

DOI: doi.org/10.21009/0305020119

PERANCANGAN PROTEKSI ARUS PAKSA PADA PIPA BAJA API 5L DENGAN COATING DAN TANPA COATING DI DALAM TANAH

Tubagus Noor R, Sulistijono, Azmi Mahiri, M. Rizal Pambudi

Jurusan Teknik Material dan Metalurgi - Fakultas Teknologi Industri

Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Jalan Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

Email: roma_r2001@yahoo.com

Abstrak

Impressed Current Cathodic Protection adalah sistem perlindungan logam dengan menggunakan sumber arus DC dari luar sistem. Kutub positif sumber arus DC dihubungkan dengan anode inert sedangkan kutub negatif sumber arus DC dihubungkan dengan logam atau katoda yang akan dilindungi dari serangan korosi. Saat ini ICCP sering digunakan karena sistem proteksi ini memiliki beberapa kelebihan diantaranya mudah untuk mengontrol arus proteksi, mudah mendeteksi kerusakan pada sistem proteksi, dan dapat digunakan di berbagai macam jenis katoda dan lingkungan yang berbeda, dan lain lain. Penelitian (Tito,2002) menyebutkan kelebihan dari sistem ICCP ini adalah dapat didesain untuk aplikasi dengan tingkat fleksibilitas yang tinggi karena mempunyai rentang kapasitas output arus yang luas. Artinya kebutuhan arus dapat diatur baik secara manual maupun secara otomatis dengan merubah tegangan output sesuai dengan kebutuhan, kelebihan lain dari sistem ini dapat memproteksi luasan yang cukup besar. Penelitian mengenai ICCP ini mengalami perkembangan ke arah desain yang disesuaikan dengan keadaan katoda dan lingkungan, ini disebabkan pada katoda dan jenis lingkungan tertentu maka membutuhkan desain yang berbeda. Pada penelitian ini dilakukan desain ICCP pada katoda API 5L grade B dengan perbedaan coating dalam kondisi kelembapan tanah yang berbeda. Pada katoda dengan ketebalan coating yang berbeda menunjukkan bahwa semakin tebal coating maka arus proteksi yang diperlukan akan menurun, Sementara pada kondisi lingkungan dengan kelembapan yang berbeda, semakin tinggi kelembapan tanah maka mengakibatkan kebutuhan arus proteksi juga meningkat.

Kata-kata kunci: *Korosi, Proteksi Katodik, Arus Paksa, API 5L*

Abstract

Impressed Current Cathodic Protection (ICCP) is a metal protection system from corrosion using DC current source from outside the system. The positive pole of DC current source is connected to the inert anode while the negative pole of the DC current source connected with metal or cathode to be protected from corrosion attack. ICCP has several advantages such as easy to control the flow of protection, is easy to detect damage to the protection system, and can be used in various types of cathodes and a different environment, and others. Research (Tito, 2002) mentions the advantages of the ICCP system is that it can be designed for applications with a high degree of flexibility because they have wide range of current output capacity. It's means that current demand can be set either manually or automatically by changing the output voltage in accordance with the needs, another advantage of this system can protect an area that is large enough. The studies regarding the ICCP is progressing towards design in tune with the cathode and the environment, this is due to the cathode and a certain kind of environment will require different designs. This research is designed ICCP on the cathode API 5L grade B with different coatings in different soil moisture conditions. At the cathode with different coating thicknesses showed that the thicker the coating, the current required protection will decrease, while the environmental conditions with different humidity, the higher the soil moisture, the resulting flow needs protection also increased

