

Efektifitas Perlindungan Korosi Aluminium Menggunakan Inhibitor Ekstrak Labu Kuning : Studi Elektrokimia dan Permukaan

Syarif Hidayatullah¹⁾, Nasmi Herlina Sari²⁾, Maharsa Pradityatama³⁾, Suteja⁴⁾.

¹⁻⁴⁾Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik, Universitas Mataram

E-mail: ¹⁾syarift008@gmail.com, ²⁾n.herlinasari@unram.ac.id, ³⁾maharsa@unram.ac.id,
⁴⁾suteja@unram.ac.id.

Abstrak

Penelitian kami berfokus pada peningkatan potensi ekstrak labu kuning sebagai penghambat korosi yang berkelanjutan untuk aluminium (Al) dalam larutan 1 M HCl. Skrining fitokimia dan aktivitas antioksidan diidentifikasi. Berbagai metodologi investigasi termasuk teknik eksperimental seperti Polarisasi Potensiodinamik (PDP) digunakan untuk mengevaluasi keefektifan inhibitor ekstrak labu kuning ini dalam menghambat korosi. Karakteristik permukaan Al yang terkorosi diperiksa dengan menggunakan kombinasi *Scanning Electron Microscopy* (SEM). Hasil elektrokimia menunjukkan bahwa efektivitas inhibitor bergantung pada konsentrasinya disini mencapai 82.28% pada 3000 ppm inhibitor ekstrak labu kuning. PDP menunjukkan bahwa kontrol inhibisi campuran secara efektif memperlambat korosi Al. Selanjutnya perilaku adsorpsi inhibitor ekstrak labu kuning ke Al mengikuti model isoterm Langmuir dengan sifat fisisorpsi. Analisis SEM lebih lanjut memverifikasi perubahan signifikan dalam morfologi permukaan dan kekasaran Al. Mekanisme adsorpsi dari inhibitor pada permukaan Al berhasil membentuk lapisan pelindung pada permukaan Al sehingga mengurangi laju korosi.

Kata Kunci: Al, Inhibitor, Korosi, Labu.

Abstract

Our research focuses on enhancing the potential of pumpkin extract as a sustainable corrosion inhibitor for aluminum (Al) in a 1 M HCl solution. Phytochemical screening and antioxidant activity were identified. Various investigative methodologies, including experimental techniques such as Potentiodynamic Polarization (PDP), were used to evaluate the effectiveness of this pumpkin extract inhibitor in preventing corrosion. The surface characteristics of corroded Al were examined using a combination of scanning electron microscopy (SEM). Electrochemical results show that the effectiveness of the inhibitor depends on its concentration, reaching 82.28% at 3000 ppm of pumpkin extract inhibitor. PDP shows that mixed inhibition control effectively slows down the corrosion of Al. Furthermore, the adsorption behavior of the pumpkin extract inhibitor on Al follows the Langmuir isotherm model with physisorption characteristics. Further SEM analysis verified significant changes in the surface morphology and roughness of Al. The adsorption mechanism of the inhibitor on the Al surface successfully formed a protective layer on the Al surface, thereby reducing the corrosion rate.

Keywords: Al, Inhibitor, Corrosion, Pumpkin.

1. PENDAHULUAN

Banyak penelitian sudah menyebutkan bahwa aluminium dan baja sebagai dua logam yang paling banyak digunakan dalam aplikasi industri [1]. Al memiliki banyak sifat khas yang membuat Al sangat disukai untuk berbagai aplikasi teknik terutama dalam konteks struktural [2]. Selain itu Al bereaksi dengan cepat dan tidak dapat dipulihkan dengan oksigen menghasilkan pembentukan lapisan oksida yang melekat kuat pada permukaan. Meskipun lapisan pelindung dapat melindungi permukaan logam di lingkungan korosif tertentu tetapi lapisan ini rentan terhadap pelarutan dalam media korosif terutama yang mengandung ion klorida (Cl^-) yang menyebabkan kerusakan substrat melalui korosi [3].

Korosi menandakan degradasi logam dan paduan yang terus-menerus melalui reaksi kimia atau elektrokimia. Penelitian sebelumnya telah mengungkapkan bahwa biaya korosi dapat mencapai 3% hingga 5% dari Produk Nasional di berbagai negara maju yang mengakibatkan kerugian ekonomi yang signifikan dalam skala global [4], [5]. Berdasarkan hal itu, banyak komunitas ilmiah untuk terus mengeksplorasi strategi inovatif untuk mengurangi dampak berbahaya dari korosi [6]. Berbagai teknik pencegahan korosi digunakan tergantung pada jenis korosi dan faktor lingkungan yang ada.

