

Pengaruh Variasi Jenis Anoda Korban terhadap Laju Korosi Pipa ASTM A53 pada Media Tanah Liat

Rizal Akbar Mantofani¹⁾, Nani Mulyaningsih^{2)*}, Adityo Noor S. Darmo³⁾

^{1,2,3)}Program Studi Teknik Mesin, Universitas Tidar

E-mail: ¹⁾mantofanirizal412@gmail.com,

Abstrak

Korosi pada pipa baja ASTM A53 yang tertanam di dalam tanah dapat menurunkan umur pakai serta keandalan sistem perpipaan. Salah satu metode yang banyak digunakan untuk mengendalikan korosi adalah proteksi katodik menggunakan anoda korban. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi jenis anoda korban, yaitu magnesium (Mg), aluminium (Al), dan seng (Zn), terhadap laju korosi pipa ASTM A53 pada media tanah liat. Pengujian dilakukan dengan metode polarisasi potensiodinamik mengacu pada ASTM G102 setelah spesimen dipendam selama 30 hari. Nilai laju korosi dihitung berdasarkan arus korosi (I_{corr}) yang diperoleh dari hasil pengujian. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan anoda korban mampu menurunkan laju korosi dibandingkan spesimen tanpa proteksi. Anoda magnesium memberikan perlindungan paling efektif dengan laju korosi sebesar 0,3110 mmpy, atau menurunkan laju korosi sebesar 86,2% dibandingkan spesimen tanpa anoda yang memiliki laju korosi 2,2568 mmpy. Sementara itu, anoda aluminium dan seng juga mampu menurunkan laju korosi, namun efektivitasnya lebih rendah dibandingkan magnesium. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemilihan jenis anoda korban berpengaruh signifikan terhadap efektivitas proteksi katodik pada pipa ASTM A53 di lingkungan tanah liat, dengan magnesium sebagai material anoda yang memberikan kinerja perlindungan terbaik.

Kata kunci: ASTM A53; anoda korban; laju korosi; proteksi katodik; polarisasi potensiodinamik.

Abstract

Corrosion of ASTM A53 steel pipes buried in soil can significantly reduce the service life and reliability of pipeline systems. One of the most effective corrosion mitigation techniques is cathodic protection using sacrificial anodes. This study aimed to investigate the effect of different sacrificial anode materials, namely magnesium (Mg), aluminum (Al), and zinc (Zn), on the corrosion rate of ASTM A53 steel pipes embedded in clay soil. Corrosion testing was conducted using the potentiodynamic polarization method in accordance with ASTM G102 after 30 days of soil exposure. The corrosion rate was determined from the corrosion current density (I_{corr}) obtained from the polarization test. The results demonstrated that the application of sacrificial anodes effectively reduced the corrosion rate compared with the unprotected specimen. The magnesium sacrificial anode exhibited the highest protection performance, resulting in a corrosion rate of 0.3110 mmpy, corresponding to an 86.2% reduction compared with the unprotected specimen, which showed a corrosion rate of 2.2568 mmpy. Aluminum and zinc sacrificial anodes also reduced the corrosion rate, although their protection efficiency was lower than that of magnesium. These findings indicate that the selection of sacrificial anode material plays a significant role in the effectiveness of cathodic protection for ASTM A53 steel pipes in clay soil environments, with magnesium providing the most effective corrosion protection.

Keywords: ASTM A53 steel pipe; cathodic protection; clay soil; corrosion rate; potentiodynamic polarization; sacrificial anode.

1. PENDAHULUAN

Korosi merupakan salah satu penyebab utama degradasi material logam yang digunakan pada sistem perpipaan, khususnya baja karbon yang banyak diaplikasikan pada industri minyak dan gas, distribusi air bersih, serta konstruksi bawah tanah. Reaksi elektrokimia antara logam dengan lingkungan sekitarnya menyebabkan penurunan ketebalan material, berkurangnya kekuatan mekanik, hingga meningkatnya risiko kebocoran dan kegagalan struktur. Oleh karena itu, pengendalian korosi menjadi aspek penting dalam meningkatkan umur pakai dan keandalan sistem perpipaan.