Keywords: *corrosion, cathodic protection, impressed current, API 5L*

1. Pendahuluan

Korosi atau karat merupakan suatu kondisi degradasi logam yang diakibatkan oleh reaksi reduksi - oksidasi yang terjadi pada logam dengan berbagai zat yang ada di lingkungan sekitarnya

sehingga menghasilkan suatu senyawa yang tidak dikehendaki, Contoh korosi yang umum terjadi adalah perkaratan logam besi. Korosi tidak dapat dicegah maupun dihentikan secara total tapi korosi ini hanya bisa diperlambat lajunya sehingga

memperlambat pula proses perusakan yang terjadi pada material tersebut. Melihat keadaan yang tidak menguntungkan seperti ini dimana korosi merupakan proses alam yang tidak dapat dihindari namun hanya dapat diminimalisir atau dicegah maka korosi tentu sangat merugikan karena dapat mengurangi kemampuan suatu material atau logam dalam menerima suatu beban. Pipa baja banyak digunakan dalam berbagai industri, pipa baja biasa digunakan untuk memindahkan zat hasil pemrosesan seperti cairan, gas, uap, zat padat yang dicairkan maupun serbuk halus. Material yang digunakan sebagai pipa sangat banyak diantaranya adalah beton cor, gelas, timbal, kuningan (brass), tembaga, plastik, aluminium, besi tuang, namun pada umumnya material yang umum digunakan sebagai pipa adalah baja karbon dan baja paduan. Pada pipa baja yang ditanam didalam tanah sangat rawan terjadi korosi akibat pengaruh lingkungan sekitarnya. Proteksi pada pipa baja diperlukan agar menghambat laju korosi sehingga pipa tersebut tidak mengalami kegagalan atau kerusakan yang dapat membahayakan lingkungan sekitar. Proteksi pada pipa saat ini sudah mengalami beberapa kemajuan, proteksi yang biasa digunakan antara lain dengan menggunakan metoda anoda tumbal, metoda arus paksa, inhibitor, dan penggunaan lapisan pelindung (coating). Masing masing metoda memiliki keunggulan dan kekurangan tersendiri. Impressed Current Cathodic Protection adalah perlindungan dengan memberikan elektron pada material pipa dengan jalan menggunakan sumber arus listrik dari luar sistem. Elektron yang diberikan berasal dari anode permanen yang terbuat dari logam. Sumber arus listrik yang digunakan untuk memberikan elektron ke badan pipa berasal dari rectifier. Kutub positif sumber arus DC dihubungkan dengan anode sedangkan kutub negatif sumber arus DC dihubungkan dengan material pipa. Sehingga elektron akan bergerak dari anode ke arah material pipa yang dilindungi terhadap pengaruh korosi. Oleh karena itu permukaan pipa akan menjadi katoda dan akan terproteksi.

2. Metode Penelitian

Proteksi katodik digunakan untuk mengendalikan korosi pada permukaan logam. Proses yang dilakukan biasanya berupa reaksi elektrokimia dimana logam yang dilindungi akan bertindak sebagai katoda. Arus mengalir berasal dari anoda melalui sel elektrolit menuju ke katoda. Sehingga kemampuan proteksi terhadap katodik dapat dicapai dengan mengalirkan arus listrik tersebut. Bahan-bahan yang digunakan dalam perancangan ini adalah pipa baja API 5L grade B yang memiliki komposisi seperti pada tabel 1. Anoda grafit yang berfungsi sebagai anoda dipilih karena memiliki laju konsumsi yang rendah dan tergolong dalam logam yang inert. Untuk coating/lapis pelindung yang digunakan adalah cat epoxy dan

coating wrapping berbahan dasar aspal. Peralatan yang menunjang dalam perancangan ini antara lain transformator rectifier sebagai penyedia arus, copper rod dan aki sebagai alat bantu pengukuran resistivitas tanah.

Dalam perancangan ini kondisi lingkungan atau tanah dibiarkan tanpa ada treatment tertentu. Dalam membantu perancangan proteksi arus paksa ini menggunakan acuan :

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

Sementara untuk pengukuran resistivitas tanah menggunakan standar ASTM G57 Standard Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four – Electrode Method.

