dan ampelas.
5. Menempelkan lakban dengan ukuran tertentu pada permukaan spesimen katoda sebagai tanda goresan (bagian yang tidak tertutup cat).
6. Melakukan pengecatan dengan cat *zinc chromate* sebanyak 2 lapis secara merata.
7. Mengeringkan spesimen dibawah sinar matahari.
8. Melapisi spesimen dengan *epoxy filler* sebanyak 2 lapis secara merata dan mengulangi langkah no. 7.
9. Memasang kabel pada katoda melalui mur dan baut pada pipa kemudian ditutup dengan memberikan lem tembak.
10. Menutup kedua ujung pipa dengan karet *sponge* agar elektrolit tidak masuk ke bagian dalam pipa menggunakan lem tembak.
11. Memberikan kode untuk masing-masing pipa dan membuka lakban yang menempel sehingga ada bagian yang terbuka (goresan).

Spesimen (pipa) berjumlah 42 buah, 39 diantaranya dibungkus dengan lapis lindung dan 3 spesimen tidak dibungkus dengan lapis lindung. Dari 39 spesimen dengan lapis lindung, 36 diantaranya diberikan goresan dengan ukuran yang berbeda dan sisanya 3 spesimen tidak diberikan goresan. Spesimen yang tidak diberikan lapis lindung dan spesimen yang tidak diberi goresan dan lapis lindung digunakan sebagai pembanding.

3.5.2 Preparasi Anoda

- ✓ Material : *Carbon Grahite*
- ✓ Tipe : *Impregnated Epoxy Resin (H)*
- ✓ Model : M120H
- ✓ Aplikasi : Tanah
- ✓ Bentuk : Tubular
- ✓ Dimensi : $p = 138 \text{ mm}$; $d = 36 \text{ mm}$
- ✓ Masa Pakai : 20 Tahun
- ✓ Komposisi Kimia : 99.80% C & 0.20% Ash



Gambar 3.8 Langkah Preparasi Anoda

- ✓ Langkah Preparasi Spesimen sebagai Anoda :
 1. Memotong anoda hingga berukuran tebal $\pm 13 \text{ mm}$ dengan diameter 36 mm.
 2. Memberi lubang bagian tengah anoda sebagai tempat memasang kabel anoda.
 3. Memasang kabel pada anoda.



3.5.3 Preparasi Media Elektrolit

Elektrolit yang digunakan dalam penelitian ini adalah tanah dengan derajat keasaman atau pH yang berbeda. Media tanah buatan ini dibuat dengan melarutkan HCl 1M (Asam Kuat) dan NaOH 1M (Basa Kuat) untuk mendapatkan tanah dengan derajat keasaman asam, netral, dan basa.

Media elektrolit tanah ini terdiri dari tiga variasi pH yang berbeda, yaitu kondisi asam dengan pH 3, netral dengan pH 7, dan basa dengan pH 11. Cara membuat media elektrolit tanah ini adalah mencampurkan larutan HCl 1M atau NaOH 1M dengan aquades dalam jumlah tertentu sampai ketemu dengan kondisi pH yang diinginkan, barulah setelah itu dicampur kedalam tanah.

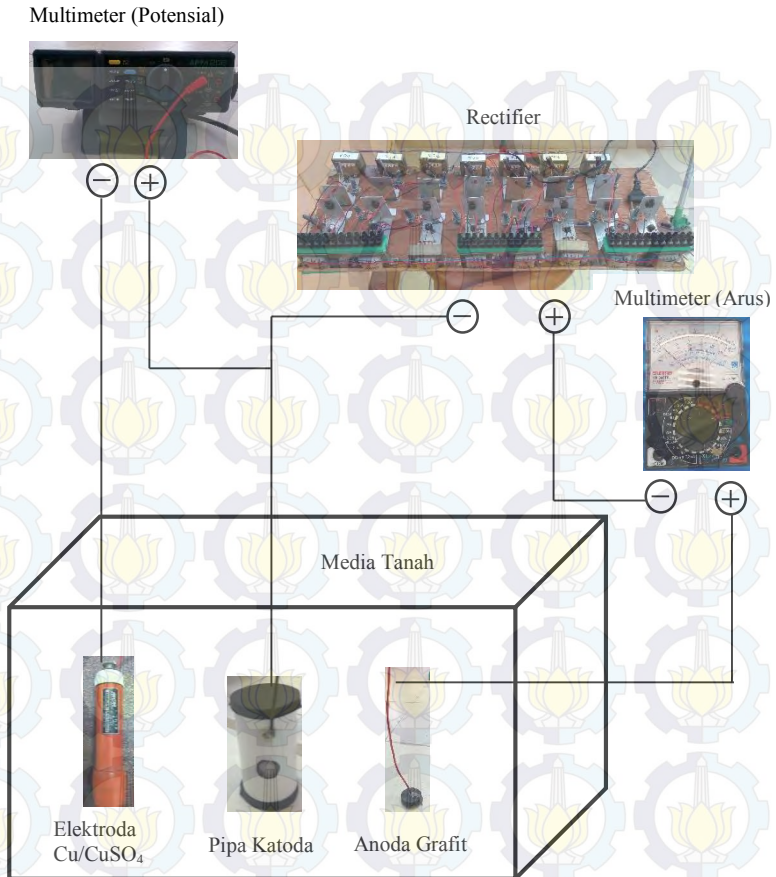
3.5.4 Pengkondisian Spesimen

Sebelum dilakukan instalasi ICCP untuk kemudian mengukur arus proteksi yang diberikan, terlebih dahulu spesimen katoda dikondisikan dalam media tanah yang telah dibuat dengan variasi pH tertentu. Pengkondisian ini bertujuan untuk merusak lapisan pasif yang terbentuk pada permukaan pipa. Pengkondisian dilakukan dengan cara imersi dalam media tanah selama 8 hari.

Dari 3 variasi pH elektrolit yang berbeda, masing-masing elektrolit ditempatkan dalam 3 *box container* dengan warna yang berbeda untuk membedakan pH tanah didalamnya.

3.5.5 Pembuatan Rangkaian ICCP

Setelah pengkondisian selesai dilakukan, spesimen (pipa) dipasang pada rangkaian ICCP dan berperan sebagai katoda, sedangkan grafit berperan sebagai anoda. Katoda dan anoda dihubungkan melalui kabel dengan rectifier sebagai penyearah arus dan digital multimeter serta avometer sebagai penunjuk potensial dan arus dalam rangkaian ICCP. Untuk lebih jelasnya diberikan ilustrasi pada gambar 3.9 berikut.



Gambar 3.9 Skema Rangkaian Sistem ICCP

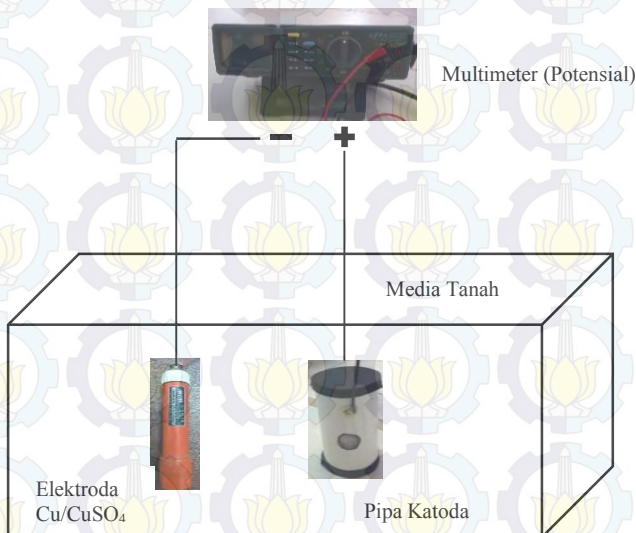
3.6 Pengukuran Arus Proteksi

Pada penelitian ini pengujian korosi *pipeline* yang dilakukan adalah dengan mengukur *half-cell potential*. Elektroda acuan yang digunakan adalah elektroda referen Cu/CuSO_4 . Dalam sistem ICCP, fokus utama yang menjadi parameter dalam sistem ICCP adalah tingkat proteksi yang didapat dari potensial korosi. Dari potensial korosi yang



diketahui, arus proteksi dapat diatur sedemikian rupa agar nilai potensial spesimen berada dalam kondisi terproteksi.

Pengujian potensial spesimen dengan metode *Half-Cell Potential* dilakukan untuk mengetahui tingkatan proteksi yang diberikan dan potensi korosi yang terjadi pada pipa. Pengukuran arus proteksi dilakukan selama 7 hari dengan interval: setiap hari selama 7 hari dilakukan pengukuran data *half-cell potential* dengan elektroda referen Cu/CuSO₄. Berikut gambar 3.10 yang menunjukkan ilustrasi pengukuran arus proteksi.



Gambar 3.10 Pengukuran Arus Proteksi

3.7 Rancangan Penelitian

Rencana penelitian dilakukan selama 15 hari dimana 8 hari pertama digunakan untuk proses imersi dan pengkondisiannya. Sedangkan 7 hari berikutnya dilakukan pengukuran nilai arus proteksi spesimen setiap harinya sesuai standard NACE TM 0169-95 "*Laboratory Corrosion Testing of Metals*". Data yang diambil adalah nilai arus proteksi yang diberikan untuk mendapatkan nilai potensial yang sama yaitu -850 mV untuk



masing-masing spesimen dengan variasi dimensi goresan *coating* pada pH yang berbeda. Pengujian dilakukan setiap hari selama 7 hari menggunakan elektroda referen Cu/CuSO₄. Pengukuran dilakukan sebanyak 3 kali untuk setiap spesimen dan diambil nilai rata-rata agar data yang didapatkan lebih valid. Pengamatan visual (makro) dilakukan untuk mengetahui tipe korosi yang terjadi. Pada tabel 3.3 dapat dilihat rencana pengukuran nilai arus proteksi.

Tabel 3.3 Rencana Pengukuran Arus Proteksi

Pengujian hari ke-	Arus Proteksi (mA) pada Luas Goresan (mm ²)							
	10	50	100	150	250	500	Tanpa Goresan	Tanpa <i>Coating</i>
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
Rata-rata								





BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisa Data

4.1.1 Pengujian Spektrometer

Pengujian spektrometer adalah suatu pengujian yang dilakukan untuk mengetahui kandungan komposisi kimia dari suatu material tertentu. Adapun berikut ditampilkan pada tabel 4.1 hasil pengujian spektrometer untuk material pipa API 5L grade B.

Tabel 4.1 Hasil Pengujian Spektrometer Pipa API 5L grade B

Komposisi Kimia	Kadar (%)
C	0.19526
Si	0.18809
Mn	0.37488
P	0.01538
S	0.01252
Cu	0.01259
Ni	0.02316
Cr	0.04622
Mo	0.00913
Al	0.00122
Fe	99.12200

Berdasarkan data pada tabel diatas dapat dilihat bahwa pipa API 5L grade B ini tergolong ke dalam baja karbon rendah dengan kandungan kadar karbon sebesar 0.19526%. Baja karbon rendah dalah baja yang memiliki kadar karbon kurang dari 0.3%. Selain itu, pipa API 5L grade B ini juga mengandung unsur-unsur lain, seperti: Si (0.18809%), Mn (0.37488%), P (0.01538%), S (0.01252%), Cu (0.01259%), Ni (0.02316%), Cr (0.04622%), Mo (0.00913%), Al (0.00122%), Fe (99.12200%).

Masing-masing dari unsur kandungan diatas memberikan pengaruh berupa sifat karakteristik yang khas pada pipa API 5L grade B ini, antara lain yaitu:



a. Silikon (Si)

Merupakan unsur penstabil ferrit yang dapat menaikkan ketangguhan dan kekuatan baja.

b. Mangan (Mn)

Unsur ini dapat menaikkan ketahanan korosi pada baja dan juga meningkatkan ketahanan terhadap abrasi.

c. Krom (Cr)

Unsur ini dapat meningkatkan ketahanan korosi pada baja, semakin banyak kandungan krom maka ketahanan baja terhadap korosi akan semakin meningkat.

d. Molibdenum (Mo)

Unsur ini dapat berperan aktif dalam ketahanan korosi terutama pada korosi sumuran (*pitting corrosion*) dan korosi celah (*crevice corrosion*).

e. Nikel (Ni)

Unsur ini dapat meningkatkan sifat mekanik dan karakteristik fabrikasi dari baja, selain itu nikel juga berfungsi untuk meningkatkan ketahanan korosi pada baja.

Akan tetapi, presentase kandungan unsur-unsur yang terdapat pada pipa API 5L grade B ini tergolong dalam kategori rendah, sehingga tidak mampu memberikan pengaruh ketahanan terhadap korosi yang begitu signifikan. Sehingga, baja API 5L grade B masih akan mudah untuk terserang korosi.

4.1.2 Kondisi Awal Pipa API 5L Grade B

Sebelum instalasi pipa dengan sistem ICCP, perlu dilakukan pengkondisian awal dengan cara imersi atau penimbunan pipa dalam lingkungan elektrolit tanah dengan pH 3 (asam), 7 (netral), dan 11 (basa) selama 7 hari. Pengukuran potensial awal imersi bertujuan untuk mengetahui perbandingan nilai potensial sebelum dan sesudah instalasi ICCP untuk kemudian dapat menentukan arus proteksi yang diberikan untuk 24 spesimen dalam 3 elektrolit yang berbeda agar tetap dalam level potensial terproteksi. Pengukuran



potensial korosi pipa untuk pengkondisian awal ini dilakukan dengan menggunakan avometer dan elektroda referen Cu/CuSO₄.

Tabel 4.2 Kondisi Awal setelah Imersi Pipa dalam Elektrolit Tanah (a) pH 3, (b) pH 7, dan (c) pH 11 tanpa Instalasi ICCP selama 7 hari untuk Cacat Gores Lingkaran

(a) pH 3

pH	Luas Goresan (mm ²)	Potensial Korosi (-mV)
3	0	685
	10	710
	50	708
	100	720
	150	723
	250	730
	500	745
	18934,2	780

(b) pH 7

pH	Luas Goresan (mm ²)	Potensial Korosi (-mV)
7	0	708
	10	708
	50	670
	100	710
	150	717
	250	730
	500	742
	18934,2	770

(c) pH 11

pH	Luas Goresan (mm ²)	Potensial Korosi (-mV)
11	0	690
	10	675
	50	680
	100	668



150	720
250	748
500	760
18934,2	770

Tabel 4.3 Kondisi Awal setelah Imersi Pipa dalam Elektrolit Tanah (a) pH 3, (b) pH 7, dan (c) pH 11 tanpa Instalasi ICCP selama 7 hari untuk Cacat Gores Persegi Panjang

(a) pH 3

pH	Luas Goresan (mm ²)	Potensial Korosi (-mV)
3	0	690
	10	673
	50	710
	100	745
	150	730
	250	756
	500	760
	18934,2	788

(b) pH 7

pH	Luas Goresan (mm ²)	Potensial Korosi (-mV)
7	0	710
	10	715
	50	700
	100	725
	150	730
	250	730
	500	755
	18934,2	777

(c) pH 11

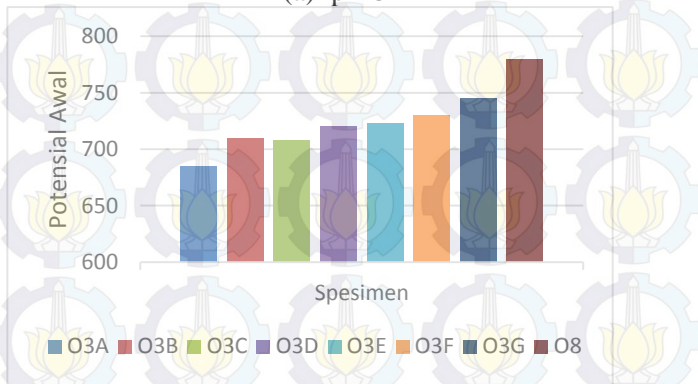
pH	Luas Goresan (mm ²)	Potensial Korosi (-mV)
11	0	696
	10	680
	50	685



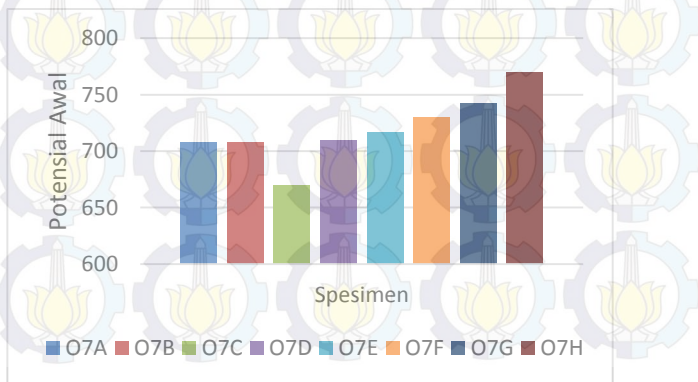
100	690
150	715
250	749
500	763
18934,2	770

Berikut ini ditampilkan gambar 4.1 yang mana merupakan grafik potensial awal imersi dalam elektrolit tanah dengan pH 3, pH 7, dan pH 11 dengan bentuk goresan lingkaran.

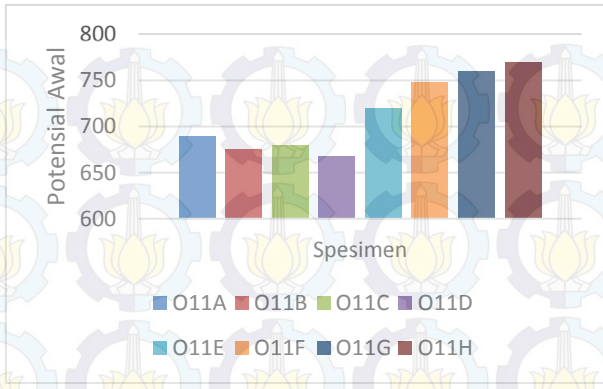
(a) pH 3



(b) pH 7



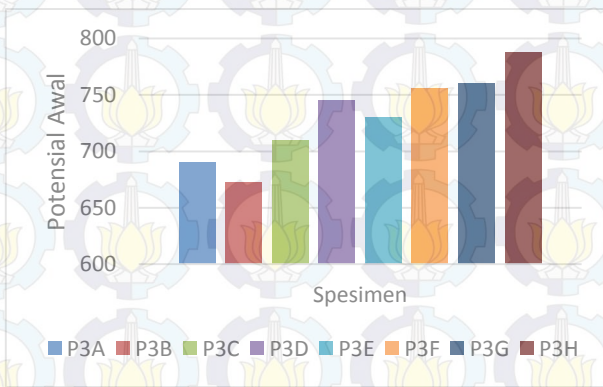
(c) pH 11

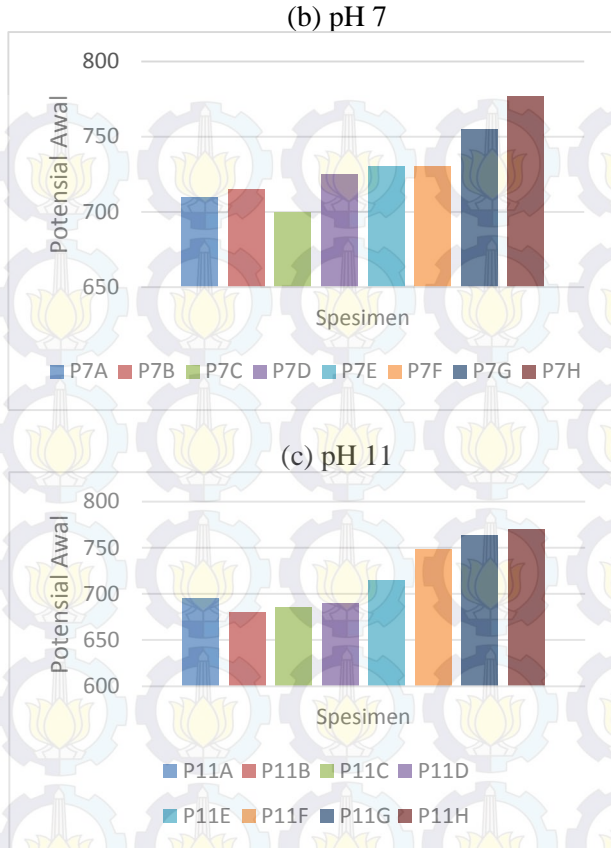


Gambar 4.1 Grafik Potensial Awal Imersi Pipa dalam Elektrolit Tanah dengan Goresan Lingkaran

Lalu pada gambar 4.2 yang berikut ini adalah grafik potensial awal dengan goresan berbentuk persegi panjang.

(a) pH 3





Gambar 4.2 Grafik Potensial Awal Imersi Pipa dalam Elektrolit Tanah dengan Goresan Persegi Panjang

4.1.3 Pengukuran Arus Proteksi Pipa

Pipa API 5L Grade B sebagai katoda dan grafit sebagai anoda dimasukkan dalam elektrolit tanah dengan pH 3, pH 7, dan pH 11 selama 7 hari. Sebelumnya, pipa telah dilakukan pengondisian selama 7 hari untuk merusak lapisan pasif yang terbentuk pada permukaan pipa yang terbuka. Kabel tembaga pada pipa dihubungkan ke kutub negatif (-) *rectifier*



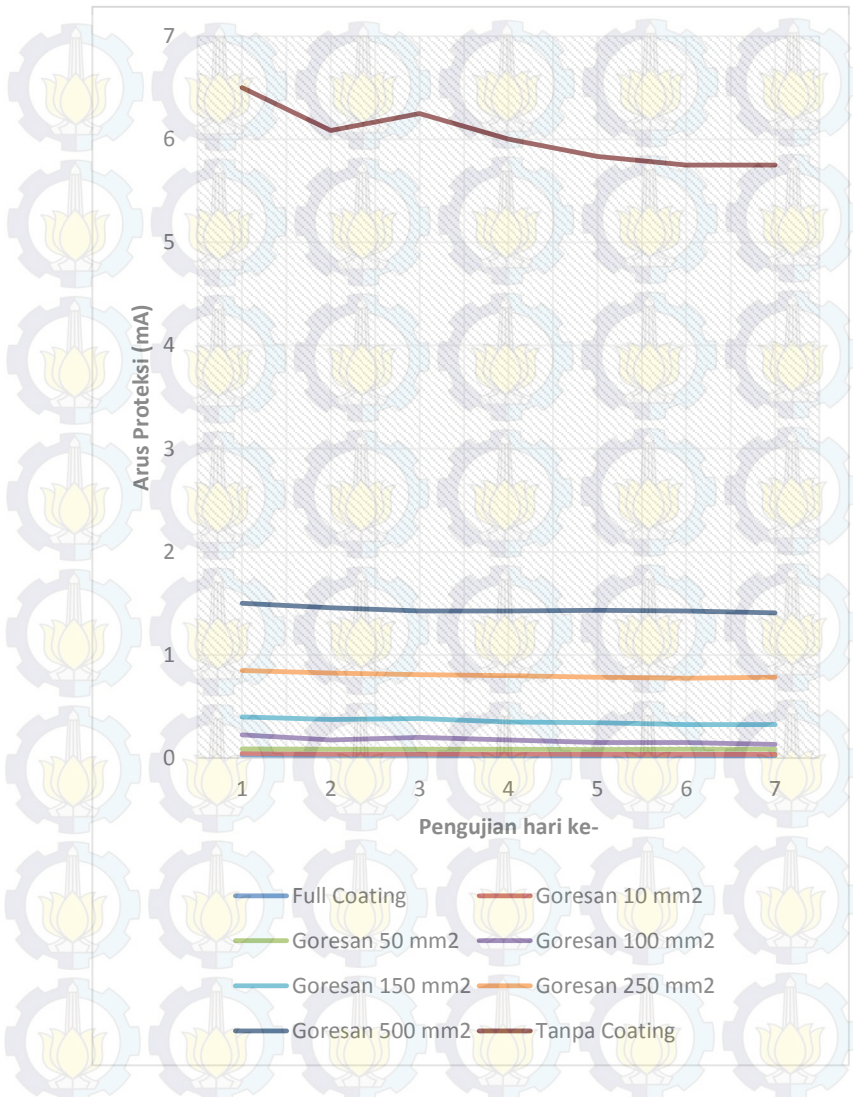
sedangkan kabel tembaga pada anoda grafit dihubungkan ke kutub positif (+) *rectifier*. Antara katoda dan anoda dengan *rectifier* dipasang avometer yang menunjukkan nilai arus yang keluar dari *rectifier* menuju katoda. Arus keluaran dari *rectifier* ini selanjutnya disebut sebagai arus proteksi yang dibutuhkan untuk proteksi pipa. Arus ini diatur dan dipantau selama 7 hari selama proses ini berlangsung.