Pipa baja ASTM A53 merupakan salah satu material yang banyak digunakan karena memiliki kekuatan mekanik yang baik, mudah diperoleh, dan relatif ekonomis. Meskipun demikian, material ini tetap rentan mengalami korosi ketika beroperasi pada lingkungan yang mengandung elektrolit, termasuk tanah dengan kadar kelembapan dan keasaman tertentu. Korosi yang terjadi secara terus-menerus dapat menyebabkan penurunan performa pipa dan meningkatkan biaya perawatan maupun penggantian komponen.

Berbagai metode telah dikembangkan untuk mengendalikan korosi, di antaranya pelapisan (*coating*), penggunaan inhibitor, pemilihan material tahan korosi, serta proteksi katodik[1]. Di antara berbagai metode tersebut, proteksi katodik menggunakan anoda korban (*sacrificial anode cathodic protection*) merupakan salah satu metode yang banyak diterapkan karena memiliki instalasi yang relatif sederhana, biaya operasional yang rendah, serta mampu memberikan perlindungan secara kontinu terhadap struktur logam yang tertanam di dalam tanah maupun berada di lingkungan perairan[2]–[4][5].

Material anoda korban yang umum digunakan adalah magnesium, aluminium, dan seng. Ketiga material tersebut memiliki karakteristik elektrokimia yang berbeda sehingga menghasilkan kemampuan proteksi yang berbeda pula. Magnesium mempunyai potensial elektroda paling negatif sehingga mampu memberikan arus proteksi yang lebih besar. Aluminium memiliki kapasitas arus yang tinggi dengan massa yang relatif ringan, sedangkan seng dikenal memiliki kestabilan yang baik pada berbagai kondisi lingkungan[6]. Oleh karena itu, pemilihan jenis anoda korban perlu disesuaikan dengan karakteristik media korosif agar diperoleh efektivitas proteksi yang optimal[7][8].

Beberapa penelitian terdahulu telah melaporkan efektivitas proteksi katodik menggunakan anoda korban pada media air laut, tanah gambut, maupun tanah aluvial[9]. Namun, kajian mengenai perbandingan kinerja anoda magnesium, aluminium, dan seng pada media tanah liat masih relatif terbatas. Padahal karakteristik tanah liat yang memiliki kadar air, porositas, serta resistivitas tertentu dapat memengaruhi mekanisme perpindahan arus proteksi dan laju korosi baja. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa evaluasi kinerja berbagai jenis anoda korban pada media tanah liat masih diperlukan.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi jenis anoda korban, yaitu magnesium, aluminium, dan seng, terhadap laju korosi pipa ASTM A53 pada media tanah liat menggunakan metode polarisasi potensiostatik. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan informasi mengenai jenis anoda korban yang paling efektif untuk meningkatkan perlindungan korosi pipa ASTM A53 yang diaplikasikan pada lingkungan tanah liat.

2. METODE PENELITIAN

a. Material dan Peralatan

Penelitian ini menggunakan pipa baja ASTM A53 sebagai material katoda dengan ketebalan 6 mm. Material anoda korban yang digunakan terdiri atas magnesium (Mg), aluminium (Al), dan seng (Zn). Media korosif yang digunakan adalah tanah liat. Peralatan utama yang digunakan meliputi *CorrTest Potentiostat* yang dioperasikan menggunakan perangkat lunak CS Studio 6 untuk pengujian polarisasi potensiostatik sesuai standar ASTM G102, pH meter untuk mengukur kondisi media, jangka sorong untuk pengukuran dimensi spesimen, serta peralatan preparasi spesimen.

b. Variabel Penelitian

Variabel bebas pada penelitian ini meliputi jenis anoda korban yang terdiri atas magnesium (Mg), aluminium (Al), dan seng (Zn), serta jumlah anoda korban yang dipasang pada spesimen, yaitu 1, 2, dan 4 buah. Variabel terikat adalah laju korosi pipa ASTM A53 yang diperoleh dari hasil pengujian polarisasi potensiostatik. Variabel kontrol meliputi media tanah liat, waktu pengujian selama 30 hari, ukuran spesimen, dimensi anoda korban, serta prosedur preparasi spesimen.