Tabel 1. Komposisi Kimia API 5L Grade B

No.	Kandungan	Kadar (%)
1.	C	0.20
2.	Mn	0.43
3.	P	0.015
4.	S	0.007
5.	Cr	0.014
6.	Ni	0.006
7.	Mo	0.0016
8.	Cu	0.008
9.	B	0.0001
10.	Nb	0.0008
11.	V	0.0013
12.	Ti	0.0015
13.	Al	0.005
14.	Si	0.23

Tabel 2. Spesifikasi Anoda Grafit

Spesifikasi	Keterangan
Kategori	Impregnated Epoxy Resin (H)
Model	M120H
Bentuk	Tubular
Dimensi	P = 800 mm ; d = 400 mm
Masa pakai	20 tahun
Komposisi Kimia	98.8% Carbon ; 0.2% Ash
Laju Konsumsi	0.1 – 1 kg/A.Year

Langkah perancangan diawali dengan melakukan desain perancangan yang akan dikehendaki, kriteria desain yang akan digunakan adalah, Umur desain : 1 tahun
 Limit positif : -850 mV

Limit negatif : -1100 mV
 Electrode Reference : Cu/CuSo4
 Kemudian berlanjut pada perhitungan keperluan arus proteksi

1. Luas permukaan struktur yang akan dilindungi

$$A = \pi \times D \times L \quad (1)$$

Dengan :

D = diameter luar pipa (m)

L = panjang pipa (m)

$\pi = 3.14$

A = luas permukaan yang diproteksi (m²)

2. Konduktansi Lapis Pelindung

$$g = (\pi \times D) / \omega \quad (2)$$

Dengan :

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

D = diameter luar pipa (m)

ω = tahanan lapis lindung pipa (ohm-m²)

$\pi = 3,14$

3. Tahanan Pipa

$$r = P_{\text{pipa}} / (\pi t (D-t)) \quad (3)$$

Dengan :

r = tahanan pipa (ohm-m-1)

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

t = tebal pipa (m)

D = diameter luar pipa (m)

4. Konstanta Atenuasi

$$\alpha = \sqrt{r \times g} \quad (4)$$

Dengan :

α = konstanta attenuasi (ohm-m-1)

r = tahanan pipa (ohm-m-1)

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

5. Tahanan Karakteristik Pipa

$$r_p = \sqrt{r/g} \quad (5)$$

Dengan :

r_p = tahanan karakteristik pipa (ohm)

r = tahanan pipa (ohm-m-1)

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

6. Pergeseran Potensial Pipa

$$E_o = E \times \cosh(\alpha L) \quad (6)$$

Dengan

E_o = pergeseran potensial pipa (volt)

E = pergeseran potensial pipa minimum (volt)

α = konstanta attenuasi

L = jarak pipa terproteksi (m)

7. Kebutuhan Arus Proteksi

$$I_o = E_o / r_p \times \tanh(\alpha L) \quad (7)$$

Dengan :

I_o = keperluan arus proteksi (Ampere)

E_o = pergeseran potensial pipa (volt)

r_p = tahanan karakteristik pipa (ohm)

α = konstanta attenuasi

8. Keperluan Arus DC Minimum

$$IR \geq I_o \times S_f \quad (8)$$

Dengan :

IR = keperluan arus DC minimum (ampere)

I_o = keperluan arus proteksi (ampere)

9. Berat Anoda

$$W_o = (Y \times C \times IR) / U \quad (9)$$

Dengan :

W_o = berat anoda (Kg)

Y = lama proteksi (tahun)

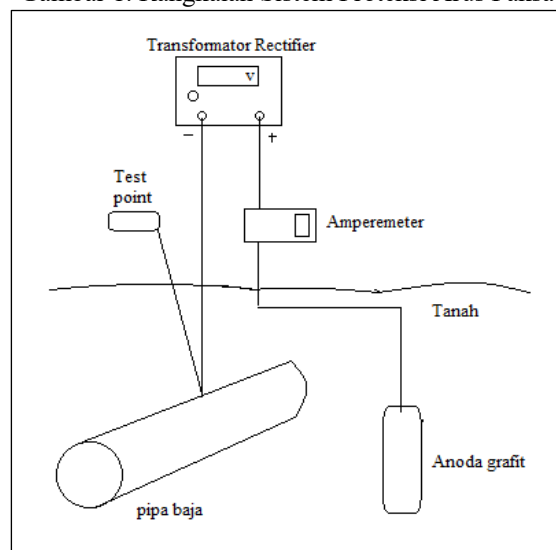
C = laju konsumsi anoda (kg/Ampere tahun)

