



Pemanfaatan Ekstrak limbah biji Labu Sebagai Inhibitor Dalam Mengurangi Terjadinya Korosi Pada Logam

Utilization Of Pumpkin Seed Waste Extract As An Inhibitor In Reducing The Corrosion Rate On Metals

Syarif Hidayatullah^{1*}, Nasmi Herlina Sari¹, Ahmad Akromul Huda¹, Maharsa Pradityatama², Sinarep¹, Suteja¹

¹Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Mataram, Indonesia

²Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Mataram, Indonesia

*corresponding author: syarift008@gmail.com.

Article History:

Received : 20-05-2025
Revised : 13-06-2025
Accepted : 14-06-2025
Online : 15-06-2025

Keywords:

Waste;
pumpkin
inhibitor
organic

Abstract: Our research focuses on enhancing the potential of pumpkin seed waste extract as a sustainable corrosion inhibitor for metal (Fe) in 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 these pumpkin seed waste extract inhibitors in inhibiting corrosion. Electrochemical results showed that the effectiveness of the inhibitor was concentration dependent here reaching 83.11% at 3000 g/L pumpkin seed waste extract inhibitor. The PDP showed that the mixed inhibition control effectively retarded the corrosion of the metal. Furthermore, the adsorption behavior of the pumpkin seed waste extract inhibitor onto the metal follows the Langmuir isotherm model with physisorption properties. The adsorption mechanism of the inhibitor on the metal surface successfully formed a protective film on the metal surface thereby reducing the corrosion rate.

Kata Kunci:

Limbah;
Labu;
Inhibitor;
Organik.

Abstrak: Penelitian kami berfokus pada peningkatan potensi ekstrak limbah biji labu sebagai penghambat korosi yang berkelanjutan untuk logam (Fe) dalam larutan 1 M HCl. Skrining fitokimia dan aktivitas antioksidan diidentifikasi. Berbagai metodologi investigasi termasuk teknik eksperimental seperti Polarisasi Potensi dinamik (PDP) digunakan untuk mengevaluasi keefektifan inhibitor ekstrak limbah biji labu ini dalam menghambat korosi. Hasil elektrokimia menunjukkan bahwa efektivitas inhibitor bergantung pada konsentrasinya disini mencapai 83.11% pada 3000 g/L inhibitor ekstrak limbah biji labu. PDP menunjukkan bahwa kontrol inhibisi campuran secara efektif memperlambat korosi logam. Selanjutnya perilaku adsorpsi inhibitor ekstrak limbah biji labu ke logam mengikuti model isotherm Langmuir dengan sifat fisisorpsi. Mekanisme adsorpsi dari inhibitor pada permukaan logam berhasil membentuk lapisan pelindung pada permukaan logam sehingga mengurangi laju korosi.



This is an open access article under the [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license

A. LATAR BELAKANG

Banyak penelitian sudah menyebutkan bahwa logam dan baja sebagai dua logam yang paling banyak digunakan dalam aplikasi industry (Shanmugapriya et al., 2023). logam memiliki banyak sifat khas termasuk kemampuan mesin, konduktivitas listrik yang baik, daya tahan tinggi, rasio kekuatan-terhadap-berat yang mengesankan, dan ketahanan korosi yang kuat. Karakteristik yang

luar biasa ini membuat logam sangat disukai untuk berbagai aplikasi teknik terutama dalam konteks struktural (Emembolu et al., 2022). Selain itu logam 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 letusan dan pelarutan dalam media korosif terutama yang mengandung ion klorida (Cl^-) yang menyebabkan kerusakan substrat melalui korosi (Qiang et al., 2021).

Korosi menandakan degradasi logam dan paduan yang terus-menerus dan tidak mencolok di lingkungannya melalui reaksi kimia atau elektrokimia (Emembolu et al., 2022). Meskipun korosi pada dasarnya mempengaruhi logam efeknya juga dapat meluas ke degradasi plastik, kayu, dan beton. 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 (Aslam et al., 2022; Zehra et al., 2022). Kombinasi pertimbangan ekonomi dengan kekhawatiran keamanan dan lingkungan telah mendorong komunitas ilmiah untuk terus mengeksplorasi strategi inovatif untuk mengurangi dampak berbahaya dari korosi (Pesha et al., 2023). Berbagai teknik pencegahan korosi digunakan tergantung pada jenis korosi dan faktor lingkungan yang ada. Pemilihan metode didasarkan pada keefektifannya dalam kondisi tertentu di samping pertimbangan ekonomi (Chigondo & Chigondo, 2016).