c. Preparasi Spesimen

Spesimen pipa ASTM A53 dipotong menjadi ukuran 100 mm × 50 mm × 6 mm. Permukaan spesimen kemudian diratakan dan diampelas secara bertahap menggunakan amplas nomor grit 100, 180, 400, 600, 1500, dan 2000 hingga diperoleh permukaan yang seragam. Setelah itu, spesimen dibersihkan menggunakan deterjen dan akuades untuk menghilangkan kotoran maupun minyak yang menempel. Anoda korban magnesium, aluminium, dan seng dipotong dengan ukuran 40 mm × 40 mm × 3 mm, kemudian dipasang pada spesimen menggunakan baut sehingga terbentuk sistem proteksi katodik. Jumlah anoda korban divariasikan menjadi 1, 2, dan 4 buah untuk setiap jenis material.

d. Prosedur Pengujian

Spesimen yang telah dirangkai bersama anoda korban ditanam pada media tanah liat selama 30 hari. Setelah periode pengujian selesai, spesimen dibersihkan dan dilakukan pengujian polarisasi potensiostatik menggunakan *CorrTest Potentiostat*. Nilai arus korosi (I_{corr}) yang diperoleh digunakan untuk menghitung laju korosi berdasarkan standar ASTM G102 menggunakan Persamaan (1)[10].

$$Cr = \frac{K \times I_{corr} \times EW}{\rho}$$

Keterangan :

Cr : Laju korosi (mmpy)

K : Konstanta

I_{corr} : Kecepatan arus ($\mu A/cm^2$)

EW : Berat ekuivalen (g)

ρ : Berat jenis spesimen (gr/cm^3)

e. Analisis Data

Nilai laju korosi dari masing-masing variasi anoda korban dibandingkan untuk mengevaluasi efektivitas magnesium, aluminium, dan seng dalam menurunkan laju korosi pipa ASTM A53 pada media tanah liat. Analisis dilakukan berdasarkan nilai laju korosi yang diperoleh dari hasil pengujian polarisasi potensiostatik.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

a. Hasil Uji Laju Korosi

Pengujian laju korosi dilakukan menggunakan metode polarisasi potensiostatik sesuai standar ASTM G102 di Laboratorium Pengecoran dan Pengelasan, Departemen Teknik Mesin, Universitas Sebelas Maret. Sebelum pengujian laju korosi, dilakukan analisis komposisi kimia material ASTM A53 untuk memperoleh nilai *equivalent weight* (EW) yang digunakan sebagai parameter dalam perhitungan laju korosi. Nilai EW dihitung berdasarkan komposisi unsur penyusun material menggunakan perangkat lunak *CorrTest*, dan hasil perhitungannya ditunjukkan pada Gambar 1.

Pure Element		Alloy	
	Atomic Weight (W _i)	Valence (n _i)	Percentage (f _i)
⊗	55.845	2	99.15
⊗	12.011	4	0.157
⊗	28.0855	4	0.194
⊗	54.938044	2	0.405
⊗	30.973762	3	0.026
Add Another Element			
Calculate			
Equivalent Weight: 27.412			

