



PENGUNAAN LIMBAH PERTANIAN BIJI KAPUK SEBAGAI SUMBER INHIBITOR KOROSI ALAMI PADA ALUMINIUM 6061

THE USE OF KAPOK SEED AGRICULTURAL WASTE AS A SOURCE OF NATURAL CORROSION INHIBITOR FOR ALUMINUM 6061

Syarif Hidayatullah^{1*}, Ahmad Akromul Huda², Suteja³

¹⁻³Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik, Universitas Mataram, Indonesia

*Co-author: syarift@gmail.com.

Article History:

Received : 20-10-2025
Revised : 14-12-2025
Accepted : 16-12-2025
Online : 18-12-2025

Keywords:

Kapok;
Inhibitor corrosion;
Acid;
Freundlich isotherm;

Kata Kunci:

Kapuk;
Inhibitor korosi;
Asam;
Isothermal freundlich;



Abstract: Aluminum 6061 is one of the most widely used materials across various industrial sectors due to its good mechanical properties, lightweight nature, and corrosion resistance. However, in acidic environments, aluminum remains susceptible to corrosion, which can reduce its performance and service life. This study utilizes agricultural waste from kapok seeds (*Ceiba pentandra*) as an environmentally friendly corrosion inhibitor for Aluminum 6061. The extract was obtained through maceration using ethanol as the solvent and was applied in corrosion tests of Aluminum 6061 in 1 M HCl solution. The evaluation was conducted using potentiodynamic polarization (PDP) and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) techniques, along with isothermal adsorption analysis to understand the adsorption mechanism of the inhibitor on the metal surface. The results showed that the kapok seed extract significantly increased polarization resistance and reduced the corrosion rate, achieving a maximum inhibition efficiency of 78.77% at an optimal concentration of 3000 ppm. The inhibitor adsorption followed the Freundlich isotherm model, indicating strong binding interactions between the inhibitor molecules and the aluminum surface. Therefore, kapok seed extract has great potential as an environmentally friendly and cost-effective corrosion inhibitor for aluminum-based industries.

Abstrak: Aluminium 6061 menjadi salah satu material yang banyak digunakan di berbagai sektor industri karena memiliki sifat mekanik yang baik, ringan, serta ketahanan terhadap korosi. Namun, dalam lingkungan asam aluminium tetap rentan mengalami korosi yang dapat menurunkan performa dan umur pakai material. Dimana penelitian ini memanfaatkan ekstrak limbah pertanian biji kapuk (*Ceiba pentandra*) sebagai inhibitor korosi ramah lingkungan pada aluminium 6061. Ekstrak diperoleh melalui metode maserasi dengan pelarut etanol, kemudian diaplikasikan pada pengujian korosi aluminium 6061 dalam larutan HCl 1 M. Pengujian dilakukan menggunakan teknik *potentiodynamic polarization* (PDP) dan *electrochemical impedance spectroscopy* (EIS), serta analisis adsorpsi *isothermal* untuk memahami mekanisme adsorpsi inhibitor pada permukaan logam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ekstrak biji kapuk mampu meningkatkan resistansi polarisasi dan menurunkan laju korosi secara signifikan, dengan efisiensi inhibisi maksimum sebesar 78.77 % pada konsentrasi optimum 3000 ppm. Adsorpsi inhibitor mengikuti model *isotherm Freundlich*, menunjukkan keterikatan molekul inhibitor yang kuat pada permukaan aluminium. Ekstrak biji kapuk berpotensi menjadi alternatif inhibitor korosi yang ramah lingkungan dan ekonomis bagi industri berbasis aluminium.



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

A. LATAR BELAKANG

Aluminium merupakan salah satu material logam yang sangat diminati dalam bidang rekayasa dan manufaktur karena kombinasi keunggulan sifat mekanis, bobot yang ringan, dan kemampuan tahan korosi yang relatif baik (Carmona-Hernandez et al., 2023). Salah satu paduan aluminium yang banyak digunakan, yaitu aluminium 6061, memiliki aplikasi luas pada konstruksi, transportasi, serta industri alat berat dan elektronik. Namun demikian, dalam beberapa proses industri, material aluminium 6061 sering kali harus berhadapan dengan lingkungan asam, misalnya selama proses pembersihan kimia, perawatan, ataupun pengolahan limbah (Jmiai et al., 2018). Kontak langsung antara aluminium dan asam, seperti asam klorida (HCl), dapat menyebabkan terjadinya korosi yang signifikan, sehingga mengurangi performa, masa pakai, serta menimbulkan kerugian ekonomi yang tidak sedikit (Jmiai et al., 2018).

Upaya mitigasi korosi pada aluminium telah banyak dilakukan, salah satunya melalui aplikasi inhibitor korosi. Penggunaan inhibitor organik dianggap sebagai strategi paling efisien dan ekonomis dalam menghambat proses korosi pada lingkungan basah, khususnya pada sistem dengan penggunaan larutan asam (Swathi et al., 2017). Berbagai senyawa anorganik maupun organik sintetis telah dikembangkan dan diaplikasikan sebagai inhibitor korosi pada aluminium maupun logam lainnya. Namun, sebagian besar dari inhibitor anorganik/sintetis tersebut memiliki kelemahan utama, yaitu potensi toksisitas, biaya produksi yang tinggi, serta dampak lingkungan yang kurang bersahabat (Nayak et al., 2020). Regulasi lingkungan yang semakin ketat juga mendorong pembatasan atau bahkan pelarangan penggunaan inhibitor sintetis tertentu.