Pengukuran arus proteksi dilakukan dengan menggunakan dua avometer. Avometer pertama digunakan sebagai acuan untuk nilai potensial -850 mV vs elektroda referen Cu/CuSO₄. Avometer kedua digunakan untuk mengukur arus yang diberikan untuk mencapai nilai potensial proteksi sebesar -850 mV. Pengukuran dilakukan dengan menghubungkan kabel tembaga pada pipa dengan kutub positif (+) avometer dan menghubungkan elektroda Cu/CuSO₄ dengan kutub negatif (-) avometer.

4.1.4 Perbandingan Hasil Pengukuran Arus Proteksi dalam Tanah dengan pH 3, pH 7, dan pH 11

Analisis data dilakukan dengan membandingkan kebutuhan arus proteksi dari masing-masing pipa dalam elektrolit tanah dengan pH 3, pH 7, dan pH 11. Hasil yang didapat diambil dari rata-rata 3 kali pengukuran. Dari pengukuran selama 7 hari, didapatkan nilai arus proteksi yang dibutuhkan masing-masing pipa dengan kondisi goresan yang berbeda dalam elektrolit tanah dengan pH yang berbeda.

4.1.4.1 Perbandingan Arus Proteksi Pipa dalam Media Tanah pH 3

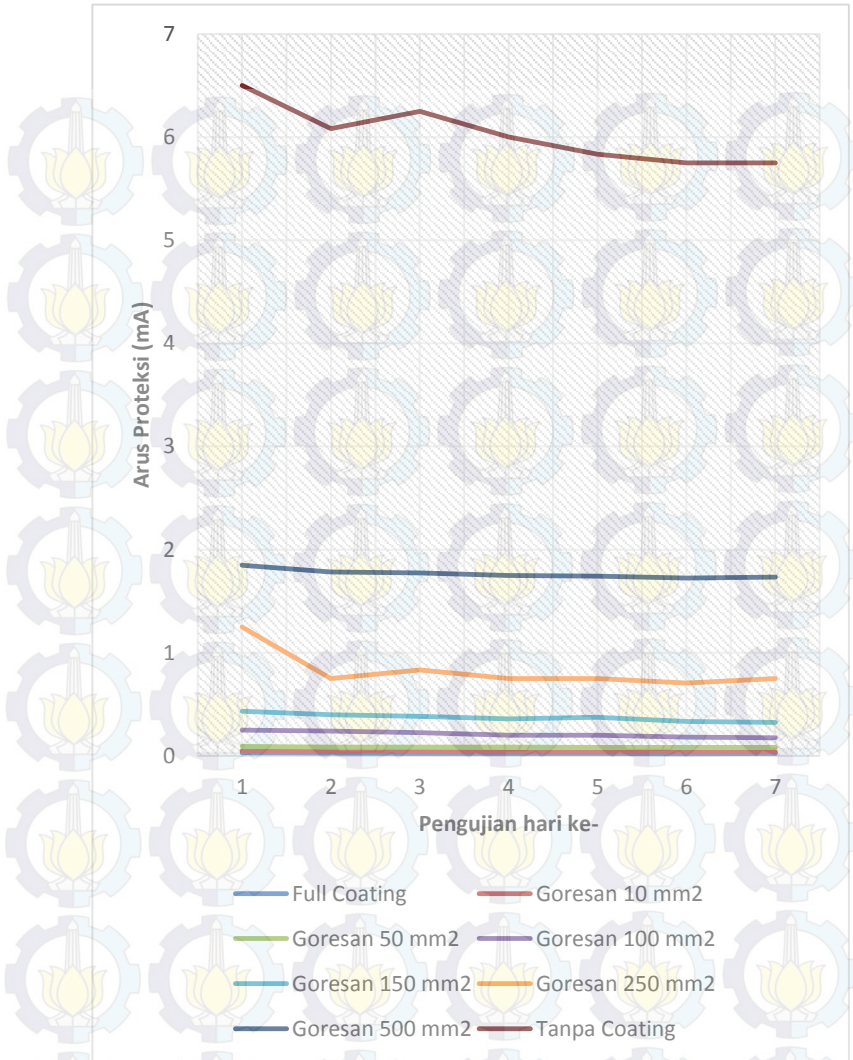


Gambar 4.3 Arus Proteksi Pipa dalam Media Tanah pH 3 untuk Cacat Gores Lingkaran



Dari gambar 4.3 dapat dilihat bahwa arus proteksi tertinggi dalam media tanah pH 3 pada cacat gores berbentuk lingkaran terdapat pada pipa tanpa *coating* dan arus proteksi terendah pada pipa tanpa goresan. Pipa dengan luas goresan dari 10 mm², 50 mm², hingga 500 mm² memiliki nilai arus proteksi yang semakin meningkat. Adapun kenaikan kebutuhan arus proteksi cenderung hampir sama, yaitu sekitar 102.627%-125%. Kenaikan arus terbesar terjadi saat mencapai goresan 100% dengan luas 18934.2 mm² rata-rata sebesar 4.584 mA. Selama 7 hari pengukuran terlihat adanya ketidakstabilan arus saat awal pengukuran dan terjadi pada semua spesimen. Semakin bertambahnya waktu, arus proteksi yang dibutuhkan semakin kecil dan lebih stabil.

Secara kuantitatif, kenaikan arus proteksi antara pipa dengan luas goresan 10 mm² dibandingkan luasan 50 mm² sebesar 120.320 %. Untuk goresan 50 mm² ke luasan 100 mm² kenaikan arus sebesar 102.627%. Kenaikan setiap spesimen dari luas goresan 100 mm², 150 mm², 250 mm², 500 mm² hingga 18934.2 mm² (goresan 100%) secara berturut-turut sebesar 106.897%, 125%, 79.111%, dan 318.528%. Sedangkan pada pipa tanpa goresan (goresan 0%) mengalami kenaikan sebesar 24041.221% jika dibandingkan dengan pipa tanpa *coating* (goresan 100%).



Gambar 4.4 Arus Proteksi Pipa dalam Media Tanah pH 3 untuk Cacat Gores Persegi Panjang

Dari gambar 4.4 dapat dilihat bahwa arus proteksi tertinggi dalam media tanah pH 3 pada cacat gores berbentuk

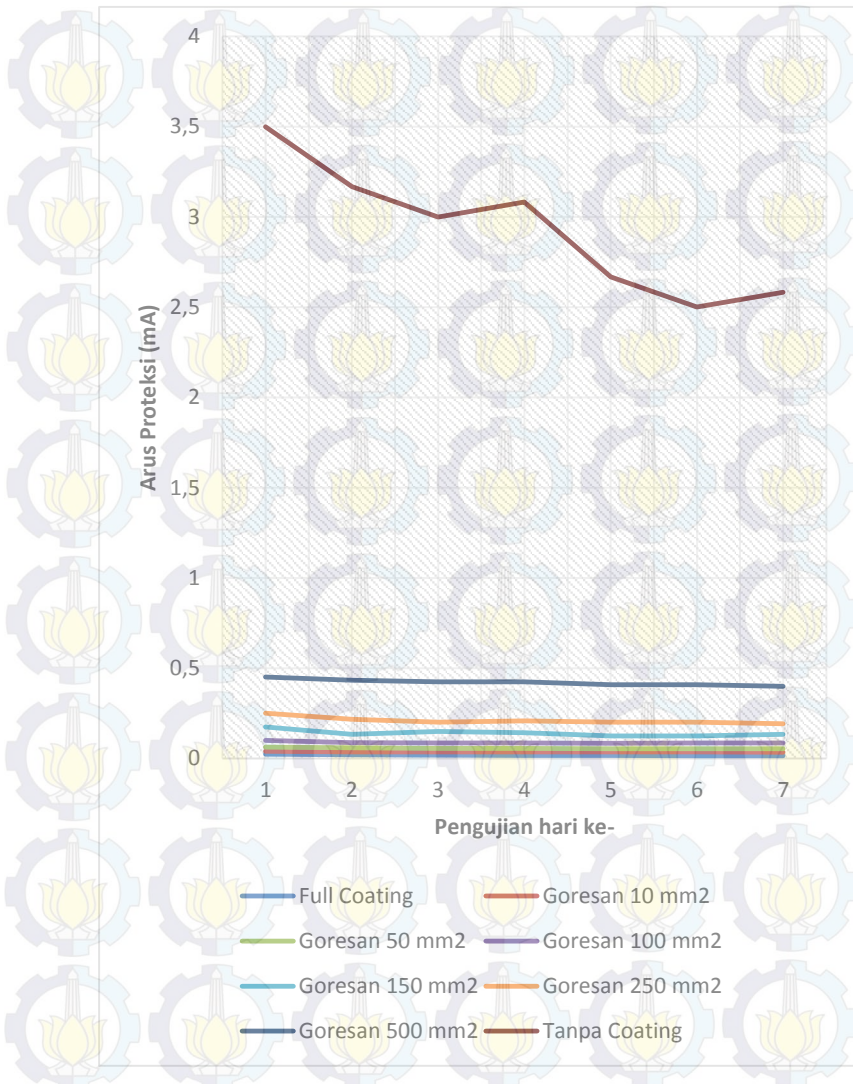


persegi panjang terdapat pada pipa tanpa *coating* dan arus proteksi terendah pada pipa tanpa goresan. Pipa dengan luas goresan dari 10 mm², 50 mm², hingga 500 mm² memiliki nilai arus proteksi yang semakin meningkat. Adapun kenaikan kebutuhan arus proteksi cukup bervariasi namun tidak begitu signifikan perbedaannya, yaitu sekitar 109.441%-146.244%. Namun hal tersebut tidak berlaku untuk spesimen tanpa *coating* dan *full coating*. Kenaikan arus terbesar terjadi saat mencapai goresan 100% dengan luas 18934.2 mm² rata-rata sebesar 4.258 mA. Selama 7 hari pengukuran terlihat adanya ketidakstabilan arus saat awal pengukuran dan terjadi pada semua spesimen. Seiring dengan bertambahnya waktu, arus proteksi yang dibutuhkan semakin kecil dan menunjukkan lebih stabil.

Jika dilihat secara kuantitatif, kenaikan arus proteksi antara pipa dengan luas goresan 10 mm² dibandingkan luasan 50 mm² sebesar 109.441 %. Untuk goresan 50 mm² ke luasan 100 mm² kenaikan arus sebesar 146.244%. Lalu untuk kenaikan setiap spesimen dari luas goresan dari 100 mm², 150 mm², 250 mm², 500 mm² hingga 18934.2 mm² (goresan 100%) secara berturut-turut yaitu sebesar 76.836%, 122.045%, 113.381%, dan 241.200%. Sedangkan pada pipa tanpa goresan (goresan 0%) mengalami kenaikan sebesar 24041.221% jika dibandingkan dengan pipa tanpa *coating* (goresan 100%), hal ini dikarenakan untuk spesimen pembandingan dengan *full coating* dan tanpa *coating* menggunakan spesimen yang sama dengan data sebelumnya.

Bisa dilihat bahwa sebenarnya baik antara bentuk goresan lingkaran dengan persegi panjang sama-sama menunjukkan hasil yang mirip, yaitu sama-sama naik untuk kebutuhan arus proteksinya untuk goresan yang semakin besar. Namun, yang membedakan adalah bahwa untuk spesimen dengan cacat goresan persegi panjang ternyata membutuhkan arus proteksi yang lebih besar jika dibandingkan dengan pipa dengan goresan berbentuk lingkaran, walaupun ada sebagian kecil arus proteksi yang dibutuhkan sama atau bahkan lebih kecil dibandingkan dengan cacat gores lingkaran.

4.1.4.2 Perbandingan Arus Proteksi Pipa dalam Media Tanah pH 7

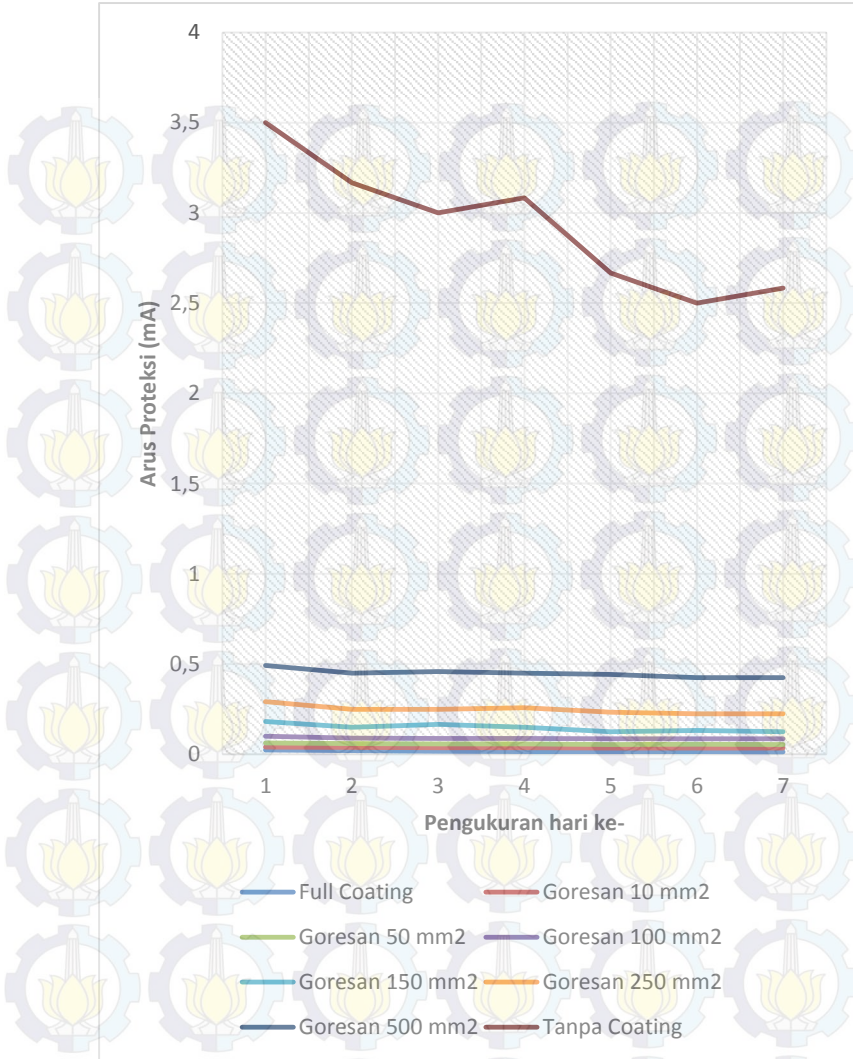


Gambar 4.5 Arus Proteksi Pipa dalam Media Tanah pH 7 untuk Cacat Goresan Lingkaran



Dari gambar 4.5 dapat dilihat bahwa arus proteksi tertinggi dalam media tanah pH 7 pada cacat gores berbentuk lingkaran terdapat pada pipa tanpa *coating* dan arus proteksi terendah pada pipa tanpa goresan (*full coating*). Pipa dengan luas goresan dari 10 mm² dengan 50 mm² menunjukkan terjadi peningkatan pada kebutuhan arus proteksi, hal yang sama juga terjadi pada spesimen dengan luas goresan 50 mm² ke 100 mm², 100 mm² ke 150 mm², 150 mm² ke 250 mm². Adapun besar kenaikannya adalah hampir sama, yaitu masing-masing 56.192%, 56.692%, 60.500%, 49.152%. Hal tersebut berkebalikan dengan kebutuhan arus proteksi antara pipa dengan luas cacat gores 250 mm² sampai 500 mm², karena pada kondisi tersebut kebutuhan arus memang sama cenderung naik tapi dengan kenaikan yang cukup signifikan yaitu sebesar 101.136%. Adapun kenaikan arus terbesar terjadi saat mencapai goresan 100% dengan luas 18934.2 mm² rata-rata sebesar 2.508 mA. Selama 7 hari pengukuran terlihat adanya ketidakstabilan arus saat awal pengukuran dan terjadi pada semua spesimen. Semakin bertambahnya waktu, arus proteksi yang dibutuhkan semakin kecil dan cenderung lebih stabil.

Secara kuantitatif, kenaikan arus proteksi antara pipa dengan luas goresan 10 mm² dibandingkan luasan 50 mm² sebesar 56.191%. Untuk goresan 50 mm² ke luasan 100 mm² kenaikan arus sebesar 56.692%. Kenaikan setiap spesimen dari luas goresan 100 mm², 150 mm², 250 mm², 500 mm² hingga 18934.2 mm² (goresan 100%) secara berturut-turut sebesar 60.500%, 49.152%, 101.136%, dan 594.915%. Sedangkan pada pipa tanpa goresan (goresan 0%) mengalami kenaikan sebesar 16611.956% jika dibandingkan dengan pipa tanpa *coating* (goresan 100%).



Gambar 4.6 Arus Proteksi Pipa dalam Media Tanah pH 7 untuk Cacat Gores Persegi Panjang

Dari gambar 4.6 dapat dilihat bahwa arus proteksi tertinggi dalam media tanah pH 7 pada cacat gores berbentuk



persegi panjang terdapat pada pipa tanpa *coating* dan arus proteksi terendah pada pipa tanpa goresan (*full coating*). Pipa dengan luas goresan dari 10 mm² dengan 50 mm² menunjukkan terjadi peningkatan pada kebutuhan arus proteksi, hal yang sama juga terjadi pada spesimen dengan luas goresan 50 mm² ke 100 mm², 100 mm² ke 150 mm², 150 mm² ke 250 mm². Adapun besar kenaikannya adalah hampir sama, yaitu masing-masing 58.148%, 55.235%, 64.631%, 67.742%. Hal tersebut berkebalikan dengan kebutuhan arus proteksi antara pipa dengan luas cacat gores 250 mm² sampai 500 mm², karena pada kondisi tersebut kebutuhan arus memang sama cenderung naik tapi dengan kenaikan yang cukup signifikan yaitu sebesar 81.250%. Adapun kenaikan arus terbesar terjadi saat mencapai goresan 100% dengan luas 18934.2 mm² rata-rata sebesar 2.48 mA. Selama 7 hari pengukuran terlihat adanya ketidakstabilan arus saat awal pengukuran dan terjadi pada semua spesimen. Semakin bertambahnya waktu, arus proteksi yang dibutuhkan semakin kecil dan cenderung lebih stabil.

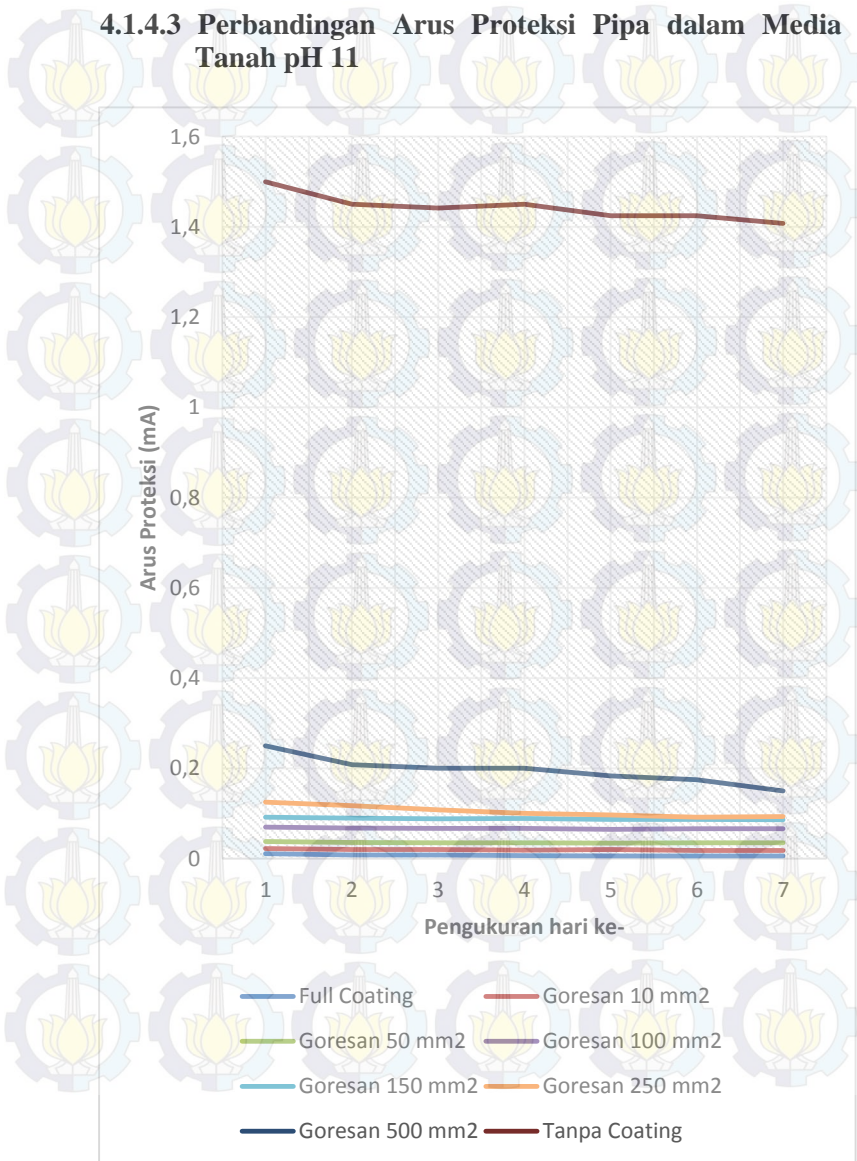
Secara kuantitatif, kenaikan arus proteksi antara pipa dengan luas goresan 10 mm² dibandingkan luasan 50 mm² sebesar 58.148%. Untuk goresan 50 mm² ke luasan 100 mm² kenaikan arus sebesar 55.235%. Kenaikan setiap spesimen dari luas goresan 100 mm², 150 mm², 250 mm², 500 mm² hingga 18934.2 mm² (goresan 100%) secara berturut-turut sebesar 64.631%, 67.742%, 81.250%, dan 552.519%. Sedangkan pada pipa tanpa goresan (goresan 0%) mengalami kenaikan sebesar 16611.956% jika dibandingkan dengan pipa tanpa *coating* (goresan 100%).