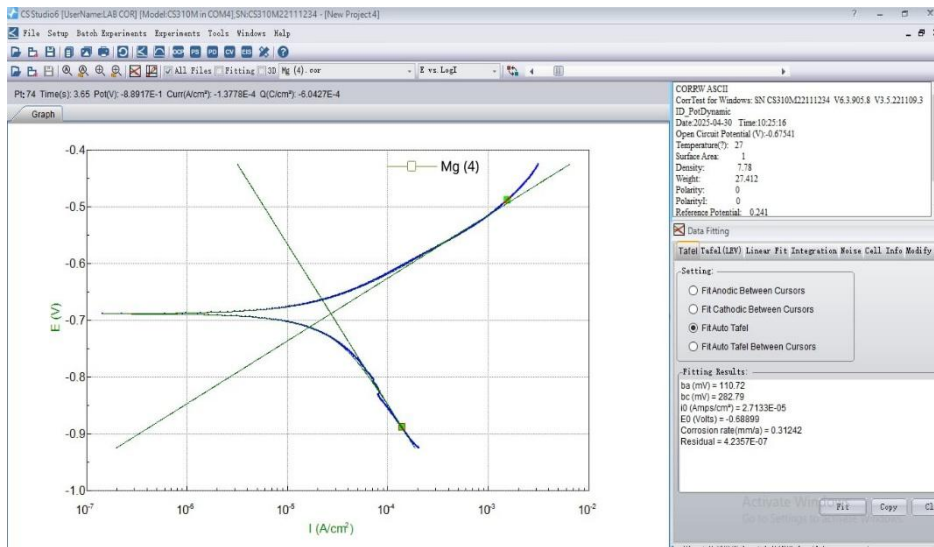
Gambar 1. Tampilan perhitungan *Equivalent Weight* (EW) berdasarkan komposisi kimia material ASTM A53.

Berdasarkan hasil perhitungan pada Gambar 1 diperoleh nilai *equivalent weight* sebesar **27,412 g/equivalent**. Nilai tersebut selanjutnya digunakan bersama nilai arus korosi (*I_{corr}*) hasil pengujian polarisasi potensiostatik untuk menghitung laju korosi masing-masing spesimen sesuai Persamaan (1). Setelah nilai *equivalent weight* (EW) diperoleh, parameter pengujian dimasukkan ke dalam perangkat lunak *CorrTest* sebelum dilakukan pengujian polarisasi potensiostatik. Parameter yang dimasukkan meliputi luas permukaan elektroda, densitas material, nilai *equivalent weight*, konstanta *Stern-Geary*, jenis elektroda acuan, dan temperatur pengujian sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.

Gambar 2. Pengaturan parameter pengujian polarisasi potensiostatik pada perangkat lunak *CorrTest*.

Seluruh parameter tersebut digunakan oleh perangkat lunak untuk memperoleh nilai arus korosi (*I_{corr}*) dari kurva polarisasi. Nilai *I_{corr}* selanjutnya digunakan dalam perhitungan laju korosi sesuai Persamaan (1).

Setelah seluruh parameter pengujian dimasukkan ke dalam perangkat lunak *CorrTest*, dilakukan pengujian polarisasi potensiodinamik untuk memperoleh kurva polarisasi masing-masing spesimen. Kurva tersebut digunakan untuk menentukan nilai potensial korosi (*E_{corr}*) dan arus korosi (*I_{corr}*) melalui ekstrapolasi Tafel. Salah satu contoh hasil pengujian ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Kurva polarisasi potensiodinamik spesimen ASTM A53 menggunakan anoda korban magnesium (4 buah).

Berdasarkan kurva polarisasi pada Gambar 3 diperoleh nilai arus korosi (*I_{corr}*) yang selanjutnya digunakan dalam perhitungan laju korosi. Nilai *I_{corr}* diperoleh dari titik perpotongan kurva anodik dan katodik melalui metode ekstrapolasi Tafel[11]. Semakin kecil nilai *I_{corr}*, semakin rendah laju korosi yang terjadi pada spesimen[10].

Berdasarkan hasil perhitungan yang diperoleh dari mesin polarisasi potensiodinamik diatas, bisa kita hitung secara manual dengan rumus sebagai berikut.