Kondisi ini mendorong para peneliti untuk menemukan alternatif inhibitor korosi yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan, salah satunya dengan memanfaatkan sumber daya alam atau limbah hayati. Dalam beberapa tahun terakhir, bahan berbasis tanaman, ekstrak tumbuhan, dan limbah pertanian mulai banyak dilirik sebagai kandidat inhibitor korosi alami. Keunggulan yang ditawarkan antara lain mudah diperoleh, ekonomis, dapat terdegradasi secara alami, serta memiliki dampak yang minimal terhadap lingkungan dan kesehatan manusia (Arellanes-Lozada et al., 2018; Tan et al., 2023). Selain itu, pemanfaatan limbah pertanian sebagai inhibitor korosi juga memberikan solusi terhadap permasalahan limbah serta mendukung pengembangan ekonomi sirkular.

Biji kapuk (*Ceiba pentandra*) merupakan salah satu limbah pertanian yang melimpah di Indonesia dan berbagai negara tropis, namun belum banyak dimanfaatkan secara optimal. Biji kapuk diketahui mengandung senyawa-senyawa aktif seperti flavonoid, saponin, dan tanin yang dapat berperan sebagai agen inhibitor korosi (Nayak et al., 2020). Mekanisme penghambatan korosi oleh senyawa-senyawa ini biasanya melalui proses adsorpsi pada permukaan logam, sehingga membentuk lapisan pelindung yang dapat menurunkan laju reaksi korosi (Tan et al., 2022). Namun, hingga saat ini, belum banyak laporan ilmiah yang menginvestigasi potensi ekstrak biji kapuk sebagai inhibitor korosi pada aluminium, khususnya pada paduan aluminium 6061 yang terekspos pada lingkungan asam.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji efektivitas ekstrak limbah pertanian biji kapuk sebagai inhibitor korosi alami pada aluminium 6061 dalam larutan HCl. Larutan HCl 1 M digunakan dalam penelitian ini didasarkan pada kondisi industri nyata khususnya pada proses pembersihan kimia (*acid pickling*), penghilangan kerak (*descaling*), dan perlakuan permukaan aluminium di mana larutan asam klorida dengan konsentrasi sedang hingga tinggi umum digunakan. Pada konsentrasi HCl 1M mampu mensimulasikan/meniru lingkungan korosif yang cukup agresif untuk mengevaluasi efektivitas inhibitor secara lebih komprehensif namun masih berada dalam rentang yang sering digunakan dalam studi laboratorium dan aplikasi industri. Selanjutnya, studi dilakukan melalui pendekatan elektrokimia menggunakan teknik *potentiodynamic*

polarization (PDP) dan *electrochemical impedance spectroscopy* (EIS), serta analisis adsorpsi *isothermal* untuk memahami mekanisme interaksi inhibitor dengan permukaan logam. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan baru mengenai pemanfaatan limbah pertanian sebagai solusi inovatif dalam permasalahan korosi di industri, sekaligus mendukung perkembangan teknologi hijau dan berkelanjutan.

B. METODE PENELITIAN

1. Persiapan Ekstrak Biji Kapuk dengan Metode Maserasi

Biji kapuk (*Ceiba pentandra*) dikumpulkan dari limbah pertanian, kemudian dibersihkan dan dikeringkan di bawah sinar matahari atau dalam oven pada suhu 50°C hingga kering. Biji kapuk yang telah kering digiling hingga menjadi serbuk halus. Sebanyak 100 gram serbuk biji kapuk diekstrak menggunakan 500 mL etanol 96% dengan metode maserasi selama 48 jam pada suhu kamar, dengan pengadukan setiap 6 jam. Setelah proses maserasi selesai, campuran disaring menggunakan kertas saring. Filtrat dievaporasi menggunakan rotary evaporator pada suhu 40–50°C hingga diperoleh ekstrak kental. Ekstrak ini selanjutnya dilarutkan dalam air deionisasi untuk membuat larutan stok 10.000 ppm yang kemudian diencerkan ke konsentrasi ppm sesuai kebutuhan penelitian.

2. Persiapan Spesimen Aluminium 6061 dan Larutan Korosif

Aluminium 6061 dipotong berukuran 1 cm × 2 cm × 0,2 cm. Permukaan spesimen digosok bertahap menggunakan kertas amplas (grit 400, 800, dan 1200), lalu dicuci dengan air deionisasi dan etanol, kemudian dikeringkan. Bagian spesimen yang tidak diuji dilapisi dengan lakban tahan kimia agar hanya satu permukaan yang terekspos larutan. Dimana Komposisi kimia aluminium 6061 terdiri dari Mg (0.829 %), Si (0.821 %), Cu (0.231 %), Fe (0.187 %), Cr (0.123 %), Zn (0.093 %), Mn (0.071 %), Ti (0.027 %), dan Al sisanya (Margono et al., 2025). Selanjutnya, larutan korosif HCl 1 M disiapkan dari HCl pro-analisis dan air deionisasi. Ekstrak biji kapuk ditambahkan ke larutan HCl 1 M untuk membentuk variasi konsentrasi inhibitor.