Bisa dilihat bahwa sebenarnya baik antara bentuk goresan lingkaran dengan persegi panjang sama-sama menunjukkan hasil yang mirip, yaitu sama-sama naik untuk kebutuhan arus proteksinya untuk goresan yang semakin besar. Namun, yang membedakan adalah bahwa untuk spesimen dengan cacat goresan persegi panjang ternyata membutuhkan arus proteksi yang lebih besar jika dibandingkan dengan pipa dengan goresan berbentuk lingkaran, walaupun ada sebagian kecil



arus proteksi yang dibutuhkan sama atau bahkan lebih kecil dibandingkan dengan cacat gores lingkaran.

4.1.4.3 Perbandingan Arus Proteksi Pipa dalam Media Tanah pH 11

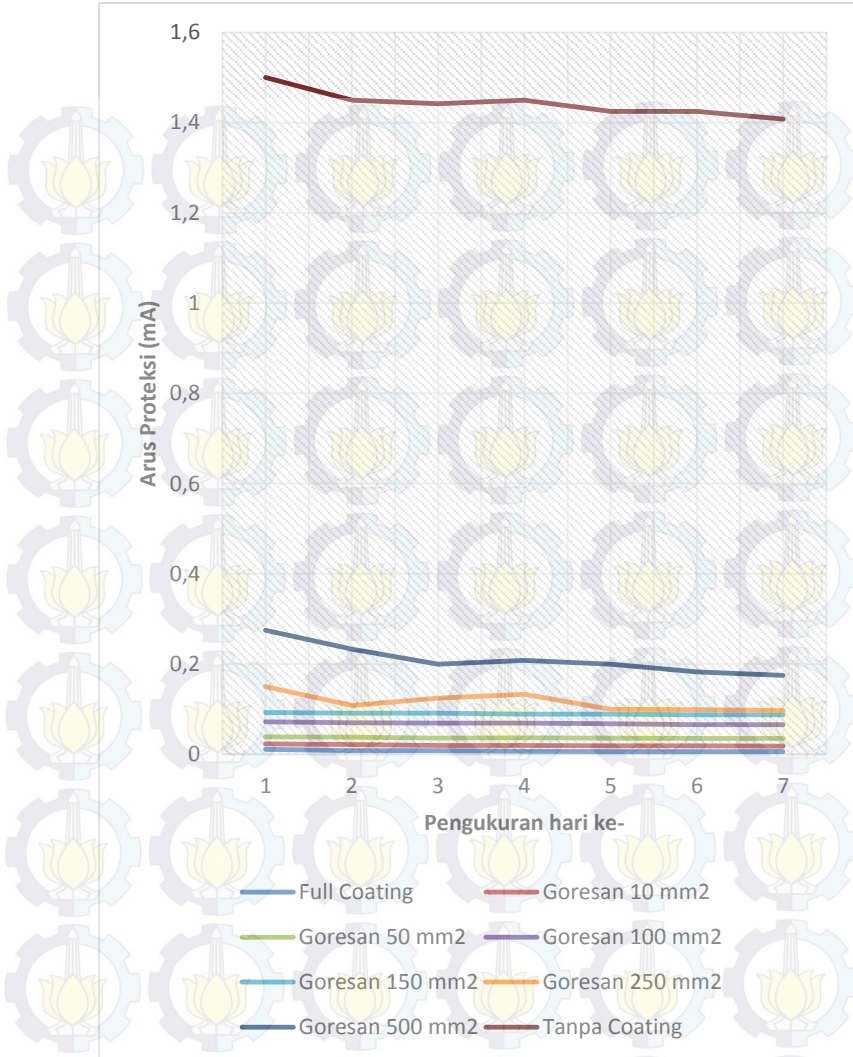




Gambar 4.7 Arus Proteksi Pipa dalam Media Tanah pH 11 untuk Cacat Gores Lingkaran

Dari gambar 4.7 dapat dilihat bahwa arus proteksi tertinggi dalam media tanah pH 11 pada cacat gores berbentuk lingkaran terdapat pada pipa tanpa *coating* dan arus proteksi terendah pada pipa tanpa goresan (*full coating*). Pipa dengan luas goresan dari 10 mm² dengan 50 mm² lalu 50 mm² ke 100 mm² dan luas goresan 250 mm² ke 500 mm² menunjukkan terjadi peningkatan pada kebutuhan arus proteksi dengan persentase yang hampir sama dan cukup tinggi, yaitu masing-masing sebesar 80.825%, 88.859%, dan 86.788%. Hal ini berbeda seperti ditunjukkan oleh pipa dengan luas goresan 100 mm² ke 150 mm² dan 150 mm² ke 250 mm² yaitu memang sama-sama menunjukkan kenaikan kebutuhan akan arus proteksi dengan semakin besarnya cacat pada pipa, hanya saja persentase kenaikannya relatif lebih kecil yaitu masing-masing 31.982%, dan 18.201%. Adapun kenaikan arus terbesar terjadi saat mencapai goresan 100% dengan luas 18934.2 mm² rata-rata sebesar 1.248 mA. Selama 7 hari pengukuran terlihat adanya ketidakstabilan arus saat awal pengukuran dan terjadi pada semua spesimen. Semakin bertambahnya waktu, arus proteksi yang dibutuhkan semakin kecil dan cenderung lebih stabil.

Secara kuantitatif, kenaikan arus proteksi antara pipa dengan luas goresan 10 mm² dibandingkan luasan 50 mm² sebesar 80.825%. Untuk goresan 50 mm² ke luasan 100 mm² kenaikan arus sebesar 88.859%. Kenaikan setiap spesimen dari luas goresan 100 mm², 150 mm², 250 mm², 500 mm² hingga 18934.2 mm² (goresan 100%) secara berturut-turut sebesar 31.982%, 18.201%, 86.788%, dan 639.024%. Sedangkan pada pipa tanpa goresan (goresan 0%) mengalami kenaikan sebesar 19077.215% jika dibandingkan dengan pipa tanpa *coating* (goresan 100%).



Gambar 4.8 Arus Proteksi Pipa dalam Media Tanah pH 11 untuk Cacat Gores Persegi Panjang

Dari gambar 4.8 dapat dilihat bahwa arus proteksi tertinggi dalam media tanah pH 11 pada cacat gores berbentuk



persegi panjang terdapat pada pipa tanpa *coating* dan arus proteksi terendah pada pipa tanpa goresan (*full coating*). Pipa dengan luas goresan dari 10 mm² dengan 50 mm² lalu 50 mm² ke 100 mm² dan luas goresan 250 mm² ke 500 mm² menunjukkan terjadi peningkatan pada kebutuhan arus proteksi dengan persentase yang hampir sama dan cukup tinggi, yaitu masing-masing sebesar 81.796%, 87.256%, dan 81.501%. Hal ini berbeda seperti ditunjukkan oleh pipa dengan luas goresan 100 mm² ke 150 mm² dan 150 mm² ke 250 mm² yaitu memang sama-sama menunjukkan kenaikan kebutuhan akan arus proteksi dengan semakin besarnya cacat pada pipa, hanya saja persentase kenaikannya relatif lebih kecil yaitu masing-masing 31.111%, dan 29.131%. Adapun kenaikan arus terbesar terjadi saat mencapai goresan 100% dengan luas 18934.2 mm² rata-rata sebesar 1,232 mA. Selama 7 hari pengukuran terlihat adanya ketidakstabilan arus saat awal pengukuran dan terjadi pada semua spesimen. Semakin bertambahnya waktu, arus proteksi yang dibutuhkan semakin kecil dan cenderung lebih stabil.

Secara kuantitatif, kenaikan arus proteksi antara pipa dengan luas goresan 10 mm² dibandingkan luasan 50 mm² sebesar 81.796%. Untuk goresan 50 mm² ke luasan 100 mm² kenaikan arus sebesar 87.256%. Kenaikan setiap spesimen dari luas goresan 100 mm², 150 mm², 250 mm², 500 mm² hingga 18934.2 mm² (goresan 100%) secara berturut-turut sebesar 31.111%, 29.131%, 81.501%, dan 584.745%. Sedangkan pada pipa tanpa goresan (goresan 0%) mengalami kenaikan sebesar 19077.215% jika dibandingkan dengan pipa tanpa *coating* (goresan 100%).

Bisa dilihat bahwa sebenarnya baik antara bentuk goresan lingkaran dengan persegi panjang sama-sama menunjukkan hasil yang mirip, yaitu sama-sama naik untuk kebutuhan arus proteksinya untuk goresan yang semakin besar. Namun, yang membedakan adalah bahwa untuk spesimen dengan cacat goresan persegi panjang ternyata membutuhkan arus proteksi yang lebih besar jika dibandingkan dengan pipa dengan goresan berbentuk lingkaran, walaupun ada sebagian kecil

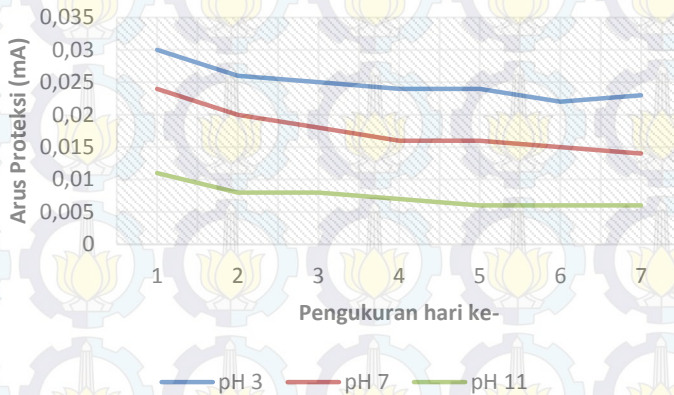


arus proteksi yang dibutuhkan sama atau bahkan lebih kecil dibandingkan dengan cacat gores lingkaran.

Dari gambar 4.3 sampai 4.8 menunjukkan bahwa nilai kebutuhan arus proteksi semakin meningkat seiring dengan semakin besarnya luas permukaan goresan. Dapat diketahui pula bahwasanya bentuk goresan juga cukup mempengaruhi kebutuhan arus proteksi. Dari grafik diatas didapatkan bahwa kebutuhan arus proteksi untuk bentuk goresan lingkaran mayoritas lebih rendah dari yang berbentuk persegi panjang. Dari perbandingan grafik tersebut juga menunjukkan bahwa dari pH 3, pH 7, dan pH 9 kebutuhan arus proteksi semakin kecil dari kondisi asam ke basa.

4.1.5 Perbandingan Hasil Pengukuran Arus Proteksi berdasarkan Luas Goresan pada Pipa

4.1.5.1 Pengukuran Arus Proteksi Pipa Tanpa Goresan



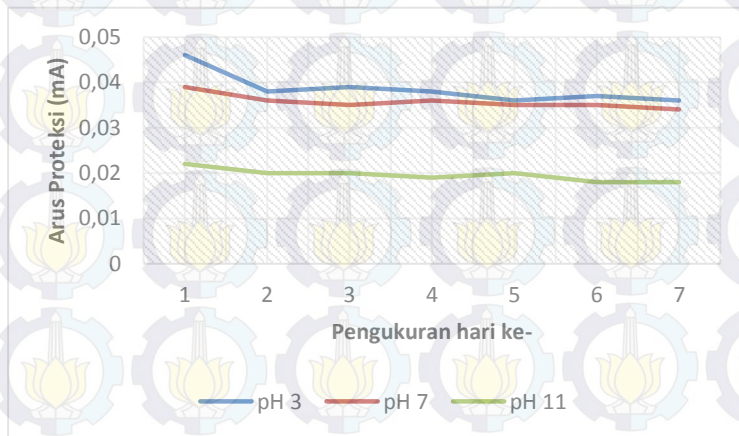
Gambar 4.9 Grafik Perbandingan Arus Proteksi Pipa Tanpa Goresan dalam Media Tanah pH 3, pH 7, dan pH 11

Pengukuran dilakukan dengan membandingkan kebutuhan arus proteksi dari pipa tanpa goresan dalam media

tanah pH 3, pH 7, dan pH 11. Selama 7 hari penimbunan dengan instalasi ICCP didapatkan nilai arus proteksi yang harus diberikan untuk mencapai potensial proteksi pada pipa sebesar -850 mV vs. elektroda Cu/CuSO₄. Arus yang dibutuhkan berada pada level 0.023-0.030 mA pada elektrolit tanah dengan pH 3, 0.014-0.024 mA pada elektrolit tanah dengan pH 7, dan 0.006-0.011 mA pada elektrolit tanah dengan pH 11.

Pipa tanpa goresan cenderung mengalami penurunan arus proteksi seiring dengan semakin naiknya pH tanah. Untuk pipa tanpa goresan kebutuhan arus proteksi dari pH tanah 3 ke pH 7 mengalami penurunan sebesar 38.611%. Sedangkan penurunan arus dari pH tanah 3 ke pH tanah 11 lebih besar yaitu 211.875%.

4.1.5.2 Pengukuran Arus Proteksi Pipa dengan Luas Goresan 10 mm²

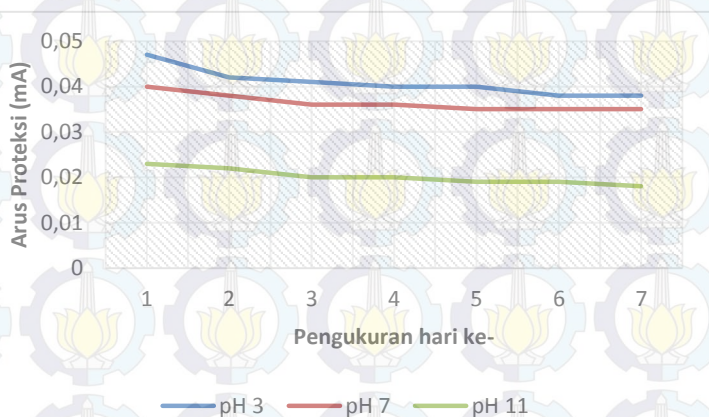


Gambar 4.10 Grafik Perbandingan Arus Proteksi Pipa dengan Goresan Lingkaran Seluas 10 mm² dalam Media Tanah pH 3, pH 7, dan pH 11



Pengukuran dilakukan dengan membandingkan kebutuhan arus proteksi dari pipa dengan luas goresan 10 mm^2 dalam media tanah pH 3, pH 7, dan pH 11. Selama 7 hari penimbunan dengan instalasi ICCP didapatkan nilai arus proteksi yang harus diberikan untuk mencapai potensial proteksi pada pipa sebesar $-850 \text{ mV vs. elektroda Cu/CuSO}_4$. Arus yang dibutuhkan berada pada level $0.036\text{-}0.046 \text{ mA}$ pada elektrolit tanah dengan pH 3, $0.034\text{-}0.039 \text{ mA}$ pada elektrolit tanah dengan pH 7, dan $0.018\text{-}0.022 \text{ mA}$ pada elektrolit tanah dengan pH 11.

Pipa dengan luas goresan 10 mm^2 dan cacat goresnya berbentuk lingkaran cenderung mengalami fluktuasi yang lebih besar dibandingkan pipa tanpa goresan. Pipa tanpa goresan cenderung mengalami penurunan arus proteksi seiring dengan semakin naiknya pH tanah. Untuk pipa dengan goresan lingkaran seluas 10 mm^2 kebutuhan arus proteksi dari pH tanah 3 ke pH 7 mengalami penurunan sebesar 7.417% . Sedangkan penurunan arus dari pH tanah 3 ke pH tanah 11 lebih besar yaitu 93.35% .

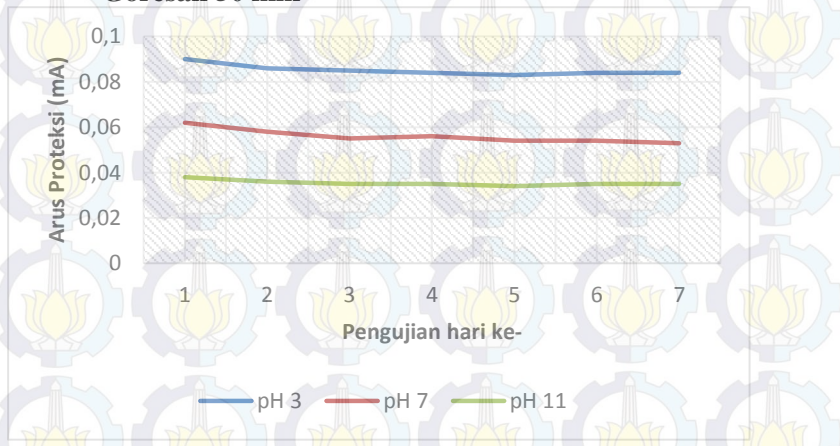


Gambar 4.11 Grafik Perbandingan Arus Proteksi Pipa dengan Goresan Persegi Panjang Seluas 10 mm^2 dalam Media Tanah pH 3, pH 7, dan pH 11

Pengukuran dilakukan dengan membandingkan kebutuhan arus proteksi dari pipa dengan luas goresan 10 mm² dalam media tanah pH 3, pH 7, dan pH 11. Selama 7 hari penimbunan dengan instalasi ICCP didapatkan nilai arus proteksi yang harus diberikan untuk mencapai potensial proteksi pada pipa sebesar -850 mV vs. elektroda Cu/CuSO₄. Arus yang dibutuhkan berada pada level 0.038-0.047 mA pada elektrolit tanah dengan pH 3, 0.035-0.040 mA pada elektrolit tanah dengan pH 7, dan 0.018-0.023 mA pada elektrolit tanah dengan pH 11.

Pipa dengan luas goresan 10 mm² dan cacat goresnya berbentuk lingkaran cenderung mengalami penurunan arus proteksi seiring dengan semakin naiknya pH tanah. Untuk pipa dengan goresan persegi panjang seluas 10 mm² kebutuhan arus proteksi dari pH tanah 3 ke pH 7 mengalami penurunan sebesar 10.432%. Sedangkan penurunan arus dari pH tanah 3 ke pH tanah 11 lebih besar yaitu 104.3%.

4.1.5.3 Pengukuran Arus Proteksi Pipa dengan Luas Goresan 50 mm²

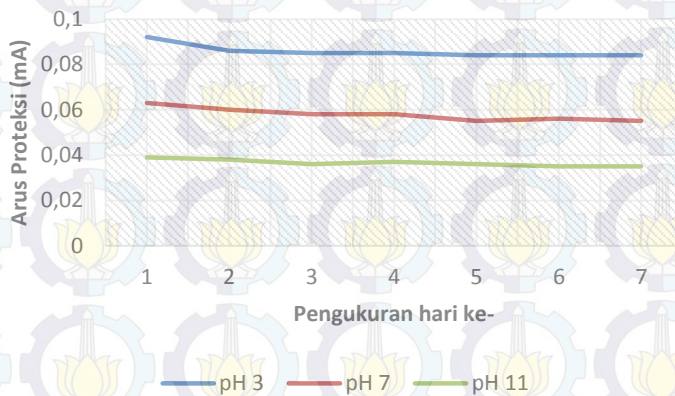


Gambar 4.12 Grafik Perbandingan Arus Proteksi Pipa dengan Goresan Lingkaran Seluas 50 mm² dalam Media Tanah pH 3, pH 7, dan pH 11



Pengukuran dilakukan dengan membandingkan kebutuhan arus proteksi dari pipa dengan luas goresan 50 mm^2 dalam media tanah pH 3, pH 7, dan pH 11. Selama 7 hari penimbunan dengan instalasi ICCP didapatkan nilai arus proteksi yang harus diberikan untuk mencapai potensial proteksi pada pipa sebesar $-850 \text{ mV vs. elektroda Cu/CuSO}_4$. Arus yang dibutuhkan berada pada level $0.083\text{--}0.090 \text{ mA}$ pada elektrolit tanah dengan pH 3, $0.053\text{--}0.062 \text{ mA}$ pada elektrolit tanah dengan pH 7, dan $0.034\text{--}0.038 \text{ mA}$ pada elektrolit tanah dengan pH 11.

Pipa dengan luas goresan 50 mm^2 dan cacat goresnya berbentuk lingkaran cenderung mengalami penurunan arus proteksi seiring dengan semakin naiknya pH tanah. Untuk pipa dengan goresan lingkaran seluas 50 mm^2 kebutuhan arus proteksi dari pH tanah 3 ke pH 7 mengalami penurunan sebesar 60.735% . Sedangkan penurunan arus dari pH tanah 3 ke pH tanah 11 lebih besar yaitu 143.4% .

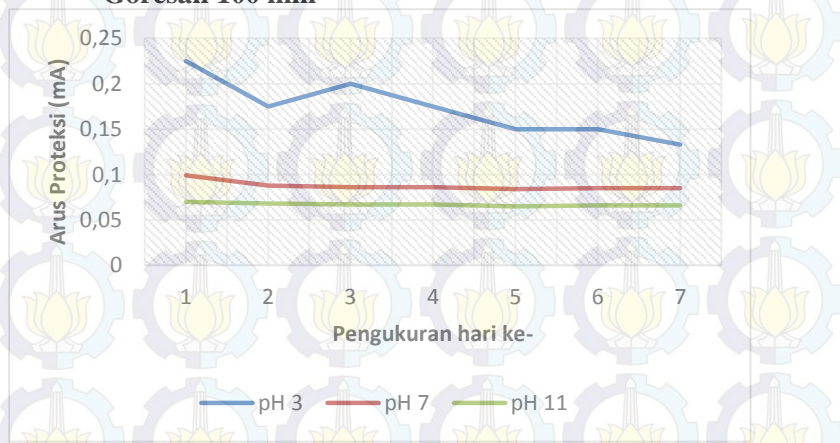


Gambar 4.13 Grafik Perbandingan Arus Proteksi Pipa dengan Goresan Persegi Panjang Seluas 50 mm^2 dalam Media Tanah pH 3, pH 7, dan pH 11

Pengukuran dilakukan dengan membandingkan kebutuhan arus proteksi dari pipa dengan luas goresan 50 mm² dalam media tanah pH 3, pH 7, dan pH 11. Selama 7 hari penimbunan dengan instalasi ICCP didapatkan nilai arus proteksi yang harus diberikan untuk mencapai potensial proteksi pada pipa sebesar -850 mV vs. elektroda Cu/CuSO₄. Arus yang dibutuhkan berada pada level 0.084-0.092 mA pada elektrolit tanah dengan pH 3, 0.055-0.063 mA pada elektrolit tanah dengan pH 7, dan 0.035-0.039 mA pada elektrolit tanah dengan pH 11.

