



INHIBITOR BIOMASSA PERTANIAN BERBAHAN DASAR KAPUK UNTUK PENGENDALIAN KOROSI BAJA DALAM H₂SO₄: STUDI KINETIKA DAN TERMODINAMIKA

KAPOK-BASED AGRICULTURAL BIOMASS INHIBITOR FOR STEEL CORROSION CONTROL IN H₂SO₄: KINETIC AND THERMODYNAMIC STUDY

Syarif Hidayatullah^{1*}, Ahmad Akromul Huda², Suteja³, Ahmad Multazam⁴

^{1,2,3,4}Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik, Universitas Mataram, Indonesia

*Co-author: syarift@gmail.com.

Article History:

Received : 26-04-2026
Revised : 03-06-2026
Accepted : 04-06-2026
Online : 07-06-2026

Keywords:

Steel corrosion;
Natural inhibitors;
Kapok bark extract;
Kinetic and thermodynamic parameters;

Kata Kunci:

Korosi baja;
Inhibitor alami;
Ekstrak kulit kapuk;
Parameter kinetika dan termodinamika;



Abstract: Steel corrosion in acidic environments is a critical issue affecting material durability and service life. This study aims to analyze the effect of kapok peel extract inhibitor concentration on the corrosion rate of steel in sulfuric acid media and to determine kinetic and thermodynamic parameters using Arrhenius plots and transition state theory. The weight loss method was employed with inhibitor concentrations (blank, 1000, 2000, and 3000 ppm) and temperatures (27, 35, and 45°C). Results indicate that corrosion rate significantly decreases with increasing inhibitor concentration, achieving a maximum inhibition efficiency of 74.06% at 3000 ppm and 27°C. Conversely, higher temperatures increase the corrosion rate. Kinetic analysis shows linear relationships in $\ln(CR)$ vs $1/T$ and $\ln(CR/T)$ vs $1/T$ plots. Activation energy increased from 15.82 to 26.75 kJ/mol, while ΔH° increased and ΔS° was negative. These findings suggest an adsorption-controlled inhibition mechanism forming a protective layer on the steel surface, indicating that kapok peel extract is a promising eco-friendly corrosion inhibitor.

Abstrak: Korosi baja dalam lingkungan asam merupakan permasalahan serius yang mempengaruhi ketahanan dan umur pakai material. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh konsentrasi inhibitor ekstrak kulit kapok terhadap laju korosi baja dalam media asam sulfat serta menentukan parameter kinetika dan termodinamika menggunakan pendekatan plot Arrhenius dan teori keadaan transisi. Metode yang digunakan adalah *weight loss* dengan variasi konsentrasi inhibitor (blank, 1000, 2000, dan 3000 ppm) dan suhu (27, 35, dan 45°C). Hasil menunjukkan bahwa laju korosi menurun signifikan seiring peningkatan konsentrasi inhibitor, dengan efisiensi maksimum 74,06% pada 3000 ppm dan 27°C. Peningkatan suhu meningkatkan laju korosi. Analisis kinetika menunjukkan hubungan linier pada plot $\ln(CR)$ vs $1/T$ dan $\ln(CR/T)$ vs $1/T$. Energi aktivasi meningkat dari 15,82 menjadi 26,75 kJ/mol, sementara ΔH° meningkat dan ΔS° bernilai negatif. Mekanisme inhibisi dikendalikan oleh adsorpsi yang membentuk lapisan pelindung, sehingga ekstrak kulit kapok berpotensi sebagai inhibitor alami yang efektif dan ramah lingkungan.



