



INVESTIGASI EKSTRAK KULIT BATANG KAPOK SEBAGAI INHIBITOR KOROSI PADA BESI ASTM A36 DALAM LARUTAN NaCl 5%

INVESTIGATION OF KAPOK BARK EXTRACT AS A CORROSION INHIBITOR ON ASTM A36 STEEL IN 5% NaCl SOLUTION

Syarif Hidayatullah¹⁾, Suteja²⁾

^{1,2}Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Mataram, Mataram, Indonesia
email: syarift008@gmail.com^{1)*}, suteja@unram.ac.id²⁾

Received:
21 Agustus
2025

Accepted:
14 Oktober
2025

Published:
5 Desember
2025



Abstrak

Peningkatan perhatian terhadap keberlanjutan dan isu lingkungan dalam bidang korosi logam semakin mendesak seiring dengan tuntutan global terhadap penerapan teknologi ramah lingkungan. Salah satu pendekatan yang banyak digunakan untuk tujuan tersebut adalah pemanfaatan inhibitor berbasis ekstrak tumbuhan karena ketersediaannya melimpah dan proses ekstraksinya relatif mudah. Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki pengaruh variasi konsentrasi inhibitor ekstrak kulit batang kapok dengan konsentrasi inhibitor 1000, 2000, dan 3000 mg/L terhadap laju korosi baja ASTM A36 dalam larutan NaCl 5%. Kinerja anti korosi dan mekanisme kerjanya diperiksa secara cermat melalui uji potensiodinamik polarisasi (PDP) dan spektroskopi impedansi elektrokimia (EIS). Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada konsentrasi 3000 mg/L, ekstrak kulit batang kapok mampu menurunkan laju reaksi katodik dan anodik secara signifikan. Kondisi tersebut menyebabkan laju korosi menurun dari 1,51 menjadi 0,28 mm/tahun dalam larutan NaCl. Efisiensi penghambatan paling optimal, yaitu 81,61%, dicapai pada penambahan inhibitor dengan konsentrasi 3000 mg/L. Berdasarkan hasil tersebut, ekstrak kulit batang kapok memiliki potensi signifikan sebagai inhibitor korosi ramah lingkungan untuk besi ASTM A36.

Kata Kunci: ASTM A36, Ekstrak kulit batang kapok, Inhibitor korosi, NaCl.

Abstract

The growing concern for sustainability and environmental issues in the field of metal corrosion has become increasingly urgent in response to global demands for the adoption of environmentally friendly technologies. One of the widely used approaches to address this challenge is the utilization of plant-based corrosion inhibitors due to their abundant availability and relatively simple extraction process. This study aims to investigate the effect of varying concentrations of kapok bark extract inhibitors specifically at 1000, 2000, and 3000 mg/L on the corrosion rate of ASTM A36 steel in a 5% NaCl solution. The anticorrosion performance and inhibition mechanism were carefully examined through potentiodynamic polarization (PDP) testing and electrochemical impedance spectroscopy (EIS). The results revealed that at a concentration of 3000 mg/L, the kapok bark extract was able to significantly reduce both cathodic

and anodic reaction rates. This condition led to a decrease in the corrosion rate from 1.51 to 0.28 mm/year in the NaCl solution. The highest inhibition efficiency, 81.61%, was achieved at an inhibitor concentration of 3000 mg/L. Based on these findings, the kapok bark extract demonstrates significant potential as an environmentally friendly corrosion inhibitor for ASTM A36 steel.

Keywords: ASTM A36, Kapok bark extract, Corrosion inhibitor, NaCl.

DOI: 10.20527/sjmekinematika.v10i2.791

How to cite: Hidayatullah, S., & Suteja, "Investigasi Ekstrak Kulit Batang Kapuk Sebagai Inhibitor Korosi Pada Besi ASTM A36 Dalam Larutan NaCl 5%". *Scientific Journal of Mechanical Engineering Kinematika*, 10(2), 348-359, 2025.

PENDAHULUAN

Struktur logam rentan mengalami kerusakan akibat korosi dan kondisi ini terus menjadi masalah serius di berbagai sektor industri[1,2]. Beberapa metode telah digunakan untuk mengatasi korosi, antara lain lapisan pelindung, perlindungan katodik dan anodik, pemilihan bahan rekayasa yang tepat, desain material, serta penggunaan inhibitor[3,4]. Reaksi korosi dapat menyebabkan hilangnya logam pada permukaan luar pipa sehingga permasalahan ini telah menjadi perhatian dalam beberapa waktu terakhir. Namun, risiko paling signifikan terhadap sistem perpipaan adalah terjadinya korosi asam di dalam pipa[5]. Sistem perpipaan yang menyalurkan campuran mentah terdiri atas air, zat asam organik, dan berbagai gas terlarut dapat membentuk media korosif bagi logam[6]. Temuan dari industri menunjukkan bahwa korosi interior asam memiliki dampak yang signifikan dan merusak pada pipa[7], meskipun penelitian komprehensif mengenai proses korosi dan pengembangan teknik diagnostik telah dilakukan. Kondisi tersebut mendorong komunitas ilmiah untuk memberikan perhatian serius terhadap pengendalian laju korosi.

Berbagai pendekatan telah diteliti dan inhibitor korosi diyakini sebagai strategi paling efektif untuk melindungi logam dari korosi internal[8]. Inhibitor tersebut terbagi menjadi dua kategori utama, yaitu organik dan anorganik[9]. Inhibitor organik umumnya digunakan dalam lingkungan asam karena sebagian besar senyawanya mengandung atom N, S, O, dan P yang mampu mengurangi pelarutan logam melalui proses adsorpsi pada permukaan. Sebaliknya, inhibitor anorganik yang banyak digunakan di sektor perpipaan mengandung bahan berbahaya sehingga menimbulkan kritik terkait risiko lingkungan dan kesehatan manusia[10]. Oleh karena itu, penelitian kini semakin difokuskan pada penerapan inhibitor alami yang berkelanjutan dan ramah lingkungan[11]. Peneliti telah mengamati berbagai jenis inhibitor berbasis alam, seperti cairan ionik, obat-obatan, dan ekstrak tumbuhan[12]. Ekstrak nabati lebih mudah diperoleh, relatif murah, dan ramah lingkungan. Beberapa sumber tanaman telah diuji potensinya dalam menekan korosi karena nilai ekonominya serta keberlanjutannya. Inhibitor ini bekerja dengan cara mengadsorpsi molekul polar pada permukaan logam sehingga mampu memperlambat korosi[13].