Pipa dengan luas goresan 50 mm² dan cacat goresnya berbentuk persegi panjang cenderung mengalami penurunan arus proteksi seiring dengan semakin naiknya pH tanah. Untuk pipa dengan goresan persegi panjang seluas 50 mm² kebutuhan arus proteksi dari pH tanah 3 ke pH 7 mengalami penurunan sebesar 55.582%. Sedangkan penurunan arus dari pH tanah 3 ke pH tanah 11 lebih besar yaitu 131.27%.

4.1.5.4 Pengukuran Arus Proteksi Pipa dengan Luas Goresan 100 mm²

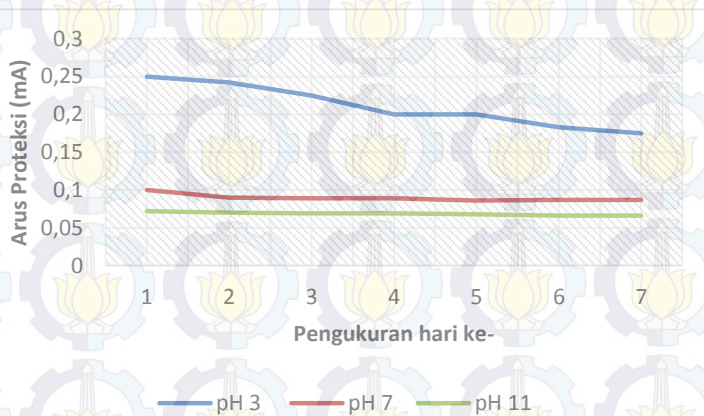


Gambar 4.14 Grafik Perbandingan Arus Proteksi Pipa dengan Goresan Lingkaran Seluas 100 mm² dalam Media Tanah pH 3, pH 7, dan pH 11



Pengukuran dilakukan dengan membandingkan kebutuhan arus proteksi dari pipa dengan luas goresan 100 mm² dalam media tanah pH 3, pH 7, dan pH 11. Selama 7 hari penimbunan dengan instalasi ICCP didapatkan nilai arus proteksi yang harus diberikan untuk mencapai potensial proteksi pada pipa sebesar -850 mV vs. elektroda Cu/CuSO₄. Arus yang dibutuhkan berada pada level 0.133-0.225 mA pada elektrolit tanah dengan pH 3, 0.084-0.099 mA pada elektrolit tanah dengan pH 7, dan 0.065-0.070 mA pada elektrolit tanah dengan pH 11.

Pipa dengan luas goresan 100 mm² dan cacat goresnya berbentuk lingkaran untuk pH 3 cukup fluktuatif mengenai kebutuhan akan arus proteksinya jika dibandingkan dengan kondisi dua pH yang lain. Namun secara keseluruhan, ketiganya cenderung mengalami penurunan arus proteksi seiring dengan semakin naiknya pH tanah. Untuk pipa dengan goresan lingkaran seluas 100 mm² kebutuhan arus proteksi dari pH tanah 3 ke pH 7 mengalami penurunan sebesar 96.159%. Sedangkan penurunan arus dari pH tanah 3 ke pH tanah 11 lebih besar yaitu 157.642%.



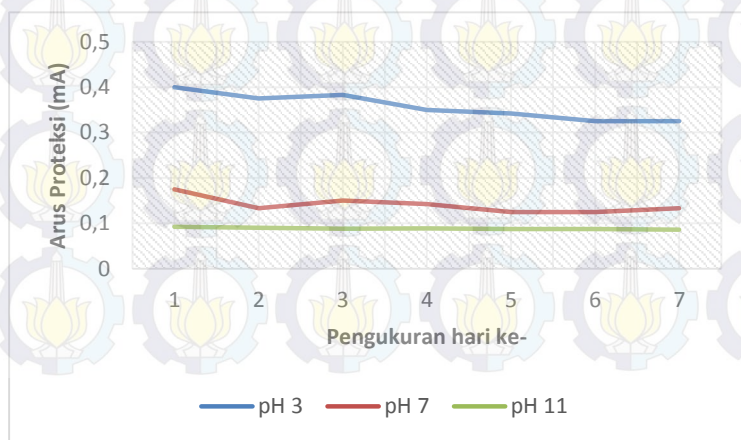
Gambar 4.15 Grafik Perbandingan Arus Proteksi Pipa dengan Goresan Persegi Panjang Seluas 100 mm² dalam Media Tanah pH 3, pH 7, dan pH 11



Pengukuran dilakukan dengan membandingkan kebutuhan arus proteksi dari pipa dengan luas goresan 100 mm² dalam media tanah pH 3, pH 7, dan pH 11. Selama 7 hari penimbunan dengan instalasi ICCP didapatkan nilai arus proteksi yang harus diberikan untuk mencapai potensial proteksi pada pipa sebesar -850 mV vs. elektroda Cu/CuSO₄. Arus yang dibutuhkan berada pada level 0.175-0.250 mA pada elektrolit tanah dengan pH 3, 0.086-0.100 mA pada elektrolit tanah dengan pH 7, dan 0.066-0.072 mA pada elektrolit tanah dengan pH 11.

Pipa dengan luas goresan 100 mm² dan cacat goresnya berbentuk persegi panjang untuk pH 3 cukup ekstrem penurunan kebutuhan akan arus proteksinya jika dibandingkan dengan kondisi dua pH yang lain. Namun secara keseluruhan, ketiganya cenderung mengalami penurunan arus proteksi seiring dengan semakin naiknya pH tanah. Untuk pipa dengan goresan persegi panjang seluas 100 mm² kebutuhan arus proteksi dari pH tanah 3 ke pH 7 mengalami penurunan sebesar 134.122%. Sedangkan penurunan arus dari pH tanah 3 ke pH tanah 11 lebih besar yaitu 205.376%.

4.1.5.5 Pengukuran Arus Proteksi Pipa dengan Luas Goresan 150 mm²

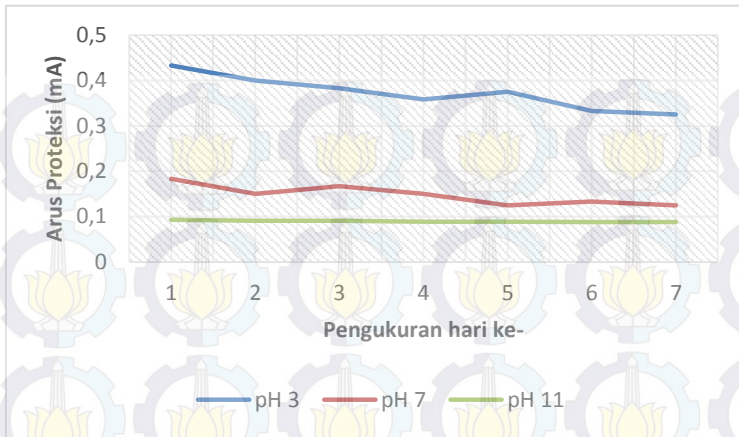




Gambar 4.16 Grafik Perbandingan Arus Proteksi Pipa dengan Goresan Lingkaran Seluas 150 mm^2 dalam Media Tanah pH 3, pH 7, dan pH 11

Pengukuran dilakukan dengan membandingkan kebutuhan arus proteksi dari pipa dengan luas goresan 150 mm^2 dalam media tanah pH 3, pH 7, dan pH 11. Selama 7 hari penimbunan dengan instalasi ICCP didapatkan nilai arus proteksi yang harus diberikan untuk mencapai potensial proteksi pada pipa sebesar -850 mV vs. elektroda Cu/CuSO_4 . Arus yang dibutuhkan berada pada level $0.325\text{-}0.400 \text{ mA}$ pada elektrolit tanah dengan pH 3, $0.125\text{-}0.175 \text{ mA}$ pada elektrolit tanah dengan pH 7, dan $0.086\text{-}0.092 \text{ mA}$ pada elektrolit tanah dengan pH 11.

Pipa dengan luas goresan 150 mm^2 dan cacat goresnya berbentuk lingkaran untuk pH 3 cukup signifikan penurunan mengenai kebutuhan akan arus proteksinya jika dibandingkan dengan kondisi dua pH yang lain. Kemudian untuk pH 7 lebih fluktuatif jika dibanding dua yang lain. Namun secara keseluruhan, ketiganya cenderung mengalami penurunan arus proteksi seiring dengan semakin naiknya pH tanah. Untuk pipa dengan goresan lingkaran seluas 150 mm^2 kebutuhan arus proteksi dari pH tanah 3 ke pH 7 mengalami penurunan sebesar 155.1%. Sedangkan penurunan arus dari pH tanah 3 ke pH tanah 11 lebih besar yaitu 305.841%.



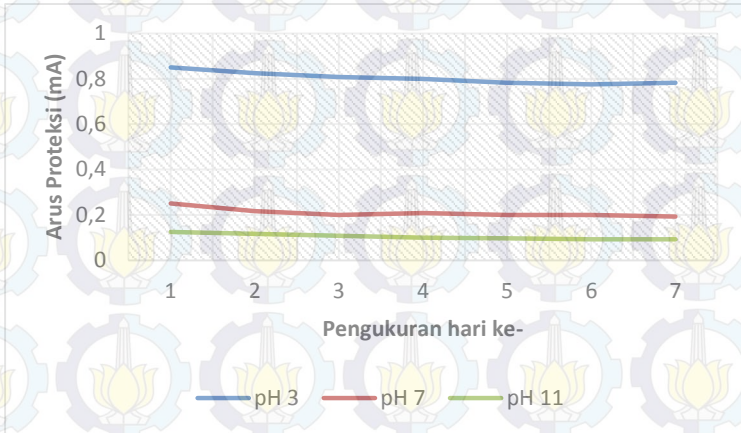
Gambar 4.17 Grafik Perbandingan Arus Proteksi Pipa dengan Goresan Persegi Panjang Seluas 150 mm^2 dalam Media Tanah pH 3, pH 7, dan pH 11

Pengukuran dilakukan dengan membandingkan kebutuhan arus proteksi dari pipa dengan luas goresan 150 mm^2 dalam media tanah pH 3, pH 7, dan pH 11. Selama 7 hari penimbunan dengan instalasi ICCP didapatkan nilai arus proteksi yang harus diberikan untuk mencapai potensial proteksi pada pipa sebesar -850 mV vs. elektroda Cu/CuSO_4 . Arus yang dibutuhkan berada pada level $0.325\text{-}0.433 \text{ mA}$ pada elektrolit tanah dengan pH 3, $0.125\text{-}0.183 \text{ mA}$ pada elektrolit tanah dengan pH 7, dan $0.088\text{-}0.093 \text{ mA}$ pada elektrolit tanah dengan pH 11.

Pipa dengan luas goresan 150 mm^2 dan cacat goresnya berbentuk persegi panjang untuk pH 3 dan pH 7 cukup fluktuatif mengenai kebutuhan akan arus proteksinya jika dibandingkan dengan kondisi pH 11 yang cenderung lebih stabil. Namun secara keseluruhan, ketiganya cenderung mengalami penurunan arus proteksi seiring dengan semakin naiknya pH tanah. Untuk pipa dengan goresan persegi panjang seluas 150 mm^2 kebutuhan arus proteksi dari pH tanah 3 ke pH 7 mengalami penurunan sebesar 151.77%. Sedangkan

penurunan arus dari pH tanah 3 ke pH tanah 11 lebih besar yaitu 314.022%.

4.1.5.6 Pengukuran Arus Proteksi Pipa dengan Luas Goresan 250 mm²

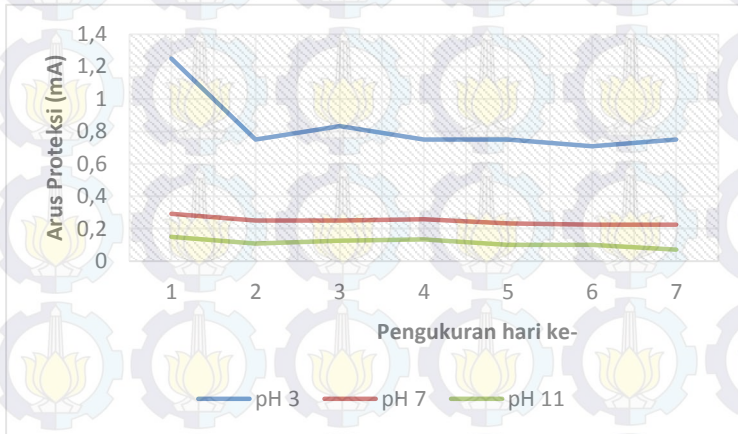


Gambar 4.18 Grafik Perbandingan Arus Proteksi Pipa dengan Goresan Lingkaran Seluas 250 mm² dalam Media Tanah pH 3, pH 7, dan pH 11

Pengukuran dilakukan dengan membandingkan kebutuhan arus proteksi dari pipa dengan luas goresan 250 mm² dalam media tanah pH 3, pH 7, dan pH 11. Selama 7 hari penimbunan dengan instalasi ICCP didapatkan nilai arus proteksi yang harus diberikan untuk mencapai potensial proteksi pada pipa sebesar -850 mV vs. elektroda Cu/CuSO₄. Arus yang dibutuhkan berada pada level 0.775-0.850 mA pada elektrolit tanah dengan pH 3, 0.192-0.250 mA pada elektrolit tanah dengan pH 7, dan 0.092-0.125 mA pada elektrolit tanah dengan pH 11.

Pipa dengan luas goresan 250 mm² dan cacat goresnya berbentuk lingkaran menunjukkan grafik yang cenderung stabil. Secara keseluruhan, ketiganya cenderung mengalami

penurunan arus proteksi seiring dengan semakin naiknya pH tanah. Untuk pipa dengan goresan lingkaran seluas 250 mm^2 kebutuhan arus proteksi dari pH tanah 3 ke pH 7 mengalami penurunan sebesar 282.652%. Sedangkan penurunan arus dari pH tanah 3 ke pH tanah 11 lebih besar yaitu 665.304%.



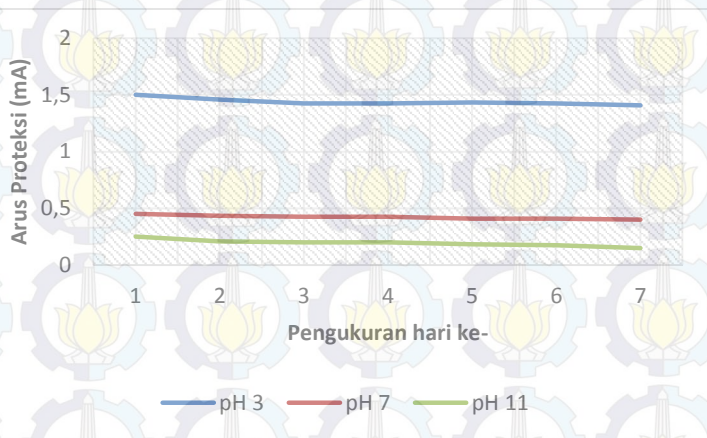
Gambar 4.19 Grafik Perbandingan Arus Proteksi Pipa dengan Goresan Persegi Panjang Seluas 250 mm^2 dalam Media Tanah pH 3, pH 7, dan pH 11

Pengukuran dilakukan dengan membandingkan kebutuhan arus proteksi dari pipa dengan luas goresan 250 mm^2 dalam media tanah pH 3, pH 7, dan pH 11. Selama 7 hari penimbunan dengan instalasi ICCP didapatkan nilai arus proteksi yang harus diberikan untuk mencapai potensial proteksi pada pipa sebesar -850 mV vs. elektroda Cu/CuSO_4 . Arus yang dibutuhkan berada pada level $0.708\text{-}1.250 \text{ mA}$ pada elektrolit tanah dengan pH 3, $0.225\text{-}0.292 \text{ mA}$ pada elektrolit tanah dengan pH 7, dan $0.097\text{-}0.150 \text{ mA}$ pada elektrolit tanah dengan pH 11.

Pipa dengan luas goresan 250 mm^2 dan cacat goresnya berbentuk persegi panjang untuk pH 3 menunjukkan grafik yang turun tajam pada awal pengujian, namun berangsur

menjadi stabil, berbeda dengan dua kondisi lainnya yang sudah stabil. Secara keseluruhan, ketiganya cenderung mengalami penurunan arus proteksi seiring dengan semakin naiknya pH tanah. Untuk pipa dengan goresan persegi panjang seluas 250 mm² kebutuhan arus proteksi dari pH tanah 3 ke pH 7 mengalami penurunan sebesar 233.621%. Sedangkan penurunan arus dari pH tanah 3 ke pH tanah 11 lebih besar yaitu 613.258%.

4.1.5.7 Pengukuran Arus Proteksi Pipa dengan Luas Goresan 500 mm²

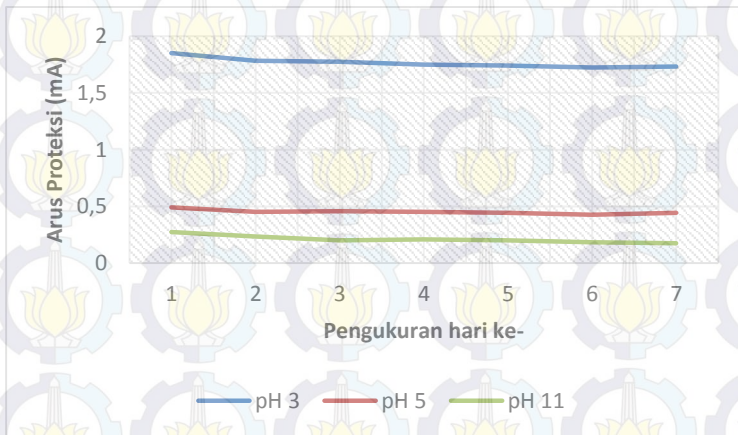


Gambar 4.20 Grafik Perbandingan Arus Proteksi Pipa dengan Goresan Lingkaran Seluas 500 mm² dalam Media Tanah pH 3, pH 7, dan pH 11

Pengukuran dilakukan dengan membandingkan kebutuhan arus proteksi dari pipa dengan luas goresan 500 mm² dalam media tanah pH 3, pH 7, dan pH 11. Selama 7 hari penimbunan dengan instalasi ICCP didapatkan nilai arus proteksi yang harus diberikan untuk mencapai potensial proteksi pada pipa sebesar -850 mV vs. elektroda Cu/CuSO₄. Arus yang dibutuhkan berada pada level 1.408-1.500 mA pada

elektrolit tanah dengan pH 3, 0.400-0.450 mA pada elektrolit tanah dengan pH 7, dan 0.150-0.250 mA pada elektrolit tanah dengan pH 11.

Pipa dengan luas goresan 500 mm² dan cacat goresnya berbentuk lingkaran menunjukkan grafik yang cenderung stabil. Secara keseluruhan, ketiganya cenderung mengalami penurunan arus proteksi seiring dengan semakin naiknya pH tanah. Untuk pipa dengan goresan lingkaran seluas 500 mm² kebutuhan arus proteksi dari pH tanah 3 ke pH 7 mengalami penurunan sebesar 241.874%. Sedangkan penurunan arus dari pH tanah 3 ke pH tanah 11 lebih besar yaitu 638.097%.



Gambar 4.21 Grafik Perbandingan Arus Proteksi Pipa dengan Goresan Persegi Panjang Seluas 500 mm² dalam Media Tanah pH 3, pH 7, dan pH 11

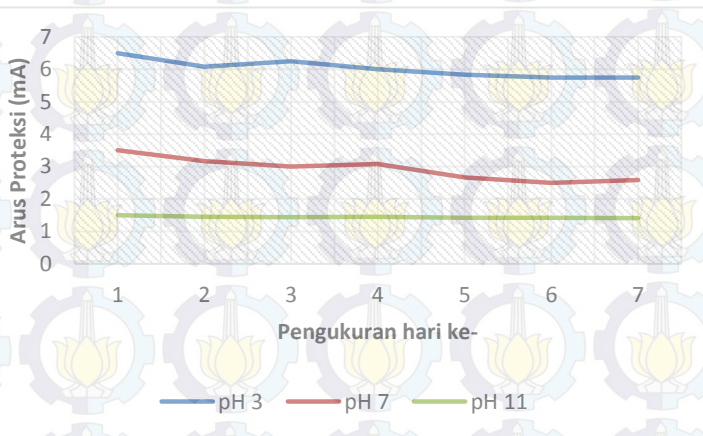
Pengukuran dilakukan dengan membandingkan kebutuhan arus proteksi dari pipa dengan luas goresan 500 mm² dalam media tanah pH 3, pH 7, dan pH 11. Selama 7 hari penimbunan dengan instalasi ICCP didapatkan nilai arus proteksi yang harus diberikan untuk mencapai potensial proteksi pada pipa sebesar -850 mV vs. elektroda Cu/CuSO₄. Arus yang dibutuhkan berada pada level 1.725-1.850 mA pada



elektrolit tanah dengan pH 3, 0.425-0.492 mA pada elektrolit tanah dengan pH 7, dan 0.175-0.275 mA pada elektrolit tanah dengan pH 11.

Pipa dengan luas goresan 500 mm² dan cacat goresnya berbentuk persegi panjang menunjukkan grafik yang cenderung stabil. Secara keseluruhan, ketiganya cenderung mengalami penurunan arus proteksi seiring dengan semakin naiknya pH tanah. Untuk pipa dengan goresan persegi panjang seluas 500 mm² kebutuhan arus proteksi dari pH tanah 3 ke pH 7 mengalami penurunan sebesar 293.202%. Sedangkan penurunan arus dari pH tanah 3 ke pH tanah 11 lebih besar yaitu 736.720%.

4.1.5.8 Pengukuran Arus Proteksi Pipa Tanpa *Coating*



Gambar 4.22 Grafik Perbandingan Arus Proteksi Pipa Tanpa *Coating* dalam Media Tanah pH 3, pH 7, dan pH 11

Pengukuran dilakukan dengan membandingkan kebutuhan arus proteksi dari pipa tanpa *coating* dalam media tanah pH 3, pH 7, dan pH 11. Selama 7 hari penimbunan dengan instalasi ICCP didapatkan nilai arus proteksi yang



harus diberikan untuk mencapai potensial proteksi pada pipa sebesar -850 mV vs. elektroda Cu/CuSO_4 . Arus yang dibutuhkan berada pada level $5.750\text{--}6.500$ mA pada elektrolit tanah dengan pH 3, $2.500\text{--}3.500$ mA pada elektrolit tanah dengan pH 7, dan $1.408\text{--}1.500$ mA pada elektrolit tanah dengan pH 11.