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 (Allah et al., 2023; Cao et al., 2023; Méndez-Figueroa et al., 2022). Inhibitor ini memanfaatkan pasangan elektron tunggal yang ada dalam strukturnya untuk membentuk ikatan koordinasi dengan orbital d yang kosong dari logam. Interaksi ini mengarah pada pembuatan film adsorpsi, yang secara efektif melindungi logam dari agen perusak (Abdullah et al., 2023; Chowdhury et al., 2023).

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 (Fernine et al., 2021; Nadhifah et al., 2025). Akibatnya, ada dorongan untuk mengembangkan logam alternatif yang berkelanjutan yang dikenal sebagai inhibitor korosi ramah lingkungan (Wang et al., 2023). Bahan-bahan logamami ini berasal dari sumber organik seperti buah-buahan, daun-daunan, sampah organik, dan lain-lain (Udensi et al., 2021). Umumnya, mekanisme penghambatan senyawa ini melibatkan proses adsorpsi, di mana heteroatom yang ada dalam molekulnya berfungsi sebagai situs aktif untuk adsorpsi. Efektivitas fenomena adsorpsi ini dipengaruhi oleh karakteristik fisik dan kimia dari inhibitor yang terkait erat dengan kerapatan elektronik atom donor (Radi et al., 2021). Selain itu, faktor-faktor seperti sifat komposisi kimiawi dari media korosif, permukaan logam, potensi elektrokimia pada antarmuka logam/larutan, dan suhu reaksi, semuanya berkontribusi dalam mempengaruhi mekanisme adsorpsi.

Dalam kerangka kerja penelitian ini, tujuan utama kami adalah untuk meningkatkan efisiensi inhibitor ekstrak limbah biji labu sebagai penghambat berkelanjutan untuk logam dalam larutan natrium klorida (HCl). Zat-zat yang terbentuk secara logamami ini memiliki sifat kimia yang unik karena struktur molekulnya yang khas yang meliputi heteroatom seperti oksigen dan nitrogen serta ikatan rangkap. Dengan menggunakan metodologi seperti analisis kimia elektro (uji PDP), dan isothermal adsorption. Disini kami tidak hanya bertujuan untuk mengungkap mekanisme fundamental tetapi juga untuk merampingkan proses pengoptimalan penghambatan korosi. Kami percaya bahwa menggunakan integrasi dengan uji eksperimental memberikan pemahaman yang komprehensif tentang sifat penghambatan korosi dari ekstrak limbah biji labu sehingga meningkatkan kredibilitas dan kepraktisan penelitian ini. Metode yang kami gunakan ini sangat penting untuk mengatasi tantangan korosi yang lazim terjadi di unit industri terutama dalam rekayasa struktur.

B. METODE PENELITIAN

1. Bahan dan larutan

Sampel Logam yang digunakan dalam penelitian ini adalah logam pasaran yang banyak beredar (Onukwuli, Nnanwube, Ochili, & Obibuenyi, 2024). 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 diamplas menggunakan mesh 500–1000. Sebelum uji korosi, media korosi yang digunakan adalah 1 M HCl. Selain itu, inhibitor korosi yang digunakan berasal dari ekstrak limbah biji labu yang selanjutnya diekstraksi lagi dengan pelarut etanol 1 mL sebelum ditambahkan kedalam larutan uji untuk membuatnya larut dengan lebih baik dalam larutan air (Sari et al., 2021; Q. H. Zhang et al., 2025). Variasi inhibitor yang digunakan setiap pengujian blank, 1000, 2000, 3000, dan 4000 (g/L) yang ditambahkan pada larutan korosif 1 M HCl.

2. Pengujian korosi

Untuk melakukan uji potensiodinamika polarisasi logam, logamat 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, specimen uji direndam dahulu pada larutan korosif yang sudah terpasang pada logamat Uji polarisasi kurang lebih 15 menit agar reaksi antara baja 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 logam 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 limbah biji labu yang didefinisikan sebagai (Gapsari et al., 2020; J. Zhang et al., 2011):

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

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

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

3. 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 (Hidayatullah et al., 2024) :

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

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

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

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

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 (Onukwuli, Nnanwube, Ochili, & Omotioma, 2024).

C. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. PDP (Potensiodynamik Polarisasi)

Kurva polarisasi potensiodynamik untuk Logam dalam larutan HCl 1 M pada suhu udara dengan tidak adanya dan adanya inhibitor ekstrak limbah biji labu pada berbagai konsentrasi ditunjukkan pada Gbr. 1. Parameter kinetika korosi elektrokimia seperti potensial korosi (E_{corr}), kemiringan Tafel katodik dan anodik (β_c, β_a) dan densitas arus korosi (I_{corr}) yang diperoleh dengan ekstrapolasi garis Tafel serta efisiensi inhibitor dicantumkan pada Tabel 1.

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 Gbr.1. Masing-masing kurva yang dihasilkan pada gambar di bawah ini menampilkan area di mana reaksi katodik dan anodik terjadi.

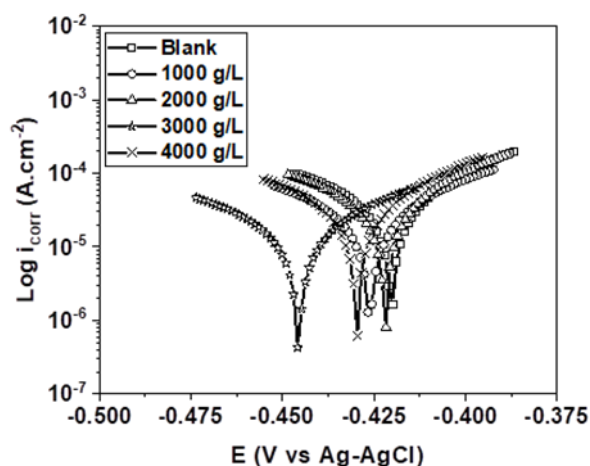
Hasil dari tabel 1 ini menunjukkan bahwa densitas arus korosi (I_{corr}) menurun drastis dengan meningkatnya konsentrasi inhibitor yang mengarah pada peningkatan efisiensi inhibisi. Suatu senyawa biasanya diklasifikasikan sebagai inhibitor tipe anodik atau katodik ketika perubahan nilai E_{corr} lebih besar dari 85 mV (J. Zhang et al., 2011). Karena perpindahan terbesar dari potensial korosi adalah sekitar 25 mV (Tabel 1) setelah penambahan inhibitor variasi 3000 g/L 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 logam dan juga memperlambat reaksi evolusi hidrogen katodik.

Tabel 1. Parameter PDP

C (g/L)	β_a (mV dec^{-1})	β_c (mV/dec)	E_{corr} (mV _{SCE})	i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	f_a	f_c	CR (mm/year)	IE (%)
blank	153.2	86.7	-421	170.9	-	-	1.352	-
1000	143.1	112.4	-427	71.1	0.43	0.40	0.55	57.93
2000	65.9	53.2	-422	50.8	0.31	0.30	0.41	71.01
3000	84.6	77.5	-446	29.9	0.24	0.13	0.24	83.11
4000	66.8	59.4	-431	47.2	0.30	0.24	0.38	73.71

Penambahan inhibitor dalam larutan 1M HCl pada konsentrasi yang ditentukan berdampak pada daerah tertentu. 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. Dimana korosi terjadi sebagai hasil dari serangkaian reaksi reduksi-oksidasi. 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 (Jaddoa et al., 2025). Baik ion material terhidrasi dalam larutan maupun padat yang terakumulasi di permukaan merupakan produk sampingan dari peluruhan material di anoda. Lapisan pelindung yang terbentuk dari inhibitor dalam penelitian ini di mana akumulasi ion material padat dalam menghentikan korosi di jalurnya (Jaddoa et al., 2024).