3. Pengujian Elektrokimia

Pengujian elektrokimia dilakukan 3 kali pengulangan dengan menggunakan sel tiga elektroda, dengan aluminium 6061 sebagai elektroda kerja, platina sebagai elektroda bantu, dan Ag/AgCl sebagai elektroda referensi. Spesimen diimersi dalam larutan HCl 1 M yang mengandung ekstrak biji kapuk pada berbagai konsentrasi maupun tanpa inhibitor sebagai blank. Setelah *Open Circuit Potential* (OCP) tercapai dan stabil selama kurang lebih 30 menit, dilakukan pengujian elektrokimia yang meliputi potentiodynamic polarization (PDP) dan electrochemical impedance spectroscopy (EIS). Pengujian PDP dilakukan dengan memindai potensial dari -250 mV hingga +250 mV terhadap OCP dengan laju pemindaian 1 mV/s, sementara EIS dilakukan pada rentang frekuensi 100 kHz hingga 1 mHz dengan amplitudo 10 mV di sekitar OCP. Data yang diperoleh dari kedua metode ini dianalisis untuk menentukan parameter laju korosi (I_{corr}), *potensial korosi* (E_{corr}), *charge transfer resistance* (R_{ct}), konstanta phase elemen (CPE), serta efisiensi inhibisi. Dimana efisiensi PDP dan EIS dapat dicapai melalui persamaan dibawah ini (Gapsari et al., 2025; Hidayatullah et al., 2024):

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

$$IE(\%) = \frac{R_{ct} - R_{ct}^0}{R_{ct}} \times 100 \quad (2)$$

Dimana $I_{corr}^0 \times I'_{corr}$ dan $R_{ct} - R_{ct}^0$ adalah tanpa dan dengan inhibitor.

C. HASIL DAN PEMBAHASAN

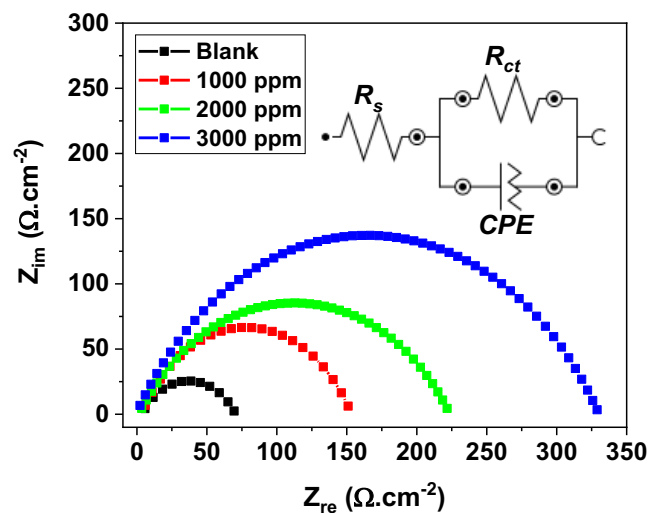
1. Analisa EIS

Plot *Nyquist* dan Bode frekuensi serta phase ditunjukkan pada **Gambar 1** dan **Gambar 2**. Plot *Nyquist* menunjukkan lingkaran kapasitif yang tertekan dengan berbagai lebar dan ukuran lingkaran meningkat seiring dengan peningkatan konsentrasi inhibitor dibandingkan dengan larutan HCl yang digunakan sebagai kontrol. Pada plot *Nyquist*, resistansi larutan diwakili oleh perpotongan frekuensi tinggi sedangkan resistansi transfer muatan diwakili oleh perpotongan frekuensi rendah. Ini berarti bahwa ukuran loop kapasitif *Nyquist* dan kerentanan logam terhadap proses yang dikendalikan transfer muatan pada antarmuka logam/larutan sangat terkait. Lingkaran kapasitif semakin besar seiring dengan peningkatan konsentrasi inhibitor, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 1**, secara berurutan. **Tabel 1** menunjukkan parameter EIS.

Tabel 1. Parameter EIS

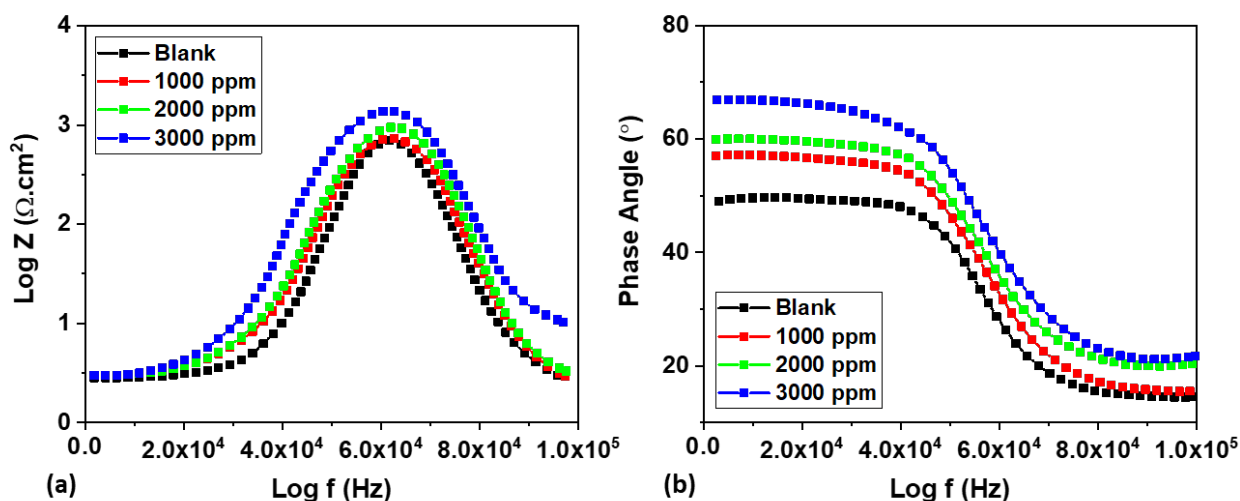
<i>C</i> (ppm)	<i>CPE</i> ($\mu F.cm^2$)	<i>R_{ct}</i> ($\Omega.cm^2$)	<i>R_s.R</i> ($\Omega.cm^2$)	<i>N</i>	<i>IE</i> (%)
Blank	143.60	69.48	4.02	0.85	-
1000	132.34	151.38	5.14	0.95	50.36
2000	101.97	201.92	2.92	0.95	61.63
3000	56.41	329.11	3.12	0.95	73.21