Pipa tanpa *coating* arus proteksinya paling besar dibandingkan spesimen yang lain. Secara keseluruhan, ketiganya cenderung mengalami penurunan arus proteksi seiring dengan semakin naiknya pH tanah. Untuk pipa tanpa *coating* kebutuhan arus proteksi dari pH tanah 3 ke pH 7 mengalami penurunan sebesar 105.661% . Sedangkan penurunan arus dari pH tanah 3 ke pH tanah 11 lebih besar yaitu 317.450% .

Dari gambar 4.9 sampai 4.21, penurunan kebutuhan arus proteksi dari kondisi pH 3 ke pH 7 umumnya lebih kecil jika dibandingkan dengan penurunan kebutuhan arus proteksi dari kondisi pH 3 ke pH 11. Dari semua spesimen dengan luas goresan yang sama mengalami penurunan kebutuhan arus proteksi dari pH 3 ke pH 11. Penurunan arus terbesar berada pada spesimen tanpa lapis lindung dari semua nilai derajat keasaman. Atau juga bisa dikatakan kenaikan kebutuhan arus tertinggi adalah dari spesimen yang berada pada pH 11 ke pH 3 pada spesimen tanpa *coating*.

4.1.6 Rata-Rata Kebutuhan Arus Proteksi

Dari hasil pengukuran arus proteksi masing-masing pipa didapatkan nilai rata-rata arus proteksi yang dibutuhkan masing-masing pipa dengan kondisi goresan dan pH tanah yang berbeda. Nilai rata-rata arus proteksi masing-masing pipa dapat dilihat pada tabel 4.4 dan table 4.5 berikut ini.



Tabel 4.4 Perbandingan Hasil Pengukuran Rata-Rata Arus Proteksi pada Pipa dalam pH Tanah (a) 3, (b) 7, dan (c) 11 dengan Cacat Gores Berbentuk Lingkaran

(a) pH Tanah 3		
pH	Luas Goresan (mm ²)	Rata-Rata Arus Proteksi (mA)
3	0	0.025
	10	0.039
	50	0.085
	100	0.173
	150	0.357
	250	0.804
	500	1.439
	18934,2	6.024
(b) pH Tanah 7		
pH	Luas Goresan (mm ²)	Rata-Rata Arus Proteksi (mA)
7	0	0.018
	10	0.036
	50	0.056
	100	0.088
	150	0.140
	250	0.210
	500	0.421
	18934,2	2.929
(c) pH Tanah 11		
pH	Luas Goresan (mm ²)	Rata-Rata Arus Proteksi (mA)
11	0	0.008
	10	0.020
	50	0.035
	100	0.067
	150	0.088
	250	0.105
	500	0.195
	18934,2	1.443

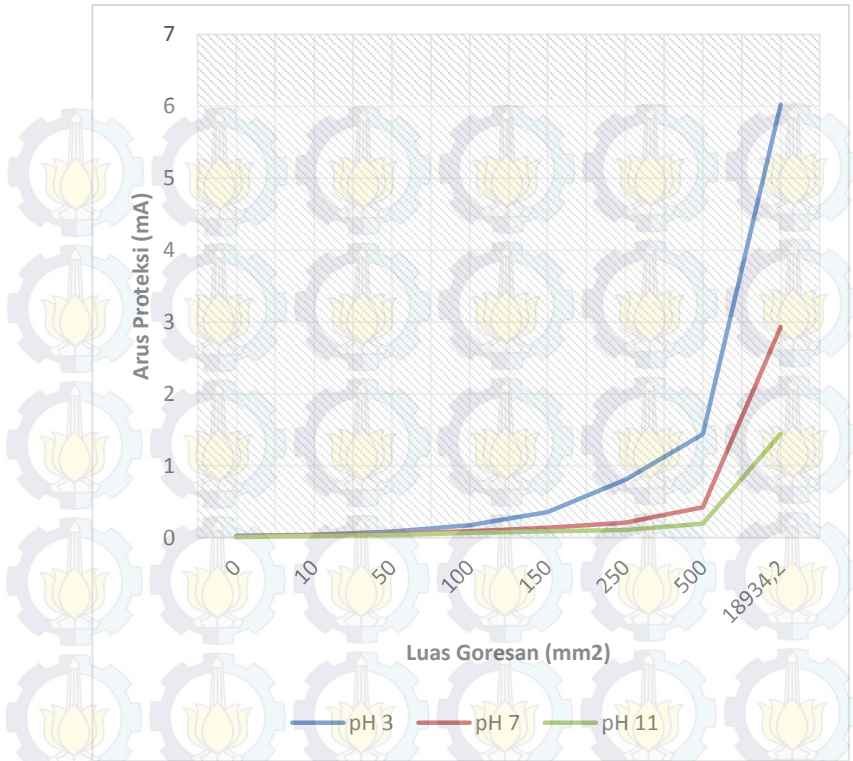


Tabel 4.5 Perbandingan Hasil Pengukuran Rata-Rata Arus Proteksi pada Pipa dalam pH Tanah (a) 3, (b) 7, dan (c) 11 dengan Cacat Gores Berbentuk Persegi Panjang

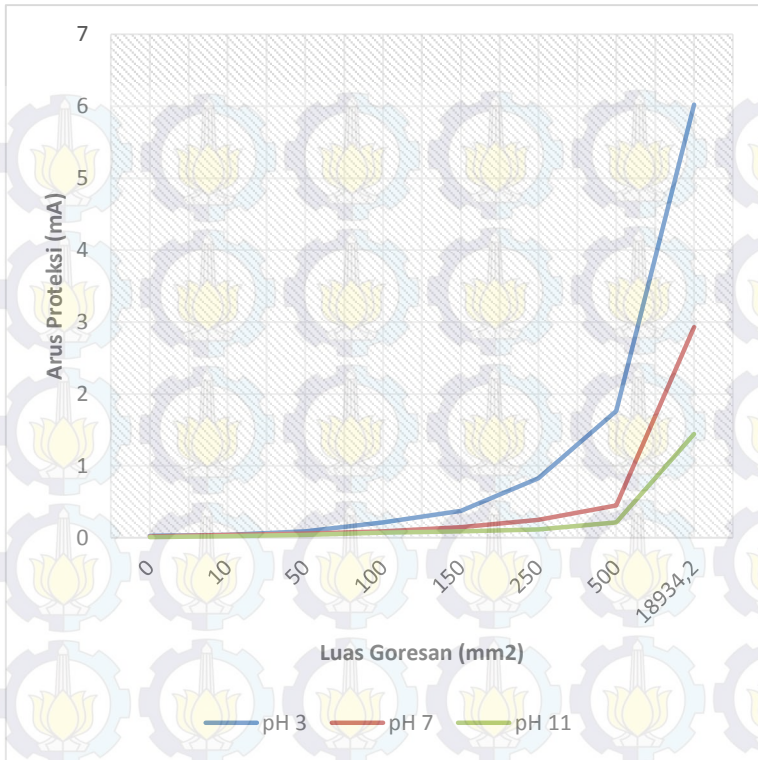
(a) pH Tanah 3		
pH	Luas Goresan (mm ²)	Rata-Rata Arus Proteksi (mA)
3	0	0.025
	10	0.041
	50	0.086
	100	0.211
	150	0.373
	250	0.827
	500	1.765
	18934,2	6.024

(b) pH Tanah 7		
pH	Luas Goresan (mm ²)	Rata-Rata Arus Proteksi (mA)
7	0	0.018
	10	0.037
	50	0.058
	100	0.090
	150	0.148
	250	0.248
	500	0.449
	18934,2	2.929

(c) pH Tanah 11		
pH	Luas Goresan (mm ²)	Rata-Rata Arus Proteksi (mA)
11	0	0.008
	10	0.020
	50	0.037
	100	0.069
	150	0.090
	250	0.116
	500	0.211
	18934,2	1.443



Gambar 4.23 Grafik Pengaruh Luas Goresan Lingkaran terhadap Rata-rata Arus Proteksi



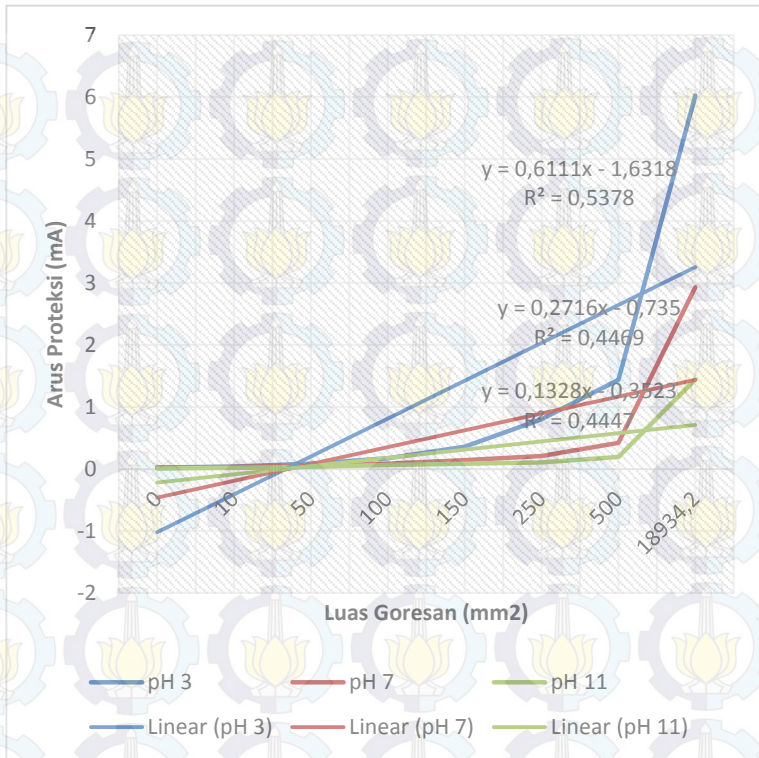
Gambar 4.24 Grafik Pengaruh Luas Goresan Persegi Panjang terhadap Rata-rata Arus Proteksi

4.1.7 Analisis Hasil Pengukuran Arus Proteksi Menggunakan Metode Statistika

Setelah dilakukan percobaan mengenai pengaruh luas goresan *coating* dan pH tanah terhadap arus proteksi, maka selanjutnya perlu dilakukan analisis dengan metode statistika agar data yang disajikan lebih sistematis dan kuantitatif, serta memungkinkan untuk melakukan peramalan mengenai suatu data. Tabel data untuk analisis statistika pada lampiran D menunjukkan data yang selanjutnya digunakan untuk melakukan analisis statistika. X_1 adalah pH tanah, X_2 adalah luas goresan, dan Y adalah arus proteksi.



4.1.7.1 Persamaan Regresi Linier Sederhana

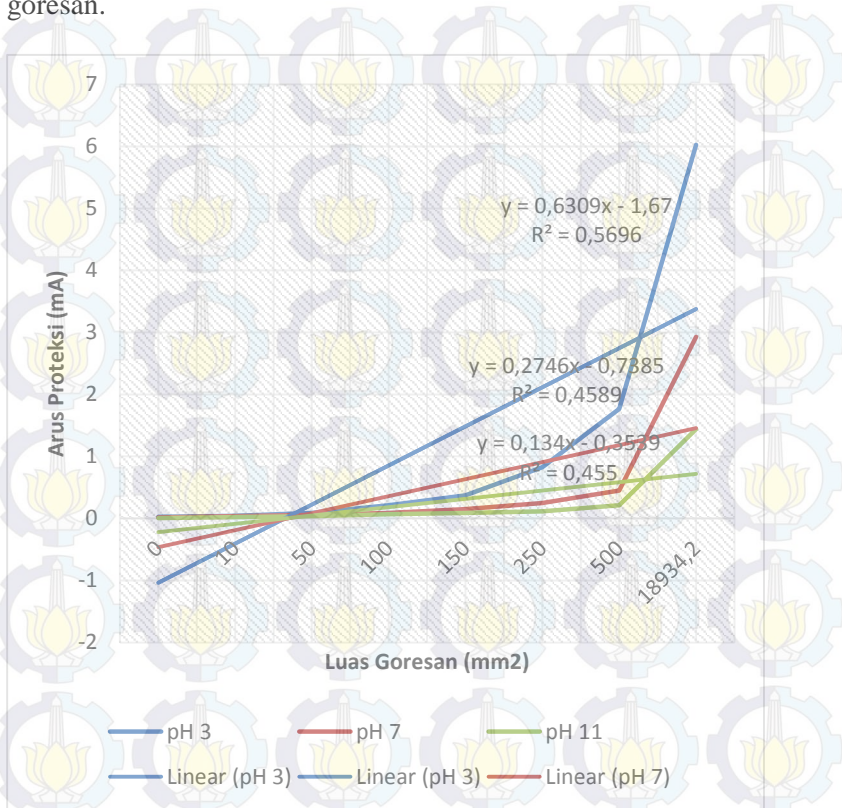


Gambar 4.25 Grafik Pengaruh Luas Goresan Berbentuk Lingkaran terhadap Arus Proteksi dalam Bentuk Persamaan Regresi Linier

Gambar 4.25 menunjukkan persamaan linier dari pengaruh luas goresan lingkaran terhadap arus proteksi dari masing-masing kondisi media tanah dengan pH 3, 7, dan 11. Untuk pH 3 nilai R² sebesar sebesar 53.78%, pada elektrolit media tanah dengan pH 7 nilai R² sebesar sebesar 44.69%. Sedangkan elektrolit media tanah dengan pH 11 nilai R² sebesar sebesar 44.47%. Sehingga dapat dinyatakan bahwa luas goresan memberikan pengaruh yang cukup kuat terhadap



arus proteksi. Dari gambar 4.25 juga menunjukkan arus proteksi yang semakin meningkat seiring meningkatnya luas goresan.

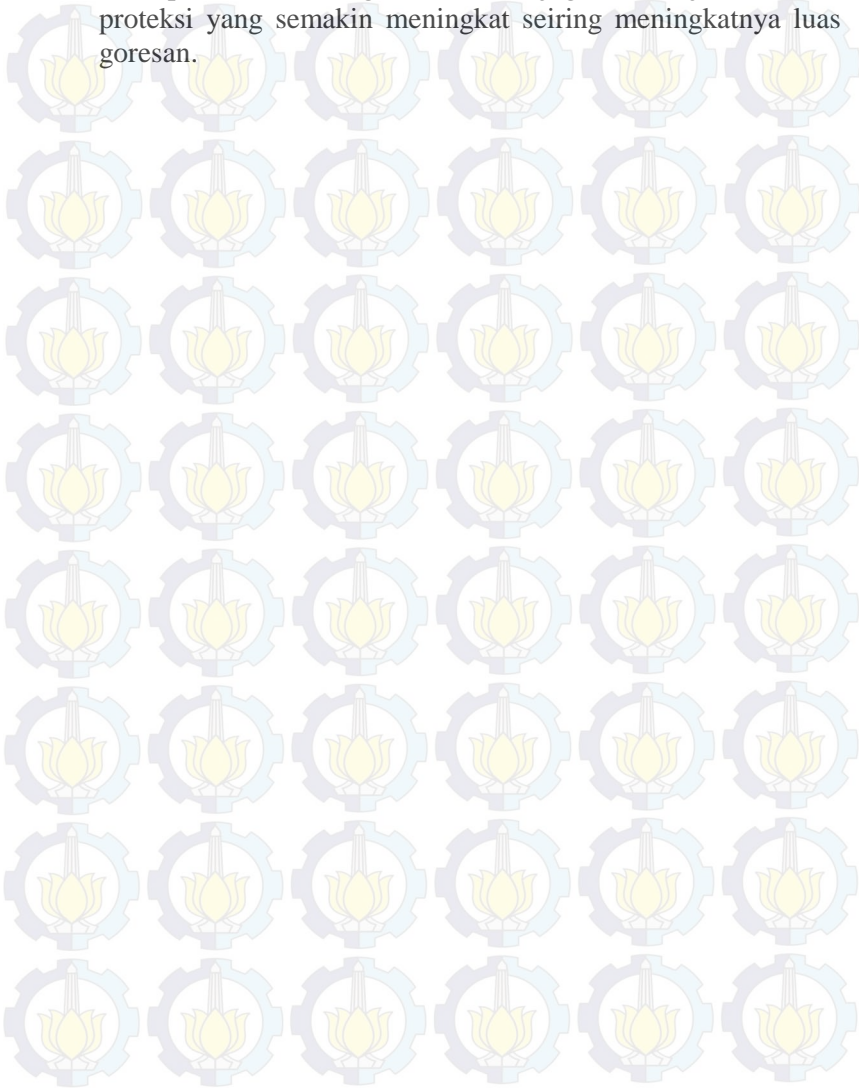


Gambar 4.26 Grafik Pengaruh Luas Goresan Berbentuk Persegi Panjang terhadap Arus Proteksi dalam Bentuk Persamaan Regresi Linier

Gambar 4.26 menunjukkan persamaan linier dari pengaruh luas goresan lingkaran terhadap arus proteksi dari masing-masing kondisi media tanah dengan pH 3, 7, dan 11. Untuk pH 3 nilai R^2 sebesar sebesar 56.96%, pada elektrolit media tanah dengan pH 7 nilai R^2 sebesar sebesar 45.89%. Sedangkan elektrolit media tanah dengan pH 11 nilai R^2



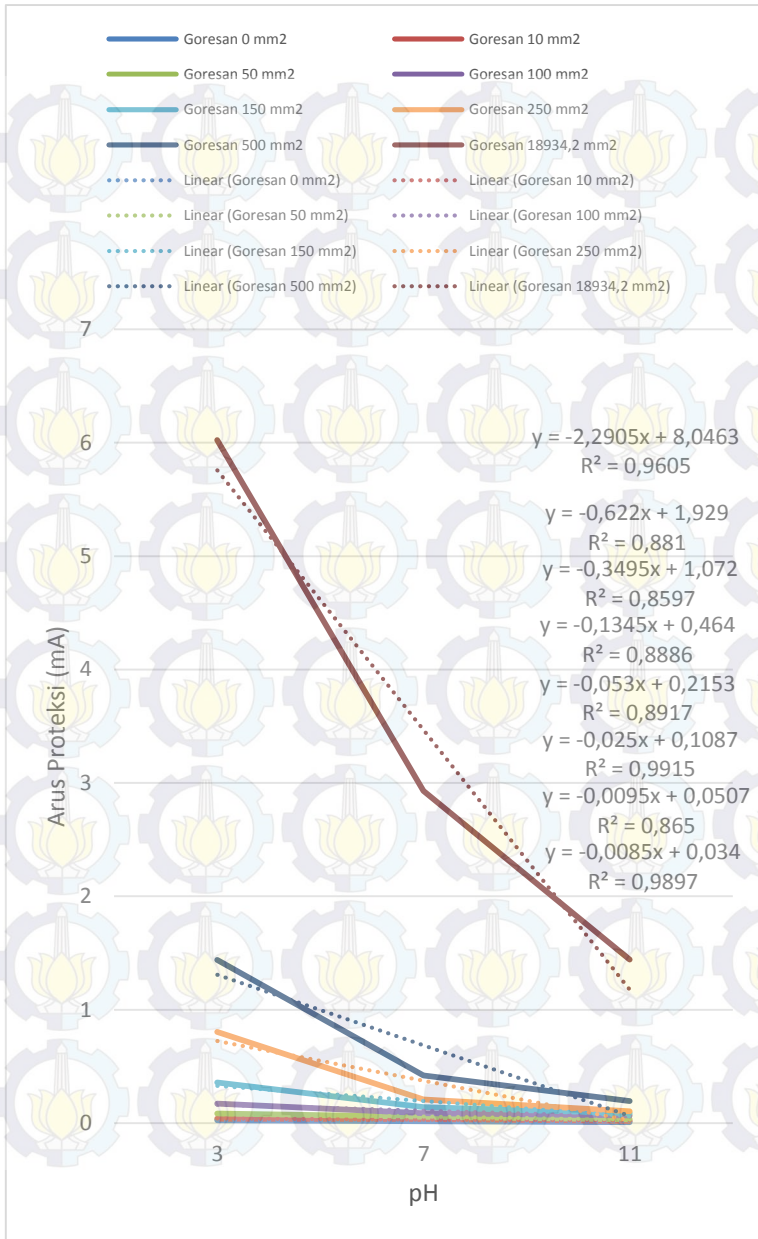
sebesar sebesar 45.50%. Sehingga dapat dinyatakan bahwa luas goresan memberikan pengaruh yang cukup kuat terhadap arus proteksi. Dari gambar 4.26 juga menunjukkan arus proteksi yang semakin meningkat seiring meningkatnya luas goresan.





Laporan Tugas Akhir

Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS



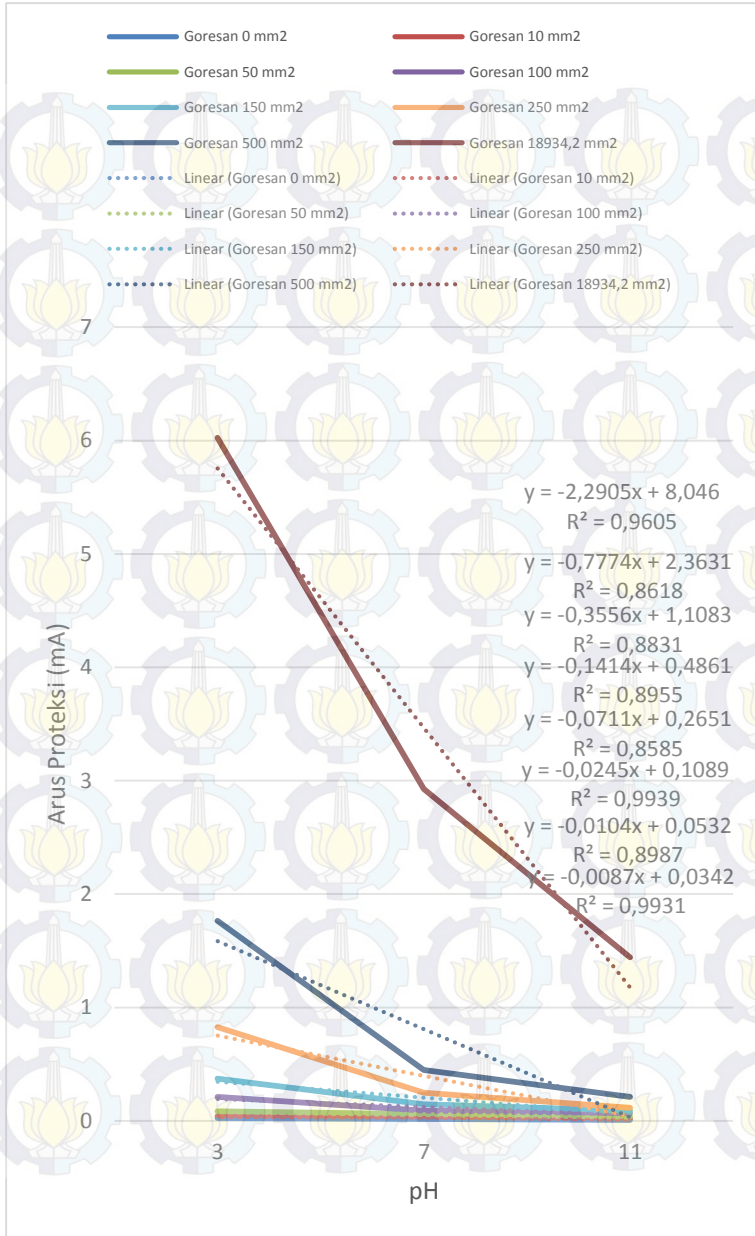


Gambar 4.27 Grafik Pengaruh pH Tanah terhadap Arus Proteksi dalam Bentuk Persamaan Regresi Linier pada Goresan Lingkaran

Gambar 4.27 menunjukkan persamaan linier dari pengaruh pH Tanah terhadap arus proteksi dari masing-masing luas goresan. Untuk pipa tanpa goresan, nilai R^2 sebesar sebesar 98.97%. Untuk luas goresan 10 mm² nilai R^2 sebesar sebesar 86.50%. Untuk luas goresan 50 mm² nilai R^2 sebesar 99.15%. Sedangkan pada luas goresan 100 mm² nilai R^2 sebesar 89.17%. Untuk luas goresan 150 mm² R^2 sebesar 88.86%. Selanjutnya untuk luas goresan 250 mm², 500 mm², dan spesimen tanpa *coating*, secara berturut-turut nilai R^2 sebesar 85.97%, 88.10%, dan 96.05%. Sehingga dapat dinyatakan bahwa luas goresan memberikan pengaruh yang sangat kuat terhadap arus proteksi. Semakin rendah pH, yaitu dari pH 11 hingga pH 3 maka semakin tinggi arus proteksi yang diberikan.