Salah satu tanaman potensial yang belum banyak dieksplorasi adalah pohon kapuk (*Ceiba Pentandra*) yang banyak tumbuh di daerah tropis dan menghasilkan limbah kulit batang dalam jumlah besar dari industri pengolahan serat[14]. Kulit batang kapuk diketahui mengandung senyawa fitokimia aktif seperti flavonoid, tanin, alkaloid, saponin, dan senyawa fenolik, yang memiliki gugus fungsional $-OH$, $-C=O$, dan cincin aromatik[15,16]. Gugus-gugus ini berperan penting dalam adsorpsi elektron pada permukaan logam sehingga berpotensi membentuk lapisan pelindung yang menekan laju korosi. Oleh karena itu, pohon kapuk ini memiliki potensi yang baik dalam menanggulangi korosi eksternal pada logam di berbagai lingkungan korosif.

Meskipun banyak penelitian telah melaporkan potensi ekstrak tumbuhan sebagai inhibitor[17], industri masih memerlukan penyelidikan tambahan sebelum penerapannya secara luas. Efektivitas inhibitor alami sangat dipengaruhi oleh parameter tertentu, seperti

metode ekstraksi, lingkungan tumbuh, dan kondisi pengujian[18]. Penelitian oleh Thomas et al.[19], melaporkan bahwa ekstrak kulit buah *Garcinia Indica* dapat menghambat korosi baja karbon rendah dalam larutan HCl dengan efisiensi 87% (EIS) dan 93% (PDP) pada konsentrasi 600 ppm. Namun, penelitian tersebut tidak menyeluruh, sehingga penelitian lanjutan diperlukan untuk memahami keterbatasan inhibitor alami terkait keragaman komposisi, stabilitas, dan skalabilitas. Selain itu, banyak peneliti menggunakan metode elektrokimia konvensional, seperti polarisasi potentiodynamik (PDP) dan spektroskopi impedansi elektrokimia (EIS) untuk mengevaluasi kinerja inhibitor. Gapsari et al.[20], melaporkan bahwa ekstrak daun *Andrographis Paniculata* (APLE) berpotensi sebagai inhibitor berkelanjutan untuk baja karbon rendah dalam asam sulfat dengan efisiensi 81,87% (EIS) dan 95,14% (PDP) pada konsentrasi 4000 ppm. Melalui metode ini, perubahan potensial dan arus akibat pembentukan lapisan penghalang dapat dikenali dari data eksperimen.

Dalam penelitian ini, kami mengevaluasi pengaruh konsentrasi inhibitor terhadap laju korosi besi ASTM A36 dalam larutan NaCl 5%. Tujuan penelitian ini adalah memberikan kontribusi pada pengembangan inhibitor korosi ramah lingkungan. Sejauh pengetahuan kami, ekstrak kulit batang kapuk belum pernah diteliti sebagai inhibitor korosi pada besi ASTM A36 dalam larutan NaCl 5% menggunakan metode PDP dan EIS.

METODE PENELITIAN

Persiapan bahan

Penyelidikan korosi dilakukan menggunakan besi ASTM A36 yang memiliki komposisi atom adalah (C) = 0.25%, copper (Cu) = 0.20%, iron (Fe) = 98%, phosphorous (P) = 0.04%, manganese (Mn) = 1.03%, silicon (Si) = 0.28%, and sulfur (S) = 0.05%[21]. Dalam mempersiapkan spesimen yang digunakan, pertama-tama besi ASTM A36 dipotong ukuran $4 \times 1 \times 0.2 \text{ cm}^3$ dan dilapisi dengan bahan anti air seperti cat waterproof dengan menyisakan 1 cm^2 untuk terpapar larutan korosif. Sebelum dilakukan pengujian, spesimen yang terpapar larutan korosif di gosok dengan ampelas bergradasi 200, 400, 600, dan 800, kemudian dicuci lagi dengan aseton sebagai pelarut pembersih untuk memastikan permukaan logam berada dalam kondisi bersih dari kotoran dan minyak.

Persiapan ekstrak kulit pohon kapuk

Proses ekstraksi akuatik dilakukan untuk mendapatkan ekstrak kulit pohon kapuk, seperti yang dinyatakan dalam literatur yang disebutkan[22]. Pada awalnya, kulit pohon kapuk didapat pada lahan pertanian. Selanjutnya menghilangkan kotoran dan dicuci dengan air suling yang kemudian dilembapkan serta digiling menjadi bentuk yang lebih padat. Untuk tujuan mendapatkan ekstrak inhibitor, 10 gram kulit luar pohon kapuk dimasukkan ke dalam 1 liter air suling dipakai untuk menjaga rasio pelarut terhadap massa sampel (10 g) agar proses ekstraksi berlangsung optimal dan homogen kemudian campuran dipanaskan hingga 80°C menggunakan metode hidrotermal selama sekitar 6 jam untuk mempercepat difusi ekstraksi tanpa menyebabkan degradasi termal yang signifikan. Larutan yang dihasilkan di sentrifugasi dengan kecepatan 4000 rpm dan kombinasi ekstrak disimpan dalam oven pada suhu 75°C selama sehari untuk menguapkan kelebihan air dan mendapatkan ekstrak yang lebih pekat. Selanjutnya, untuk mempersiapkan lingkungan korosif untuk pengujian larutan natrium klorida 5 % digunakan, karena larutan ini sering diaplikasikan sebagai standar untuk menyimulasi lingkungan laut dalam uji korosi dibandingkan larutan korosif jenis lain, ini juga terkait dengan kandungan ion Cl^- yang bersifat sangat reaktif terhadap logam yang dimiliki oleh larutan. Pada langkah selanjutnya, larutan stok ekstrak diencerkan dengan larutan asam asetat pada $\text{pH} \pm 3$ untuk mendapatkan

dosis inhibitor kerja sebesar 1000, 2000, dan 3000 mg/L. Pada suhu 27 °C pengukuran elektrokimia dilakukan setelah perendaman selama 30 menit.