Inhibitor korosi sering digunakan untuk mengendalikan korosi dalam sistem tertutup. Biasanya inhibitor korosi organik tradisional menggabungkan unsur-unsur seperti oksigen (O), nitrogen (N), sulfur (S), dan fosfor (P), juga gugus fungsi seperti gugus hidroksil dan karboksil, ikatan π terkonjugasi tak jenuh, dan cincin aromatik [7], [8], [9]. Meskipun memiliki kinerja yang efektif dalam menghambat korosi, inhibitor organik konvensional menghadapi berbagai keterbatasan seperti biaya tinggi, kemampuan degradasi yang terbatas, dan toksisitas yang substansial [10]. Akibatnya, ada dorongan untuk mengembangkan alternatif yang berkelanjutan yang dikenal sebagai inhibitor korosi ramah lingkungan. Bahan-bahan alami ini berasal dari sumber organik seperti buah-buahan, daun-daunan, sampah organik, dan lain-lain [11].

Dalam kerangka kerja penelitian ini, tujuan utama penelitian adalah untuk meningkatkan efisiensi inhibitor ekstrak labu kuning sebagai penghambat berkelanjutan untuk Al dalam larutan natrium klorida (HCl). Dengan menggunakan

metodologi seperti analisis kimia elektro (uji *PDP*), *isothermal adsorption*, dan karakterisasi permukaan (SEM). Manfaat penelitian ini juga untuk meningkatkan proses pengoptimalan penghambatan korosi. Metode yang kami gunakan ini sangat penting untuk mengatasi tantangan korosi yang lazim terjadi di industri terutama dalam rekayasa struktur.

2. METODE PENELITIAN

a. Bahan dan Larutan

Sampel Aluminium yang digunakan dalam penelitian ini memiliki komposisi kimia yaitu Mg (0.03 %), Al (99.3 %), Fe (0.02 %), Cu (0.03 %), Zn (0.07 %), V (0.04 %), Ti (0.12 %), Si (0.25 %), Mn (0.14 %) [12]. Sampel kerja memiliki dimensi $1.0 \times 1.0 \times 0.5 \text{ cm}^3$. Sebelum uji elektrokimia hanya satu sisi elektroda terpapar larutan korosi dan lima sisi lainnya ditutup dengan resin epoksi. Sebelum uji korosi dilakukan, semua sampel diampelas menggunakan mesh 500–1000. Sebelum uji korosi, media korosi yang digunakan adalah 1 M HCl. Selain itu, inhibitor korosi yang digunakan berasal dari ekstrak labu kuning. Variasi inhibitor yang digunakan setiap pengujian blank, 1000, 2000, 3000, dan 4000 (*ppm*) yang ditambahkan pada larutan korosif 1 M HCl.

b. Pengujian Korosi

Untuk melakukan uji potensiodinamika polarisasi aluminium, alat uji laju korosi Autolab Metrohm PGSTAT 204 dengan tiga elektroda digunakan. Spesimen yang ditempatkan pada elektroda kerja dalam sel ini, platina digunakan sebagai elektroda pembanding, dan Ag/Ag-Cl (KCl 3M) digunakan sebagai elektroda reference. Sebelum pengujian korosi dilakukan, spesimen uji direndam dahulu pada larutan korosif yang sudah terpasang pada alat Uji polarisasi kurang lebih 15 menit agar reaksi antara Al dan larutan sudah mulai bereaksi. Kemudian kecepatan pemindaian yang digunakan 0,1 *mV/s* dan frekuensi dari 1000 *Hz* hingga 0,1 *Hz*. Open circuit potential (*OCP*) direcord dalam waktu sampai 120 detik sampai pengujian korosi berakhir. Selanjutnya, data polarisasi dari plot Tafel diekstrapolasi dan dianalisis menggunakan perangkat lunak nova 1.11 untuk mendapatkan beberapa parameter korosi aluminium seperti tafel slope anodik (β_a), tafel slope katodik (β_c), potensial korosi (E_{corr}), kerapatan arus korosi (i_{corr}) dan laju korosi (*CR*). Rumus di bawah ini digunakan untuk menghitung efisiensi penghambatan