Laporan Tugas Akhir Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS





Gambar 4.28 Grafik Pengaruh pH Tanah terhadap Arus Proteksi dalam Bentuk Persamaan Regresi Linier pada Goresan Persegi Panjang

Gambar 4.28 menunjukkan persamaan linier dari pengaruh pH Tanah terhadap arus proteksi dari masing-masing luas goresan. Untuk pipa tanpa goresan, nilai R^2 sebesar 99.31%. Untuk luas goresan 10 mm² nilai R^2 sebesar 89.87%. Untuk luas goresan 50 mm² nilai R^2 sebesar 99.39%. Sedangkan pada luas goresan 100 mm² nilai R^2 sebesar 85.85%. Untuk luas goresan 150 mm² R^2 sebesar 89.55%. Selanjutnya untuk luas goresan 250 mm², 500 mm², dan spesimen tanpa *coating*, secara berturut-turut nilai R^2 sebesar 88.31%, 86.18%, dan 96.05%. Sehingga dapat dinyatakan bahwa luas goresan memberikan pengaruh yang sangat kuat terhadap arus proteksi. Semakin rendah pH, yaitu dari pH 11 hingga pH 3 maka semakin tinggi arus proteksi yang diberikan.

4.1.7.2 Regresi Linier Berganda

Dari hasil perhitungan didapatkan nilai b_1 , b_2 , dan a sebesar 0.027650761, 0.000231738, dan 1.773888523 secara berturut-turut. Sehingga dapat dituliskan persamaan regresi linier berganda 4.1

$$Y = 1.773888523 + 0.027650761x_1 + 0.000231738x_2 \quad (4.1)$$

Persamaan 4.1 berlaku pada rentang kondisi pH tanah 3 sampai 7 saja dengan nilai x_2 dalam satuan mm². Besar nilai konstanta adalah 1.773888523 pada persamaan regresi diatas menunjukkan bahwa nilai arus proteksi (Y) akan tetap sebesar 1.773888523 tanpa adanya pengaruh dari pH tanah dan luas goresan sebagai variabel bebas (x_1 dan x_2). Bila variabel x_1 meningkat sebesar 1 satuan, maka nilai Y akan bertambah sebesar 0.027650761. Dan bila variabel x_2 meningkat 1 satuan, maka nilai Y akan bertambah juga sebesar 0.000231738.



4.1.7.3 Analisa Varians (Anova)

Dari perhitungan analisa varians (anova) diperoleh hasil sebagai berikut:

1. Untuk Cacat Gores Lingkaran

$$F_{hitung\ pH} = 2.56149 \quad F_{critical\ pH} = 3.738892$$

$$F_{hitung\ gores} = 6.501771 \quad F_{critical\ gores} = 2.764199$$

Untuk pH nilai F hitung lebih kecil daripada F critical, hal ini menandakan bahwa pH tidaklah cukup berpengaruh signifikan terhadap arus proteksi. Sebaliknya, untuk luas cacat gores F hitungnya lebih besar daripada F critical cacat gores, maka untuk cacat gores memiliki pengaruh yang cukup signifikan terhadap kebutuhan arus proteksi karena memang selisih yang cukup jauh antara F hitung dengan F criticalnya.

2. Untuk Cacat Gores Persegi Panjang

$$F_{hitung\ pH} = 2.895331 \quad F_{critical\ pH} = 3.885294$$

$$F_{hitung\ gores} = 6.444574 \quad F_{critical\ gores} = 2.99612$$

Untuk pH nilai F hitung lebih kecil daripada F critical, hal ini mengindikasikan bahwa pH tidaklah memiliki pengaruh yang cukup signifikan terhadap arus proteksi. Sebaliknya, untuk luas cacat gores F hitungnya lebih besar daripada F critical cacat gores, maka untuk cacat gores memiliki pengaruh yang cukup signifikan terhadap kebutuhan arus proteksi karena memang selisih yang cukup jauh antara F hitung dengan F criticalnya. Perlu diingat bahwa jika F hitung lebih besar daripada F critical maka variabel tersebut memiliki pengaruh terhadap variabel lain tertentu dan sebaliknya.

4.1.8 Hasil Foto Makro Pipa



Gambar 4.29 Kondisi Spesimen dalam pH 3 setelah Running selama 7 hari



Gambar 4.30 Kondisi Spesimen dalam pH 7 setelah Running selama 7 hari



Gambar 4.31 Kondisi Spesimen dalam pH 11 setelah Running selama 7 hari



4.2 Pembahasan

Sistem proteksi *Impressed Current Cathodic Protection (ICCP)* adalah sebuah sistem untuk menghambat laju korosi yang sudah banyak sekali diterapkan. Pada dasarnya sistem proteksi katodik dengan metode ICCP ini dilakukan dengan cara menurunkan nilai potensial struktur yang akan dilindungi (katoda) hingga berada pada level terproteksi dari nilai standard potensial proteksi elektroda referen tertentu. Pemberian *coating* dan ICCP adalah kombinasi yang tepat untuk melindungi struktur dengan baik dari serangan korosi, terutama pada lingkungan yang korosif.

4.2.1 Pengukuran Arus Proteksi Pipa

Pada penelitian kali ini dilakukan percobaan mengenai sistem ICCP yang digunakan untuk melindungi struktur pipa dari jenis baja karbon rendah yaitu API 5L Grade B yang mana jenis pipa ini banyak digunakan di *oil and gas industry* baik *onshore* ataupun *offshore*. Pipa API 5L grade B ini dilapisi dengan *coating* yang terdiri dari dua jenis cat, pertama adalah dengan cat primer *zinc chromate* dan lapisan kedua dengan *epoxy filler* untuk mencegah kontak antara permukaan pipa dengan lingkungan (tanah). Pemberian *coating* dan goresan dilakukan dengan teliti agar didapatkan hasil yang akurat mengenai prosentase goresan dan goresan hanya yang sengaja dibuat pada permukaan pipa, bukan goresan akibat faktor yang lain. Pipa dibenamkan pada *container box* berisi tanah dengan pH (derajat keasaman) yang berbeda yaitu pH 3, pH 7, dan pH 11.

Pipa diberi goresan dengan luas yang bervariasi, yaitu 10 mm², 50 mm², 100 mm², 150 mm², 250 mm², 500 mm², serta satu pipa tanpa goresan (*full coating*) dan satu pipa tanpa *coating* sebagai pembanding. Hal ini sesuai dalam aplikasinya, bahwa arus proteksi dari kondisi goresan yang berbeda akan digunakan dalam satuan luas permukaan.

Pengukuran arus proteksi pipa dengan instalasi ICCP dilakukan selama 7 hari dan sebelumnya telah dilakukan imersi atau pembersihan pipa untuk pengkondisian awal



selama 8 hari tanpa instalasi ICCP (*Open Circuit*). Hal ini dilakukan untuk mencegah pembentukan lapisan pasif yang akan menurunkan efisiensi peroteksi dengan arus ICCP. Dengan memberi perlakuan yang sama seperti ini untuk semua spesimen, maka dapat dibandingkan kondisi awal dengan kondisi akhir dan untuk memastikan bahwa spesimen mengalami perlakuan yang sama di awal penelitian.

4.2.1.1 Pengukuran Arus Proteksi dalam pH Tanah yang Sama

Dari hasil pengukuran arus proteksi yang didapatkan, dapat dilihat bahwa dalam lingkungan elektrolit yang sama (pH sama), semakin besar luas goresan pada pipa maka semakin besar pula arus proteksi yang harus diberikan pada pipa. Atau dengan kata lain semakin besar luasan pipa yang kontak dengan lingkungan, maka semakin besar arus yang dibutuhkan untuk melindungi pipa agar tetap berada pada level terproteksi. Semakin besar luas permukaan pipa yang terbuka dengan lingkungan, maka daerah anodik menjadi lebih besar sehingga reaksi oksidasi akan lebih banyak terjadi. Pasokan elektron dibutuhkan lebih banyak didaerah anodik ini untuk menekan reaksi anodik yang melibatkan ion logam, menghindari korosi yang lebih parah. Oleh sebab itu, arus proteksi yang diberikan juga harus lebih besar karena arus proteksi berbanding lurus dengan arus elektron.

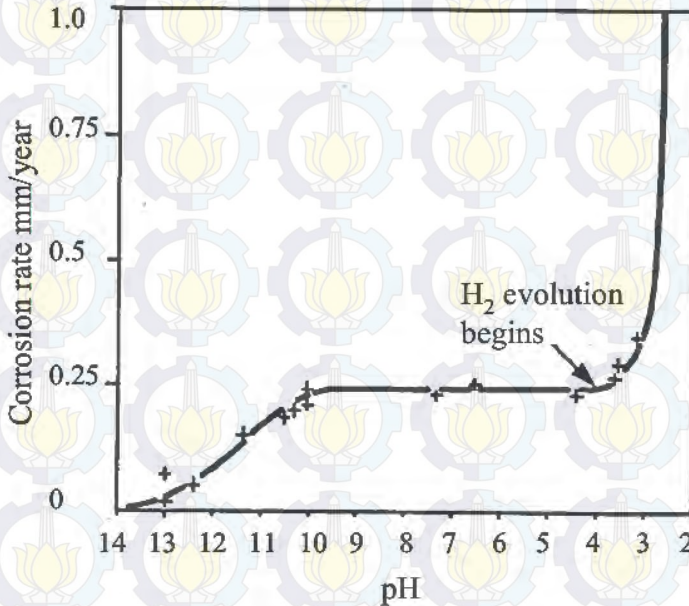
4.2.1.2 Pengukuran Arus Proteksi dalam Luas Goresan yang Sama

Pengukuran arus proteksi juga dibandingkan berdasarkan lingkungan elektrolit dengan pH tanah yang berbeda. Dalam pipa dengan luas goresan yang sama, kebutuhan arus proteksi semakin meningkat seiring dengan semakin kecilnya nilai pH media, yaitu dari pH 11, pH 7, hingga pH 3.

Dalam penelitian ini material yang digunakan adalah pipa API 5L *grade* B yang mana tergolong kedalam baja karbon rendah. Berdasarkan hasil penelitian didapatkan bahwa kondisi derajat keasaman atau yang biasa disebut pH tanah cukup

berpengaruh terhadap kebutuhan arus proteksi, walaupun pengaruhnya tidak begitu signifikan seperti ditunjukkan dalam perhitungan Anova (*Analysis of Variance*). Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin asam atau semakin rendah nilai pH maka kebutuhan arus proteksi cenderung lebih besar. Hal tersebut terbukti pada trend hasil penelitian yang ada.

Dengan hasil yang diperoleh tersebut maka sesuai dengan literatur yang ada, bahwasanya semakin rendah pH maka semakin asam dan butuh arus proteksi yang lebih besar. Kita bisa lihat pada diagram hubungan antara pH dengan laju korosi seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.29 berikut ini:



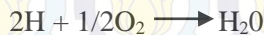
Gambar 4.32 Kurva Hubungan pH dengan Laju Korosi
(Bardal, 2003: 199)

Terlihat pada kurva bahwa semakin asam kondisi suatu lingkungan maka laju korosi semakin tinggi, begitu juga sebaliknya semakin basa kondisi suatu lingkungan maka laju



korosi akan semakin rendah. Hal ini berkaitan dengan erat dengan pengaruh adanya lapisan pasif yang memiliki sifat protektif. Hampir semua logam memiliki kemampuan membentuk lapisan pasif yang bersifat protektif pada permukaan logam. Lapisan pasif ini biasanya terbentuk dari oksida logam atau senyawa lain yang akan memisahkan logam dari media (larutan).

Antara pH 4 sampai 10 terdapat endapan lapisan *ferro oxide* yang porous dan menutupi permukaan sehingga bisa menghalang untuk bisa bereaksi langsung dengan lingkungan. Pada kondisi pH dibawah 4 maka laju korosi cenderung sangat tinggi. Hal ini dikarenakan oksida besi (FeO) ini larut, maka dari itu tidak ada lagi yang bisa membentuk film pelindung dari lingkungan, sehingga material akan bereaksi dengan lingkungan. Korosi semakin meningkat karena konsentrasi H⁺ yang cukup tinggi. Atom-atom H bergabung dengan oksigen dengan reaksi:



Jika konsentrasi H⁺ cukup tinggi (pH rendah) maka terjadi reaksi:



Ion Fe²⁺ juga bereaksi dengan oksigen dan membentuk karat (coklat kemerah-merahan) dengan menghasilkan ion H⁺ yang selanjutnya direduksi menjadi H₂. Sedangkan untuk suatu kondisi dimana pH dalam kondisi basa atau 10 keatas itu cenderung lebih tahan terhadap korosi. Hal ini dikarenakan pada kondisi ini terbentuklah lapisan pasif fero oksida (Fe₂O₃) yang protektif. Hal ini juga sejalan dengan teori dari persamaan Nerst. Jika dihitung melalui persamaan nerst maka pada kondisi asam memiliki nilai E atau potensial korosi yang lebih besar jika dibandingkan dengan kondisi netral bahkan basa.

4.2.2 Hasil Foto Makro

Dari hasil pengamatan makro pada daerah goresan untuk mengamati produk korosi yang terjadi, tipe korosi yang terjadi



Laporan Tugas Akhir Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS

tidak jauh berbeda. Berdasarkan variasi luas goresan *coating*, terlihat korosi yang semakin parah terjadi dari pipa dengan luas goresan 10 mm² hingga 18934.2 mm². Pada kondisi elektrolit dengan pH tanah yang sama, produk korosi terlihat semakin banyak dan cenderung terjadi penumpukan produk korosi dari kondisi pH tanah 11, pH 7 hingga yang paling parah adalah pada pH 3. Sebagai perbandingan pada pipa dengan goresan seluas 250 mm² keatas terlihat penumpukan produk korosi yang semakin banyak membentuk kerak, semakin berwarna coklat kemerahan. Hal yang sama juga dapat diamati pada pipa tanpa *coating* dimana produk korosi menutupi hampir seluruh permukaan pipa.. Korosi yang terjadi cenderung merupakan korosi merata (*uniform corrosion*).



BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian yang sudah dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Dalam pH tanah yang sama, arus proteksi yang dibutuhkan pada sistem ICCP meningkat seiring dengan semakin bertambah besarnya luas goresan pada pipa.
2. Dalam luas goresan yang sama, arus proteksi yang dibutuhkan pada sistem ICCP meningkat seiring dengan semakin rendahnya pH tanah (semakin asam kondisi lingkungan).

5.2 Saran

Dari penelitian yang sudah dilakukan, penulis memiliki saran, yaitu:

1. Menggunakan spesimen yang berbentuk pelat atau pipa pejal. Hal ini dimaksudkan untuk mengurangi kemungkinan masuknya air dari media tanah ke spesimen.





DAFTAR PUSTAKA

- Yahya, Aditya, F. 2012. **Pengaruh Lebar Goresan pada Lapis Lindung Polietilena dan pH Tanah terhadap Proteksi Katodik Anoda Tumbal pada Baja AISI 1045 di Lingkungan Tanah Rawa**. Surabaya: Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
- API Specification 5L. 2004. **STD API/PETRO Spec 5L-ENGL 2000-0732290 0618044970**. Forty Third Edition. USA: American Petroleum Institute.
- ASM Metal Handbook Vol.13 9th ed. 1987. **Corrosion**. Colorado: ASM International Handbook Committee.
- A,W, Peabody. 2001. **Control of Pipeline Corrosion**. Edited by Ronald L Bianchetti. Texas: NACE International the Corrosion Society.
- Bardal, Einar. 2003. **Corrosion and Protection**. Trondheim: Norway.
- Callister, William. D. Jr., 2006. **Fundamentals of Materials Science and Engineering**. Seventh Edition. USA: John Wiley & Sons Inc.
- Departemen Perindustrian dan Perdagangan. (____). **Pendidikan dan Pelatihan Inspektur Korosi**. Jakarta: Balai Besar Bahan dan Barang Teknik.
- Fessler, Raymond R, Ph.D. 2008. **Pipeline Corrosion**. USA: Michael Baker Jr., Inc.
- Fontana, Mars G. 1978. **Corrosion Engineering 2nd Edition**. Singapore: McGraw-Hill International.
- G. Wranglen, B. Sjodin, and B. Wallen. **Electrochimica Acta, Vol. 7**.
- James B. Bushman, P. E. 2000. **Impressed Current Cathodic Protection System Design**. Medina Ohio USA: Bushman & Associates, Inc.
- Jones, D.A. 1992. **Principles and Prevention of Corrosion**. New York: University of Nevada-Maximillan Publishing Company.



Laporan Tugas Akhir
Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS

- Kenneth R., Trethewey, BSc., Ph.D, CChem., MRSC, MICorr.ST. 1991. **Corrosion for Students of Science and Engineering**. Alih bahasa Alex Tri Kantjono Widodo. Jakarta: PT. Gramedia Pustaka Utama.
- Parker, Marshall, E., Edward, G, Peattie,. 1999. **Pipeline Corrosion and Cathodic Protection**. Third Edition. USA: Elsevier Science.
- Popov, Branko, N., (___). **Cathodic Protection of Pipelines**. South Carolina: University of South Carolina.
- Roberge, Pierre, R., 2000. **Handbook of Corrosion Engineering**. USA: The Mc.Graw-Hill Companies Inc.
- Ross, Sheldon, M., 2004. **Introduction to Probability and Statistics for Engineers and Scientists**. California: University of California, Berkeley.
- Schweitzer . P.E., Philip A. 1994. **Corrosion-Resistant Piping Systems**. USA: Marcel Dekker Inc.
- Shreir, L.L. 1994. **Corrosion Vol.1 3rd edition. Metal/Environment Reactions**. Great Britain: Butterworth-Heinemann.



