



EVALUASI KINERJA DAN MEKANISME ADSORPSI EKSTRAK KULIT BATANG POHON KAPUK SEBAGAI INHIBITOR KOROSI PADA *STAINLESS STEEL* 304

Syarif Hidayatullah ^{*1}, Ahmad Akromul Huda ²

¹⁻² Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Mataram, Indonesia

* Corresponding Author: E-mail: ^{*1}syarift008@gmail.com

ABSTRACT

Penelitian ini berupaya meningkatkan kemampuan ekstrak kulit batang pohon kapuk sebagai inhibitor korosi ramah lingkungan untuk *stainless steel* 304 (SS) dalam media 1 M HCl. Untuk menilai efektivitas dan mekanisme ekstrak tersebut dalam menghambat korosi, digunakan metode investigasi seperti pengujian eksperimen Polarisasi Potensiodinamik (PDP) dan analisa adsorpsi Isotermal. Temuan eksperimen PDP menunjukkan bahwa kemampuan penghambatan ekstrak sangat dipengaruhi oleh konsentrasinya, dengan efisiensi mencapai 74.72% pada konsentrasi 3000 mg/L. Data PDP mengonfirmasi bahwa inhibitor ini bertindak sebagai inhibitor campuran yang efektif dalam memperlambat proses korosi pada *stainless steel*. Selain itu, perilaku adsorpsi ekstrak mengikuti model isoterm Langmuir dan bersifat kemisorpsi dan fisisorpsi seperti terjadinya interaksi elektrostatik antara inhibitor yang terionisasi dengan permukaan logam dan melibatkan pembentukan ikatan kovalen. Secara keseluruhan, mekanisme terjadi melalui proses adsorpsi heteroatom seperti oksigen (O), nitrogen (N), sulfur (S), fosfor (P), dan struktur molekul cincin aromatik dari ekstrak kulit batang pohon kapuk ke permukaan *stainless steel* sehingga memungkinkan terbentuknya lapisan pelindung untuk menurunkan laju korosi.

Keyword

*Stainless steel,
Inhibitor alam,
Korosi logam,
Adsorpsi isotermal*

1. PENDAHULUAN

Berbagai studi telah melaporkan bahwa *stainless steel* 304 dan baja merupakan dua logam yang paling banyak dimanfaatkan dalam berbagai sektor industri. *Stainless steel* 304 memiliki sejumlah karakteristik unggul, seperti kemudahan dalam proses permesinan, konduktivitas listrik yang tinggi, ketahanan mekanik yang baik, rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, serta sifat tahan korosi (En-Nyly et al., 2023; Obot et al., 2023). Kombinasi sifat tersebut menjadikan *Stainless steel* sangat diminati untuk beragam kebutuhan teknik, khususnya pada aplikasi struktural. Selain itu, *Stainless steel* bereaksi cepat dengan oksigen dan membentuk lapisan oksida yang stabil serta melekat kuat pada permukaannya. Walaupun lapisan ini berfungsi sebagai pelindung dalam beberapa kondisi korosif, lapisan oksida tersebut tetap dapat mengalami kerusakan, terutama di lingkungan yang mengandung ion klorida (Cl^-), sehingga memicu pengikisan dan serangan korosi pada logam dasar (Neupane et al., 2021a).

Korosi sering diakibatkan oleh proses degradasi bertahap pada logam maupun paduannya yang terjadi akibat reaksi kimia atau elektrokimia dengan lingkungan sekitarnya (Neupane et al., 2021b). Walaupun terutama menyerang logam, dampak korosi juga dapat memengaruhi material lain seperti plastik, kayu, dan beton. Berbagai studi sebelumnya menunjukkan bahwa kerugian ekonomi akibat korosi dapat mencapai 3% hingga 5% dari Produk Nasional di sejumlah negara maju, menggambarkan besarnya beban finansial yang ditimbulkannya secara global (Aslam et al., 2022). Pertimbangan ekonomi yang besar tersebut, ditambah dengan isu keselamatan dan lingkungan, mendorong para peneliti untuk terus mencari pendekatan baru yang lebih efektif dalam menekan dampak negatif korosi (Pesha et al., 2023). Metode pengendalian korosi sangat beragam dan dipilih berdasarkan jenis korosi serta kondisi lingkungan yang memengaruhi proses tersebut. Pemilihan teknik yang tepat mempertimbangkan efektivitasnya dalam kondisi spesifik sekaligus aspek keterjangkauannya.