korosi dan koefisien interaksi katodik dan anodik (f_c , f_a) inhibitor ekstrak labu kuning yang didefinisikan sebagai [13], [14]:

$$\eta \% = \frac{I_{corr}^0 \times I'_{corr}}{I_{corr}^0} \times 100 \dots \dots \dots (1)$$

$$f_c = \frac{i}{i_0} \exp [(E - E_0)/\beta_c] \dots \dots \dots (2)$$

$$f_a = \frac{i}{i_0} \exp [(E_0 - E)/\beta_a] \dots \dots \dots (3)$$

c. Adsorption isotherms

Data θ digunakan untuk mengevaluasi kegunaan model isoterm yang berbeda seperti model Langmuir, Freundlich, Frumkin, dan Temkin yang masing-masing digambarkan oleh Persamaan seperti di bawah ini [15] :

$$\frac{C}{\theta} = \frac{1}{K_{ads}} + C \dots \dots \dots (4)$$

$$\log \theta = \log K_{ads} + n \log C \dots \dots \dots (5)$$

$$\log \frac{\theta}{C} = \log K_{ads} - a\theta \dots \dots \dots (6)$$

$$\log \left\{ \frac{\theta}{(1-\theta)C} \right\} = \log K_{ads} + a\theta \dots \dots \dots (7)$$

di mana C , θ , K_{ads} , n , a masing-masing menunjukkan konsentrasi inhibitor, tingkat cakupan permukaan, kesetimbangan adsorpsi konstanta, parameter ukuran dan istilah interaksi lateral. Energi bebas adsorpsi (ΔG_{abs}) ditunjukkan kedalam persamaan di bawah ini [16] :

$$\Delta G_{abs} = -2.303RT \log(K_{ads} 55.5K) \dots \dots \dots (8)$$

d. Karakterisasi Permukaan (SEM)

Pengujian SEM dilakukan pada permukaan Aluminium pada variasi blank yang direndam secara bebas dalam 1 M HCl dan Aluminium yang mengandung 3000 ppm inhibitor ekstrak labu kuning pada suhu 27 °C selama 12 jam.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

a. PDP (Potensiodinamik Polarisasi)

Hasil dari percobaan ini disajikan dalam bentuk kurva polarisasi yang menggambarkan hubungan antara kerapatan arus dan potensial yang diterapkan. Kurva-kurva ini dapat ditemukan pada gambar 1. Masing-masing kurva yang dihasilkan pada gambar di bawah ini menampilkan area di mana reaksi katodik dan anodik terjadi.

Tabel 1. Parameter korosi

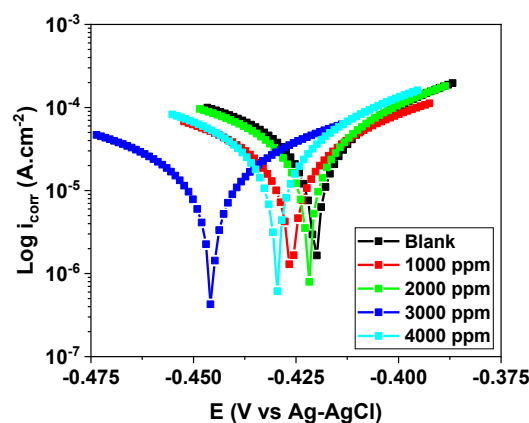
C (ppm)	β_a ($mV\ dec^{-1}$)	β_c (mV/dec)	E_{corr} (mV_{SCE})	i_{corr} ($\mu A/cm^2$)	f_a	f_c	CR ($mm/year$)	IE (%)
blank	152.8	81.1	-420	171	-	-	1.352	-
1000	141.4	101.4	-426	70.8	0.431	0.391	0.562	58.43
2000	66.4	51.3	-421	51.1	0.303	0.293	0.401	70.27
3000	85.1	74.2	-445	30.1	0.236	0.125	0.239	82.28
4000	67.1	57.1	-429	46.8	0.312	0.233	0.370	72.60

Hasil dari tabel 1 ini menunjukkan bahwa densitas arus korosi (I_{corr}) menurun drastis dengan meningkatnya konsentrasi inhibitor yang mengarah pada peningkatan efisiensi inhibisi. Suatu senyawa biasanya diklasifikasikan sebagai inhibitor tipe anodik atau katodik ketika perubahan nilai E_{corr} lebih besar dari 85 mV [14]. Karena perpindahan terbesar dari potensial korosi adalah sekitar 25 mV (Tabel 1) setelah penambahan inhibitor variasi 3000 ppm menunjukkan bahwa inhibitor bertindak sebagai inhibitor tipe campuran. Hasil perhitungan untuk koefisien interaksi anodik dan katodik kurang dari 1 dan perbedaan antara nilai tidak begitu signifikan menandakan bahwa inhibitor dapat lebih efektif menghambat pelarutan anodik aluminium dan juga memperlambat reaksi evolusi hidrogen katodik.