IR = keluaran arus DC (ampere)

U = faktor guna (80%)

Setelah mendapatkan perhitungan keperluan arus proteksi hingga anoda yang dibutuhkan, maka proses berikutnya adalah persiapan alat dan bahan. Pipa baja API 5L grade B yang digunakan sebanyak 4 buah dengan dimensi masing-masing berukuran panjang 15000 mm, diameter 736 mm, dan ketebalan 105 mm. pipa kemudian dibersihkan sehingga tidak ada kotoran yang menempel pada permukaan pipa. Pipa selanjutnya dipasang baut dan mur sebagai tempat mengaitkan kabel dengan cara dilas. Setelah selesai pemasangan baut dan mur, pipa diberikan lapisan pelindung/coating yang berbeda beda. Satu pipa dibiarkan tanpa lapisan pelindung/coating, satu pipa diberikan lapisan pelindung/coating dengan wrapping, satu pipa diberi lapisan pelindung/coating dengan cat epoxy sebanyak 1 lapis, kemudian yang terakhir diberi lapisan pelindung/coating dengan cat epoxy sebanyak 2 lapis. Sementara untuk anoda diberikan backfill menggunakan serbuk grafit, kemudian dilapisi dengan lapisan logam. Pipa dan anoda grafit kemudian dipasang kabel, kemudian ditanam di dalam tanah pada kedalaman 50 cm. Sebelum dipasang menuju rectifier, pipa yang telah ditanam di dalam tanah diukur potensialnya menggunakan elektroda acuan Cu/CuSO₄. Setelah mengetahui potensial pipa, kabel dari pipa dan anoda kemudian dihubungkan menuju rectifier, dimana kabel yang berasal dari pipa dihubungkan dengan kutub negatif dari transformator rectifier sementara kabel yang berasal dari anoda dihubungkan dengan kutub positif dari transformator rectifier. Setelah pemasangan kabel selesai rectifier dinyalakan dan tegangan dan arus yang keluar diatur agar pipa tersebut dapat terproteksi yaitu dirange sekitar - 850mv sampai dengan -1100mv.

Gambar 1. Rangkaian Sistem Proteksi Arus Paksa



Pengukuran resistivitas tanah dilakukan untuk mengetahui resistansi tanah dimana resistansi

tersebut berhubungan dengan kelembapan dari tanah tersebut, pengukuran dilakukan dengan menggunakan copper rod (pin) sebanyak empat buah yang ditanam pada jarak yang sama dalam satu garis lurus, kemudian 2 copper rod (pin) terjauh atau terluar disambungkan dengan kabel dan diberi arus listrik menggunakan aki dan diberi avometer untuk mengetahui seberapa besar arus yang mengalir, sementara 2 copper rod (pin) yang berada ditengah-tengah copper rod terjauh dihubungkan dengan kabel kemudian dipasang avometer untuk mengukur tegangan. Setelah mendapat arus dan tegangan, masuk kedalam perhitungan rumus

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R \tag{10}$$

Dimana

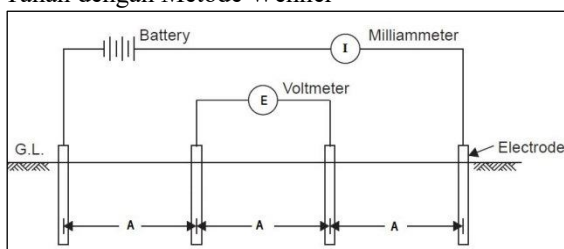
ρ = Tahanan Jenis Tanah (Ohm-cm)