Inhibitor korosi seperti pohon kapuk (*Ceiba Pentandra*) merupakan salah satu bahan alam yang sering digunakan sebagai metode pengendalian korosi pada sistem tertutup. Secara umum, inhibitor alam mengandung elemen-elemen seperti oksigen (O), nitrogen (N), sulfur (S), dan fosfor (P), serta memiliki gugus fungsi seperti hidroksil dan karboksil, ikatan π tak jenuh yang terkonjugasi, dan struktur cincin aromatik (Fawzy & Toghan, 2021; saber et al., 2024). Keberadaan pasangan elektron bebas pada molekul-molekul ini memungkinkan terbentuknya ikatan koordinasi dengan orbital d kosong pada permukaan logam. Ikatan tersebut menghasilkan terbentuknya lapisan adsorpsi yang mampu melindungi logam dari serangan zat pengkorosi (Thoume et al., 2022). Oleh karena itu, inhibitor korosi berbasis alam sekarang ini banyak digunakan dan banyak diperoleh dari berbagai sumber biologis seperti buah-buahan, daun, serta limbah organik lainnya (Suryono et al., 2025).

Dalam penelitian ini, fokus utama kami adalah mengevaluasi kinerja dan mekanisme ekstrak kulit batang pohon kapuk sebagai inhibitor korosi untuk *stainless steel* 304 (SS) dalam larutan asam klorida (HCl). Melalui penerapan metode seperti analisis elektrokimia (uji PDP) dan studi adsorpsi isotermal, penelitian ini akan berupaya menjelaskan mekanisme dasar penghambatan korosi tetapi juga mengoptimalkan proses perlindungan permukaan logam. Integrasi hasil analisa pengujian akan memberikan gambaran menyeluruh mengenai perilaku dan mekanisme penghambatan korosi oleh ekstrak kulit batang pohon kapuk sehingga meningkatkan validitas dan relevansi dari penelitian ini.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Penelitian dilakukan oleh (Wan et al., 2022) tentang Daun kapok yang diekstraksi sebagai inhibitor korosi ramah lingkungan untuk baja karbon Q235 dalam larutan H_2SO_4 0,5

mol/L. Kinerja penghambatan korosi diteliti melalui uji elektrokimia dan analisis permukaan. Hasil menunjukkan bahwa inhibitor memiliki perilaku penghambatan anodik dan katodik campuran serta efisiensi penghambatan yang luar biasa sebesar 95% pada konsentrasi 150 mg/L. Selain itu, efisiensi penghambatan masih mencapai lebih dari 90% setelah perendaman jangka panjang selama 72 jam dalam larutan asam sulfat. Adsorpsi pada permukaan baja karbon mengikuti model isothermal adsorpsi Langmuir yang melibatkan adsorpsi fisik dan efisiensi penghambatan menurun seiring peningkatan suhu.

(Lahbabi et al., 2025) meneliti Efek konsentrasi ekstrak *Tamarix Aphylla* (TA) sebagai inhibitor korosi ramah lingkungan untuk baja karbon (E24) dalam larutan garam. Ekstrak tersebut diperoleh melalui metode maserasi menggunakan larutan etanol. Ekstrak ditemukan kaya akan polifenol dan antioksidan yang mengindikasikan potensi ekstrak TA menjadi inhibitor korosi yang baik. Kinerja penghambatan korosi dievaluasi menggunakan beberapa teknik elektrokimia seperti potensial sirkuit terbuka (OCP), spektroskopi impedansi elektrokimia (EIS), dan pengukuran polarisasi potensiodinamik (PDP). Hasil penelitian menunjukkan bahwa ekstrak TA pada konsentrasi optimal 50 ppm memberikan perlindungan korosi yang sangat baik dalam larutan garam. TA bertindak sebagai penghambat anodik. Dimana ekstrak ini secara efektif membentuk lapisan pelindung pada permukaan baja, meningkatkan ketahanannya terhadap korosi. Adsorpsi TA mengikuti isoterma Langmuir. Data termodinamika dan elektrokimia menunjukkan bahwa adsorpsi terutama bersifat fisisorpsi.