Interaksi katodik dan anodik yang disebutkan di atas dipengaruhi oleh penambahan konsentrasi inhibitor. Akibatnya inhibitor membatasi reaksi penarikan hidrogen dan membentuk lapisan material yang teradsorpsi pada permukaan logam sehingga berdampak pada interaksi katodik dan anodik. Bahan anoda adalah

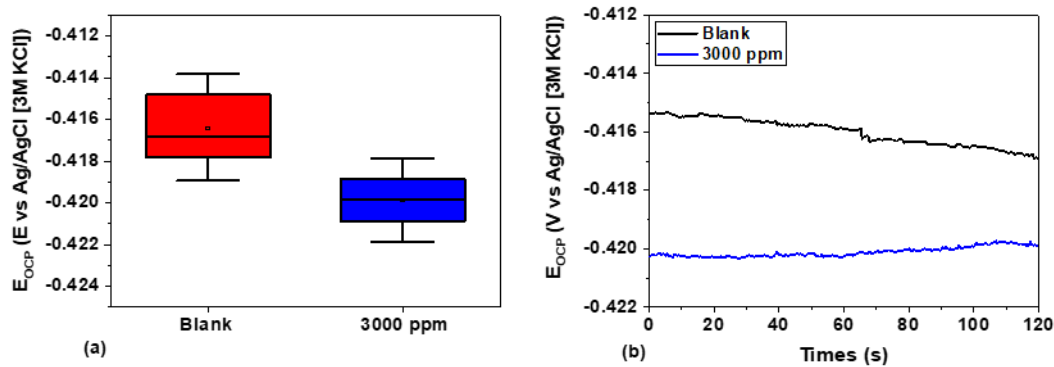
material terkorosi yang mengalami oksidasi dan menghasilkan ion dan elektron bebas. Hidroksida yang merupakan produk dari elektron bebas mereduksi oksigen dan memberikan perilaku katodik [17].

Menurut hasil eksperimen dari ekstrak labu kuning ini telah menunjukkan kinerja penghambatan korosi yang luar biasa mencapai nilai efisiensi inhibisi hingga 82.28 % pada konsentrasi inhibitor 3000 ppm. Diperkirakan bahwa mekanisme fisisorpsi dan atau kemisorpsi yang melibatkan adsorpsi molekul pada permukaan aluminium menyebabkan proses penghambatan. Lihat gambar 1. Hasil kurva tafel menunjukkan bahwa korosi aluminium dalam larutan 1 M HCl dihambat oleh adanya ekstrak labu kuning. Hasil kurva polarisasi dengan jelas menunjukkan bahwa mekanisme penghambatan melibatkan penghalangan permukaan aluminium oleh molekul inhibitor melalui proses adsorpsi. Dimana fenomena adsorpsi dipengaruhi oleh karakteristik logam dan struktur kimia inhibitor [18].