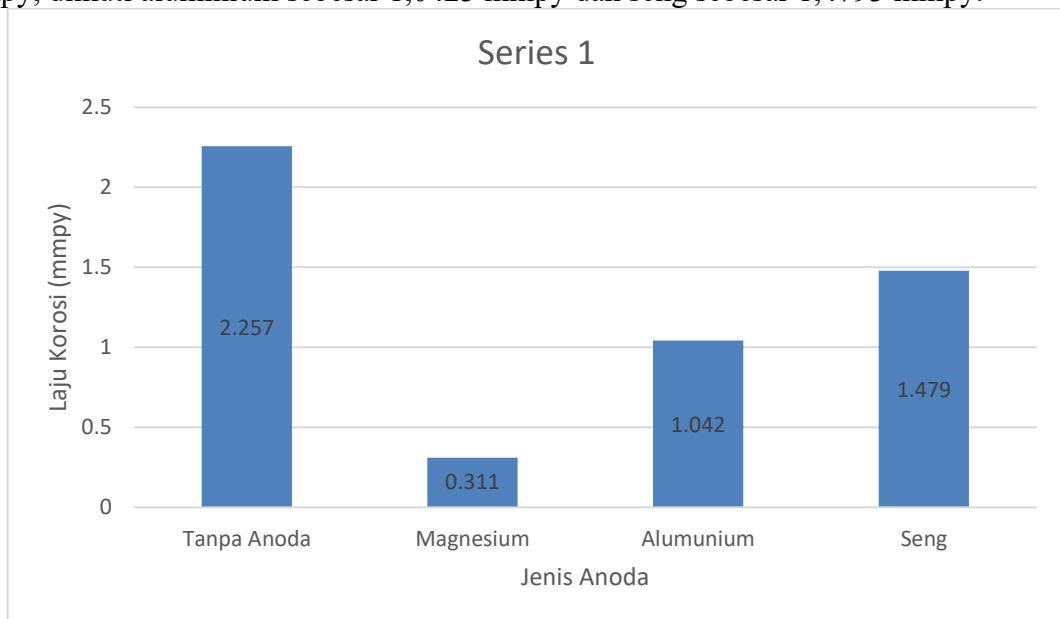
$$\begin{aligned}
 PG &= \frac{K \times I_{corr} \times EW}{\rho} \\
 &= \frac{3,27 \times 10^{-3} \times 195,8 \frac{\mu A}{cm^2} \times 27,412 g}{7,78 gr/cm^3} = 2,2568 mmpy
 \end{aligned}$$

Berikut adalah data hasil perhitungan laju korosi dari beberapa spesimen dalam bentuk tabel:

Tabel 1. Hasil perhitungan laju korosi

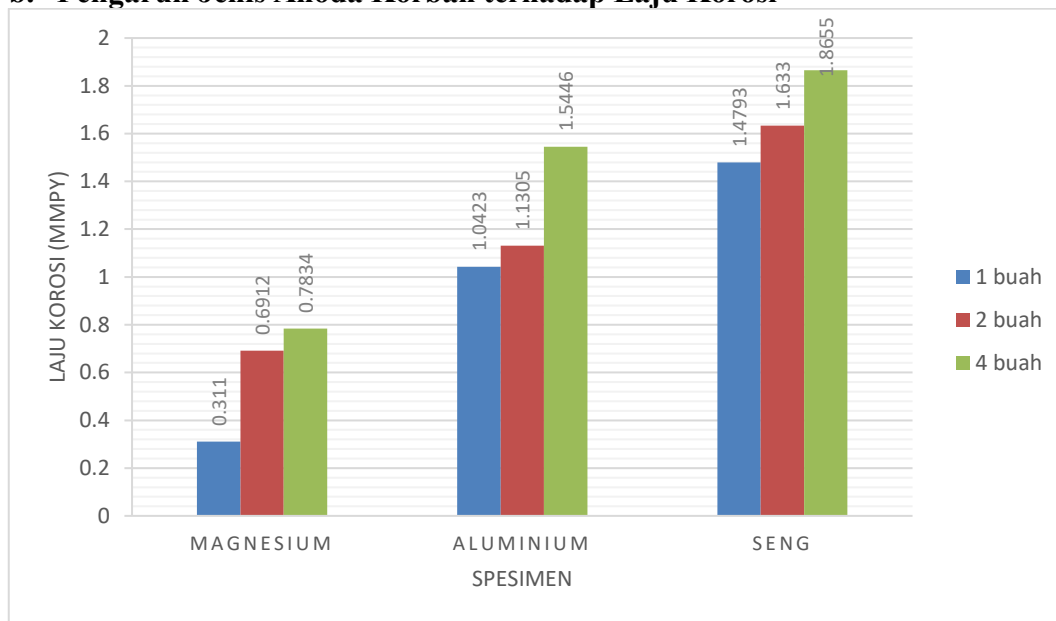
No.	Spesimen	Jumlah Anoda	I_{corr} ($\mu A/cm^2$)	EW (g)	ρ (g/cm ³)	Laju Korosi (mmpy)
1	PG	-	195,8	27,412	7,78	2,2568
2	PG-Mg	1	27,13	27,412	7,78	0,3110
		2	60,89	27,412	7,78	0,6912
		4	68,42	27,412	7,78	0,7834
3	PG-Al	1	90,4	27,412	7,78	1,0423
		2	98,1	27,412	7,78	1,1305
		4	134,1	27,412	7,78	1,5446
4	PG-Zn	1	128,3	27,412	7,78	1,4793
		2	141,8	27,412	7,78	1,6330
		4	161,9	27,412	7,78	1,8655