3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Persiapan bahan

Sampel *stainless steel* 304 yang dipakai dalam penelitian ini memiliki komposisi kimia sebagai berikut: C (0,07%), Ni (8,14%), Cr (18,2%), Mn (0,9%), Si (0,53%), P (0,0035%), S (0,017%), Fe Bal. (Gapsari et al., 2024). Dimensi spesimen uji adalah $1,0 \times 1,0 \times 0,1 \text{ cm}^3$. Pada tahap persiapan, hanya satu permukaan elektroda yang dibiarkan kontak dengan larutan korosi, sedangkan lima sisi lainnya dilapisi menggunakan resin epoksi. Seluruh sampel diampelas terlebih dahulu dengan kertas amplas mesh 200 sampai 1000 sebelum dilakukan pengujian korosi. Inhibitor korosi yang digunakan berasal dari ekstrak kulit batang pohon kapuk yang diekstrak. Konsentrasi inhibitor yang diuji meliputi blank, 1000, 2000, dan 3000 mg/L, yang kemudian ditambahkan ke dalam larutan korosif HCl 1 M.

3.2 Ekstrak inhibitor

Pertama, biji kapuk kering digiling hingga menjadi bubuk halus. Proses selanjutnya menggunakan metode ekstraksi *refluks*. Dalam tahap ini, 15 gram bubuk biji kapuk dicampurkan dengan 250 mL larutan etanol-air 40% (v/v) dan direndam selama dua jam pada suhu ruang. Setelah perendaman, campuran tersebut direfluks dalam bak air pada suhu 70 °C selama tiga jam. Setelah itu, hasilnya disaring menggunakan penyaringan vakum, dengan filtratnya tetap dipertahankan. Filtrat kemudian diuapkan menggunakan rotary evaporator untuk menghilangkan etanol. Padatan berwarna coklat yang merupakan ekstrak biji kapuk diperoleh. Ekstrak yang dihasilkan bersifat mudah larut dalam air. Untuk tahap pengujian, larutan ekstrak disiapkan dengan konsentrasi antara 1000, 2000, dan 3000 mg/L menggunakan air deionisasi.

3.3 Pengujian elektrokimia

Pengujian polarisasi potensiodinamik pada *stainless steel* 304 dilakukan menggunakan alat uji laju korosi Autolab Metrohm Tipe AUT84948 yang dilengkapi dengan sistem tiga

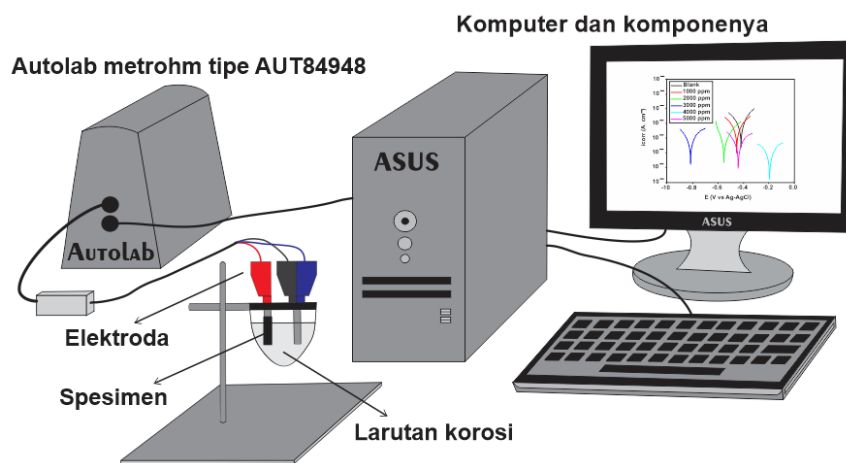
elektroda. Dalam konfigurasi sel, spesimen dipasang sebagai elektroda kerja, elektroda platina berfungsi sebagai elektroda pembantu, sedangkan elektroda Ag/AgCl (KCl 3M) digunakan sebagai elektroda referensi. Sebelum pengukuran dimulai, spesimen direndam dalam larutan korosif di dalam sel uji selama kurang lebih 10 menit untuk memastikan interaksi awal antara *stainless steel* 304 dan larutan berlangsung dengan stabil.