Gambar 1. Kurva Polarisasi

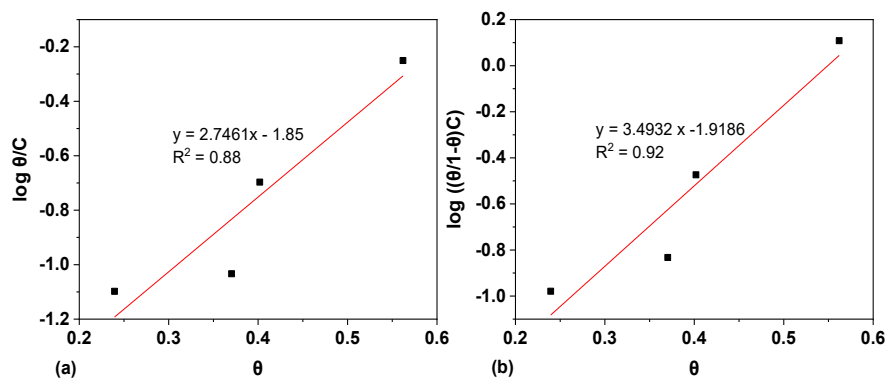
Kurva *OCP* (Gambar 2) menunjukkan nilai *OCP* yang stabil dicapai setelah 120 detik untuk spesimen aluminium yang direndam dalam 1 M HCl dengan inhibitor 3000 ppm dan tanpa inhibitor/blank. Gambar 2 (a) menunjukkan rata-rata dan deviasi standar dari hasil *OCP* yang dipisahkan berdasarkan parameter *OCP* dari variasi inhibitor blank dengan inhibitor 3000 ppm. Dalam analisis awal dapat dilihat bahwa inhibitor 3000 ppm dapat menurunkan nilai *OCP* sampel dibandingkan dengan sampel tanpa inhibitor. Di antara Nilai *OCP* spesimen yang direndam dalam 1 M HCl dengan inhibitor 3000 ppm sedikit lebih negatif dibandingkan dengan tanpa inhibitor gambar 3(b) [19].



Gambar 2. *OCP* (a) Kurva *OCP* (b) pengukuran nilai *OCP* kedua spesimen

b. Analisa adsorpsi

Dengan menyelidiki proses adsorpsi permukaan dengan menggunakan hasil *PDP* empat model isoterm adsorpsi umum digunakan untuk menggambarkan perilaku adsorpsi molekul inhibitor ekstrak labu kuning seperti yang ditunjukkan pada gambar 3. Secara umum semakin dekat koefisien korelasi linier (R^2) dengan 1 maka persamaan tersebut memiliki keakuratan yang tinggi [20]. Berdasarkan nilai R^2 dari keempat model dapat disimpulkan bahwa proses adsorpsi inhibitor korosi mengikuti model adsorpsi isotermal Frumkin dengan nilai R^2 terbesar. Dari tabel 2 K_{ads} memiliki nilai 82.91.



Gambar 3

Biasanya, nilai K_{ads} yang diperoleh dapat digunakan untuk menghitung energi bebas Gibbs standar adsorpsi (ΔG_{ads}) dan kemudian menentukan jenis adsorpsi. Dari tabel 2 nilai ΔG_{ads} dari persamaan frumkin ini kita dapatkan adalah -20.88 *kJ/mol* yang menunjukkan bahwa inhibitor ekstrak labu kuning memiliki sifat fisisorpsi dikaitkan dengan interaksi elektrostatik untuk inhibitor terionisasi pada permukaan aluminium serta gaya van der Waals antar molekul [19], [21].

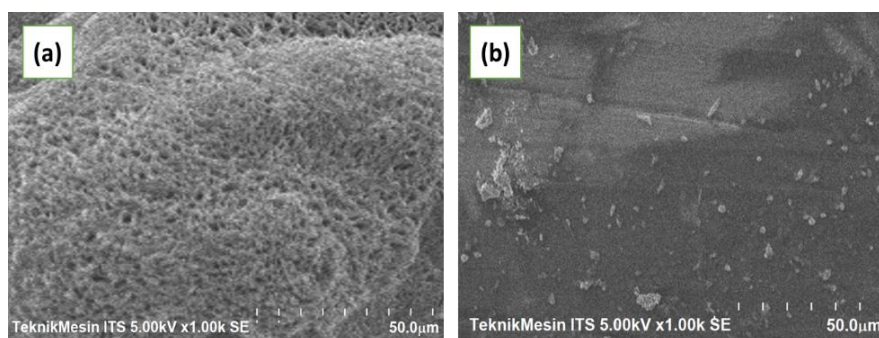
Proses eksotermik ditunjukkan dengan entalpi adsorpsi yang negative yang menunjukkan molekul inhibitor korosi secara spontan teradsorpsi ke permukaan logam dalam proses eksotermis membentuk lapisan yang stabil pada saat adsorpsi [22]. Peningkatan entropi yang signifikan mengikuti proses adsorpsi yang mendorong adsorpsi inhibitor ke permukaan logam.