Temuan ini menunjukkan bahwa laju korosi aluminium dalam larutan asam sangat berkurang dengan penambahan ekstrak inhibitor hingga 3000 ppm. Penemuan ini dapat dikaitkan dengan molekul inhibitor yang menempel pada permukaan logam. Plot sudut fase dan frekuensi seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2**, adalah contoh representasi impedansi yang bergantung pada frekuensi. Impedansi absolut untuk aluminium dalam larutan asam pada konsentrasi blank adalah sekitar $69.48 \Omega.cm^2$, tetapi nilainya meningkat secara drastis menjadi $329.11 \Omega.cm^2$ untuk ekstrak inhibitor pada konsentrasi 3000 ppm. Aluminium dalam larutan asam menunjukkan satu puncak pada grafik sudut fase. Ini adalah ilustrasi nyata dari efek penghambatan. Menggunakan rangkaian elektrokimia ekuivalen yang digambarkan dalam Informasi Tambahan dalam **Gambar 1**, dimungkinkan untuk mengevaluasi bagaimana perilaku impedansi aluminium berubah dengan dan tanpa inhibitor.



Gambar 1. Plot Nyquist

Plot EIS untuk aluminium dalam larutan asam HCl 1M tanpa inhibitor, hasil konsentrasi yang representatif masing-masing ditunjukkan pada **Gambar 1**. Model-model tersebut menunjukkan tingkat kesesuaian yang tinggi dengan seluruh kumpulan data eksperimen. Gambar yang disediakan menunjukkan secara meyakinkan bahwa plot impedansi yang diamati sesuai dengan plot impedansi yang diprediksi berdasarkan rangkaian ekuivalen yang digambarkan pada **Gambar 1**. Resistansi antara permukaan elektroda aluminium dan ujung elektroda referensi dikenal sebagai resistansi larutan (R_s). nilai resistansi larutan (R_s) yang diperoleh dari fitting rangkaian ekuivalen menunjukkan perubahan yang relatif kecil setelah penambahan inhibitor. Hal ini mengindikasikan bahwa keberadaan ekstrak inhibitor tidak secara signifikan mempengaruhi konduktivitas larutan HCl 1 M karena R_s ditentukan oleh sifat elektrolit, jarak elektroda, dan temperatur pengujian. Resistansi dan konstanta fase elemen yang terhubung dengan proses elektrokimia yang terjadi di permukaan aluminium dilambangkan dengan huruf R_{ct} dan CPE , masing-masing. R_{ct} dan CPE menunjukkan resistansi dan konstanta fase elemen yang terhubung ke lapisan tipis yang teradsorpsi ketika ekstrak inhibitor hadir (Adesina et al., 2017). Dalam model rangkaian ekuivalen, elemen fase konstan (CPE) digunakan sebagai pengganti kapasitor untuk memperhitungkan perilaku sistem korosi yang tidak ideal.



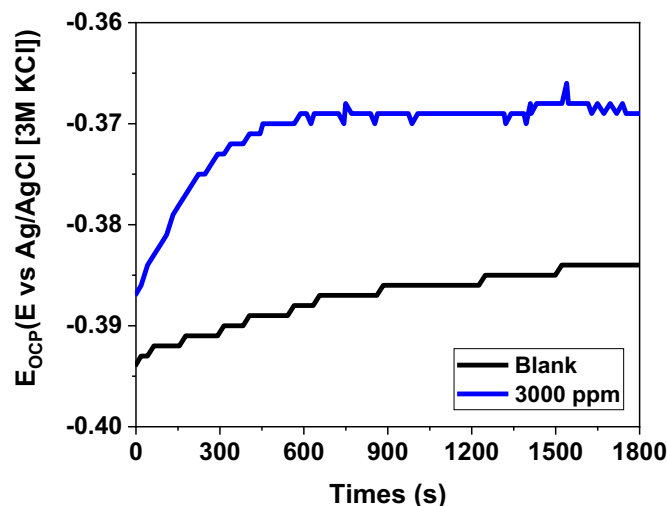
Gambar 2. Plot (a) Frekuensi dan (b) Phase

2. Analisis Open Circuit Potential (OCP)

Menggunakan berbagai metode elektrokimia, pengaruh konsentrasi inhibitor terhadap efektivitas inhibisi dievaluasi pada suhu 25°C . Setelah menyadari potensi rangkaian terbuka (OCP) yang stabil selama perendaman bebas aluminium selama 30 menit dalam larutan asam dengan dan tanpa inhibitor, pengukuran elektrokimia dilakukan. Kurva OCP untuk aluminium dalam larutan HCl 1M ditunjukkan pada Gambar 3. Dari Gambar 3, jelas bahwa stabilitas yang diperlukan tercapai setelah pengukuran OCP. Dengan begini bahwa OCP logam dalam larutan asam yang dihambat mencerminkan kerentanan aluminium terhadap korosi (Salcı et al., 2022). Terlebih lagi, potensial rangkaian terbuka diamati bergeser ke arah anodik setelah penambahan inhibitor. Namun, perbedaan nilai OCP sampel aluminium dalam larutan blank dan dalam larutan yang diinhibisi oleh ekstrak limbah pertanian biji kapuk kurang dari $+85\text{mV}$ dengan Ag/AgCl yang sering digunakan dalam literatur untuk mengklasifikasikan inhibitor sebagai jenis anodik (Ituen et al., 2016). Oleh karena itu, hasil OCP menunjukkan bahwa ekstrak biji kapuk berperilaku sebagai inhibitor korosi jenis campuran tetapi dengan dominasi katodik.