π = 3.14

a= Jarak antar pin (cm)

R = Hambatan yang terukur (ohm)

Gambar 2. Rangkaian Pengukuran Resistivitas Tanah dengan Metode Wenner



Pengukuran resistivitas tanah dilakukan sebanyak empat kali dengan jarak dan kedalaman yang berbeda beda yaitu jarak (a_1) 10 cm, kedalaman (d_1) 200 cm, (a_2) 20 cm (d_2) 400 cm, (a_3) 30 cm (d_3) 30 cm, (a_4) 40 cm (d_4) 40 cm. pengukuran dengan jarak dan kedalaman yang berbeda bertujuan agar mengetahui resistivitas secara menyeluruh. Hasil tersebut dirata-rata untuk mengetahui nilai resistivitas tanah

3. Pembahasan

Pengukuran potensial awal dilakukan pada pipa sebelum instalasi ICCP dinyalakan. Nilai potensial ini berfungsi untuk mengetahui nilai potensial sebelum dan sesudah instalasi ICCP yang selanjutnya dapat digunakan sebagai patokan untuk menentukan arus proteksinya. Hasil dari pengukuran arus dan potensial proteksi pipa adalah sebagai berikut.

Tabel 3. Pengukuran Potensial Awal Pipa

Pipa	Potensial Awal (mV)
Tanpa Coating	-450
Epoxy 1 Lapis	-630
Epoxy 2 Lapis	-655
Wrapping	-635

Tabel 4. Arus dan Potensial Proteksi Pipa Coating Wrapping

Hari ke -	Arus Proteksi (mA)	Potensial Proteksi (mV)
1.	5.91	-1128
2.	5.98	-1109
3.	6.05	-1078
4.	5.79	-1053
5.	5.85	-1050
6.	5.79	-1004
7.	6.38	-1052
8.	5.86	-1033
9.	5.49	-1048
10.	5.75	-981
11.	5.89	-987
12.	5.45	-982
13.	4.88	-965
14.	4.62	-991
15.	4.44	-1000
16.	4.94	-969
17.	4.36	-951
18.	4.64	-1008
19.	4.54	-960
20.	4.60	-959

Tabel 5. Arus dan Potensial Proteksi Pipa Coating Cat Epoxy 2 Lapis

Hari ke -	Arus Proteksi (mA)	Potensial Proteksi (mV)
1.	2.21	-1045
2.	2.11	-1007
3.	2.16	-997
4.	1.98	-981
5.	1.72	-976
6.	1.57	-959
7.	1.32	-931
8.	1.28	-935
9.	1.31	-947
10.	1.45	-941
11.	1.65	-949
12.	1.51	-937
13.	1.25	-931
14.	1.28	-947
15.	1.24	-934
16.	1.26	-938
17.	1.23	-927
18.	1.52	-942
19.	1.47	-948
20.	1.25	-940

Tabel 6. Arus dan Potensial Proteksi Pipa Coating Epoxy 1 Lapis

Hari ke -	Arus Proteksi (mA)	Potensial Proteksi (mV)
1.	7.91	-1032
2.	7.52	-1003
3.	7.61	-997
4.	7.56	-993
5.	7.47	-972
6.	7.31	-961
7.	7.44	-967
8.	7.51	-973
9.	7.47	-971
10.	7.65	-968
11.	7.61	-963
12.	7.37	-951
13.	7.42	-958
14.	7.37	-955
15.	7.43	-967
16.	7.48	-972
17.	7.42	-967
18.	7.62	-971
19.	7.59	-968
20.	7.49	-977

Tabel 8. Nilai Resistivitas Tanah

Hari ke -	Resistivitas Tanah (Ohm.cm)
1.	220.904
2.	223.766
3.	247.089
4.	278.598
5.	297.796
6.	278.103
7.	280.165
8.	272.130
9.	235.662
10.	186.138
11.	202.863
12.	244.958
13.	263.029
14.	267.278
15.	229.563
16.	230.119
17.	218.231
18.	213.953
19.	214.857
20.	219.579