Pengujian Elektrokimia

Pengukuran PDP dan EIS digunakan alat Autolab Metrohm tipe 204N yang terhubung dengan susunan tiga elektroda khas untuk melakukan studi EIS dan polarisasi yaitu elektroda platina sebagai elektroda bantu, Elektroda reference (Ag/AgCl), dan Elektroda kerja (besi ASTM A36) dan terhubung dengan aplikasi Nova 1.11 pada komputer.

Pengujian PDP

uji polarisasi digunakan untuk menyelidiki dampak penghambatan yang dimiliki ekstrak kulit kapuk terhadap besi ASTM A36 ketika terpapar kondisi yang tidak menguntungkan. Dimana, semua spesimen yang memiliki luas permukaan 1 cm² yang tampak direndam dalam larutan (natrium klorida 5 %) pada suhu kamar. Hasil kurva polarisasi diperoleh pada laju pemindaian 1 mV/s dalam rentang potensial ± 250 mV untuk mendapatkan parameter seperti potensial korosi (E_{corr}), densitas arus korosi (i_{corr}), laju korosi (CR), lereng Tafel anodik dan katodik (β_a dan β_c). Selanjutnya untuk perhitungan resistansi polarisasi (R_p) ditentukan dengan menggunakan persamaan Stern-Geary dan perhitungan efisiensi penghambatan (IE) inhibisi didasarkan pada perubahan densitas arus korosi (i_{corr}) sebelum dan sesudah penambahan inhibitor dapat dilihat pada Persamaan (1) dan (2) dimana $I_{corr}^0 \times I'_{corr}$ dan adalah tanpa dan dengan inhibitor[23].

$$i_{corr} = \frac{\beta_a \beta_c}{2.303(\beta_a + \beta_c) R_p} \quad (1)$$

$$IE(\%) = \frac{I_{corr}^0 \times I'_{corr}}{I_{corr}^0} \times 100 \quad (2)$$

Pengujian EIS

Spektroskopi impedansi elektrokimia dilakukan menggunakan peralatan yang sama setelah elektroda direndam selama 30 menit pada larutan uji. Sinyal sinusoidal dengan amplitudo 10 mV diberikan dalam rentang frekuensi 10^{0.5} hingga 10⁻¹ Hz. Data impedansi kemudian diproses menggunakan perangkat lunak Autolab Metrohm dengan *fitting* terhadap rangkaian ekuivalen listrik (EEC). Parameter utama yang dianalisis adalah resistansi polarisasi (R_p) sebagai indikator ketahanan terhadap korosi. Selanjutnya, untuk menghitung efisiensi inhibisi berdasarkan nilai resistansi polarisasi (R_p) yang diperoleh dari pengukuran EIS dapat dilihat pada Persamaan (3), dimana $R_p - R_p^0$ adalah tanpa dan dengan inhibitor [24,25]:

$$IE(\%) = \frac{R_p - R_p^0}{R_p} \times 100\% \quad (3)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis PDP

Sebelum dan sesudah penambahan inhibitor, plot PDP besi ASTM A36 yang direndam dalam NaCl 5% ditunjukkan pada Gambar 1 dan dalam Tabel 1. Parameter korosi elektrokimia terkait meliputi kerapatan arus korosi (i_{corr}), efisiensi inhibisi, potensial korosi (E_{corr}), dan lereng Tafel katodik (β_c) dan anodik (β_a). Parameter ini adalah bagian dari proses korosi elektrokimia. Berdasarkan data tersebut, dapat disimpulkan bahwa mekanisme reaksi katodik tidak terlalu dipengaruhi oleh penambahan inhibitor ini ke dalam larutan asam. Akibatnya, mekanisme utama yang bertanggung jawab kinerja inhibitor pada reaksi

pelarutan logam anodik, dimana E_{corr} bergerak ke arah cabang anodik dan pada saat yang sama menurunkan kecenderungan korosi[26]. Inhibitor ekstrak kulit batang pohon kapuk telah terbukti memiliki kemampuan unik dalam melindungi logam terhadap korosi dalam kondisi asam, seperti yang ditunjukkan oleh data yang disajikan pada tabel 1. Ketika konsentrasi inhibitor adalah 3000 mg/L, potensial korosi (E_{corr}) diukur sebesar 550 mV. Berdasarkan informasi ini, tampaknya inhibitor memiliki dampak dalam meminimalkan risiko korosi. Telah ditunjukkan bahwa inhibitor ekstrak kulit kapuk memiliki kinerja yang lebih efektif pada konsentrasi yang lebih tinggi dalam hal kerapatan arus korosi (i_{corr}).