LAMPIRAN A

Hasil Pengukuran Arus Proteksi ICCP dalam Media Tanah pH 3 dengan Cacat Gores Lingkaran

Pengujian hari ke-	Arus Proteksi (mA) pada Luas Goresan (mm ²)								
	10	50	100	150	250	500	Tanpa Goresan	Tanpa Coating	
1	0.046	0.090	0.225	0.400	0.850	1.500	0.030	6.500	
2	0.038	0.086	0.175	0.375	0.825	1.458	0.026	6.083	
3	0.039	0.085	0.200	0.383	0.808	1.425	0.025	6.250	
4	0.038	0.084	0.175	0.350	0.800	1.425	0.024	6.000	
5	0.036	0.083	0.150	0.342	0.783	1.433	0.024	5.833	
6	0.037	0.084	0.150	0.325	0.775	1.425	0.022	5.750	
7	0.036	0.084	0.133	0.325	0.783	1.408	0.023	5.750	
Rata-rata	0.039	0.085	0.173	0.357	0.804	1.439	0.025	6.024	



Hasil Pengukuran Arus Proteksi ICCP dalam Media Tanah pH 3 dengan Cacat Gores Persegi Panjang

Pengujian hari ke-	Arus Proteksi (mA) pada Luas Goresan (mm ²)							Tanpa Goresan	Tanpa Coating
	10	50	100	150	250	500			
1	0.047	0.092	0.250	0.433	1.250	1.850	0.030	6.500	
2	0.042	0.086	0.242	0.400	0.750	1.783	0.026	6.083	
3	0.041	0.085	0.225	0.383	0.833	1.775	0.025	6.250	
4	0.040	0.085	0.200	0.358	0.750	1.750	0.024	6.000	
5	0.040	0.084	0.200	0.375	0.750	1.742	0.024	5.833	
6	0.038	0.084	0.183	0.333	0.708	1.725	0.022	5.750	
7	0.038	0.084	0.175	0.325	0.750	1.733	0.023	5.750	
Rata-rata	0.041	0.086	0.211	0.373	0.827	1.765	0.025	6.024	



Hasil Pengukuran Arus Proteksi ICCP dalam Media Tanah pH 7 dengan Cacat Gores Lingkaran

Pengujian hari ke-	Arus Proteksi (mA) pada Luas Goresan (mm ²)									
	10	50	100	150	250	500	Tanpa Goresan	Tanpa <i>Coating</i>		
1	0.039	0.062	0.099	0.175	0.250	0.450	0.024	3.500		
2	0.036	0.058	0.088	0.133	0.217	0.433	0.020	3.167		
3	0.035	0.055	0.086	0.150	0.200	0.425	0.018	3.000		
4	0.036	0.056	0.086	0.142	0.208	0.425	0.016	3.083		
5	0.035	0.054	0.084	0.125	0.200	0.408	0.016	2.667		
6	0.035	0.054	0.085	0.125	0.200	0.408	0.015	2.500		
7	0.034	0.053	0.085	0.133	0.192	0.400	0.014	2.583		
Rata-rata	0.036	0.056	0.088	0.140	0.210	0.421	0.018	2.929		



Hasil Pengukuran Arus Proteksi ICCP dalam Media Tanah pH 7 dengan Cacat Gores Persegi Panjang

Pengujian hari ke-	Arus Proteksi (mA) pada Luas Goresan (mm ²)								Tanpa Goresan	Tanpa Coating
	10	50	100	150	250	500				
1	0.040	0.063	0.100	0.183	0.292	0.492	0.024	3.500		
2	0.038	0.060	0.090	0.150	0.250	0.450	0.020	3.167		
3	0.036	0.058	0.089	0.167	0.250	0.458	0.018	3.000		
4	0.036	0.058	0.089	0.150	0.258	0.450	0.016	3.083		
5	0.035	0.055	0.086	0.125	0.233	0.442	0.016	2.667		
6	0.035	0.056	0.087	0.133	0.225	0.425	0.015	2.500		
7	0.035	0.055	0.087	0.125	0.225	0.425	0.014	2.583		
Rata-rata	0.037	0.058	0.090	0.148	0.248	0.449	0.018	2.929		



Hasil Pengukuran Arus Proteksi ICCP dalam Media Tanah pH 11 dengan Cacat Gores Lingkaran

Pengujian hari ke-	Arus Proteksi (mA) pada Luas Goresan (mm ²)								Tanpa Goresan	Tanpa Coating
	10	50	100	150	250	500				
1	0.022	0.038	0.070	0.092	0.125	0.250	0.011	1.500		
2	0.020	0.036	0.068	0.090	0.117	0.208	0.008	1.450		
3	0.020	0.035	0.067	0.088	0.108	0.200	0.008	1.442		
4	0.019	0.035	0.067	0.089	0.100	0.200	0.007	1.450		
5	0.020	0.034	0.065	0.087	0.097	0.183	0.006	1.425		
6	0.018	0.035	0.066	0.087	0.092	0.175	0.006	1.425		
7	0.018	0.035	0.066	0.086	0.093	0.150	0.006	1.408		
Rata-rata	0.020	0.035	0.067	0.088	0.105	0.195	0.008	1.443		

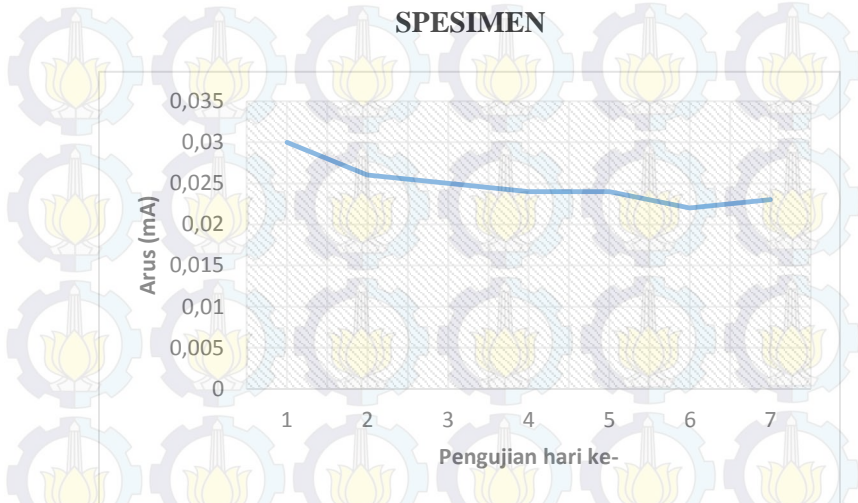


Hasil Pengukuran Arus Proteksi ICCP dalam Media Tanah pH 11 dengan Cacat Gores Persegi Panjang

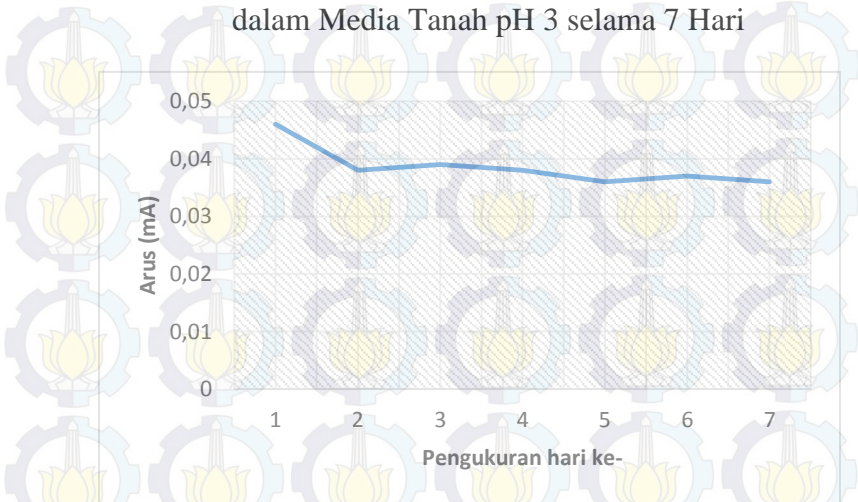
Pengujian hari ke-	Arus Proteksi (mA) pada Luas Goresan (mm ²)								Tanpa Goresan	Tanpa Coating
	10	50	100	150	250	500				
1	0.022	0.039	0.072	0.093	0.150	0.275	0.011	1.500		
2	0.023	0.038	0.070	0.091	0.108	0.233	0.008	1.450		
3	0.020	0.036	0.069	0.091	0.125	0.200	0.008	1.442		
4	0.020	0.037	0.069	0.089	0.133	0.208	0.007	1.450		
5	0.019	0.036	0.068	0.089	0.100	0.200	0.006	1.425		
6	0.019	0.035	0.066	0.088	0.099	0.183	0.006	1.425		
7	0.018	0.035	0.066	0.088	0.097	0.175	0.006	1.408		
Rata-rata	0.020	0.037	0.069	0.090	0.116	0.211	0.008	1.443		

LAMPIRAN B

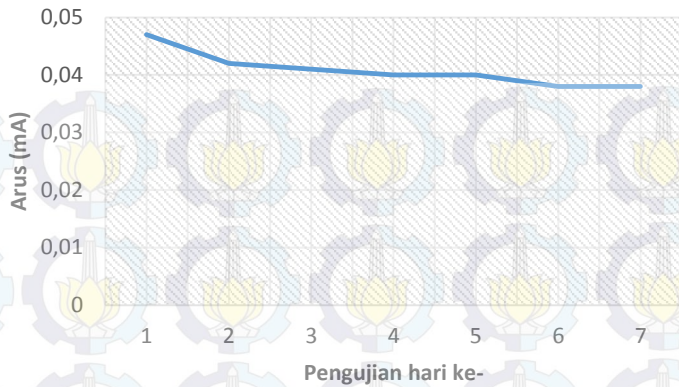
GRAFIK ARUS PROTEKSI MASING-MASING
SPESIMEN



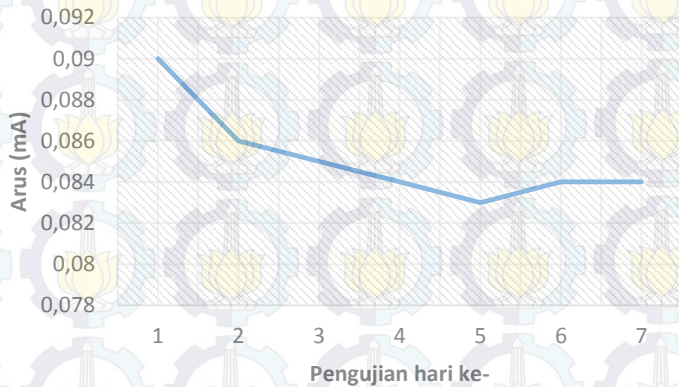
Gambar 1. Grafik Arus Proteksi pada Pipa Tanpa Goresan dalam Media Tanah pH 3 selama 7 Hari



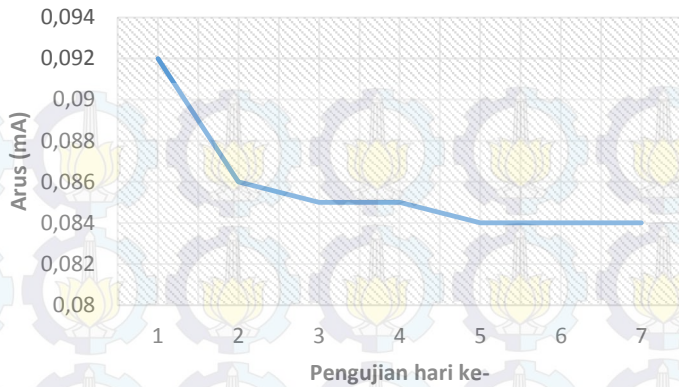
Gambar 2. Grafik Arus Proteksi pada Pipa dengan Luas Goresan Lingkaran 10 mm² dalam Media Tanah pH 3 selama 7 Hari



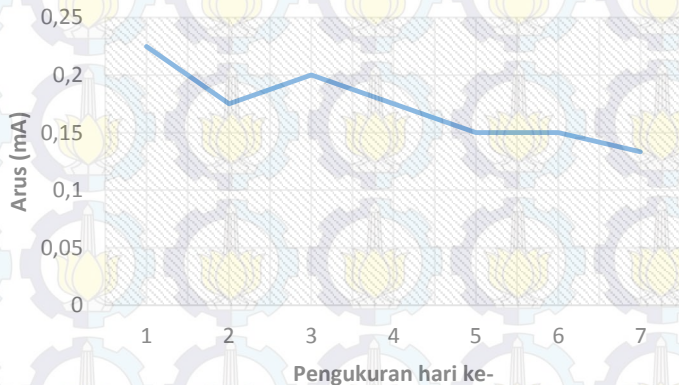
Gambar 3. Grafik Arus Proteksi pada Pipa dengan Luas Goresan Persegi Panjang 10 mm² dalam Media Tanah pH 3 selama 7 Hari



Gambar 4. Grafik Arus Proteksi pada Pipa dengan Luas Goresan Lingkaran 50 mm² dalam Media Tanah pH 3 selama 7 Hari



Gambar 5. Grafik Arus Proteksi pada Pipa dengan Luas Goresan Persegi Panjang 50 mm² dalam Media Tanah pH 3 selama 7 Hari



Gambar 6. Grafik Arus Proteksi pada Pipa dengan Luas Goresan Lingkaran 100 mm² dalam Media Tanah pH 3 selama 7 Hari



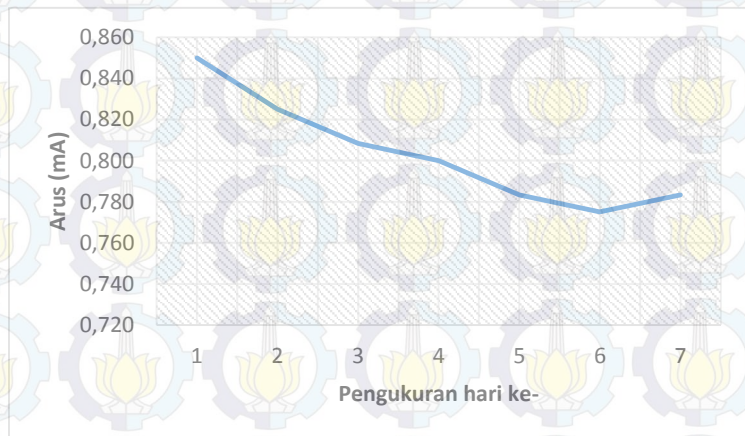
Gambar 7. Grafik Arus Proteksi pada Pipa dengan Luas Goresan Persegi Panjang 100 mm^2 dalam Media Tanah pH 3 selama 7 Hari



Gambar 8. Grafik Arus Proteksi pada Pipa dengan Luas Goresan Lingkaran 150 mm^2 dalam Media Tanah pH 3 selama 7 Hari



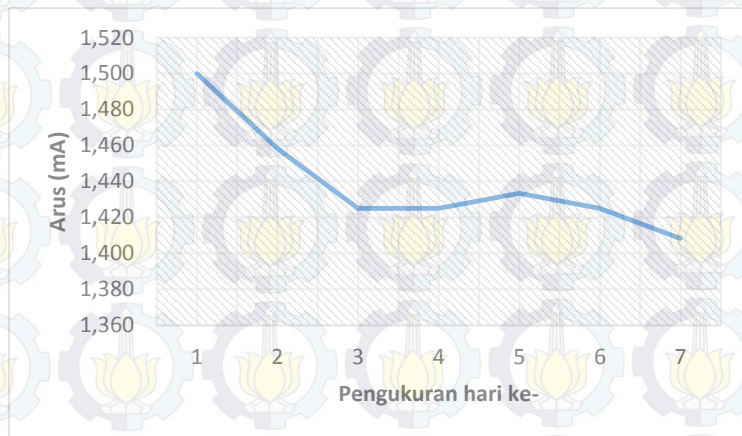
Gambar 9. Grafik Arus Proteksi pada Pipa dengan Luas Goresan Persegi Panjang 150 mm² dalam Media Tanah pH 3 selama 7 Hari



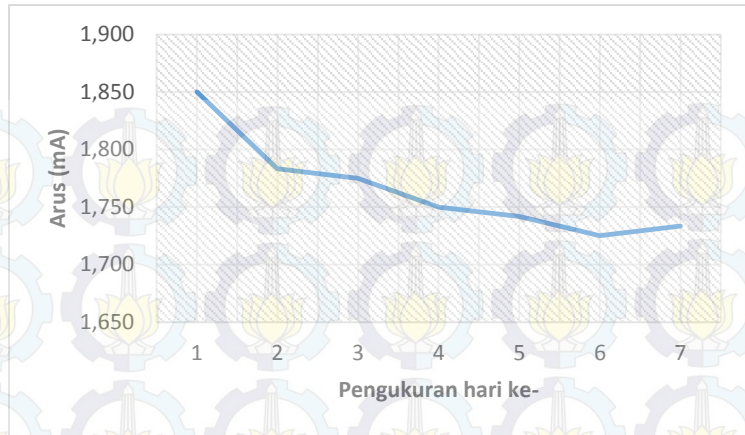
Gambar 10. Grafik Arus Proteksi pada Pipa dengan Luas Goresan Lingkaran 250 mm² dalam Media Tanah pH 3 selama 7 Hari



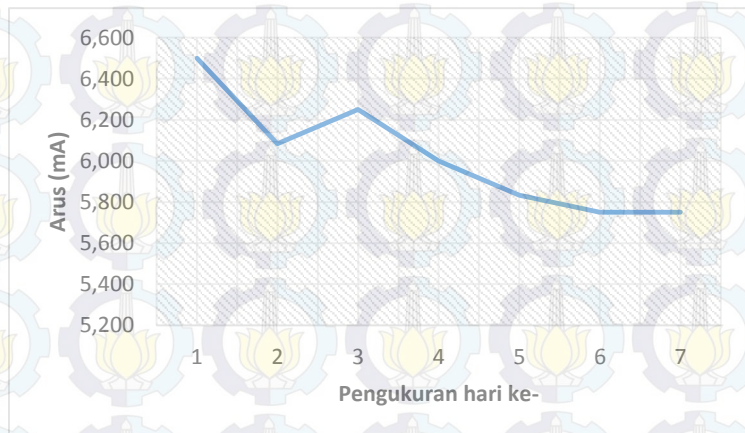
Gambar 11. Grafik Arus Proteksi pada Pipa dengan Luas Goresan Persegi Panjang 250 mm² dalam Media Tanah pH 3 selama 7 Hari



Gambar 12. Grafik Arus Proteksi pada Pipa dengan Luas Goresan Lingkaran 500 mm² dalam Media Tanah pH 3 selama 7 Hari



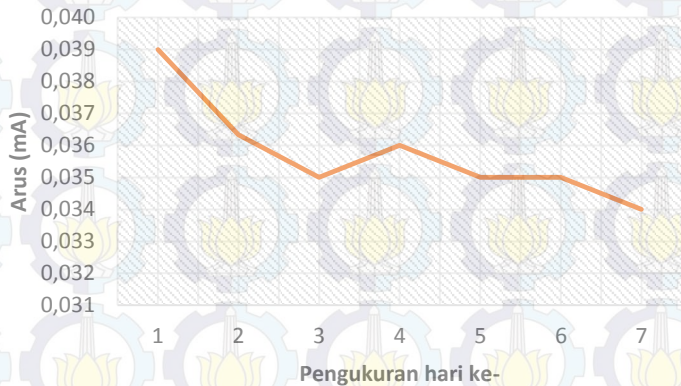
Gambar 13. Grafik Arus Proteksi pada Pipa dengan Luas Goresan Persegi Panjang 500 mm² dalam Media Tanah pH 3 selama 7 Hari



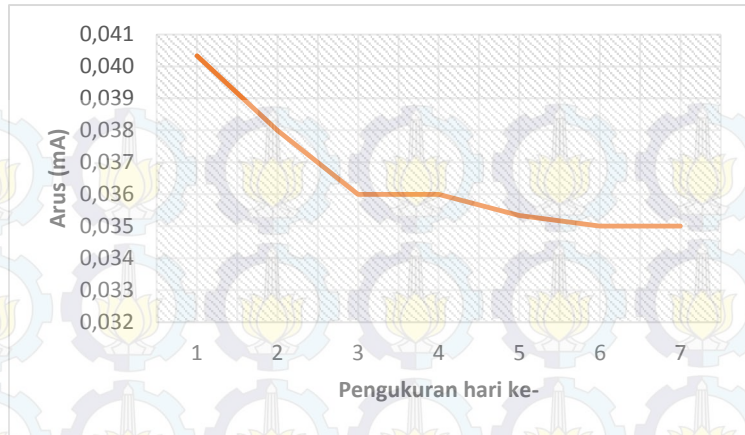
Gambar 14. Grafik Arus Proteksi pada Pipa Tanpa *Coating* dalam Media Tanah pH 3 selama 7 Hari



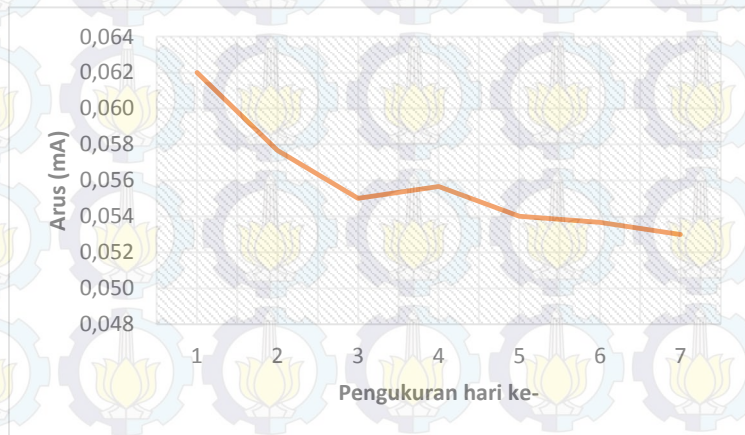
Gambar 15. Grafik Arus Proteksi pada Pipa Tanpa Goresan dalam Media Tanah pH 7 selama 7 Hari



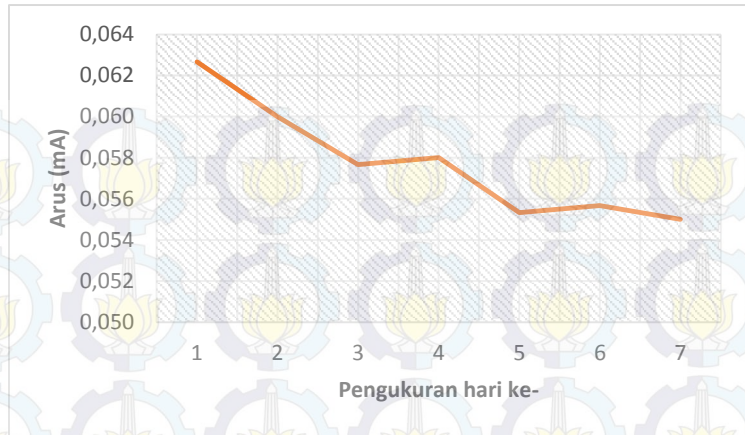
Gambar 16. Grafik Arus Proteksi pada Pipa dengan Luas Goresan Lingkaran 10 mm² dalam Media Tanah pH 7 selama 7 Hari



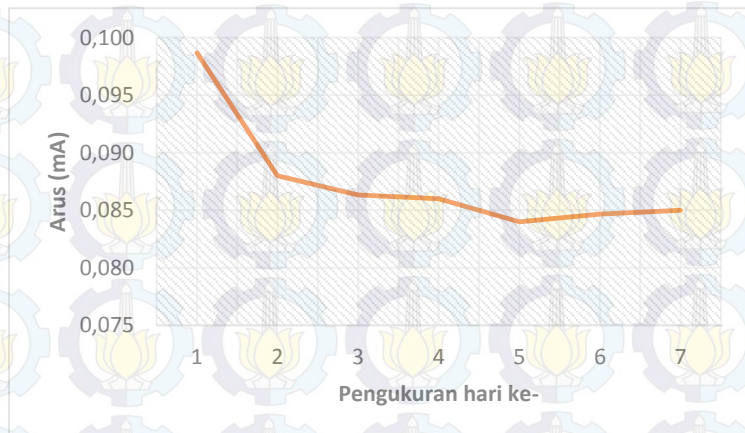
Gambar 17. Grafik Arus Proteksi pada Pipa dengan Luas Goresan Persegi Panjang 10 mm² dalam Media Tanah pH 7 selama 7 Hari



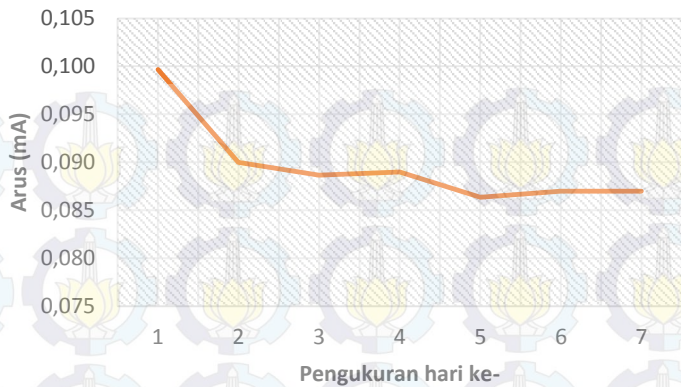
Gambar 18. Grafik Arus Proteksi pada Pipa dengan Luas Goresan Lingkaran 50 mm² dalam Media Tanah pH 7 selama 7 Hari



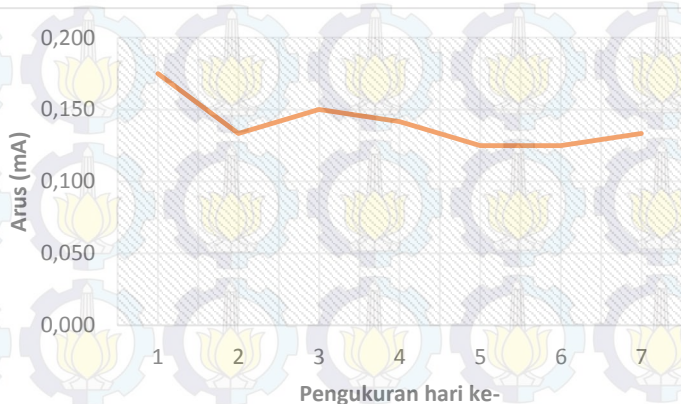
Gambar 19. Grafik Arus Proteksi pada Pipa dengan Luas Goresan Persegi Panjang 50 mm² dalam Media Tanah pH 7 selama 7 Hari