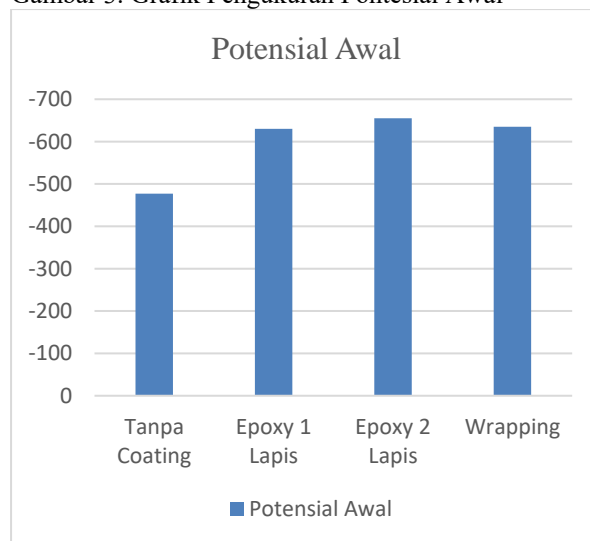
Tabel 7. Arus dan Potensial Proteksi Pipa Tanpa Coating

Hari ke -	Arus Proteksi (mA)	Potensial Proteksi (mV)
1.	17.6	-878
2.	17.6	-994
3.	15.6	-820
4.	17.7	-894
5.	15.7	-848
6.	17.9	-875
7.	17.9	-872
8.	17.1	-924
9.	15.6	-833
10.	20.3	-941
11.	21.2	-959
12.	17.2	-877
13.	22.1	-1025
14.	19.2	-939
15.	16.9	-844
16.	17.4	-977
17.	17.0	-868
18.	17.3	-876
19.	21.1	-987
20.	18.3	-879

Selain pengukuran arus dan potensial proteksi, resistivitas tanah juga diukur untuk mengetahui kondisi tanah.

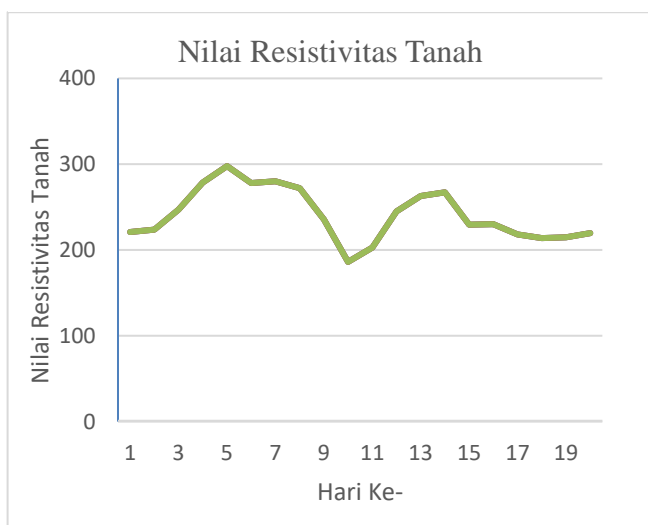
Dari data yang sudah didapat kemudian dirubah menjadi grafik agar mempermudah untuk menganalisa dan melakukan evaluasi.