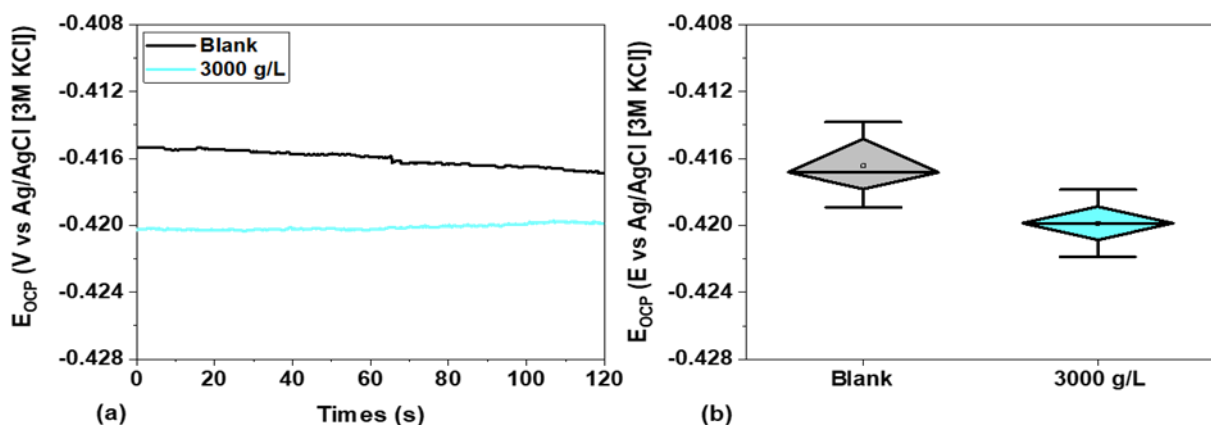
Gambar 1. Kurva Polarisasi

Menurut hasil eksperimen dari ekstrak limbah biji labu ini telah menunjukkan kinerja penghambatan korosi yang luar biasa mencapai nilai efisiensi inhibisi (EI) hingga 83.11 % pada konsentrasi inhibitor 3000 g/L. Diperkirakan bahwa mekanisme fisisorpsi dan atau kemisorpsi yang melibatkan adsorpsi molekul pada permukaan logam menyebabkan proses penghambatan. Lihat Gbr. 1. Hasil kurva tafel menunjukkan bahwa korosi logam dalam larutan 1 M HCl dihambat oleh adanya ekstrak limbah biji labu. Hasil kurva polarisasi dengan jelas menunjukkan bahwa mekanisme penghambatan melibatkan penghalangan permukaan logam oleh molekul inhibitor melalui proses adsorpsi. Dimana fenomena adsorpsi dipengaruhi oleh karakteristik logam dan struktur kimia inhibitor (Shahba et al., 2016).

Kurva OCP (Gbr. 2) menunjukkan nilai OCP yang stabil dicapai setelah 120 detik untuk spesimen logam yang direndam dalam 1 M HCl dengan inhibitor 3000 g/L 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 g/L. Dalam analisis awal dapat dilihat bahwa inhibitor 3000 g/L dapat menurunkan nilai OCP sampel dibandingkan dengan sampel tanpa inhibitor. Di antara Nilai OCP spesimen yang direndam dalam 1 M HCl dengan inhibitor 3000 g/L sedikit lebih negatif dibandingkan dengan tanpa inhibitor (Gbr. 2b) (Gapsari et al., 2023).

2. Analisa adsorpsi

Dengan menyelidiki proses adsorpsi permukaan dengan menggunakan hasil PDP empat model isoterm adsorpsi umum digunakan untuk menggambarkan perilaku adsorpsi molekul inhibitor ekstrak limbah biji labu seperti yang ditunjukkan pada Gbr. 3. Secara umum semakin dekat koefisien korelasi linier (R^2) dengan 1 maka persamaan tersebut memiliki keakuratan yang tinggi (Liao et al., 2023). Berdasarkan nilai R^2 dari keempat model dapat disimpulkan bahwa proses adsorpsi inhibitor korosi mengikuti model adsorpsi isothermal Frumkin dengan nilai R^2 terbesar. Dari tabel 2 K_{ads} memiliki nilai 81.43.