Pemindaian dilakukan dengan kecepatan 0,1 mV/s dan rentang frekuensi dari 1000 Hz hingga 0,1 Hz. Data polarisasi yang diperoleh kemudian dianalisis melalui kurva Tafel menggunakan perangkat lunak Nova 1.11 untuk menentukan parameter-parameter korosi *stainless steel* 304, seperti kemiringan Tafel anodik (β_a), kemiringan Tafel katodik (β_c), potensial korosi (E_{corr}), kerapatan arus korosi (i_{corr}), serta laju korosi (CR). Selanjutnya, efisiensi penghambatan korosi dan koefisien interaksi anodik maupun katodik (f_a dan f_c) dari inhibitor ekstrak kulit batang pohon kapuk dihitung menggunakan persamaan yang telah ditetapkan dalam literatur (Gapsari et al., 2020; Hidayatullah et al., 2024; Zhang et al., 2011).

$$\eta \% = \frac{I_{corr}^0 \times I_{corr}'}{I_{corr}^0} \times 100$$

$$f_c = \frac{i}{i^0} \exp[(E - E_0)/\beta_c]$$

$$f_a = \frac{i}{i^0} \exp[(E_0 - E)/\beta_a]$$



Gambar 1. Sketsa alat pengujian elektrokimia

4. HASIL DAN DISKUSI

4.1 Analisa PDP (potensiodynamik Polarisasi)

Kurva polarisasi potensiodynamik *stainless steel* 304 dalam larutan HCl 1 M pada suhu ruang, baik tanpa inhibitor maupun dengan penambahan inhibitor ekstrak kulit batang pohon kapuk pada berbagai konsentrasi, ditampilkan pada Gambar 2. Parameter kinetika korosi elektrokimia, meliputi potensial korosi (E_{corr}), kemiringan Tafel katodik dan anodik (β_c dan β_a), serta densitas arus korosi (i_{corr}), diperoleh melalui proses ekstrapolasi kurva Tafel. Nilai-nilai tersebut beserta efisiensi penghambatan inhibitor dirangkum dalam Tabel 1.

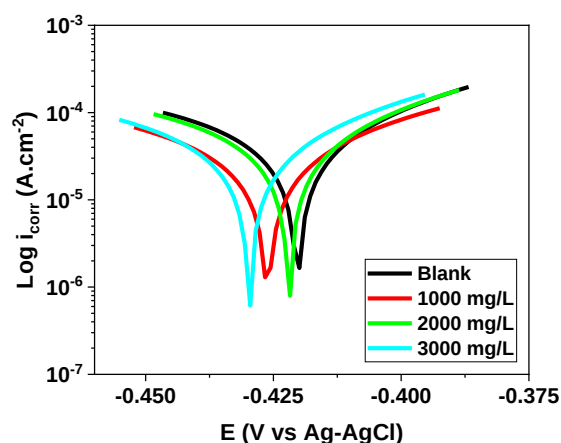
Hasil percobaan divisualisasikan dalam bentuk kurva polarisasi yang menunjukkan hubungan antara potensial yang diberikan dan kerapatan arus. Kurva tersebut dapat dilihat pada Gambar 2, menggambarkan zona tempat berlangsungnya reaksi katodik dan anodik. Data pada Tabel 1 menunjukkan bahwa nilai densitas arus korosi (i_{corr}) menurun secara signifikan seiring dengan peningkatan konsentrasi inhibitor, yang berbanding lurus dengan meningkatnya efisiensi penghambatan. Suatu inhibitor umumnya dikategorikan sebagai tipe anodik atau katodik apabila pergeseran potensial korosi (E_{corr}) melebihi 85 mV (Neupane et

al., 2021c). Dalam penelitian ini, pergeseran maksimum E_{corr} hanya sekitar 9 mV (Tabel 1) pada konsentrasi 3000 mg/L, sehingga inhibitor dapat diklasifikasikan sebagai inhibitor tipe campuran. Selain itu, hasil perhitungan koefisien interaksi anodik dan katodik bernilai kurang dari 1, dengan selisih yang tidak terlalu besar. Hal ini mengindikasikan bahwa inhibitor mampu menghambat proses pelarutan anodik *stainless steel* 304 secara efektif sekaligus memperlambat reaksi evolusi hidrogen pada mekanisme katodik (Elangovan et al., 2024).

Tabel 1. Parameter-parameter korosi yang diperoleh dari pengujian PDP.