Tabel 2. Parameter adsorpsi

Persamaan adsorpsi	Persamaan Linier	R^2	K_{ads}	ΔG_{ads}
Langmuir	$y = 3.4615x - 1.1328$	0.80	0.88	-9.63
Freundlich	$y = -0.4356x - 0.2743$	0.56	1.88	-11.51
Temkin	$y = 2.7461x - 1.85$	0.88	70.79	-20.49
Frumkin	$y = 3.4932x - 1.9186$	0.92	82.91	-20.88

c. Karakteristik permukaan

Gambar 4 Menampilkan mikrograf permukaan aluminium dengan tidak adanya inhibitor gambar 4(a) dimana permukaan aluminium yang menunjukkan ketidakteraturan dalam bentuk lubang dan gumpalan karena terkikisnya permukaan aluminium oleh reaksi oksidasi dapat diamati. Pengamatan ini menunjukkan bahwa aluminium telah mengalami korosi yang signifikan akibat agresivitas lingkungan yang korosif [23].

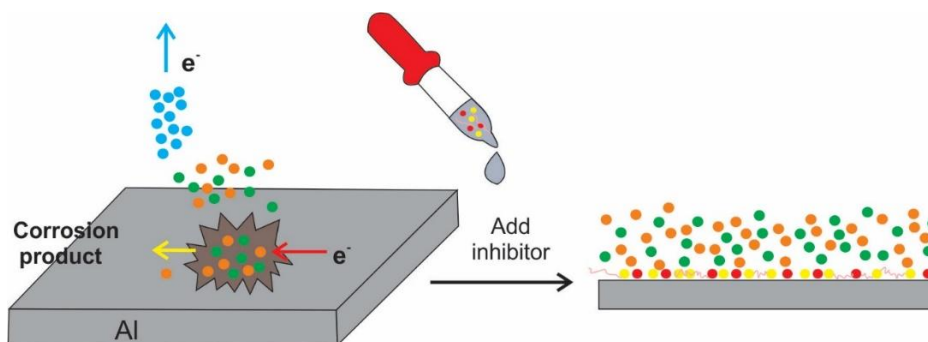


Gambar 4. Spesimen SEM (a) blank (b) 3000 ppm

Sebaliknya sampel aluminium yang direndam dalam larutan yang mengandung inhibitor 3000 ppm menunjukkan permukaan yang lebih halus gambar 4(b). Ini menunjukkan bahwa molekul inhibitor bekerja dengan membentuk lapisan yang teradsorpsi pada permukaan baja sehingga menghambat proses pelarutan dan secara efektif mengurangi laju korosi [24].

d. Mekanisme inhibitor

Larutan asam klorida klinis memiliki efek korosif pada permukaan aluminium yang memiliki efek protektif pada permukaan logam. Ini karena energi adsorpsi lebih negatif dari pada Cl^- dan jari-jari ioniknya lebih besar daripada Cl^- maka inhibitor ekstrak labu kuning lebih mudah menempati situs aktif pada permukaan Al [25]. Inhibitor diadsorpsi pada permukaan aluminium menghasilkan muatan negatif. Selain itu, elektron tunggal heteroatom S dan O pada gugus fungsi pada ekstrak labu kuning membentuk ikatan kimia dengan orbital kosong pada susunan elektron valensi Al $3s^2 3p^1$ dan teradsorpsi pada permukaan aluminium. Al memberikan elektron ke N membentuk ikatan umpan balik yang mengikat permukaan besi. Ekstrak labu kuning sebagai inhibitor membentuk lapisan pelindung pada permukaan aluminium untuk mencapai penghambatan korosi [26], [27].



Gambar 5. Mekanisme inhibitor

4. KESIMPULAN

Penelitian ini dibuat untuk menghitung kinerja penghambatan korosi dari ekstrak labu kuning. Data variasi inhibitor yang diprediksi sesuai dengan data eksperimen yang diperoleh dari pengukuran elektrokimia seperti *PDP*. Ekstrak labu kuning bertindak sebagai inhibitor korosi yang sangat baik untuk aluminium dalam larutan 1 M HCl dan efisiensi penghambatannya meningkat dengan peningkatan konsentrasi dan menurun pada konsentrasi akhir. Kurva polarisasi menunjukkan bahwa sistem ini bertindak sebagai penghambat korosi tipe katodik dan anodik atau campuran. Adsorpsi inhibitor yang diprediksi pada permukaan aluminium mematuhi isotherm adsorpsi Frumkin dengan sifat fisisorpsi. inhibitor teradsorpsi pada permukaan aluminium sebagai bentuk perlindungan dari reaksi korosi.