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

A. LATAR BELAKANG

Korosi merupakan salah satu permasalahan utama dalam penggunaan material logam, khususnya baja lunak, yang banyak diaplikasikan dalam industri konstruksi, kimia, dan energi (Abuelela et al., 2021; Lashgari et al., 2021a, 2021b). Dalam lingkungan asam seperti asam sulfat (H_2SO_4), laju korosi baja meningkat secara signifikan akibat reaksi elektrokimia antara logam dan medium agresif (Onukwuli et al., 2024; Zhou et al., 2023). Oleh karena itu, pengendalian korosi menjadi aspek penting untuk meningkatkan umur pakai material dan efisiensi operasional sistem industri. Salah satu metode yang paling efektif dan ekonomis untuk mengurangi laju korosi adalah dengan penggunaan inhibitor, terutama inhibitor berbasis bahan alami yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa inhibitor alami seperti ekstrak tanaman, biopolimer, dan senyawa berbasis biomassa mampu menurunkan laju korosi melalui mekanisme adsorpsi pada permukaan baja, sehingga membentuk lapisan pelindung yang menghambat proses pelarutan logam (Salleh et al., 2021; Tan et al., 2021). Efisiensi inhibisi umumnya meningkat seiring dengan kenaikan konsentrasi inhibitor dan seringkali mengikuti model isoterm adsorpsi seperti Langmuir atau Temkin (Ahmed et al., 2024; Menaka & Subhashini, 2016). Selain itu, parameter kinetika dan termodinamika seperti energi aktivasi (E_a), entalpi aktivasi (ΔH°), dan entropi aktivasi (ΔS°) menjadi indikator penting untuk memahami mekanisme inhibisi serta interaksi antara inhibitor dan permukaan logam dalam sistem korosi (Hegde & Raghavendra, 2024; Kumari et al., 2023; Nasser et al., 2023; Priya, 2021; Soltani et al., 2024).

Dalam konteks praktis, pemanfaatan ekstrak kulit kapuk sebagai inhibitor korosi berpotensi mendukung pengelolaan material pada sistem industri yang melibatkan media asam, seperti proses pembersihan logam, peralatan pengolahan kimia, dan unit produksi berbasis biomassa (Abuelela et al., 2021). Penggunaan inhibitor berbahan dasar limbah pertanian juga dapat mengurangi ketergantungan terhadap inhibitor sintesis yang berpotensi toksik, sehingga lebih sesuai dengan prinsip teknologi ramah lingkungan dan ekonomi sirkular (Gaber & Shahan, 2020). Keterkaitan penelitian ini dengan bidang biosystems terletak pada pemanfaatan biomassa pertanian sebagai sumber senyawa bioaktif untuk meningkatkan keberlanjutan sistem material dan proses industri. Dengan demikian, ekstrak kulit kapuk tidak hanya berfungsi sebagai agen penghambat korosi, tetapi juga merepresentasikan pendekatan biosystems dalam mengubah residu biologis menjadi material fungsional bernilai tambah.

Meskipun penggunaan inhibitor telah banyak diteliti, interpretasi parameter kinetika dan termodinamika korosi masih menghadapi tantangan, khususnya dalam mengaitkan perubahan laju korosi dengan mekanisme adsorpsi dan pengaruh suhu. Analisis berbasis plot Arrhenius ($\ln CR$ vs $1/T$) dan plot transisi keadaan ($\ln CR/T$ vs $1/T$) sering digunakan untuk menentukan parameter seperti energi aktivasi dan entalpi aktivasi, namun hasil yang diperoleh tidak selalu konsisten karena adanya pengaruh non-linearitas sistem dan kondisi operasional yang berbeda (Moslehpour et al., 2016; Shaukat et al., 2020). Sebagai solusi umum, pendekatan analisis kinetika berbasis temperatur melalui metode Arrhenius dan teori keadaan transisi tetap menjadi metode yang paling relevan untuk mengevaluasi mekanisme inhibisi korosi. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi perubahan energi aktivasi dan parameter termodinamika lainnya sebagai akibat dari penambahan inhibitor, sehingga memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai interaksi antara inhibitor dan permukaan logam serta efektivitasnya dalam menghambat reaksi korosi.

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penambahan inhibitor dalam sistem korosi baja pada media asam sulfat secara signifikan meningkatkan energi aktivasi dibandingkan kondisi tanpa inhibitor. Hal ini menunjukkan bahwa inhibitor bekerja dengan cara meningkatkan hambatan energi

terhadap reaksi pelarutan logam, yang umumnya dikaitkan dengan mekanisme adsorpsi pada permukaan logam (Mohd, 2020; Soltani et al., 2024). Peningkatan nilai energi aktivasi ini menjadi indikator bahwa proses korosi menjadi lebih sulit terjadi akibat adanya lapisan pelindung yang terbentuk.