θ_a (mV dec ⁻¹)	θ_c (mV/dec)	E_{corr} (mV _{SCE})	i_{corr} (μ A/cm ²)	f_a	f_c	CR (mm/year)	IE (%)
147.79	79.81	-419	171.10	-	-	1.14	-
137.41	78.39	-425	80.12	0.49	0.43	0.54	53.17
62.40	56.11	-422	56.81	0.35	0.31	0.38	66.80
79.89	70.58	-428	43.20	0.28	0.22	0.29	74.72

Penambahan inhibitor ke dalam larutan HCl 1 M pada berbagai konsentrasi memberikan pengaruh pada area tertentu dari proses korosi. Konsentrasi inhibitor yang meningkat turut memengaruhi interaksi reaksi katodik dan anodik yang telah dijelaskan sebelumnya. Kehadiran inhibitor menghambat reaksi evolusi hidrogen pada sisi katodik serta mendorong terbentuknya lapisan adsorpsi pada permukaan logam, sehingga memengaruhi kedua reaksi tersebut. Korosi sendiri berlangsung melalui rangkaian reaksi redoks, di mana material pada anoda mengalami oksidasi dan menghasilkan ion serta elektron bebas (Jebali et al., 2024). Elektron bebas tersebut kemudian mereduksi oksigen dan membentuk hidroksida, yang mencerminkan proses katodik. Produk dari peluruhan logam pada anoda dapat berupa ion yang terlarut maupun padatan yang mengendap di permukaan logam. Dalam penelitian ini, lapisan pelindung yang terbentuk akibat adsorpsi inhibitor berperan penting dalam menghambat proses korosi, karena akumulasi material padat tersebut membantu menghalangi reaksi lebih lanjut pada permukaan logam (Ennafaa et al., 2025).



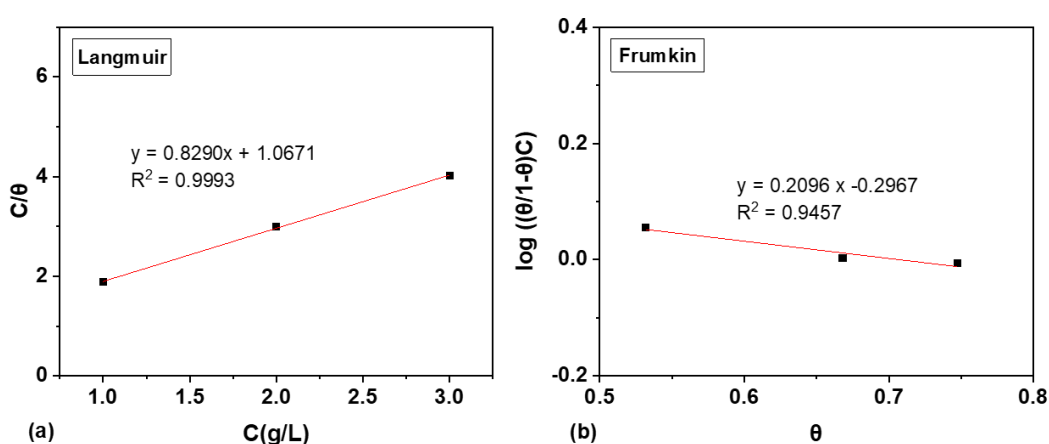
Gambar 2. Kurva tafel PDP

Berdasarkan hasil eksperimen, ekstrak kulit batang pohon kapuk menunjukkan kemampuan penghambatan korosi yang sangat baik, dengan efisiensi inhibisi (EI) mencapai 74.72% pada konsentrasi 3000 mg/L. Mekanisme penghambatan ini diperkirakan terjadi melalui proses fisisorpsi dan atau kemisorpsi, dimana molekul inhibitor teradsorpsi pada

permukaan *stainless steel* 304. Seperti terlihat pada Gambar 2, kurva Tafel mengonfirmasi bahwa penambahan ekstrak kulit batang pohon kapuk mampu menekan laju korosi *stainless steel* 304 dalam larutan HCl 1 M. Kurva polarisasi tersebut memperlihatkan secara jelas bahwa penghambatan berlangsung melalui pembentukan lapisan adsorpsi oleh molekul inhibitor yang menutupi permukaan logam. Proses adsorpsi ini dipengaruhi oleh sifat permukaan *stainless steel* 304 serta struktur kimia dari inhibitor itu sendiri (Kahkesh et al., 2025).