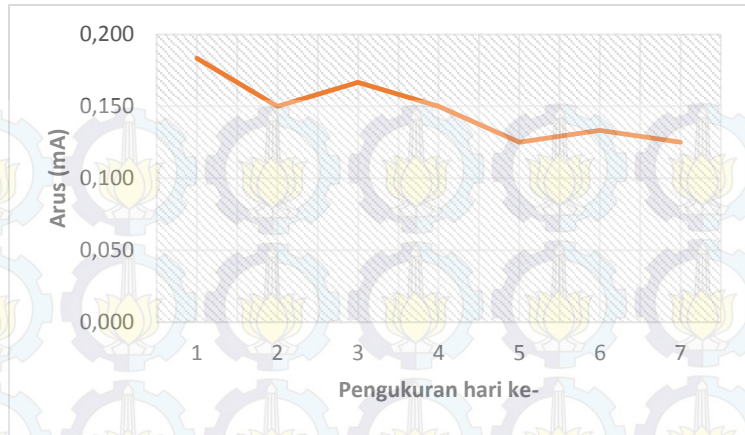
Gambar 20. Grafik Arus Proteksi pada Pipa dengan Luas Goresan Lingkaran 100 mm² dalam Media Tanah pH 7 selama 7 Hari



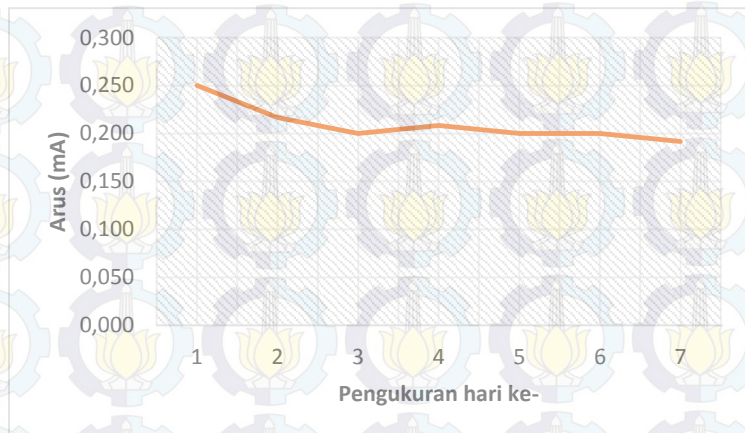
Gambar 21. Grafik Arus Proteksi pada Pipa dengan Luas Goresan Persegi Panjang 100 mm² dalam Media Tanah pH 7 selama 7 Hari



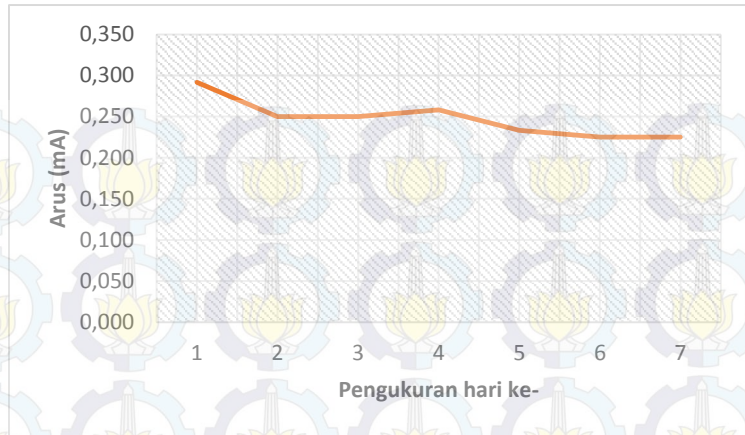
Gambar 22. Grafik Arus Proteksi pada Pipa dengan Luas Goresan Lingkaran 150 mm² dalam Media Tanah pH 7 selama 7 Hari



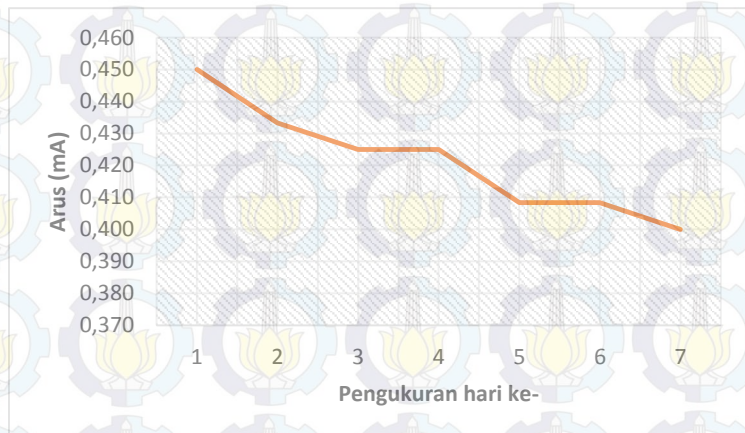
Gambar 23. Grafik Arus Proteksi pada Pipa dengan Luas Goresan Persegi Panjang 150 mm^2 dalam Media Tanah pH 7 selama 7 Hari



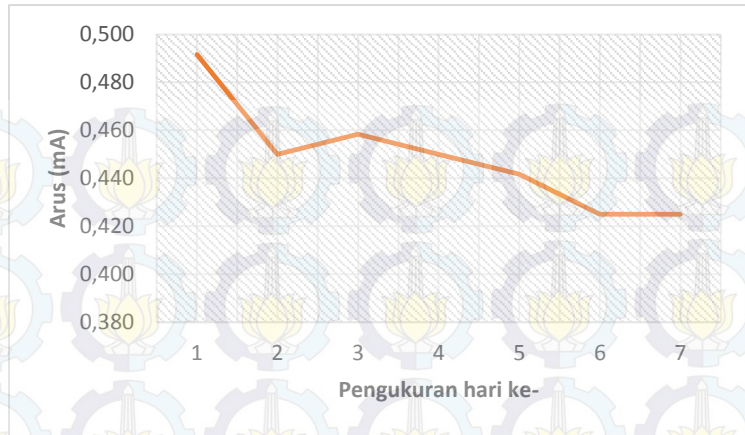
Gambar 24. Grafik Arus Proteksi pada Pipa dengan Luas Goresan Lingkaran 250 mm^2 dalam Media Tanah pH 7 selama 7 Hari



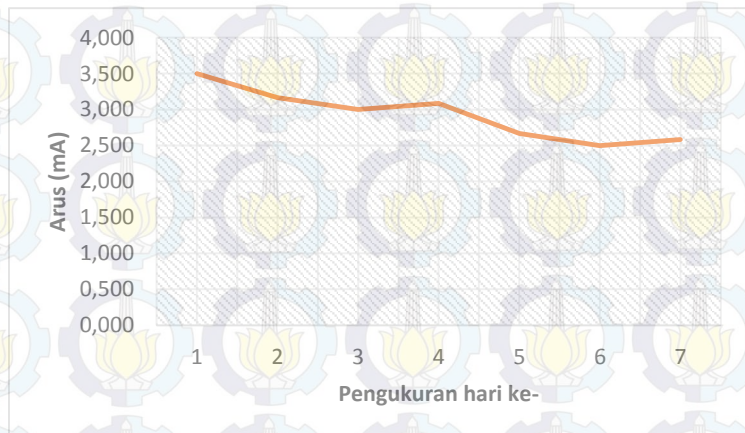
Gambar 25. Grafik Arus Proteksi pada Pipa dengan Luas Goresan Persegi Panjang 250 mm² dalam Media Tanah pH 7 selama 7 Hari



Gambar 26. Grafik Arus Proteksi pada Pipa dengan Luas Goresan Lingkaran 500 mm² dalam Media Tanah pH 7 selama 7 Hari



Gambar 27. Grafik Arus Proteksi pada Pipa dengan Luas Goresan Persegi Panjang 500 mm² dalam Media Tanah pH 7 selama 7 Hari



Gambar 28. Grafik Arus Proteksi pada Pipa Tanpa *Coating* dalam Media Tanah pH 7 selama 7 Hari



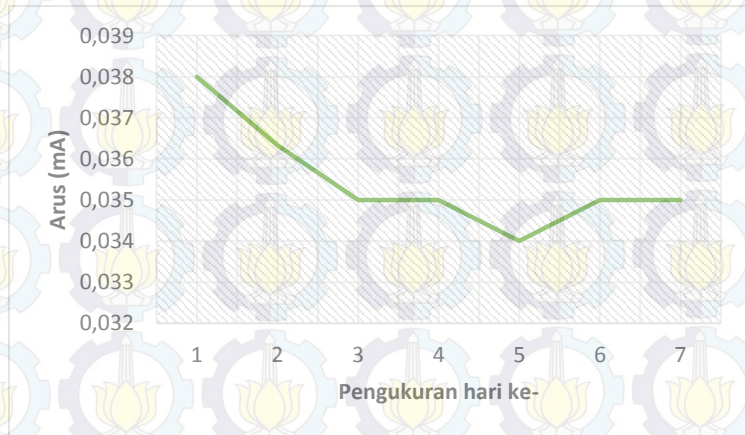
Gambar 29. Grafik Arus Proteksi pada Pipa Tanpa Goresan dalam Media Tanah pH 11 selama 7 Hari



Gambar 30. Grafik Arus Proteksi pada Pipa dengan Luas Goresan Lingkaran 10 mm² dalam Media Tanah pH 11 selama 7 Hari



Gambar 31. Grafik Arus Proteksi pada Pipa dengan Luas Goresan Persegi Panjang 10 mm² dalam Media Tanah pH 11 selama 7 Hari



Gambar 32. Grafik Arus Proteksi pada Pipa dengan Luas Goresan Lingkaran 50 mm² dalam Media Tanah pH 11 selama 7 Hari



Gambar 33. Grafik Arus Proteksi pada Pipa dengan Luas Goresan Persegi Panjang 50 mm² dalam Media Tanah pH 11 selama 7 Hari



Gambar 34. Grafik Arus Proteksi pada Pipa dengan Luas Goresan Lingkaran 100 mm² dalam Media Tanah pH 11 selama 7 Hari



Gambar 35. Grafik Arus Proteksi pada Pipa dengan Luas Goresan Persegi Panjang 100 mm² dalam Media Tanah pH 11 selama 7 Hari



Gambar 36. Grafik Arus Proteksi pada Pipa dengan Luas Goresan Lingkaran 150 mm² dalam Media Tanah pH 11 selama 7 Hari



Gambar 37. Grafik Arus Proteksi pada Pipa dengan Luas Goresan Persegi Panjang 150 mm² dalam Media Tanah pH 11 selama 7 Hari



Gambar 38. Grafik Arus Proteksi pada Pipa dengan Luas Goresan Lingkaran 250 mm² dalam Media Tanah pH 11 selama 7 Hari



Gambar 39. Grafik Arus Proteksi pada Pipa dengan Luas Goresan Persegi Panjang 250 mm² dalam Media Tanah pH 11 selama 7 Hari



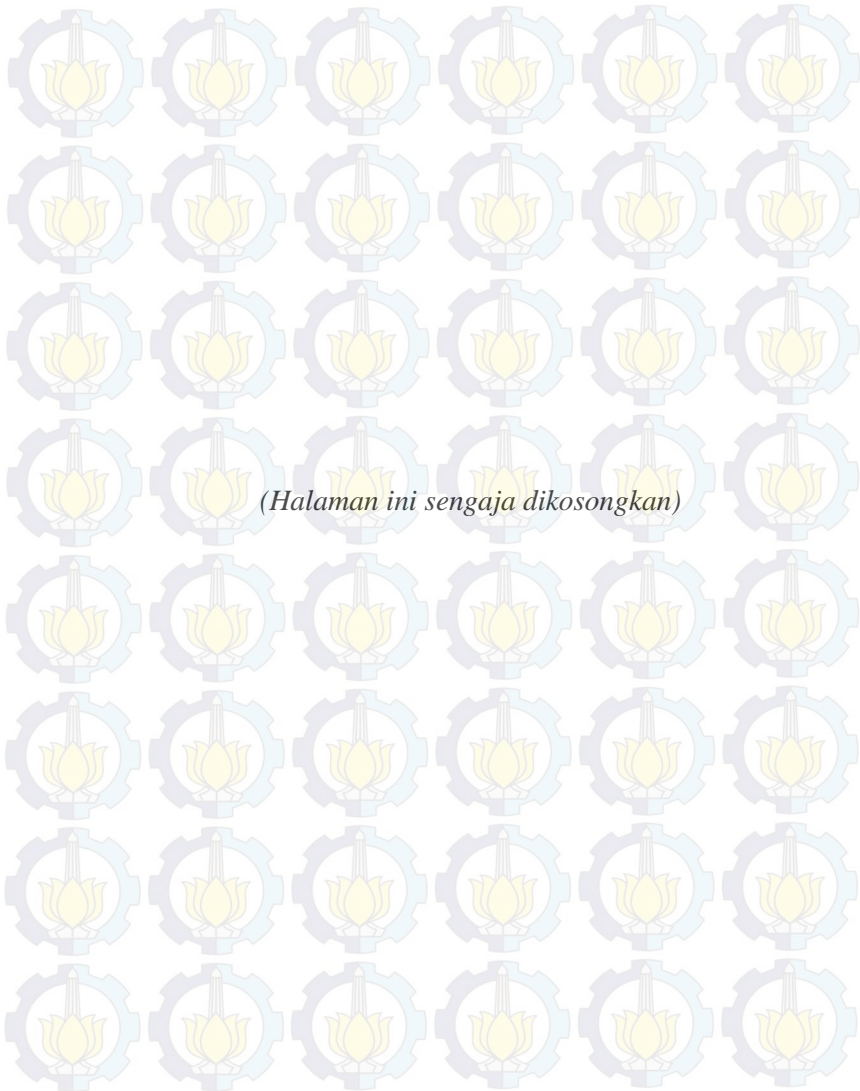
Gambar 40. Grafik Arus Proteksi pada Pipa dengan Luas Goresan Lingkaran 500 mm² dalam Media Tanah pH 11 selama 7 Hari



Gambar 41. Grafik Arus Proteksi pada Pipa dengan Luas Goresan Persegi Panjang 500 mm² dalam Media Tanah pH 11 selama 7 Hari



Gambar 42. Grafik Arus Proteksi pada Pipa Tanpa *Coating* dalam Media Tanah pH 11 selama 7 Hari





LAMPIRAN C

Perhitungan pH Media Tanah

Perhitungan Volume Larutan

Luas Permukaan Katoda

$$SA = \pi \cdot OD \cdot L$$

$$SA = 3.14 \times 60.3 \times 100$$

$$SA = 18934.2 \text{ mm}^2 = 189.342 \text{ cm}^2$$

Berdasarkan NACE Standard TM 0169-95, rasio minimum yang dianjurkan untuk volume larutan (elektrolit) terhadap luas permukaan spesimen adalah **20 mL/cm²**

- Volume tanah minimum untuk 1 spesimen:

$$V_{\text{elektrolit}} = 20 \text{ mL/cm}^2 \times 189.342 \text{ cm}^2 \\ = 3786.84 \text{ mL} = \pm 3.8 \text{ L (Dibuat 4 L)}$$

- Volume tanah minimum untuk 8 spesimen (1 elektrolit):

$$V_{\text{elektrolit}} = 8 \times 4 \text{ L} \\ = 32 \text{ L}$$

Dalam percobaan ini, volume larutan elektrolit yang digunakan sebesar 1 liter untuk setiap spesimen. Sehingga untuk satu box yang berisi 8 spesimen, dibutuhkan volume elektrolit sebanyak:

$$V = 8 \times 1 \text{ L} = 8 \text{ L}$$

Perhitungan HCl dan NaOH yang dibutuhkan

pH tanah yang digunakan adalah pH 3, pH 7, dan pH 11:

1) Perhitungan pH 3 (Dengan HCl 1M)

$$\text{pH} = 3 \text{ maka } [\text{H}^+] = 10^{-3}$$

$$\text{Jadi, } M_1 \cdot V_1 = M_2 \cdot V_2$$

$$1 \cdot V_1 = 10^{-3} \cdot 1000 \text{ ml}$$

$$V_1 = 1 \text{ ml}$$

Jadi, dibutuhkan HCl 1M dengan jumlah 1 ml untuk dicampurkan kedalam aquades untuk bisa mendapatkan larutan dengan pH 3. Larutan elektrolit pH 3 sebanyak 1 L



ini nantinya dicampurkan ke tanah 4 L untuk setiap spesimen.

2) Perhitungan pH 7
Kebanyakan tanah yang digunakan mempunyai pH sekitar 7 (netral), sehingga tidaklah perlu diberikan perlakuan. Hanya nanti akan diberikan aquades agar menjadi elektrolit.

3) Perhitungan pH 11 (Dengan NaOH 1M)

$$\text{pH} + \text{pOH} = 14$$

$$11 + \text{pOH} = 14$$

$$\text{pOH} = 3, \text{ maka } [\text{OH}^-] = 10^{-3}$$

Jadi,

$$M_1 \cdot V_1 = M_2 \cdot V_2$$

$$1 \cdot V_1 = 10^{-3} \cdot 1000 \text{ ml}$$

$$V_1 = 1 \text{ ml}$$

Maka, dibutuhkan NaOH 1M sebanyak 1 ml yang akan dicampurkan dengan aquades untuk bisa menghasilkan larutan dengan pH 11. Larutan elektrolit pH 11 sebanyak 1 L ini nantinya akan dicampurkan dengan tanah sebanyak 4 L.



LAMPIRAN D
Analisa Data Statistik

x_1 (pH)	x_2 (Luas Gores)	Y (Arus)	X_1^2	x_2^2	x_1x_2	x_1y	x_2y
3	0	0,025	9	0	0	0,075	0
3	10	0,039	9	100	30	0,117	0,39
3	50	0,085	9	2500	150	0,255	4,25
3	100	0,173	9	10000	300	0,519	17,3
3	150	0,357	9	22500	450	1,071	53,55
3	250	0,804	9	62500	750	2,412	201
3	500	1,439	9	250000	1500	4,317	719,5
3	18934,2	6,024	9	358503929,6	56802,6	18,072	114059,6
3	10	0,041	9	100	30	0,123	0,41
3	50	0,086	9	2500	150	0,258	4,3
3	100	0,211	9	10000	300	0,633	21,1
3	150	0,373	9	22500	450	1,119	55,95
3	250	0,827	9	62500	750	2,481	206,75
3	500	1,765	9	250000	1500	5,295	882,5
7	0	0,018	49	0	0	0,126	0
7	10	0,036	49	100	70	0,252	0,36
7	50	0,056	49	2500	350	0,392	2,8
7	100	0,088	49	10000	700	0,616	8,8
7	150	0,14	49	22500	1050	0,98	21
7	250	0,21	49	62500	1750	1,47	52,5
7	500	0,421	49	250000	3500	2,947	210,5
7	18934,2	2,929	49	358503929,6	132539,4	20,503	55458,27
7	10	0,037	49	100	70	0,259	0,37
7	50	0,058	49	2500	350	0,406	2,9
7	100	0,09	49	10000	700	0,63	9
7	150	0,148	49	22500	1050	1,036	22,2
7	250	0,248	49	62500	1750	1,736	62
7	500	0,449	49	250000	3500	3,143	224,5



1) Analisa Varians
 a. Cacat Gores Lingkaran

Anova: Two-Factor
 Without Replication

SUMMARY	Count	Sum	Average	Variance
Row 1	8	8,946	1,11825	4,166943
Row 2	8	3,898	0,48725	0,990455
Row 3	8	1,961	0,245125	0,23779
Column 1	3	0,051	0,017	7,3E-05
Column 2	3	0,095	0,031667	0,000104
Column 3	3	0,176	0,058667	0,00063
Column 4	3	0,328	0,109333	0,00315
Column 5	3	0,585	0,195	0,020359
Column 6	3	1,119	0,373	0,142077
Column 7	3	2,055	0,685	0,439156
Column 8	3	10,396	3,465333	5,46213

ANOVA						
Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Rows (pH)	3,251021	2	1,62551	2,56149	0,112722	3,738892
Columns (Luas Gores)	28,88197	7	4,125996	6,501771	0,001519	2,764199
Error	8,88434	14	0,634596			
Total	41,01733	23				



b. Cacat Gores Persegi Panjang

Anova: Two-Factor
 Without Replication

<i>SUMMARY</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
Row 1	7	9,327	1,332429	4,642149
Row 2	7	3,959	0,565571	1,106298
Row 3	7	1,986	0,283714	0,265233
Column 1	3	0,098	0,032667	0,000124
Column 2	3	0,181	0,060333	0,000604
Column 3	3	0,37	0,123333	0,005874
Column 4	3	0,611	0,203667	0,022346
Column 5	3	1,191	0,397	0,143031
Column 6	3	2,425	0,808333	0,700569
Column 7	3	10,396	3,465333	5,46213

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Rows (pH)	4,123734952	2	2,061867	2,895331	0,094175	3,885294
Columns (Luas Gores)	27,53645581	6	4,589409	6,444574	0,003143	2,99612
Error	8,545625048	12	0,712135			
Total	40,20581581	20				



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Trendy Leo Pratama dilahirkan di kota Sukoharjo pada tanggal 19 Juli 1993. Penulis merupakan anak pertama dari dua bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu di SD Negeri Ponowaren 1, SMP Negeri 1 Tawang Sari, dan SMA Negeri 1 Sukoharjo. Lulus SMA tahun 2011, penulis melanjutkan pendidikan perguruan tinggi dan diterima di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif di organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Material dan Metalurgi (HMMT) FTI-ITS dalam Departemen Pengabdian Masyarakat sebagai staff (2012-2013), *Society of Petroleum Engineers* (SPE) ITS *Student Chapter* dalam Departemen Keprofesian sebagai Kepala Departemen (2013-2014), dan Koperasi Mahasiswa dr. Angka ITS dalam Departemen Hubungan Masyarakat sebagai Direktur Bidang (2013-2014). Selama kuliah di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS, penulis juga pernah menjadi Asisten Laboratorium Korosi dan Pengendalian Korosi pada tahun 2013 dan 2014 serta Asisten Laboratorium Karakterisasi Material pada tahun 2013. Penulis pernah melaksanakan Kerja Praktek di PGN (Perusahaan Gas Negara) Solution selama satu bulan. Korosi dan Kegagalan Material menjadi bidang tugas akhir yang penulis ambil untuk meraih gelar sarjana teknik.

Email: trendzleo@gmail.com