3. Linear Polarization Resistance (LPR)

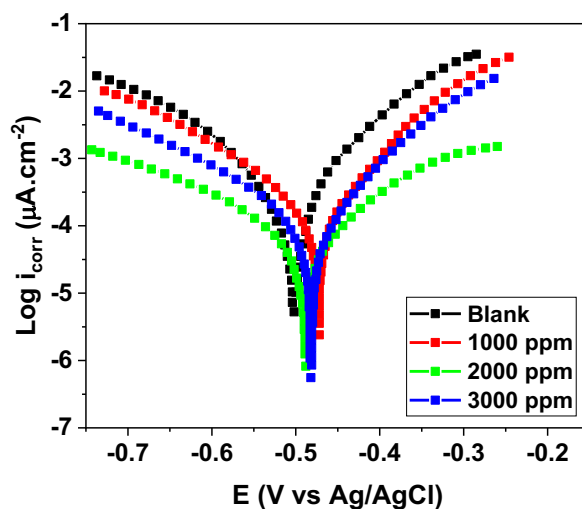
Efektivitas penghambatan inhibitor ekstrak limbah pertanian biji kapuk dalam larutan asam diuji menggunakan pengujian resistansi polarisasi linier. Nilai tegangan di sekitar OCP untuk mencegah gangguan permanen pada proses korosi, metode non-destruktif ini memungkinkan penilaian laju korosi secara real-time sambil mempertahankan keakuratan hasil. Pada tegangan ini, hubungan linier antara E_{corr} dan resistansi I_{corr} masih berlaku (Olasunkanmi et al., 2015). **Tabel 2** menunjukkan nilai polarisasi dan efisiensi yang diperoleh pada suhu 25°C dalam larutan HCl 1 M tanpa dan dengan konsentrasi inhibitor. Hasil yang ditunjukkan pada **Tabel 2** menunjukkan bahwa, ketika inhibitor ditambahkan dibandingkan dengan tanpa inhibitor, resistansi polarisasi meningkat. Berbeda dengan nilai resistansi polarisasi 84.24 $\Omega \cdot \text{cm}^2$ yang diukur pada larutan blank, nilai resistansi polarisasi meningkat menjadi 289.65 $\Omega \cdot \text{cm}^2$, 457.96 $\Omega \cdot \text{cm}^2$, dan 1117.32 $\Omega \cdot \text{cm}^2$ dengan penambahan dari 1000-3000 ppm. Dengan meningkatnya konsentrasi, resistansi polarisasi meningkat. Nilai EIS dan LPR terlihat selaras sempurna. Dengan penambahan inhibitor, keduanya menunjukkan tren yang serupa dalam penurunan laju korosi dan peningkatan efisiensi inhibisi. Peningkatan efektivitas inhibitor dengan konsentrasi mungkin terkait erat dengan fakta bahwa semakin tinggi konsentrasi, semakin banyak molekul yang dapat diserap pada permukaan aluminium sehingga mengurangi jumlah situs aktif untuk korosi. Akibatnya, permukaan logam yang tertutup oleh molekul inhibitor yang teradsorpsi menjadi terlindungi.



Gambar 3. Kurva Plot OCP

4. Analisa PDP

Kurva polarisasi potensiodinamik untuk aluminium dengan dan tanpa inhibitor dalam larutan asam disajikan pada Gambar 4. Kurva yang mewakili blank menunjukkan karakteristik anodik dan katodik Tafel yang ideal. Garis anodik sesuai dengan reaksi oksidasi aluminium ($\text{Al} \rightarrow \text{Al}^{3+} + 3\text{e}^-$), sedangkan garis katodik mewakili reaksi reduksi ($3\text{H}^+ + 3\text{e}^- \rightarrow \text{H}_3$) (Carmona-Hernandez et al., 2023). Kurva sampel yang dihambat oleh inhibitor menunjukkan garis anodik dan katodik yang serupa, menunjukkan bahwa penambahan inhibitor ke dalam larutan asam tidak secara efektif menghambat reaksi korosi redoks aluminium. Meskipun demikian, penurunan yang jelas pada kerapatan arus anodik dan katodik diamati, menunjukkan adanya penghambatan korosi (Tan et al., 2022). Ini menunjukkan bahwa inhibitor memiliki efek memperlambat laju reaksi redoks anodik dan katodik. Penurunan yang diamati pada kerapatan arus anodik dan katodik dengan adanya inhibitor memberikan konfirmasi bahwa ekstrak limbah pertanian biji kapuk berfungsi sebagai inhibitor jenis campuran, secara efektif menghambat korosi aluminium dalam larutan HCl 1 M (Hidayatullah et al., 2025).



Gambar 4. Kurva Plot PDP

Ansari et al., 2016 (Ansari et al., 2016) telah mengidentifikasi tiga mekanisme di mana inhibitor antarmuka dapat secara efektif menghambat reaksi korosi logam redoks. Pertama, permukaan logam secara geometris diblokir oleh spesies penghambat yang teradsorpsi di atasnya. Efisiensi inhibisi (η) inhibitor dalam skenario ini bergantung pada cakupan relatif (θ). Selain itu, deaktivasi situs aktif pada permukaan logam dapat terjadi melalui adsorpsi spesies penghambat. Variabel η tidak bergantung pada θ dan perlu dicatat bahwa permukaan aktif yang cukup terblokir dapat menghasilkan inhibisi yang kuat meskipun cakupan rata-rata relatif rendah. Selanjutnya, melalui pendekatan reaktif terhadap cakupan dua dimensi. Dalam skenario khusus ini, inhibitor menunjukkan karakteristik sebagai katalis elektropositif atau negatif untuk reaksi korosi atau alternatifnya spesies inhibitor yang teradsorpsi mengalami reaksi redoks elektrokimia. Diferensiasi ketiga mekanisme ini dapat difasilitasi melalui pemanfaatan studi PDP yang melibatkan perhitungan koefisien aksi terkait dampak inhibitor pada reaksi oksidasi anodik dan reduksi katodik. Koefisien reaksi anodik (f_a) dan katodik (f_c) diperkirakan menggunakan Persamaan (3) dan (4) masing-masing sebagai berikut:

$$f_c = \frac{i}{i_0} \exp [(E - E_0)/\beta_c] \quad (3)$$

$$f_a = \frac{i}{i_0} \exp [(E_0 - E)/\beta_a] \quad (4)$$

Nilai f_a dan f_c berbeda, dan pergeseran E_{corr} terlihat jelas, karena inhibisi disebabkan oleh deaktivasi situs aktif pada permukaan logam atau penutupan reaktif (Arellanes-Lozada et al., 2020). Dalam hal nilai f_c kurang dari satu, mekanisme inhibisi dapat dikaitkan dengan deaktivasi situs aktif. Inhibisi terjadi melalui penutupan reaktif ketika nilai f_a atau f_c melebihi satu, yang menunjukkan percepatan dalam reaksi korosi setengah oksidasi atau reduksi (Zhang et al., 2011). Nilai f_a dan f_c yang dihitung untuk penghambatan inhibitor bersama dengan parameter elektrokimia lainnya yang diperoleh melalui ekstrapolasi Tafel tercantum dalam **Tabel 2**. Persamaan 1 digunakan untuk menilai efektivitas ekstrak limbah pertanian biji kapuk sebagai inhibitor korosi dari kerapatan arus korosi/ i_{corr} .

Tabel 2. Parameter nilai PDP dan LPR

<i>C</i> (ppm)	<i>b_a</i> (V/dec)	<i>b_c</i> (V/dec)	<i>f_a</i>	<i>f_c</i>	<i>R_p</i> Ω.cm ²	<i>E_{corr}</i> (mV)	<i>i_{corr}</i> (μA/cm ²)	<i>IE</i> (%)
blank	0.09	0.11	-	-	84.24	-502	255.12	-
1000	0.11	0.21	0.73	0.31	289.65	-562	108.21	57.58
2000	0.15	0.25	0.70	0.22	457.96	-608	88.88	65.15
3000	0.22	0.38	0.37	0.15	1117.32	-625	54.14	78.77

5. Adsorpsi Isothermal

Untuk membantu memahami mekanisme penghambatan bahan organik yang dapat memengaruhi/mengurangi reaksi korosi dengan menyerap pada permukaan logam, beberapa model dapat dihubungkan untuk menjelaskan interaksi yang terjadi. Di mana model-model seperti persamaan *Freundlich* dan *Temkin* digunakan untuk mencari pendekatan proses adsorpsi inhibitor (Enabulele et al., 2023; Palumbo et al., 2019). Selanjutnya, analisis regresi linier (R^2) menunjukkan bahwa model adsorpsi mengikuti persamaan adsorpsi isothermal *Freundlich* ketika disesuaikan menggunakan data PDP, karena nilai R^2 paling mendekati 1 dibandingkan dengan model lainnya. Oleh karena itu, analisis persamaan adsorpsi *Freundlich* digunakan untuk mengidentifikasi interaksi yang terjadi antara inhibitor ekstrak kapuk dan permukaan aluminium (Gambar 5).

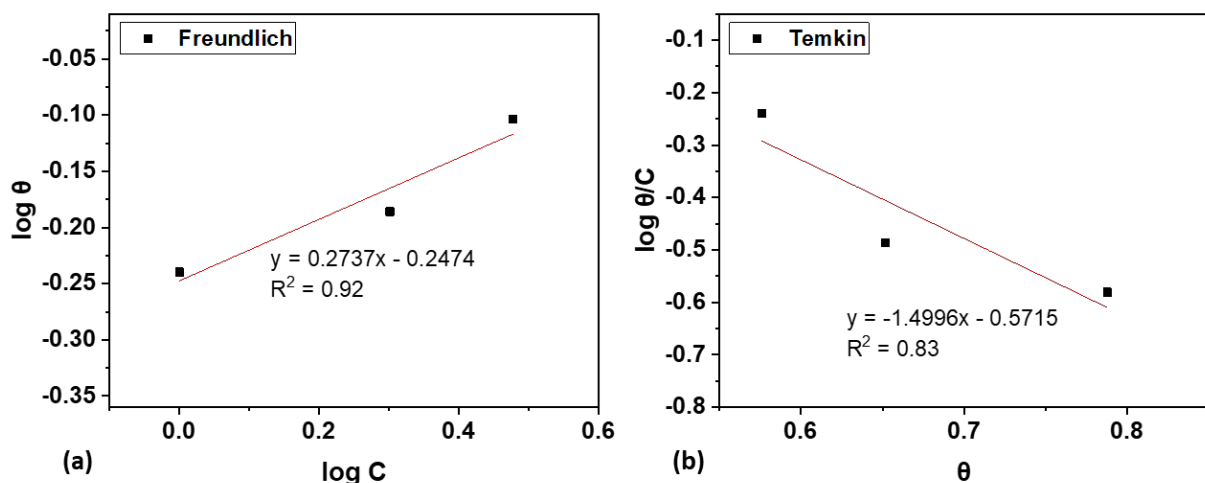
Tabel 3. Parameter nilai adsorpsi

Persamaan adsorpsi	Persamaan Linier	K_{ads} (L.mol ⁻¹)	ΔG_{ads} kJ/mol
<i>Freundlich</i>	$y = 0.2737x - 0.2474$	1767.66	-28.46
<i>Temkin</i>	$y = -1.4997x + 0.5716$	3729.06	-30.31