Gambar 4. Perbandingan laju korosi pipa ASTM A53 tanpa proteksi dan menggunakan anoda korban magnesium, aluminium, dan seng pada konfigurasi terbaik. Anoda magnesium menghasilkan laju korosi terendah sebesar 0,3110 mmpy, diikuti aluminium sebesar 1,0423 mmpy dan seng sebesar 1,4793 mmpy.



Gambar 4. Perbandingan Laju Korosi Pipa ASTM A53

b. Pengaruh Jenis Anoda Korban terhadap Laju Korosi



Gambar 5. Laju Korosi Pipa ASTM A53 pada Berbagai Jenis dan Jumlah Anoda Korban

Berdasarkan Gambar 5, seluruh spesimen yang menggunakan anoda korban menunjukkan laju korosi yang lebih rendah dibandingkan spesimen tanpa proteksi katodik. Spesimen tanpa anoda memiliki laju korosi sebesar 2,2568 mmpy, sedangkan penggunaan anoda korban mampu menurunkan laju korosi hingga berada pada rentang 0,3110–1,8655 mmpy. Hasil tersebut menunjukkan bahwa proteksi katodik dengan anoda korban efektif dalam menghambat proses korosi pada pipa ASTM A53 yang berada di media tanah liat.

Di antara ketiga material anoda yang digunakan, magnesium memberikan perlindungan paling baik dengan nilai laju korosi terendah sebesar 0,3110 mmpy, diikuti aluminium sebesar 1,0423 mmpy, dan seng sebesar 1,4793 mmpy pada konfigurasi terbaik masing-masing. Hal ini menunjukkan bahwa jenis material anoda memiliki pengaruh yang nyata terhadap efektivitas proteksi katodik.

Magnesium memberikan kinerja terbaik karena memiliki potensial elektroda yang lebih negatif dibandingkan aluminium maupun seng. Kondisi tersebut menyebabkan magnesium lebih mudah mengalami oksidasi sehingga mampu menyuplai elektron dalam jumlah yang lebih besar ke permukaan baja ASTM A53[9]. Elektron yang diterima oleh baja akan menghambat reaksi oksidasi pada permukaan logam sehingga laju korosi menurun secara signifikan. Mekanisme tersebut sesuai dengan prinsip proteksi katodik menggunakan anoda korban, yaitu logam yang lebih aktif dikorbankan terlebih dahulu untuk melindungi logam yang memiliki potensial lebih mulia.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian terdahulu yang menyatakan bahwa magnesium merupakan material anoda korban yang sangat efektif untuk aplikasi pada lingkungan tanah karena memiliki driving voltage yang tinggi dan mampu memberikan arus proteksi yang lebih besar dibandingkan aluminium maupun seng[5][12]. Dengan demikian, magnesium menjadi pilihan yang tepat untuk meningkatkan ketahanan korosi pipa baja ASTM A53 yang ditanam pada media tanah liat.

c. Pengaruh Jumlah Anoda Korban

Selain dipengaruhi oleh jenis material, efektivitas proteksi katodik juga dipengaruhi oleh jumlah anoda korban yang dipasang pada spesimen. Pada setiap jenis material terlihat kecenderungan bahwa peningkatan jumlah anoda menyebabkan penurunan laju korosi. Sebagai contoh, pada anoda magnesium laju korosi menurun dari 0,7834 mmpy menjadi 0,6912 mmpy, kemudian mencapai 0,3110 mmpy ketika jumlah anoda ditingkatkan menjadi empat buah.