Gambar 2. OCP (a) pengukuran nilai OCP untuk kedua spesimen (b) Kurva OCP untuk blank dengan inhibitor 3000 g/L

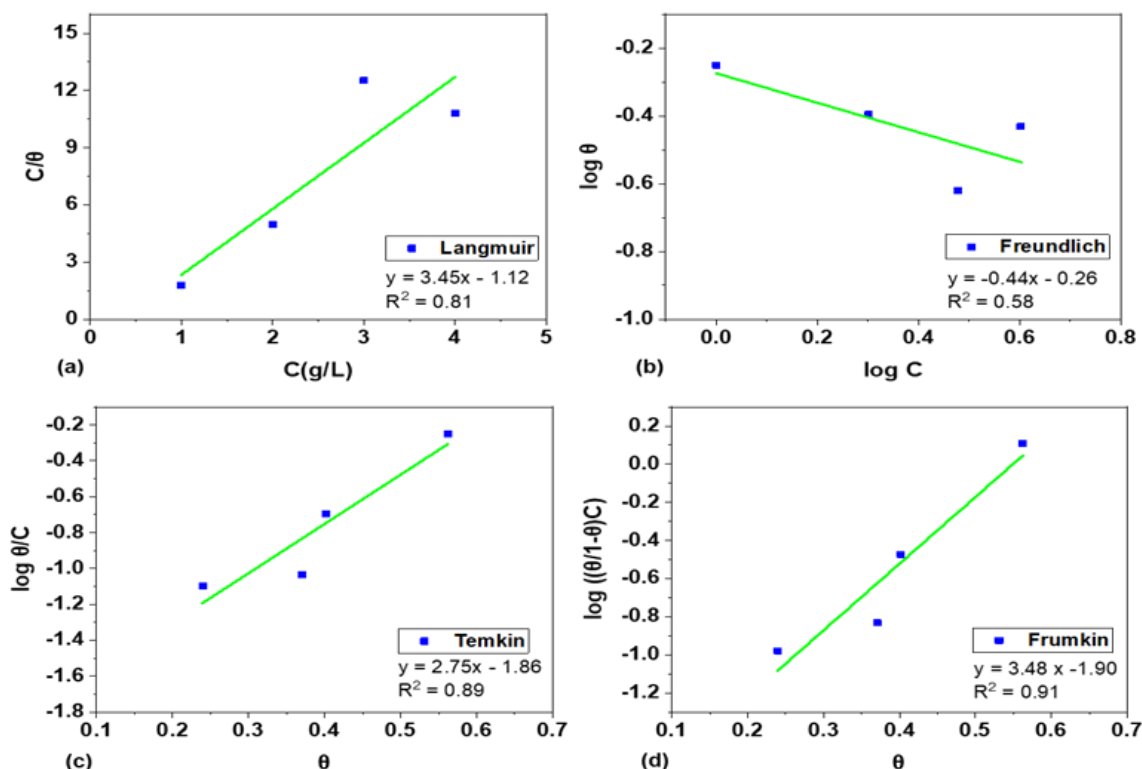
Biasanya, nilai K_{ads} yang diperoleh dapat digunakan untuk menghitung energi bebas Gibbs standar adsorpsi (ΔG_{ads}) dan kemudian menentukan jenis adsorpsi. Jenis adsorpsi dapat dibagi menjadi tiga kategori yaitu fisisorpsi, adsorpsi fisika-kimia, dan kemisorpsi.

Dimana fisisorpsi dikaitkan dengan interaksi elektrostatis untuk inhibitor terionisasi pada permukaan logam serta gaya van der Waals antar molekul, kemisorpsi adalah pembentukan ikatan kovalen, dan adsorpsi fisika-kimia terdiri dari dua situasi ini (Zhou et al., 2023). Dari tabel 2 nilai ΔG_{ads} dari persamaan frumkin ini kita dapatkan adalah -20.56 kJ/mol yang menunjukkan bahwa inhibitor ekstrak limbah biji labu memiliki sifat fisisorpsi (Gapsari et al., 2023, 2025).

Tabel 2. Parameter persamaan adsorpsi

Persamaan adsorpsi	Persamaan Linier	K_{ads}	ΔG_{ads}
Langmuir	$y = 3.45x - 1.12$	0.87	-9.58
Freundlich	$y = -0.44x - 0.26$	1.91	-12.01
Temkin	$y = 2.75x - 1.86$	69.87	-21.21
Frumkin	$y = 3.48x - 1.90$	81.43	-20.56

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 (Behloul et al., 2022). Peningkatan entropi yang signifikan mengikuti proses adsorpsi yang mendorong adsorpsi inhibitor ke permukaan logam.