Selain itu, nilai potensial korosi (E_{corr}) juga tidak hanya dipengaruhi oleh keberadaan inhibitor tetapi juga bergantung pada jenis logam dan komposisi larutan korosif yang digunakan. Besi ASTM A36 yang memiliki kandungan utama besi ($\pm 98\%$) dengan unsur paduan lain seperti C, Mn, dan Si dapat mempengaruhi kinetika reaksi elektrokimia pada permukaan. Kehadiran unsur-unsur tersebut berkontribusi pada heterogenitas permukaan logam sehingga dapat menyebabkan variasi pada pergeseran E_{corr} ketika berinteraksi dengan media korosif. Di sisi lain, penggunaan larutan NaCl 5% sebagai medium uji juga memiliki peran penting karena ion Cl^- dikenal sangat agresif dalam mempercepat proses pitting dan penetrasi ke permukaan logam sehingga perubahan nilai E_{corr} menjadi lebih nyata saat inhibitor ditambahkan. Selain itu, senyawa aktif dalam ekstrak kulit batang kapuk seperti flavonoid dan tannin juga berperan penting sebagai donor elektron yang teradsorpsi pada permukaan logam sehingga memperkuat pergeseran E_{corr} dan menurunkan i_{corr} [15,27]. Meskipun inhibitor mampu menurunkan i_{corr} menjadi 0.15 (mA/cm²) pada konsentrasi 3000 mg/L. Pada konsentrasi yang lebih rendah, lereng Tafel (β_c) untuk inhibitor tetap cukup stabil. Namun, ketika ada penambahan inhibitor, penurunan β_a terjadi sehingga memvalidasi efektivitasnya sebagai agen pelindung jenis campuran[28]. Dalam hal efisiensi perlindungan (PDP) optimal adalah pada konsentrasi 3000 mg/L. Sebagai kesimpulan, dapat dikatakan bahwa ekstrak kulit batang kapuk memiliki karakteristik yang menjanjikan sebagai inhibitor korosi. Hal ini terlihat dari nilai-nilai yang tercatat untuk E_{corr} , i_{corr} , β_a , dan β_c .

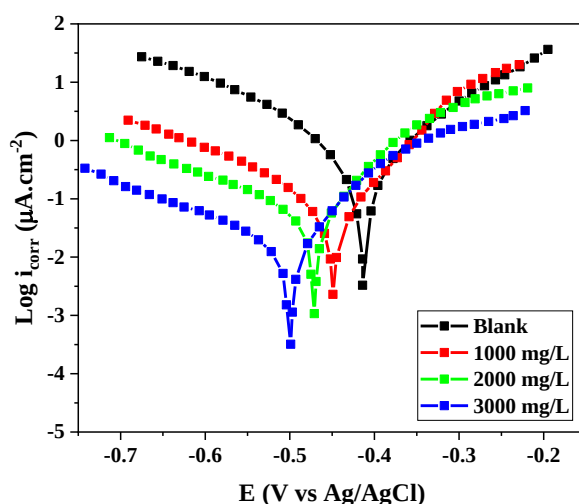
Tabel 1. Parameter PDP

C (mg/L)	β_c (V/dec)	β_a (V/dec)	E_{corr} (V)	f_a	f_c	R_p ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	i_{corr} (mA/cm ²)	Corrosion rate (mm/year)	IE (%)
blank	0.11	0.13	-0.44	-	-	31.76	0.81	1.51	-
1000	0.08	0.15	-0.50	0.91	0.28	45.62	0.49	0.92	39.04
2000	0.07	0.16	-0.53	0.62	0.10	73.12	0.28	0.53	64.49
3000	0.10	0.16	-0.55	0.36	0.02	178.44	0.15	0.28	81.61

Dari temuan ini, kita dapat mengategorikan inhibitor yang diselidiki sebagai jenis campuran dengan dominasi anodik. Hal ini disebabkan perbedaan potensial antara adanya dan tidak adanya inhibitor kurang dari 85 milivolt[29]. Sebagai hasil, kita dapat menilai inhibitor kita berdasarkan penurunan daya pelindung yang dimilikinya sejalan dengan temuan yang diperoleh adalah 81.61 %. Selain itu, R_p adalah parameter penting yang berfungsi untuk memverifikasi kinerja penghambatan korosi yang sebelumnya ditentukan melalui nilai i_{corr} . Dengan membandingkan nilai R_p yang diperoleh tanpa adanya inhibitor dengan nilai yang diperoleh dengan adanya inhibitor, efisiensi inhibitor tersebut semakin dikonfirmasi. Karena R_p adalah ukuran resistansi terhadap transfer muatan yang terjadi selama proses korosi elektrokimia, nilai R_p yang lebih tinggi dikaitkan dengan laju korosi yang lebih rendah yang merupakan bukti bahwa perlindungan yang diberikan meningkat.

Seperti yang terlihat pada tabel 1, nilai R_p meningkat seiring dengan peningkatan konsentrasi inhibitor. Selanjutnya, inhibitor tersebut menunjukkan ketahanan yang signifikan terhadap korosi pada permukaan logam. Hal ini dibuktikan oleh nilai R_p yang tinggi yang tercatat pada semua konsentrasi, terutama pada 3000 mg/L. Sebagai akibatnya,

nilai R_p (PDP) yang diperoleh sangat sesuai dengan nilai R_p (EIS) yang diperoleh dari pengukuran impedansi, yaitu R_p tertinggi pada 3000 mg/L. Konsistensi ini memberikan bukti lebih lanjut bahwa analisis elektrokimia dapat diandalkan dan bahwa inhibitor mampu mencapai tujuan yang dimaksudkan.