Efektifitas perlindungan ini ditunjukkan dari hasil Analisa spektrometer seperti SEM.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Shanmugapriya, M. Ravi, S. Ravi, M. Ramasamy, A. Maruthapillai, and A. S. J, "Electrochemical and Morphological investigations of Elettaria cardamomum pod extract as a green corrosion inhibitor for Mild steel corrosion in 1 N HCl," *Inorg Chem Commun*, vol. 154, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.inoche.2023.110958.
- [2] L. N. Emembolu, P. E. Ohale, C. E. Onu, and N. J. Ohale, "Comparison of RSM and ANFIS modeling techniques in corrosion inhibition studies of Aspilia Africana leaf extract on mild steel and aluminium metal in acidic medium," *Applied Surface Science Advances*, vol. 11, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.apsadv.2022.100316.
- [3] Y. Qiang, L. Guo, H. Li, and X. Lan, "Fabrication of environmentally friendly Losartan potassium film for corrosion inhibition of mild steel in HCl medium," *Chemical Engineering Journal*, vol. 406, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.cej.2020.126863.
- [4] S. Zehra, M. Mobin, and J. Aslam, "1 - An overview of the corrosion chemistry," in *Environmentally Sustainable Corrosion Inhibitors*, C. M. Hussain, C. Verma, and J. Aslam, Eds., Elsevier, 2022, pp. 3–23. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85405-4.00012-4>.
- [5] R. Aslam, M. Mobin, S. Zehra, and J. Aslam, "A comprehensive review of corrosion inhibitors employed to mitigate stainless steel corrosion in different environments," Oct. 15, 2022, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.molliq.2022.119992.
- [6] T. Pesha, V. L. Mulaudzi, M. L. Cele, M. P. Mothapo, and F. Ratshisindi, "Evaluation of corrosion inhibition effect of glycerol stearate on aluminium metal by electrochemical techniques," *Arabian Journal of Chemistry*, vol. 16, no. 7, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.arabjc.2023.104798.
- [7] M. D. Allah, M. El Hefnawy, and S. A. Elhamed, "Experimental investigation of the corrosion inhibition of Aluminum by three novel anionic surfactants as green inhibitors in HCl solution," *Chemical Data Collections*, vol. 45, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.cdc.2023.101033.
- [8] Y. Cao, H. Shao, S. He, Z. Chen, and W. Yang, "Natural polycitric acid-curcumin for highly efficient corrosion inhibition of aluminum alloys," *Mater Today Commun*, vol. 36, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.mtcomm.2023.106659.
- [9] H. G. Méndez-Figueroa, S. Ossandón, J. A. Ramírez Fernández, R. Galván Martínez, A. Espinoza Vázquez, and R. Orozco-Cruz, "Electrochemical evaluation of an Acanthocereus tetragonus aqueous extract on aluminum in NaCl (0.6 M) and HCl (1 M) and its modelling using forward and inverse