Gambar 3. Grafik Pengukuran Pontesial Awal



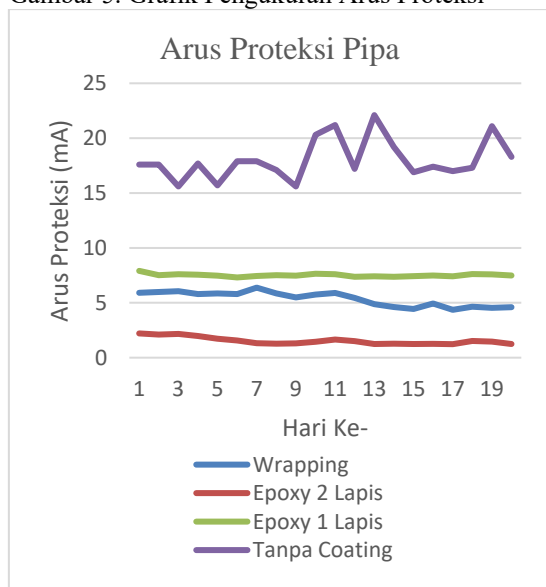
Dari grafik diatas dapat diketahui bahwa pontesial pipa mengalami perbedaan. Pipa yang diberi coating potensialnya lebih tinggi dari pada pipa yang tidak coating. Pemberian coating sebanyak 2 lapis memberikan efek potensial pipa yang lebih tinggi dibandingkan pipa yang diberi coating epoxy 1 lapis dan coating wrapping.

Gambar 4. Grafik Pengukuran Resistivitas Tanah

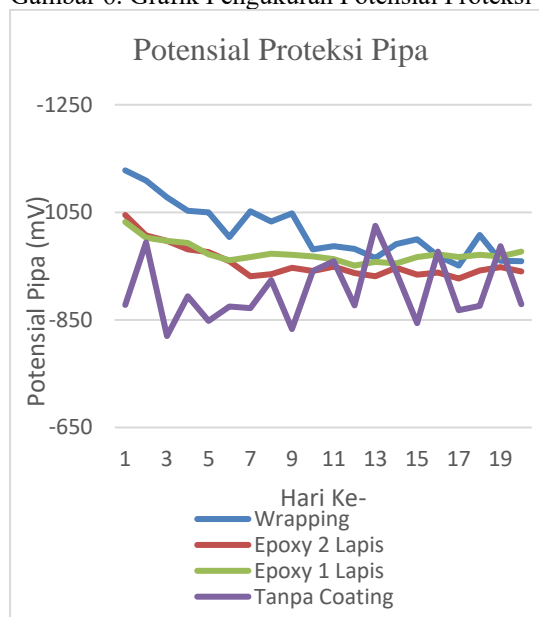


Dari grafik dapat diketahui bahwa resistivitas cenderung fluktuatif, hal ini dapat disimpulkan bahwa kondisi tanah cenderung berubah-ubah. Nilai resistivitas minimum yang diperoleh adalah 186.138 Ohm.cm, sementara nilai resistivitas maksimum adalah 297.796 Ohm.cm. Dari grafik tersebut juga dapat dilihat bahwa rentang resistivitas tanah berkisar antara 200 - 300 Ohm.com, jika dapat disimpulkan dari nilai resistivitas tanah, tanah tersebut termasuk dalam golongan tanah yang korosif. Nilai resistivitas tanah juga dapat menyatakan bahwa kondisi tanah tersebut lembab atau tidak, Semakin kecil nilai resistivitas tanah maka tanah tersebut semakin lembab.