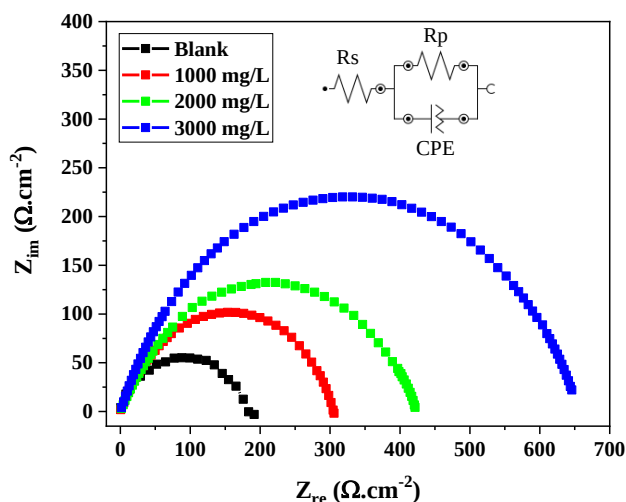
Gambar 1. Kurva plot PDP

Lereng tafel yang diperoleh dari pengukuran PDP digunakan untuk menghitung kontribusi fraksional anodik (f_a) dan katodik (f_c). Hal ini dilakukan untuk memberikan penjelasan lebih lanjut mengenai mekanisme dominan penghambatan korosi. Data yang disajikan dalam tabel 1 mengilustrasikan bahwa baik f_a maupun f_c berubah seiring dengan konsentrasi inhibitor. Hal ini menunjukkan bahwa mekanisme inhibisi bersifat campuran dengan respons anodik menjadi efek yang dominan dalam sebagian besar kasus. Lebih tepatnya, nilai f_a yang semakin kecil dan kurang dari 0.6 untuk konsentrasi 3000 mg/L adalah ($f_a = 0.36$) yang menunjukkan adanya kontribusi anodik yang kuat seiring peningkatan konsentrasi [30]. Kesimpulan bahwa inhibitor membatasi baik proses pelarutan logam anodik maupun reaksi evolusi hidrogen katodik didukung oleh bukti-bukti ini. Ditunjukkan bahwa proses inhibisi mencakup pemblokiran geometris situs aktif oleh molekul inhibitor yang teradsorpsi, sebagaimana dibuktikan oleh dominasi perilaku anodik pada nilai f_a yang lebih rendah, serta peningkatan resistansi polarisasi. Sebagai hasil dari penemuan-penemuan ini, proses penutupan permukaan oleh inhibitor yang dihipotesiskan diperkuat yang pada akhirnya menghasilkan permukaan logam yang terlindungi baik secara fisik maupun lingkungan.

Analisa EIS

Berbagai konsentrasi inhibitor mulai dari blank hingga 3000 mg/L dipilih untuk mengevaluasi kinerja ekstrak inhibitor dalam 5% NaCl berdasarkan karakteristik yang bergantung pada konsentrasi. Diagram Nyquist pada Gambar 2 menggambarkan setengah lingkaran yang tertekan dengan diameter yang meningkat seiring dengan konsentrasi inhibitor. Hal ini menunjukkan bahwa keberadaan inhibitor meningkatkan ketahanan korosi besi ASTM A36 saat terpapar 5% NaCl. Karena perilaku ini, tampaknya transfer muatan adalah mekanisme utama di balik proses korosi. Selanjutnya, tampaknya inhibitor tersebut terserap ke permukaan logam untuk memperlambat laju pertukaran elektron antara elektroda dan larutan. Meskipun proses korosi tidak sepenuhnya berhenti, molekul inhibitor yang telah teradsorpsi berfungsi sebagai penghalang yang sangat memperlambat kinetika transfer muatan. Karena itu, nilai resistansi polarisasi (R_p) meningkat dan efisiensi inhibisi juga membaik. Perilaku kapasitor yang dapat dilihat dalam bentuk setengah lingkaran. Perilaku

ini menunjukkan bahwa lapisan pelindung yang dihasilkan oleh inhibitor efektif. Gambar 2 mengilustrasikan rangkaian ekuivalen yang digunakan untuk proses penyesuaian.



Gambar 2. Kurva plot EIS

Pengamatan loop kapasitif pada plot Nyquist (Gambar 2), khususnya lingkaran setengah yang jelas dan membesar diameternya seiring dengan peningkatan konsentrasi inhibitor, mencerminkan karakteristik kapasitansi lapisan yang dihasilkan dari pembentukan lapisan inhibitor pelindung pada antarmuka logam/larutan.

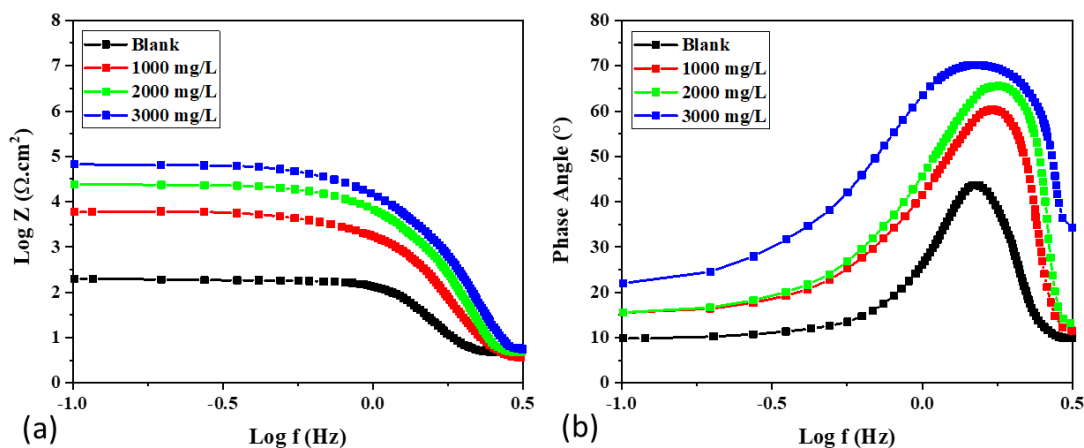
Tabel 2. Parameter EIS

C (mg/L)	CPE (F.cm ²)x10 ⁻⁵	Rp (Ω.cm ²)	Rs (Ω.cm ²)	CPE	IE (%)
Blank	8.11	190.21	0.68	0.99	-
1000	1.45	305.36	0.59	0.99	37.77
2000	0.23	421.43	1.39	0.99	54.91
3000	0.11	645.81	1.72	0.99	70.57

Tabel 2 menyajikan parameter elektrokimia yang diidentifikasi melalui analisis data EIS, menggunakan sirkuit ekuivalen sederhana yang dicirikan oleh konstanta waktu tunggal [31]. Data EIS eksperimen dianalisis menggunakan model sirkuit ekuivalen yang mencakup resistansi larutan (R_s), elemen fasa konstan (CPE) untuk mengatasi kekasaran dan tidak-homogenan permukaan serta resistansi polarisasi (R_p) yang menandakan resistansi transfer muatan. Model ini secara efektif menyimulasikan proses korosi yang mencakup pembentukan lapisan permukaan.