4.2 Analisa adsorpsi isothermal

Untuk memahami mekanisme adsorpsi pada permukaan logam, data hasil pengujian PDP dianalisis menggunakan dua model isoterm adsorpsi yang umum digunakan. Kedua model tersebut diaplikasikan untuk menggambarkan perilaku adsorpsi molekul inhibitor dari ekstrak kulit batang pohon kapuk, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 3. Secara umum, semakin tinggi nilai koefisien korelasi linier (R^2) dan semakin mendekati angka 1, maka semakin baik kecocokan model tersebut dengan data eksperimen.



Gambar 3. Plot adsorpsi isothermal (a) langmuir dan (b) frumkin

Berdasarkan nilai R^2 dari seluruh model yang diuji, dapat disimpulkan bahwa proses adsorpsi inhibitor korosi paling sesuai dengan model isoterm langmuir, karena memiliki nilai R^2 tertinggi. Selain itu, nilai K_{ads} yang ditunjukkan pada Tabel 2 adalah sebesar 937.11 L.mol⁻¹. Secara umum, nilai K_{ads} yang diperoleh dapat dimanfaatkan untuk menghitung energi bebas Gibbs standar adsorpsi (ΔG_{ads}) yang kemudian digunakan untuk menentukan jenis adsorpsi yang terjadi. Proses adsorpsi umumnya diklasifikasikan ke dalam tiga kategori, yaitu fisisorpsi, kemisorpsi, serta adsorpsi fisika-kimia (Zhou et al., 2023). Fisisorpsi terjadi akibat interaksi elektrostatik antara inhibitor yang terionisasi dengan permukaan logam, serta gaya van der Waals antar molekul; sedangkan kemisorpsi melibatkan pembentukan ikatan kovalen. Adsorpsi fisika-kimia merupakan kombinasi dari kedua mekanisme tersebut.

Tabel 2. Parameter nilai adsorpsi isothermal

Persamaan adsorpsi	Persamaan Linier	K_{ads} (L.mol ⁻¹)	ΔG_{ads} kJ/mol
Langmuir	$y = 0.8290x + 1.0671$	937.11	-26.89
Framkin	$y = -0.2967x + 0.2097$	1620.69	-28.25

Berdasarkan data pada Tabel 2, nilai ΔG_{ads} yang dihasilkan dari model Langmuir adalah -26.89 kJ/mol. Nilai ini menunjukkan bahwa ekstrak kulit batang pohon kapuk berinteraksi dengan permukaan *stainless steel* 304 terutama melalui mekanisme fisisorpsi dan kemisorpsi

(Behloul et al., 2022). 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.

4.3 Mekanisme penghambatan

Berdasarkan hasil eksperimen dan pemahaman teori yang ada, ekstrak kulit batang pohon kapuk terbukti mampu memberikan efek penghambatan korosi yang sangat baik pada *stainless steel* 304. Dalam kondisi asam klorida, permukaan *stainless steel* 304 mengalami proses korosi, namun kehadiran inhibitor mampu memberikan perlindungan melalui mekanisme adsorpsi. Hal ini disebabkan karena energi adsorpsi molekul inhibitor lebih negatif dibandingkan ion Cl^- , serta ukuran ioniknya yang lebih besar (Liu et al., 2025), sehingga molekul inhibitor lebih mudah menempati situs aktif pada permukaan *Stainless steel*.

Saat teradsorpsi, molekul inhibitor membentuk muatan negatif pada permukaan *stainless steel* 304. Selain itu, pasangan elektron bebas pada heteroatom seperti S dan O dalam gugus fungsi ekstrak kulit batang pohon kapuk dapat berinteraksi dengan orbital kosong pada konfigurasi elektron valensi *stainless steel* 304, sehingga terbentuk ikatan fisik dan kimia. *Stainless steel* 304 juga dapat mendonorkan elektron ke atom N, menghasilkan ikatan umpan balik yang memperkuat proses adsorpsi (Dwivedi et al., 2017; Oguzie et al., 2010; Quraishi et al., 2020). Melalui mekanisme ini, ekstrak kulit batang pohon kapuk membentuk lapisan pelindung yang menutupi permukaan *stainless steel* 304, sehingga mampu menurunkan laju korosi secara efektif.