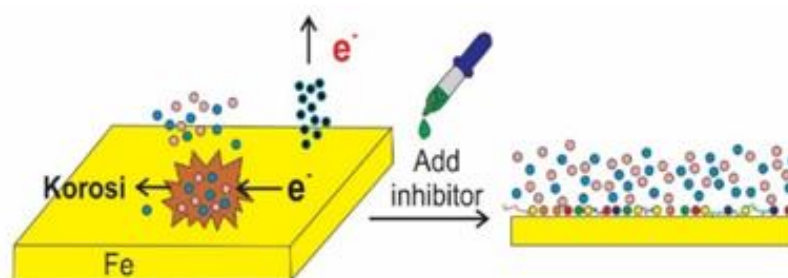


Gambar 3. Adsorpsi Isothermal

3. Mekanisme Inhibitor

Melalui hasil eksperimen dan teori di atas bahwa ekstrak inhibitor dari labu kuning memiliki efek inhibisi korosi yang sangat baik pada logam. Sebagai contoh, pada penambahan ekstrak limbah biji labu sebagai inhibitor mekanisme penghambatan korosi ditunjukkan pada Gambar 4.

Larutan asam klorida klinis memiliki efek korosif pada permukaan logam 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 limbah biji labu lebih mudah menempati situs aktif pada permukaan logam (Liu et al., 2025). Inhibitor diadsorpsi pada permukaan logam menghasilkan muatan negatif. Selain itu, elektron tunggal heteroatom S dan O pada gugus fungsi pada ekstrak limbah biji labu membentuk ikatan kimia dengan orbital kosong pada susunan elektron valensi logam $3s^2 3p^1$ dan teradsorpsi pada permukaan logam. logam memberikan elektron ke N membentuk ikatan umpan balik yang mengikat permukaan besi. Ekstrak limbah biji labu sebagai inhibitor membentuk lapisan pelindung pada permukaan logam untuk mencapai penghambatan korosi (Elsamman et al., 2023; Haldhar et al., 2018).



Gambar 4. Mekanisme inhibitor

D. SIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini dibuat untuk menghitung kinerja penghambatan korosi dari ekstrak limbah biji labu. Data variasi inhibitor yang diprediksi sesuai dengan data eksperimen yang diperoleh dari pengukuran elektrokimia seperti PDP. Ekstrak limbah biji labu bertindak sebagai inhibitor korosi yang sangat baik untuk logam dalam larutan 1 M HCl dan efisiensi penghambatannya meningkat dengan peningkatan konsentrasi dan menurun pada konsentrasi inhibitor pada variasi akhir. Kurva polarisasi menunjukkan bahwa sistem ini bertindak sebagai penghambat korosi tipe katodik dan anodik atau campuran. Adsorpsi inhibitor yang diprediksi pada permukaan logam mematuhi isoterm adsorpsi Frumkin dengan sifat fisisorpsi. Elektron tunggal heteroatom S dan O pada ekstrak limbah biji labu membentuk ikatan kimia dengan orbital kosong p dari logam dan teradsorpsi pada permukaan logam sebagai bentuk perlindungan dari reaksi korosi.