- artificial neural networks,” *Journal of Electroanalytical Chemistry*, vol. 918, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.jelechem.2022.116444.
- [10] Y. Fernine *et al.*, “Ocimum basilicum seeds extract as an environmentally friendly antioxidant and corrosion inhibitor for aluminium alloy 2024 -T3 corrosion in 3 wt% NaCl medium,” *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp*, vol. 627, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.colsurfa.2021.127232.
- [11] S. C. Udensi, O. E. Ekpe, and L. A. Nnanna, “Corrosion inhibition performance of low cost and eco-friendly Treculia africana leaves extract on aluminium alloy AA7075-T7351 in 2.86% NaCl solutions,” *Sci Afr*, vol. 12, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.sciaf.2021.e00791.
- [12] O. D. Onukwuli, I. A. Nnanwube, F. O. Ochili, and J. I. Obibuenyi, “Assessing the efficiency of danacid as corrosion inhibitor for aluminium in HCl medium: Experimental, theoretical and optimization studies,” *Heliyon*, vol. 10, no. 24, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e40994.
- [13] F. Gapsari, F. G. U. Dewi, Wijaya, P. H. Setyarini, and S. Hidayatullah, “The Effectiveness of Fish Scale Waste-Synthesized Chitosan and Food-Grade Chitosan as Corrosion Inhibitor,” *Journal of Southwest Jiaotong University*, vol. 55, no. 2, 2020, doi: 10.35741/issn.0258-2724.55.2.47.
- [14] J. Zhang, X. L. Gong, H. H. Yu, and M. Du, “The inhibition mechanism of imidazoline phosphate inhibitor for Q235 steel in hydrochloric acid medium,” *Corros Sci*, vol. 53, no. 10, pp. 3324–3330, Oct. 2011, doi: 10.1016/j.corsci.2011.06.008.
- [15] S. Hidayatullah, A. M. Sulaiman, and E. N. Iftitah, “Durio Zibethinus Extract Performance as Corrosion Inhibitor in Simulated Seawater,” *Mechanics Exploration and Material Innovation*, vol. 1, no. 1, pp. 27–34, Jan. 2024, doi: 10.21776/ub.memi.2024.001.01.4.
- [16] O. D. Onukwuli, I. A. Nnanwube, F. O. Ochili, and M. Omotioma, “DFT, experimental and optimization studies on the corrosion inhibition of aluminium in H₂SO₄ with danacid as inhibitor,” *Results in Engineering*, vol. 24, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.103113.
- [17] H. A. Jaddoa, B. A. Abdulhussein, and J. M. Ali, “Novel efficiency of turmeric extract as a green inhibitor of low carbon steel corrosion in 3.5% NaCl solution,” *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 11, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.cscee.2024.101086.
- [18] R. M. A. Shahba, A. E.-A. E.-S. Fouda, A. E.-S. El-Shenawy, and A. S. M. Osman, “Effect of Catharanthus roseus (Vince rosea) and Turmeric (Curcuma longa) Extracts as Green Corrosion Inhibitors for Mild Steel in 1 M HCl,” *Materials Sciences and Applications*, vol. 07, no. 10, pp. 654–671, 2016, doi: 10.4236/msa.2016.710053.
- [19] F. Gapsari *et al.*, “Analysis of corrosion inhibition of Kleinhovia hospita plant extract aided by quantification of hydrogen evolution using a

- GLCM/SVM method,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 41, pp. 15392–15405, May 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.01.067.
- [20] B. Liao *et al.*, “Fructus cannabis protein extract powder as a green and high effective corrosion inhibitor for Q235 carbon steel in 1 M HCl solution,” *Int J Biol Macromol*, vol. 239, p. 124358, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124358>.
- [21] F. Gapsari *et al.*, “Efficacy of *Andrographis paniculata* leaf extract as a green corrosion inhibitor for mild steel in concentrated sulfuric acid: Experimental and computational insights,” *Results in Surfaces and Interfaces*, vol. 18, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.rsurfi.2024.100361.
- [22] H. Behloul *et al.*, “New insights on the adsorption of CI-Reactive Red 141 dye using activated carbon prepared from the ZnCl₂-treated waste cotton fibers: Statistical physics, DFT, COSMO-RS, and AIM studies,” *J Mol Liq*, vol. 364, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.molliq.2022.119956.
- [23] A. Guendouz *et al.*, “New Benzimidazole Derivatives as Efficient Organic Inhibitors of mild steel Corrosion in Hydrochloric Acid Medium: Electrochemical, SEM/EDX, MC, and DFT Studies,” *J Mol Struct*, p. 139901, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.molstruc.2024.139901.
- [24] H. Zarrok *et al.*, “Study of the inhibition of carbon steel corrosion by two pyridazin derivatives in 1 M HCl: Experimental study and theoretical approach☆,” *Chemical Data Collections*, vol. 51, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.cdc.2024.101140.
- [25] Y. Liu, J. Liu, B. Chen, and X. Ren, “Investigation of three betaine surfactants and KI compounds as a corrosion inhibitor on carbon steel in industrial pickling,” *J Mol Struct*, p. 141269, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.molstruc.2024.141269.
- [26] A. Elsamman, K. F. Khaled, S. A. Halim, and N. S. Abdelshafi, “Development of QSAR based GFA predictive model for the effective design of a new bispyrazole derivative corrosion inhibitor,” *J Mol Struct*, vol. 1293, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.molstruc.2023.136230.
- [27] R. Haldhar, D. Prasad, A. Saxena, and R. Kumar, “Experimental and theoretical studies of *Ficus religiosa* as green corrosion inhibitor for mild steel in 0.5 M H₂SO₄ solution,” *Sustain Chem Pharm*, vol. 9, pp. 95–105, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.scp.2018.07.002.