5. KESIMPULAN

Penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi kinerja dan mekanisme ekstrak kulit batang pohon kapuk sebagai inhibitor korosi. Data hasil variasi konsentrasi inhibitor menunjukkan kesesuaian dengan nilai eksperimental yang diperoleh dari pengujian elektrokimia, seperti metode PDP. Ekstrak kulit batang pohon kapuk terbukti menjadi inhibitor yang sangat efektif bagi *stainless steel* 304 dalam larutan HCl 1 M, dengan efisiensi penghambatan yang meningkat seiring bertambahnya konsentrasi inhibitor dengan konsentrasi optimal pada 3000 mg/L dengan efisiensi 74.72%. Kurva polarisasi mengindikasikan bahwa inhibitor bekerja sebagai penghambat tipe campuran, yang memengaruhi baik reaksi katodik maupun anodik. Proses adsorpsi inhibitor pada permukaan *stainless steel* 304 mengikuti model isotermal langmuir dan bersifat campuran. Pasangan elektron bebas pada heteroatom seperti S, O dan Ciccin aromatik dalam ekstrak kulit batang pohon kapuk berinteraksi dengan orbital p kosong pada *stainless steel* 304, sehingga memungkinkan terbentuknya ikatan fisik-kimia yang membantu proses adsorpsi dan memberikan perlindungan terhadap serangan korosi. Meskipun demikian, penelitian ini masih memiliki keterbatasan karena dilakukan dalam kondisi lingkungan dan hanya menggunakan satu jenis media korosif, yaitu HCl 1M tanpa mempertimbangkan pengaruh variasi suhu maupun pH secara terkontrol. Oleh sebab itu, penelitian lebih lanjut perlu dilakukan untuk menilai kestabilan lapisan inhibitor dalam kondisi industri yang lebih kompleks, termasuk pengaruh perubahan suhu, pH, serta melakukan perbandingan dengan inhibitor sintetis.

REFERENCES

- 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 Cl-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>
- Dwivedi, D., Lepková, K., & Becker, T. (2017). Carbon steel corrosion: a review of key surface properties and characterization methods. *RSC Advances*, 7(8), 4580–4610. <https://doi.org/10.1039/C6RA25094G>
- Elangovan, N., Srinivasan, A., Pugalmari, S., Kalaiyarasan, M., Rajendran, N., Seikh, A. H., & Rajendiran, N. (2024). Development and electrochemical investigations of enhanced corrosion-resistant Polyvinylcarbazole-TiO₂ hybrid nanocomposite coatings on 316L SS for marine applications. *Surface and Coatings Technology*, 481. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.130628>
- Ennafaa, F., Chraka, A., Tassaoui, K., Mouamr, I., Damej, M., Mahmoudi, A. E. L., Bougrin, K., Rahal, H. T., & Benmessaoud, M. (2025). An experimental and dual computational study using DFT and MD simulations to better understand the adsorption and corrosion-inhibiting properties of N-(3-(4-Methoxyphenyl) isoxazol-5-yl) methyl saccharin for C38 Steel in acidic medium. *Materials Chemistry and Physics*, 130441. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2025.130441>
- En-Nylly, M., Skal, S., El aoufir, Y., Lgaz, H., Adnin, R. J., Alrashdi, A. A., Bellaouchou, A., Al-Hadeethi, M. R., Benali, O., Guedira, T., Lee, H. S., Kaya, S., & Ibrahim, S. M. (2023). Performance evaluation and assessment of the corrosion inhibition mechanism of carbon steel in HCl medium by a new hydrazone compound: Insights from experimental, DFT and first-principles DFT simulations. *Arabian Journal of Chemistry*, 16(6). <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.104711>
- Fawzy, A., & Toghan, A. (2021). Inhibition evaluation of chromotrope dyes for the corrosion of mild steel in an acidic environment: thermodynamic and kinetic aspects. *ACS Omega*, 6(5), 4051.
- 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., Utaminingrum, F., Lai, C. W., Anam, K., Sulaiman, A. M., Haidar, M. F., Julian, T. S., & Ebenso, E. E. (2024). A convolutional neural network -VGG16 method for corrosion