Dalam **Tabel 3**, nilai K_{ads} untuk semua model persamaan melebihi 1000 L.mol⁻¹, menunjukkan bahwa inhibitor dapat menghasilkan efisiensi tinggi (Fernandes et al., 2019). Jika nilai ΔG_{ads} adalah -20 kJ/mol atau lebih tinggi, ini disebut physisorption, di mana prosesnya tidak melibatkan pemutusan atau pembentukan ikatan kimia. Di sini, terjadi interaksi antara molekul inhibitor dan permukaan logam yang disebabkan oleh gaya elektrostatis. Ketika nilai ΔG_{ads} adalah -40 kJ/mol atau lebih rendah, itu disebut adsorpsi kimia yang merupakan proses yang disertai dengan pembentukan ikatan. Di sini, inhibitor dapat berbagi dan mentransfer muatan ke permukaan aluminium (Gapsari et al., 2025; Syarif Hidayatullah et al., 2025). Oleh karena itu, nilai ΔG_{ads} -28.46 kJ/mol yang diperoleh dari model menunjukkan jenis adsorpsi fisik dengan adsorpsi kimia yang menunjukkan bahwa inhibitor memiliki mekanisme yang sangat kompleks dalam proses perlindungan. Persamaan untuk mendapatkan energi bebas (5) dapat dilihat dibawah ini (Gapsari et al., 2023):

$$\Delta G_{ads} = -2.303RT \log(K_{ads} 55.5K) \quad (5)$$

dimana ΔG_{ads} mewakili energi bebas standar adsorpsi, T adalah suhu mutlak, R adalah konstanta gas molar, dan K_{ads} adalah konstanta kesetimbangan adsorpsi.



Gambar 5. Kurva persamaan (a) *freundlich* dan (b) *temkin*

6. Mekanisme Inhibitor

Senyawa aktif dalam ekstrak biji kapuk, seperti flavonoid, saponin, dan tanin, diduga berperan utama dalam proses inhibisi korosi. Gugus fungsional polar (-OH, -COOH, dan lain-lain) pada senyawa tersebut dapat berinteraksi dengan permukaan aluminium melalui adsorpsi fisik dan kimia, membentuk lapisan pelindung yang menghalangi difusi ion korosif ke permukaan logam. Pada konsentrasi rendah, adsorpsi inhibitor belum menutupi seluruh permukaan, namun pada konsentrasi optimal (3000 ppm), lapisan film semakin tebal dan rapat sehingga hampir seluruh permukaan logam terlindungi, menyebabkan laju korosi menurun drastis. Mekanisme utama inhibisi adalah adsorpsi molekul inhibitor pada permukaan aluminium, baik melalui interaksi elektrostatik maupun pembentukan ikatan koordinasi antara gugus fungsional senyawa organik dengan permukaan logam. Hal ini didukung oleh penurunan nilai *CPE*, peningkatan *R_{ct}*, serta kecocokan data adsorpsi dengan model *Freundlich*. Dengan demikian, ekstrak biji kapuk dari limbah pertanian terbukti efektif sebagai inhibitor korosi alami yang ramah lingkungan pada aluminium 6061 di lingkungan asam dengan konsentrasi optimal pada 3000 ppm.

D. SIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas ekstrak biji kapuk sebagai inhibitor korosi alami pada material aluminium 6061 dalam lingkungan asam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ekstrak biji kapuk secara signifikan mampu menurunkan laju korosi aluminium 6061, yang ditandai dengan pergeseran potensial korosi ke arah lebih positif, penurunan densitas arus korosi, peningkatan nilai *charge transfer resistance* (*R_{ct}*), dan penurunan nilai *constant phase element* (*CPE*). Efektivitas inhibitor meningkat seiring kenaikan konsentrasi dengan efisiensi inhibisi tertinggi dicapai pada konsentrasi 3000 ppm berdasarkan hasil uji PDP dan EIS masing-masing 78,77% dan 73,21%. Studi adsorpsi isothermal menunjukkan bahwa mekanisme adsorpsi inhibitor mengikuti model *Freundlich*, membentuk lapisan pelindung kuat pada permukaan aluminium. Mekanisme inhibisi terjadi melalui interaksi fisik dan kimia antara senyawa aktif dalam ekstrak biji kapuk dan permukaan logam sehingga mampu menghambat proses korosi secara efektif.

Sebagai arah penelitian selanjutnya, perlu mengevaluasi stabilitas inhibitor dalam berbagai media korosif (asam, netral, basa), pengaruh suhu dan waktu perendaman jangka panjang, serta pengujian skala industri guna menilai kelayakan penerapan ekstrak biji kapuk sebagai inhibitor korosi alami yang berkelanjutan pada sistem berbasis aluminium.

DAFTAR RUJUKAN

- Adesina, O., McNally, S. K., Katz, B., Warner, J., McFadden, M., & Digre, K. (2017). Diffusion-weighted imaging and post-contrast enhancement in differentiating optic neuritis and non-arteritic anterior optic neuropathy. *Neuro-Ophthalmology*, 13, 1–9. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85048625137&partnerID=40&md5=99aaf23cd3b53307ea717aba9012287f>
- Ansari, K. R., Quraishi, M. A., Singh, A., Ramkumar, S., & Obote, I. B. (2016). Corrosion inhibition of N80 steel in 15% HCl by pyrazolone derivatives: electrochemical, surface and quantum chemical studies. *RSC Advances*, 6(29), 24130–24141. <https://doi.org/10.1039/C5RA25441H>
- Arellanes-Lozada, P., Díaz-Jiménez, V., Hernández-Cocoletzi, H., Nava, N., Olivares-Xometl, O., & Likhanova, N. V. (2020). Corrosion inhibition properties of iodide ionic liquids for API 5L X52 steel in acid medium. *Corrosion Science*, 175, 108888. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108888>
- Arellanes-Lozada, P., Olivares-Xometl, O., Likhanova, N. V., Lijanova, I. V., Vargas-García, J. R., & Hernández-Ramírez, R. E. (2018). Adsorption and performance of ammonium-based ionic liquids as corrosion inhibitors of steel. *Journal of Molecular Liquids*, 265, 151–163. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.04.153>
- Carmona-Hernandez, A., Campechano-Lira, C., Espinoza-Vázquez, A., Ramírez-Cano, J. A., Orozco-Cruz, R., & Galván-Martínez, R. (2023). Electrochemical and DFT theoretical evaluation of the *Randia*