Efisiensi inhibisi (IE) EIS meningkat seiring dengan konsentrasi inhibitor, mencapai puncak 70.57 % untuk 3000 mg/L (Tabel 2). Temuan ini memvalidasi bahwa ekstrak kulit batang kapuk sebagai inhibitor menawarkan perlindungan signifikan terhadap korosi logam dalam asam klorida. Pengamatan ini sejalan dengan hasil yang diperoleh dari pengukuran kurva polarisasi potensiodinamik.

Analisis spektrum Bode modulus logam lunak yang direndam dalam 5 % NaCl dengan konsentrasi inhibitor yang berbeda menunjukkan bahwa adsorpsi inhibitor meningkatkan perlindungan dengan meningkatkan impedansi pada frekuensi yang lebih rendah. Selanjutnya, seiring dengan peningkatan konsentrasi inhibitor terjadi peningkatan sudut fasa, menunjukkan bahwa inhibitor menutupi area permukaan yang lebih luas.



Gambar 3. Plot (a) bode modulus (b) phase

Pengamatan puncak tunggal pada plot sudut fase Bode modulus (Gambar. 3 (a)) menandakan adanya konstanta waktu yang unik, terkait dengan proses elektrokimia primer yaitu resistansi transfer muatan pada antarmuka logam/larutan. Hal ini menunjukkan bahwa mekanisme inhibisi melibatkan pembentukan lapisan inhibitor yang konsisten dan stabil yang berfungsi sebagai lapisan kapasitif tunggal. Selanjutnya, pola serupa yang diamati pada diagram bode modulus di semua konsentrasi menyiratkan mekanisme terpadu yang mengatur proses korosi. Selanjutnya, penyimpangan dari nilai optimal (90°) pada plot phase (Gambar 3(b)), menunjukkan dispersi frekuensi yang diakibatkan oleh permukaan yang tidak seragam dan pembentukan lapisan berpori akibat adsorpsi inhibitor.

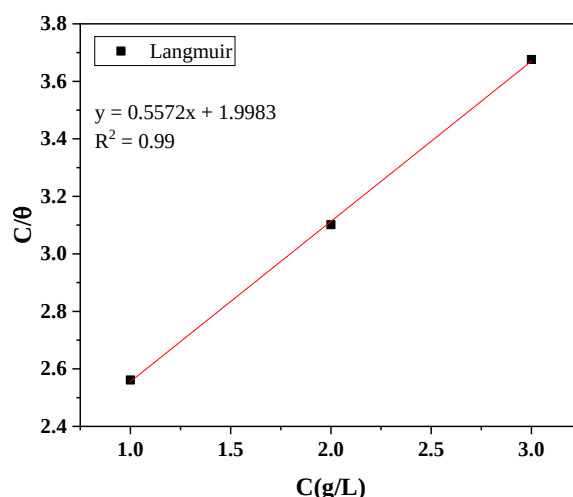
Adsorpsi Isotherm

Studi isotherm adsorpsi memberikan wawasan tentang perilaku molekul organik pada permukaan logam. Untuk menilai reaktivitas inhibitor, nilai θ yang diperoleh dari uji PDP dianalisis menggunakan berbagai model adsorpsi termasuk isotherm Temkin, Frumkin, Freundlich, dan Langmuir (lihat Gambar 4 dan Tabel 3). Analisis ini menjelaskan interaksi inhibitor dengan permukaan logam dan mengilustrasikan efektivitas setiap model dalam menangkap perilaku adsorpsi inhibitor organik di lingkungan asam[32].

Tabel 3. Parameter adsorpsi isothermal

Persamaan adsorpsi	Persamaan Linier	K_{ads} (L.mol ⁻¹)	ΔG_{ads} kJ/mol
Langmuir	$y = 0.5572x + 1.9983$	500.42	-25.34
Freundlich	$y = 0.6769x - 0.4046$	2538.63	-29.36
Temkin	$y = -0.3652x - 0.263$	1832.31	-28.55
Framkin	$y = 0.8344x - 0.5367$	3441.53	-30.11

Pada tabel 3 menyajikan parameter adsorpsi isothermal seperti persamaan linier, K_{ads} dan ΔG_{ads} . Dimana ΔG_{ads} sering digunakan untuk menyimpulkan karakteristik adsorpsi, penelitian terbaru menyarankan kehati-hatian dalam mengandalkan nilai-nilai ini secara eksklusif karena sifat empiris dan kontingen dari model isotherm adsorpsi. Akibatnya dalam penelitian ini, ΔG_{ads} dianggap semata-mata sebagai ukuran spontanitas.



Gambar 4. Adsorpsi *isothermal Langmuir*

Gambar 4 mengilustrasikan hubungan antara C/θ terhadap C (Adsorpsi *isothermal Langmuir*) yang digunakan untuk mengevaluasi interaksi antara molekul inhibitor dan permukaan logam. Mekanisme global paling efektif dipahami melalui integrasi temuan eksperimental seperti penyesuaian *isoterm Langmuir*, peningkatan R_p , penurunan CPE, dan cakupan permukaan dengan pemodelan teoritis. Bersama-sama, elemen-elemen ini memberikan bukti kuat untuk pembentukan lapisan inhibitor yang padat dan teradsorpsi kuat[32]. Dalam penelitian ini, nilai ΔG_{ads} yang dihitung mengikuti persamaan adsorpsi *isothermal langmuir* karena paling mendekati nilai 1 pada R^2 , dimana nilai untuk inhibitor ekstrak kulit batang pohon kapuk adalah -25.34 kJ/mol. Hasil menunjukkan bahwa inhibitor yang dianalisis menunjukkan perilaku campuran, hal ini menyoroti pembentukan interaksi koordinasi antara inhibitor dan permukaan logam[33]. Dimana inhibitor juga interaksi kimia yang lebih kuat dengan permukaan logam yang menunjukkan bahwa ini adalah solusi yang lebih efektif dan tahan lama untuk perlindungan korosi.