UCAPAN TERIMA KASIH

DAFTAR RUJUKAN

- Abdullah, H. A., Anaee, R. A., Khadom, A. A., Abd Ali, A. T., Malik, A. H., & Kadhim, M. M. (2023). Experimental and theoretical assessments of the chamomile flower extract as a green corrosion inhibitor for aluminum in artificial seawater. *Results in Chemistry*, 6. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2023.101035>
- Allah, M. D., Hefnawy, M. El, & Elhamed, S. A. (2023). Experimental investigation of the corrosion inhibition of Aluminum by three novel anionic surfactants as green inhibitors in HCl solution. *Chemical Data Collections*, 45. <https://doi.org/10.1016/j.cdc.2023.101033>
- Aslam, R., Mobin, M., Zehra, S., & Aslam, J. (2022). A comprehensive review of corrosion inhibitors employed to mitigate stainless steel corrosion in different environments. In *Journal of Molecular Liquids* (Vol. 364). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.119992>
- Behloul, H., Ferkous, H., Bougdah, N., Djellali, S., Alam, M., Djilani, C., Sedik, A., Lerari, D., Jeon, B. H., & Benguerba, Y. (2022). 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. *Journal of Molecular Liquids*, 364. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.119956>
- Cao, Y., Shao, H., He, S., Chen, Z., & Yang, W. (2023). Natural polycitric acid-curcumin for highly efficient corrosion inhibition of aluminum alloys. *Materials Today Communications*, 36. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106659>
- Chigondo, M., & Chigondo, F. (2016). Recent Natural Corrosion Inhibitors for Mild Steel: An Overview. In *Journal of Chemistry* (Vol. 2016). Hindawi Publishing Corporation. <https://doi.org/10.1155/2016/6208937>
- Chowdhury, M. A., Hossain, N., Ahmed, M. M. S., Islam, M. A., Islam, S., & Rana, M. M. (2023). Green tea and tulsi extracts as efficient green corrosion inhibitor for aluminum alloy in alkaline medium. *Heliyon*, 9(6). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16504>
- Elsamman, A., Khaled, K. F., Halim, S. A., & Abdelshafi, N. S. (2023). Development of QSAR based GFA predictive model for the effective design of a new bispyrazole derivative corrosion inhibitor. *Journal of Molecular Structure*, 1293. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2023.136230>
- Emembolu, L. N., Ohale, P. E., Onu, C. E., & Ohale, N. J. (2022). 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*, 11. <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2022.100316>
- Fernine, Y., Ech-chihbi, E., Arrousse, N., El Hajjaji, F., Bousraf, F., Ebn Touhami, M., Rais, Z., & Taleb, M. (2021). Ocimum basilicum seeds extract as an environmentally friendly antioxidant and corrosion inhibitor for aluminium alloy 2024 -T3 corrosion in 3 wt% NaCl medium. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 627. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.127232>
- Gapsari, F., Darmadi, D. B., Setyarini, P. H., Wijaya, H., Madurani, K. A., Juliano, H., Sulaiman, A. M., Hidayatullah, S., Tanji, A., & Hermawan, H. (2023). Analysis of corrosion inhibition of Kleinhovia hospita plant extract aided by quantification of hydrogen evolution using a GLCM/SVM method. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(41), 15392–15405. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.01.067>
- Gapsari, F., Dewi, F. G. U., Wijaya, Setyarini, P. H., & Hidayatullah, S. (2020). The Effectiveness of Fish Scale Waste-Synthesized Chitosan and Food-Grade Chitosan as Corrosion Inhibitor. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 55(2). <https://doi.org/10.35741/issn.0258-2724.55.2.47>
- Gapsari, F., Setyarini, P. H., Anam, K., Hadisaputra, S., Hidayatullah, S., Purnami, Sulaiman, A. M., & Lai, C. W. (2025). 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*, 18. <https://doi.org/10.1016/j.rsrfi.2024.100361>
- Haldhar, R., Prasad, D., Saxena, A., & Kumar, R. (2018). Experimental and theoretical studies of Ficus religiosa as green corrosion inhibitor for mild steel in 0.5 M H₂SO₄ solution. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 9, 95–105. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2018.07.002>
- Hidayatullah, S., Sulaiman, A. M., & Iftitah, E. N. (2024). Durio Zibethinus Extract Performance as Corrosion Inhibitor in Simulated Seawater. *Mechanics Exploration and Material Innovation*, 1(1), 27–34. <https://doi.org/10.21776/ub.memi.2024.001.01.4>
- Jaddoa, H. A., Abdulhussein, B. A., & Ali, J. M. (2025). 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*, 11. <https://doi.org/10.1016/j.csee.2024.101086>
- Jaddoa, H. A., Ali, J. M., & Abdulhussein, B. A. (2024). A Review of Corrosion Inhibition of Carbon Steel Using Fruit, Vegetable and Rice Husk Extract. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 1–13.
- Liao, B., Ma, S., Zhang, S., Li, X., Quan, R., Wan, S., & Guo, X. (2023). Fructus cannabis protein extract powder as a green and high effective corrosion inhibitor for Q235 carbon steel in 1 M HCl solution. *International Journal of Biological Macromolecules*, 239, 124358. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124358>
- Liu, Y., Liu, J., Chen, B., & Ren, X. (2025). Investigation of three betaine surfactants and KI compounds as a corrosion inhibitor on carbon steel in industrial pickling. *Journal of Molecular Structure*, 141269. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2024.141269>
- Méndez-Figueroa, H. G., Ossandón, S., Ramírez Fernández, J. A., Galván Martínez, R., Espinoza Vázquez, A., & Orozco-Cruz, R. (2022). 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*, 918. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2022.116444>
- Nadhifah, A., Sholahuddin, S., & Saputri, N. E. (2025). Application edible coating of rice bran starch on the quality of tomato fruit (Lycopersicum esculentum Mill.). *Jurnal Agrotek Ummat*, 12(2), 60–71.
- Onukwuli, O. D., Nnanwube, I. A., Ochili, F. O., & Obibuenyi, J. I. (2024). Assessing the efficiency of danacid as corrosion inhibitor for aluminium in HCl medium: Experimental, theoretical and optimization studies. *Heliyon*, 10(24). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40994>