- monantha Benth extract as an eco-friendly corrosion inhibitor for mild steel in 1 M HCl solution. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 147, 104913. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jtice.2023.104913>
- Enabulele, D. O., Bamigboye, G. O., Solomon, M. M., & Durodola, B. (2023). Exploration of the Corrosion Inhibition Potential of Cashew Nutshell on Thermo-Mechanically Treated Steel in Seawater. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 48(1), 223–237. <https://doi.org/10.1007/s13369-022-06981-5>
- Fernandes, C. M., Alvarez, L. X., dos Santos, N. E., Maldonado Barrios, A. C., & Ponzio, E. A. (2019). Green synthesis of 1-benzyl-4-phenyl-1H-1,2,3-triazole, its application as corrosion inhibitor for mild steel in acidic medium and new approach of classical electrochemical analyses. *Corrosion Science*, 149, 185–194. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.01.019>
- 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., 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.rsurfi.2024.100361>
- Hidayatullah, S., Herlina Sari, N., Akromul Huda, A., & Pradityatama, M. (2025). *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*. 5(1). <https://doi.org/10.31764>
- 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>
- Ituen, E., Akaranta, O., & James, A. (2016). Green anticorrosive oilfield chemicals from 5-hydroxytryptophan and synergistic additives for X80 steel surface protection in acidic well treatment fluids. *Journal of Molecular Liquids*, 224, 408–419. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.molliq.2016.10.024>
- Jmiae, A., El Ibrahim, B., Tara, A., El Issami, S., Jbara, O., & Bazzi, L. (2018). Alginate biopolymer as green corrosion inhibitor for copper in 1 M hydrochloric acid: Experimental and theoretical approaches. *Journal of Molecular Structure*, 1157, 408–417. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2017.12.060>
- Margono, Darmadi, D. B., Gapsari, F., Widodo, T. D., & Kartika, B. M. (2025). Enhanced corrosion resistance of aluminum 6061 alloy using Ti-based thin films and plasma nitriding. *JCIS Open*, 18. <https://doi.org/10.1016/j.jciso.2025.100139>
- Nayak, A. K., Hasnain, M. S., Pal, K., Banerjee, I., & Pal, D. (2020). Chapter 25 - Gum-based hydrogels in drug delivery. In K. Pal, I. Banerjee, P. Sarkar, D. Kim, W.-P. Deng, N. K. Dubey, & K. Majumder (Eds.), *Biopolymer-Based Formulations* (pp. 605–645). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816897-4.00025-4>
- Olasunkanmi, L. O., Obot, I. B., Kabanda, M. M., & Ebenso, E. E. (2015). Some Quinoxalin-6-yl Derivatives as Corrosion Inhibitors for Mild Steel in Hydrochloric Acid: Experimental and Theoretical Studies. *J. Phys. Chem. C*, 119, 16004.
- Palumbo, G., Górny, M., & Banaś, J. (2019). Corrosion Inhibition of Pipeline Carbon Steel (N80) in CO₂-Saturated Chloride (0.5 M of KCl) Solution Using Gum Arabic as a Possible Environmentally Friendly Corrosion Inhibitor for Shale Gas Industry. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 28(10), 6458–6470. <https://doi.org/10.1007/s11665-019-04379-3>
- Salcı, A., Yüksel, H., & Solmaz, R. (2022). Experimental studies on the corrosion inhibition performance of 2-(2-aminophenyl)benzimidazole for mild steel protection in HCl solution. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 134, 104349. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jtice.2022.104349>
- Swathi, P. N., Rasheeda, K., Samshuddin, S., & Alva, V. D. P. (2017). Fatty Acids and its Derivatives as Corrosion Inhibitors for Mild Steel - An Overview. *Journal of Asian Scientific Research*, 7(8), 301–308. <https://doi.org/10.18488/journal.2.2017.78.301.308>
- Syarif Hidayatullah, Nasmi Herlina Sari, Maharsa Pradityatama, & Suteja. (2025). Efektifitas Perlindungan Korosi Aluminium Menggunakan Inhibitor Ekstrak Labu Kuning : Studi Elektrokimia dan Permukaan. *Jurnal Mesin Nusantara*, 8(1), 97–108. <https://doi.org/10.29407/jmn.v8i1.24651>

- Tan, B., Fu, A., Guo, L., Ran, Y., Xiong, J., Marzouki, R., & Li, W. (2023). Insight into anti-corrosion mechanism of *Dalbergia odorifera* leaves extract as a biodegradable inhibitor for X70 steel in sulfuric acid medium. *Industrial Crops and Products*, 194, 116106. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.116106>
- Tan, B., Lan, W., Zhang, S., Deng, H., Qiang, Y., Fu, A., Ran, Y., Xiong, J., Marzouki, R., & Li, W. (2022). *Passiflora edulia* Sims leaves Extract as renewable and degradable inhibitor for copper in sulfuric acid solution. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 645, 128892. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.128892>
- 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>