KESIMPULAN

Inhibitor ekstrak kulit pohon kapuk dalam menghambat korosi pada besi ASTM A36 dalam 5% NaCl dievaluasi menggunakan pengujian PDP dan EIS dengan efisiensi masing-masing adalah 81.61% dan 70.57%. Dimana inhibitor menunjukkan efektivitas penghambatan korosi yang signifikan, sebagaimana dibuktikan oleh data eksperimen memperlihatkan kinerja yang unggul. Perilaku adsorpsi inhibitor sesuai dengan model adsorpsi *Langmuir* dan pengukuran PDP dengan nilai ΔG_{ads} adalah -25.34 kJ/mol, menunjukkan bahwa inhibitor berfungsi sebagai inhibitor jenis campuran yang mana secara efektif mengurangi evolusi hidrogen katodik dan disolusi logam anodik. Pada uji EIS, inhibitor yang telah teradsorpsi bekerja sebagai penghalang yang dapat memperlambat kinetika transfer muatan penyebab korosi. Dimana kedua pengujian ini dapat membuktikan bagaimana inhibitor dapat mempengaruhi lingkungan sekitarnya untuk menghalangi interaksi antara larutan korosif dengan permukaan logam. Namun, penelitian ini masih terbatas pada kondisi laboratorium dan hanya melibatkan satu jenis media korosif yaitu NaCl 5% dan tidak mempertimbangkan pengaruh variasi suhu dan pH secara sistematis. Oleh karena itu, penelitian lanjutan disarankan untuk mengevaluasi stabilitas lapisan inhibitor dalam kondisi industri yang lebih kompleks, seperti variasi suhu, pH, dan membandingkannya dengan inhibitor sintesis komersial untuk menilai efisiensi biaya dan potensi aplikasinya pada skala industri

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kami ucapkan kepada Almh. Prof. Dr. Ir. Femiana Gapsari, S.T., M.T. atas segala bimbingan dan ilmu yang telah diberikan serta bantuan materiil untuk menyelesaikan penelitian ini. Semoga segala amal ibadah beliau diterima Allah S , Amin.

REFERENSI

- [1] V. K. R. Pulapa and M. R. Kotupalli, "Cyanthillium cinerium(L.) extract as green corrosion inhibitor for mild steel in acidic medium: Electrochemical and computational study," *International Journal of Electrochemical Science* , vol. 20, no. 7, Jul. 2025, doi: 10.1016/j.ijoes.2025.101020.
- [2] A. Syarief and A. A. Rahmatuloh, "Pengaruh Udara Dan Perendaman Larutan Nacl Terhadap Laju Korosi Pada Lasan Baja S45C," *Scientific Journal of Mechanical Engineering Kinematika*, vol. 5, no. 1, pp. 67–74, Jun. 2020, doi: 10.20527/sjmekinematika.v5i1.140.
- [3] H. Parangusan, M. H. Sliem, A. M. Abdullah, M. Elhaddad, N. Al-Thani, and J. Bhadra, "Plant extract as green corrosion inhibitors for carbon steel substrate in different environments: A systematic review," Apr. 01, 2025, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.ijoes.2024.100919.
- [4] C. Du, X. Wang, Y. Chen, X. Lu, and H. Wang, "Synergistic effect between two quaternary ammonium salts and thiourea as corrosion inhibitors for X70 steels in CO₂ saturated 3.5% NaCl solution," *Int J Electrochem Sci*, vol. 19, no. 1, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.ijoes.2023.100443.
- [5] M. Aoulad Belayachi *et al.*, "Electrochemical, surface, and theoretical studies on amine-based organic compounds as efficient corrosion inhibitors for mild steel in 1 M HCl," *International Journal of Electrochemical Science* , vol. 20, no. 4, Apr. 2025, doi: 10.1016/j.ijoes.2025.100951.
- [6] M. Vakili, P. Koutnik, and J. Kohout, "Addressing Hydrogen Sulfide Corrosion in Oil and Gas Industries: A Sustainable Perspective," Feb. 01, 2024, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/su16041661.
- [7] I. Danaee, P. Nikparsa, and M. R. Khosravi-Nikou, "Computational and Experimental Study on the Adsorption and Inhibition Effects of 1,3-Benzothiazol-6-ol on the Corrosion of Steel X80 in Acidic Solution," *Zeitschrift fur Physikalische Chemie*, vol. 235, no. 5, pp. 549–581, May 2021, doi: 10.1515/zpch-2019-1383.
- [8] R. T. Loto, O. U. Uyanwune, A. O. Oluwasesan, I. J. Oladipo, and M. E. Agbi, "Evaluation of Vitis vinifera seed oil as a green corrosion inhibitor for high-carbon steel and ferrovanadium alloys in sulfuric acid," *International Journal of Electrochemical Science* , vol. 20, no. 3, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.ijoes.2025.100936.
- [9] S. Rameshkumar, I. Danaee, M. RashvandAvei, and M. Vijayan, "Quantum chemical and experimental investigations on equipotent effects of (+)R and (-)S enantiomers of racemic amisulpride as eco-friendly corrosion inhibitors for mild steel in acidic solution," *J Mol Liq*, vol. 212, pp. 168–186, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.molliq.2015.09.001.
- [10] N. Bahramipناه, I. Danaee, and M. Sayyadpisheh, "Electrochemical and Anticorrosive Behavior of Synthesized Diimine-Based Compound on X80 Steel in Acidic Oil and Gas Well Treatment Fluids at Different Temperatures," *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, vol. 56, no. 4, pp. 457–468, Jul. 2020, doi: 10.3103/S1068375520040031.
- [11] S. Elhady, E. G. Zaki, O. E. El-Azabawy, and I. S. Fahim, "Electrochemical evaluation of green corrosion inhibitor based on ground coffee waste in Petroleum fields," *Results in Engineering*, vol. 21, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.101880.
- [12] R. Lei *et al.*, "Sunflower stalk extract as a novel green inhibitor on aluminium corrosion in HCl solution," *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp*, vol. 687, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.colsurfa.2024.133358.
- [13] H. Thacker and V. Ram, "Green corrosion inhibitors derived from plant extracts and drugs for mild steel in acid media: A review," Jan. 01, 2025, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.rsufi.2024.100364.