Kecenderungan yang sama juga terlihat pada anoda aluminium dan seng. Penambahan jumlah anoda meningkatkan luas permukaan aktif yang mengalami oksidasi sehingga arus proteksi yang dialirkan menuju katoda menjadi lebih besar[13]. Akibatnya, proses oksidasi pada permukaan baja semakin terhambat dan laju korosi menjadi lebih rendah[14][15].

Meskipun demikian, efektivitas proteksi tidak hanya dipengaruhi oleh jumlah anoda, tetapi juga oleh sifat elektrokimia material anoda itu sendiri. Hal ini terlihat dari hasil penelitian, di mana magnesium tetap menghasilkan laju korosi yang lebih rendah dibandingkan aluminium dan seng meskipun menggunakan jumlah anoda yang sama[1]. Dengan demikian, pemilihan material anoda dan jumlah anoda merupakan dua faktor yang saling memengaruhi dalam menentukan keberhasilan sistem proteksi katodik.

d. Perbandingan dengan Penelitian Sebelumnya

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa anoda magnesium memberikan efektivitas proteksi tertinggi dibandingkan aluminium dan seng[16]. Temuan ini sejalan dengan penelitian Anwar et al. (2025) yang melaporkan bahwa magnesium memberikan potensi perlindungan tertinggi dibandingkan seng[17]. Selain itu, Mulyaningsih et al. (2022) juga melaporkan bahwa penerapan proteksi katodik pada sistem perpipaan yang tertanam di dalam tanah efektif mengurangi laju korosi secara signifikan[3]. Perbedaan tingkat perlindungan yang diperoleh pada masing-masing material anoda berkaitan dengan perbedaan potensial elektrokimia dan kemampuan setiap material dalam menghasilkan arus proteksi. Oleh karena itu, pemilihan jenis anoda harus mempertimbangkan karakteristik lingkungan operasi agar sistem proteksi katodik dapat bekerja secara optimal[18].

4. SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa penerapan proteksi katodik menggunakan anoda korban efektif dalam menurunkan laju korosi pipa ASTM A53 pada media tanah liat. Jenis material anoda memberikan pengaruh terhadap efektivitas proteksi, di mana anoda magnesium menghasilkan laju korosi paling rendah dibandingkan aluminium dan seng. Pada konfigurasi terbaik, penggunaan anoda magnesium menghasilkan laju korosi sebesar 0,3110 mmpy, atau menurunkan laju korosi sekitar 86,2% dibandingkan spesimen tanpa proteksi yang memiliki laju korosi sebesar 2,2568 mmpy.

Selain jenis material, jumlah anoda korban juga memengaruhi efektivitas proteksi katodik. Peningkatan jumlah anoda dari 1 menjadi 4 buah menunjukkan kecenderungan penurunan laju korosi pada seluruh jenis material yang digunakan. Hal ini menunjukkan bahwa pemilihan material anoda serta jumlah anoda merupakan faktor penting dalam meningkatkan efektivitas sistem proteksi katodik pada pipa ASTM A53 yang diaplikasikan di lingkungan tanah liat.

Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengevaluasi pengaruh parameter lain yang dapat memengaruhi efektivitas proteksi katodik, seperti jarak pemasangan anoda, ukuran atau luas permukaan anoda, serta variasi jenis media tanah. Selain itu, karakterisasi permukaan spesimen setelah pengujian menggunakan metode seperti *Scanning Electron Microscopy* (SEM) atau *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDS) dapat dilakukan untuk memberikan informasi yang lebih komprehensif mengenai mekanisme korosi dan efektivitas perlindungan yang dihasilkan oleh masing-masing jenis anoda korban.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. S. P. T. Iswanto, "Desain Proteksi Katodik pada Struktur Baja di Laut dan di Darat untuk Masa Layan 10 Tahun," vol. 2, no. 2, pp. 77–86, 2020.
- [2] D. Rosalina and S. Komalasari, "Proteksi Katodik Dengan Menggunakan Anoda Korban Pada Struktur Baja Karbon Untuk Mengendalikan Laju Korosi," vol. 6, pp. 2–6, 2019.
- [3] N. Mulyaningsih, A. Muhib, and S. Hastuti, "Penggunaan Proteksi Katodik pada Pipa Air PDAM di Lingkungan Tanah Alluvial," vol. 6, no. 2, pp. 65–68, 2022.
- [4] T. T. Windriawan, N. Mulyaningsih, and A. N. S. H. Darmo, "Pengaruh Jarak Anoda Korban Aluminium Terhadap Laju Korosi Baja ASTM A36 Dalam Lingkungan Air Laut," *Majamecha*, vol. 7, no. 1, pp. 1–12, 2025.
- [5] H. Wicaksono and B. Sulaksono, "ANALYSIS OF CATHODIC PROTECTION SYSTEM TYPE OF VICTIM ANODES USING MAGNESIUM AND ZINC," pp. 9–10, 2019.
- [6] "Electrochemical Evaluation of Mg and a Mg-Al 5%Zn Metal Rich Primers for Protection of Al-Zn- Mg-Cu Alloy in NaCl A. Korjenic".
- [7] R. Indarti, Y. T. Sarungu, and C. Magesang, "KARAKTERISASI SIMULATOR SISTEM PROTEKSI PERPIPAAN YANG TERTANAM DALAM TANAH," pp. 41–45, 1997.
- [8] T. Kyada, S. Patel, A. Babu, S. Lulaniya, and T. Rakholiya, "Aluminum Alloy as Sacrificial Anode for Corrosion Protection : A Review," vol. 11, no. 2, pp. 1–13, 2025.
- [9] K. Lama, "Rancangan Dasar Perhitungan Proteksi Katodik dengan Menggunakan Anoda Korban Pada Struktur Baja Anjungan Minyak di Lingkungan Air Laut," vol. 45, no. 1, pp. 79–90, 2011.
- [10] J. R. Material *et al.*, "FT-UMSU FT-UMSU," vol. 7, no. 2, pp. 236–243, 2024.
- [11] P. Potensiodinamik, B. Beton, K. Puspipitek, and T. Selatan, "AIR LAUT DAN KARBONAT," pp. 165–171, 2016.
- [12] D. N. Abdulamer, "Journal of Petroleum Research & Studies," no. 9.
- [13] S. M. A. Bukhari, S. A. R. Gardezi, N. Husnain, R. Ahmad, M. F. Zaman, and R. Qurashi, "Asia - Pacific Journal of Science and Technology Modelling and simulation of cathodic protection using magnesium sacrificial anode for steel Bent-Y-Pipe in seawater environment".
- [14] L. Pongsapan and A. Suhadi, "Efektivitas Penggunaan Anoda Korban Paduan Seng Pada Pelat Baja Kapal AISI E 2512 Terhadap Laju Korosi Di Dalam Media Air Laut," vol. 1, no. 1, pp. 40–47.
- [15] D. Tamhane, J. Thalapil, S. Banerjee, and S. Tallur, "Smart cathodic

- protection system for real-time quantitative assessment of corrosion of sacrificial anode based on Electro-Mechanical Impedance (EMI),” 2024.
- [16] G. Priyotomo and L. Nuraini, “The Selection of Magnesium alloys as Sacrificial Anode for the Cathodic Protection of Underground Steel Structure,” vol. 51, no. 2, pp. 78–82, 2017.
- [17] S. Anwar, Y. Octavitri, I. Purnaningratri, and I. M. Sofian, “Electrochemical Performance of Sacrificial Anode Metals in Preventing Corrosion on Ships : A Literature Review,” vol. 4, no. 1, pp. 2208–2216, 2025.
- [18] A. Mahgoub and G. Houtan, “Limitation of Aluminum Anode in Cathodic Protection Applications,” vol. 10, no. 2, pp. 9–17, 2024.