- Onukwuli, O. D., Nnanwube, I. A., Ochili, F. O., & Omotioma, M. (2024). DFT, experimental and optimization studies on the corrosion inhibition of aluminium in H₂SO₄ with danacid as inhibitor. *Results in Engineering*, 24. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103113>
- Pesha, T., Mulaudzi, V. L., Cele, M. L., Mothapo, M. P., & Ratshisindi, F. (2023). Evaluation of corrosion inhibition effect of glycerol stearate on aluminium metal by electrochemical techniques. *Arabian Journal of Chemistry*, 16(7). <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.104798>
- Qiang, Y., Guo, L., Li, H., & Lan, X. (2021). Fabrication of environmentally friendly Losartan potassium film for corrosion inhibition of mild steel in HCl medium. *Chemical Engineering Journal*, 406. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126863>
- Radi, M., Melian, R., Galai, M., Dkhirche, N., Makha, M., Verma, C., Fernandez, C., & EbnTouhami, M. (2021). Pumpkin seeds as an eco-friendly corrosion inhibitor for 7075-T6 alloy in 3.5% NaCl solution: Electrochemical, surface and computational studies. *Journal of Molecular Liquids*, 337. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.116547>
- Sari, N. H., Suteja, S. T., & Syarif Hidayatullah, S. T. (2021). *Pengantar Inhibitor Korosi Alami*. Deepublish.
- Shahba, R. M. A., Fouda, A. E.-A. E.-S., El-Shenawy, A. E.-S., & Osman, A. S. M. (2016). 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*, 07(10), 654–671. <https://doi.org/10.4236/msa.2016.710053>
- Shanmugapriya, R., Ravi, M., Ravi, S., Ramasamy, M., Maruthapillai, A., & J, A. S. (2023). Electrochemical and Morphological investigations of Elettaria cardamomum pod extract as a green corrosion inhibitor for Mild steel corrosion in 1 N HCl. *Inorganic Chemistry Communications*, 154. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.110958>
- Udensi, S. C., Ekpe, O. E., & Nnanna, L. A. (2021). Corrosion inhibition performance of low cost and eco-friendly Treculia africana leaves extract on aluminium alloy AA7075-T7351 in 2.86% NaCl solutions. *Scientific African*, 12. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e00791>
- Wang, J., Zhao, J., Tabish, M., Peng, L., Cheng, Q., & Shi, F. (2023). Long-term corrosion inhibition for AA5052 aluminum alloy by an eco-friendly hybrid inhibitor: Synergism inhibition between rosemary extract and zinc chloride in 0.05 M NaCl solution. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 120, 302–315. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2022.12.037>
- Zehra, S., Mobin, M., & Aslam, J. (2022). 1 - An overview of the corrosion chemistry. In C. M. Hussain, C. Verma, & J. Aslam (Eds.), *Environmentally Sustainable Corrosion Inhibitors* (pp. 3–23). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85405-4.00012-4>
- Zhang, J., Gong, X. L., Yu, H. H., & Du, M. (2011). The inhibition mechanism of imidazoline phosphate inhibitor for Q235 steel in hydrochloric acid medium. *Corrosion Science*, 53(10), 3324–3330. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.06.008>
- Zhang, Q. H., Yang, X. B., Zhang, Y., & Xu, N. (2025). Artemisia verlotiorum extract as green corrosion inhibitor for enhanced corrosion resistance of mild steel in acidic solution. *Journal of Molecular Liquids*, 419, 126811. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.126811>
- Zhou, Z., Min, X., Wan, S., Liu, J., Liao, B., & Guo, X. (2023). A novel green corrosion inhibitor extracted from waste feverfew root for carbon steel in H₂SO₄ solution. *Results in Engineering*, 17. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.100971>