- [14] A. Banso and A. M.A, "Phytochemical and antimicrobial activity of Ceiba pentandra against some pathogenic bacteria," *Journal of Current Opinion in Crop Science*, vol. 4, pp. 179–184, Dec. 2023, doi: 10.62773/jcocs.v4i4.217.
- [15] S. Menaga and N. Geetha, "Bioactive compounds in Ceiba pentandra: GC–MS analysis and molecular docking insights into potential anticancer properties," *Next Research*, vol. 2, no. 3, p. 100500, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nexres.2025.100500>.
- [16] S. Wan, T. Zhang, H. Chen, B. Liao, and X. Guo, "Kapok leaves extract and synergistic iodide as novel effective corrosion inhibitors for Q235 carbon steel in H₂SO₄ medium," *Ind. Crops Prod.*, vol. 178, p. 114649, 2022.
- [17] F. Liu, F. Zhao, W. Liu, G. Xie, and X. Liu, "Enhanced combination of mechanical and electrical properties of a Cu-Cr-Zr alloy by optimized two-step thermomechanical treatment," *Mater Today Commun*, vol. 39, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.mtcomm.2024.108876.
- [18] H. M. Hassan, "Potentilla erecta extract as a green and eco-friendly corrosion inhibitor for 360 carbon steel in hydrochloric acid environment," *International Journal of Electrochemical Science*, vol. 20, no. 6, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.ijoes.2025.101028.
- [19] A. Thomas, M. Prajila, K. M. Shainy, and A. Joseph, "A green approach to corrosion inhibition of mild steel in hydrochloric acid using fruit rind extract of *Garcinia indica* (Binda)," *J Mol Liq*, vol. 312, p. 113369, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113369>.
- [20] 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.
- [21] F. Gapsari, P. H. Setyarini, S. Hidayatullah, Y. D. Puraditya, H. Wijaya, and Z. Abidin, "ASTM A36 steel corrosion rate control in 1M HCl using Electrophoretic Deposition (EPD) with chitosan coating," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 1034, no. 1, p. 012169, Feb. 2021, doi: 10.1088/1757-899x/1034/1/012169.
- [22] Y. Li *et al.*, "Deciphering composition-structure-taste relationship of black tea-infusion via assessments of nanoparticles by centrifugal treatment," *LWT*, vol. 222, Apr. 2025, doi: 10.1016/j.lwt.2025.117601.
- [23] G. Siğircik, T. Tüken, and M. Erbil, "Assessment of the inhibition efficiency of 3,4-diaminobenzonitrile against the corrosion of steel," *Corros Sci*, vol. 102, pp. 437–445, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.corsci.2015.10.036.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] I. Danaee, M. Gholami, M. RashvandAvei, and M. H. Maddahy, "Quantum chemical and experimental investigations on inhibitory behavior of amino-imino tautomeric equilibrium of 2-aminobenzothiazole on steel corrosion in H₂SO₄ solution," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 26, pp. 81–94, Jun. 2015, doi: 10.1016/j.jiec.2014.11.018.
- [27] M. Xu, H. Shen, R. Wen, X. Wang, and G. Xu, "Sustainable fabrication and performance characterization of programmable kapok (*Ceiba pentandra*) paper via lignin-mediated interfacial engineering," *Int J Biol Macromol*, vol. 319, Aug. 2025, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2025.145686.
- [28] C. Zeng, Z. Y. Zhou, W. J. Mai, Q. H. Chen, J. B. He, and B. K. Liao, "Exploration on the corrosion inhibition performance of *Salvia miltiorrhiza* extract as a green corrosion inhibitor for Q235 steel in HCl environment," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 32, pp. 3857–3870, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.jmrt.2024.09.003.
- [29] S. Hidayatullah, N. Herlina Sari, A. Akromul Huda, and M. Pradityatama, "Protech Biosystems Journal 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,” vol. 5, no. 1, 2025, doi: 10.31764.
- [30] 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.
- [31] W. Ettahiri *et al.*, “Synthesis, Characterization, Antibacterial, Antifungal and Anticorrosion Activities of 1,2,4-Triazolo[1,5-a]quinazolinone,” *Molecules*, vol. 28, no. 14, Jul. 2023, doi: 10.3390/molecules28145340.
- [32] W. Ettahiri *et al.*, “Regio- and chemoselective synthesis of new isoxazolyll-linked benzimidazolones via 1,3-dipolar cycloaddition: Characterization, corrosion studies, density functional theory, and Monte Carlo simulations,” *Fuel*, vol. 371, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.fuel.2024.132058.
- [33] Syarif Hidayatullah, Nasmi Herlina Sari, Maharsa Pradityatama, and Suteja, “Efektifitas Perlindungan Korosi Aluminium Menggunakan Inhibitor Ekstrak Labu Kuning : Studi Elektrokimia dan Permukaan,” *Jurnal Mesin Nusantara*, vol. 8, no. 1, pp. 97–108, Jul. 2025, doi: 10.29407/jmn.v8i1.24651.