- inhibition of 304SS in sulfuric acid solution by timoho leaf extract. *Journal of Materials Research and Technology*, 30, 1116–1127. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.03.156>
- 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>
- Jebali, Z., Ferkous, H., Zerroug, M., Boublia, A., Delimi, A., Bouzid, A., Majdoub, H., Ernst, B., Elboughdiri, N., & Benguerba, Y. (2024). Unveiling the potent corrosion-inhibiting power of Ammophila arenaria aqueous extract for mild steel in acidic environments: An integrated experimental and computational study. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(2). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112374>
- Kahkesh, H., Yeganeh, M., & Shahryari, Z. (2025). Algae-based corrosion inhibitors as innovative approaches to corrosion prevention: A review. In *Algal Research* (Vol. 89). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2025.104071>
- Lahbabi, S., Bouferra, R., Saadi, L., & Khalil, A. (2025). Evaluation of Tamarix Aphylla extract as an eco-friendly corrosion inhibitor for carbon steel in saline medium. *RSC Advances*, 15(50), 42479–42492. <https://doi.org/https://doi.org/10.1039/d5ra06912b>
- 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>
- Neupane, S., Losada-Pérez, P., Tiringier, U., Taheri, P., Desta, D., Xie, C., Crespo, D., Mol, A., Milošev, I., & Kokalj, A. (2021a). Study of mercaptobenzimidazoles as inhibitors for copper corrosion: Down to the molecular scale. *J. Electrochem. Soc.*, 168(5), 051504.
- Neupane, S., Losada-Pérez, P., Tiringier, U., Taheri, P., Desta, D., Xie, C., Crespo, D., Mol, A., Milošev, I., & Kokalj, A. (2021b). Study of mercaptobenzimidazoles as inhibitors for copper corrosion: Down to the molecular scale. *J. Electrochem. Soc.*, 168(5), 051504.
- Neupane, S., Losada-Pérez, P., Tiringier, U., Taheri, P., Desta, D., Xie, C., Crespo, D., Mol, A., Milošev, I., & Kokalj, A. (2021c). Study of mercaptobenzimidazoles as inhibitors for copper corrosion: Down to the molecular scale. *J. Electrochem. Soc.*, 168(5), 051504.
- Obot, I. B., Sorour, A. A., Verma, C., Al-Khalidi, T. A., & Rushaid, A. S. (2023). Key parameters affecting sweet and sour corrosion: Impact on corrosion risk assessment and inhibition. In *Engineering Failure Analysis* (Vol. 145). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.107008>
- Oguzie, E. E., Enenebeaku, C. K., Akalezi, C. O., Okoro, S. C., Ayuk, A. A., & Ejike, E. N. (2010). Adsorption and Corrosion-Inhibiting Effect of Dacryodis Edulis Extract on Low-Carbon-Steel Corrosion in Acidic Media. *J. Colloid Interface Sci.*, 349, 283.
- 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>

- Quraishi, M. A., Chauhan, D. S., & Saji, V. S. (2020). 1 - Heterocyclic corrosion inhibitors. In M. A. Quraishi, D. S. Chauhan, & V. S. Saji (Eds.), *Heterocyclic Organic Corrosion Inhibitors* (pp. 1–19). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818558-2.00001-1>
- saber, I., dahmani, K., Kharbouch, O., Aribou, Z., Ferraa, S., Alotaibi, N. H., El-alouani, M., Hsissou, R., Al-Maswari, B. M., Galai, M., Touhami, M. E., Aziz, Z., & El youbi, M. S. (2024). Enhancing copper corrosion resistance in highly caustic environments: Evaluation of environmentally friendly inorganic inhibitors and mechanistic insights. *International Journal of Electrochemical Science*, 19(11), 100815. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2024.100815>
- Suryono, A. F., Ilman, M. N., Iswanto, P. T., & Ariyanto, T. (2025). Evaluation of Gambir extract as green corrosion inhibitor for API 5L X65 steel in 3.5 % NaCl solution containing 100 ppm NaHCO₃. *Results in Surfaces and Interfaces*, 20. <https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2025.100600>
- Thoume, A., Left, D. B., Elmakssoudi, A., Achagar, R., Dakir, M., Azzi, M., & Zertoubi, M. (2022). Performance evaluation of new chalcone oxime functionalized graphene oxide as a corrosion inhibitor for carbon steel in a hydrochloric acid solution. *Langmuir*, 38(24), 7472.
- Wan, S., Zhang, T., Chen, H., Liao, B., & Guo, X. (2022). Kapok leaves extract and synergistic iodide as novel effective corrosion inhibitors for Q235 carbon steel in H₂SO₄ medium. *Ind. Crops Prod.*, 178, 114649.
- 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>
- 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>