Gambar 5. Grafik Pengukuran Arus Proteksi



Gambar 6. Grafik Pengukuran Potensial Proteksi



Dari hasil tersebut dapat dilihat bahwa pipa yang tidak diberi coating memerlukan arus yang lebih tinggi dibandingkan dengan yang lain, sementara pipa yang diberi cat epoxy 2 lapis memerlukan arus proteksi yang paling kecil. Hal ini menunjukkan bahwa ketebalan coating sangat mempengaruhi arus yang diperlukan untuk proteksi, semakin tebal coating yang diberikan maka semakin kecil arus yang dibutuhkan. Arus proteksi pada pipa tanpa coating cenderung naik turun dan tidak stabil jika dibandingkan dengan pipa yang diberi coating, hal ini diakibatkan karena pada pipa yang tidak diberi coating hanya mengandalkan arus yang diberikan untuk dapat memproteksi dari korosi, sementara pada pipa yang dicoating memiliki sistem proteksi yang berasal dari coating tersebut dan arus paksa yang diberikan. Urutan pipa yang memerlukan arus proteksi yang paling kecil adalah pipa coating epoxy 2 lapis, pipa coating wrapping, pipa coating epoxy 1 lapis, dan pipa tanpa coating. Nilai resistivitas tanah juga mempengaruhi arus proteksi yang diperlukan, saat nilai resistivitas menurun seperti pada hari ke 10 dan 11, serta hari ke 18 dan 19. Pada hari ke 10 dan 11 tersebut konsumsi arus proteksi dari masing masing pipa mengalami kenaikan untuk dapat memproteksi, pada pipa tanpa coating mengalami kenaikan arus proteksi menjadi 20.3 dan 21.2 A, pada pipa yang diberi coating epoxy 1 lapis mengalami kenaikan arus proteksi menjadi 7.65 dan 7.61 A, pada pipa yang diberi coating epoxy 2 lapis mengalami kenaikan arus proteksi menjadi 1.45 dan 1.65 A, pada pipa yang diberi coating wrapping mengalami kenaikan arus proteksi menjadi 5.75 dan 5.89 A. Sementara pada hari ke 18 dan 19 arus proteksi pada pipa tanpa coating mengalami kenaikan menjadi 17.3 dan 21.1 A, pada pipa coating epoxy 1 lapis mengalami kenaikan menjadi 7.62 dan 7.59 A, pada pipa coating epoxy 2 lapis mengalami kenaikan menjadi 1.52 dan 1.47 A, pada pipa coating

wrapping lapis mengalami kenaikan menjadi 4.64 dan 4.54 A.

5. Kesimpulan

Berdasarkan dari hasil penelitian dalam perancangan proteksi katodik arus paksa dapat disimpulkan bahwa :

1. Pengaruh ketebalan coating dapat mempengaruhi besar arus proteksi yang diperlukan untuk memproteksi, pada pipa yang diberi coating epoxy sebanyak 2 lapis memerlukan arus proteksi yang lebih kecil, sementara pipa yang tidak diberi coating memerlukan arus proteksi yang besar.
2. Nilai resistivitas atau kelembaban tanah mempengaruhi besar arus proteksi yang digunakan untuk memproteksi pipa, saat resistivitas tanah menurun kondisi tanah menjadi lebih lembab sehingga memerlukan arus proteksi yang lebih besar, sementara saat resistivitas tanah meningkat atau kelembaban berkurang arus proteksi yang diperlukan akan menurun.

Daftar Pustaka

- ASTM. (2001). *United States of America Patent No. G57 Standard Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four - Electrode Method*.
- Labolatory, B. o. (2013). *Corrosion and Cathodic Protection*. Denver: Bureau of Reclamation Materials Engineering Research Laboratory, Denver Federal Center.
- NACE. (1997). *Houston, TX Patent No. RP-0268-97 Electrical Isolation of Cathodically Protected Pipelines*.
- NACE. (2012). *Houston, TX Patent No. TM0457-2012 Measurement Techniques Related to Criteria for Cathodic Protection on Underground or Submerged Metallic Piping Systems*.
- NACE. (2013). *Houston, TX Patent No. SP0169-2013 Control of External Corrosion of Underground or Submerged Metallic Piping System*.
- Pasaribu, L. (2011). *Studi Analisis Pengaruh Jenis Tanah, Kelembaban, Temperatur, dan Kadar Garam Terhadap Tahanan Pertanahan Tanah*. Depok: Universitas Indonesia.
- Peabody, A. (2001). *Control of Pipeline Corrosion, Second Edition*. Texas: NACE International.
- Saputra, T. Y. (2002). *Perancangan Sistem Proteksi Katodik Metode Arus Paksa pada Pipa PDAM Kota Surabaya Jalur Distribusi Jembatan Merah - Kedung Cowek*. Surabaya: Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI - ITS.

Supomo. (1995). *Diktat Kuliah Korosi*. Surabaya: Jurusan Teknik Perkapalan.

Trethewey, K. d. (1991). *Korosi untuk Mahasiswa dan Rekayasawan*.