Selain itu, analisis menggunakan plot $\ln(CR/T)$ vs $1/T$ memungkinkan penentuan parameter entalpi aktivasi (ΔH°) dan entropi aktivasi (ΔS°). Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai ΔH° pada sistem yang mengandung inhibitor cenderung positif dan meningkat seiring dengan konsentrasi inhibitor, yang mengindikasikan bahwa proses aktivasi bersifat endotermik dan dipengaruhi oleh fenomena adsorpsi (Gaber & Shahan, 2020; Hegde & Raghavendra, 2024; Nasser et al., 2023). Sementara itu, perubahan nilai ΔS° mencerminkan tingkat keteraturan sistem pada keadaan transisi, yang berkaitan dengan pembentukan lapisan adsorbat pada permukaan logam. Lebih lanjut, berbagai studi juga mengaitkan parameter kinetika dan termodinamika dengan model adsorpsi seperti isoterm Langmuir, di mana efisiensi inhibisi (IE) berbanding lurus dengan luas penutupan permukaan (θ). Nilai θ yang tinggi menunjukkan tingkat adsorpsi yang kuat, yang berkontribusi pada peningkatan energi aktivasi dan penurunan laju korosi (Gaber & Shahan, 2020; Toghan et al., 2023). Hal ini memperkuat pemahaman bahwa mekanisme inhibisi korosi sangat dipengaruhi oleh interaksi permukaan antara inhibitor dan logam.

Meskipun banyak penelitian telah membahas pengaruh inhibitor terhadap korosi baja dalam media asam, masih terdapat kesenjangan dalam pemahaman terkait hubungan kuantitatif antara parameter kinetika dan termodinamika dengan mekanisme adsorpsi secara menyeluruh. Beberapa studi melaporkan peningkatan energi aktivasi sebagai indikator inhibisi, namun tidak secara konsisten mengaitkannya dengan perubahan entalpi dan entropi aktivasi dalam kerangka teori keadaan transisi. Selain itu, variasi hasil yang diperoleh pada berbagai sistem menunjukkan adanya pengaruh faktor lain seperti suhu, konsentrasi inhibitor, dan sifat kimia inhibitor itu sendiri yang belum sepenuhnya dipahami.

Selain itu, sebagian besar penelitian berfokus pada evaluasi efisiensi inhibisi tanpa mengintegrasikan analisis Arrhenius dan transisi keadaan secara komprehensif dalam satu kerangka studi. Padahal, kombinasi kedua pendekatan ini dapat memberikan gambaran yang lebih lengkap mengenai mekanisme korosi dan inhibisi. Dengan demikian, diperlukan penelitian yang secara sistematis mengkaji pengaruh konsentrasi inhibitor terhadap parameter kinetika dan termodinamika menggunakan kedua pendekatan tersebut, serta menghubungkannya dengan mekanisme adsorpsi yang terjadi pada permukaan logam.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh konsentrasi inhibitor terhadap laju korosi baja dalam media asam sulfat melalui pendekatan plot Arrhenius dan transisi keadaan, serta menentukan parameter kinetika dan termodinamika seperti energi aktivasi (E_a), entalpi aktivasi (ΔH°), dan entropi aktivasi (ΔS°). Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk mengevaluasi mekanisme inhibisi berdasarkan hubungan antara parameter tersebut dengan fenomena adsorpsi pada permukaan logam.

B. METODE PENELITIAN

1. Bahan yang Digunakan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi baja lunak dengan komposisi Fe sebesar 98,5%, C sebesar 0,19%, dan Mn sebesar 0,654%. Media korosif yang digunakan adalah larutan asam sulfat (H_2SO_4) dengan konsentrasi 1 M. Inhibitor yang digunakan berupa ekstrak kulit kapuk yang diperoleh melalui proses ekstraksi menggunakan pelarut etanol. Bahan tambahan lainnya meliputi akuades, aseton, dan etanol sebagai pelarut dan pembersih. Peralatan yang digunakan antara lain

neraca analitik, jangka sorong, gelas beaker, labu ukur, pipet volumetrik, pipet tetes, batang pengaduk, hot plate, water bath, grinder, amplas dengan ukuran kehalusan dari 200 sampai 1000.

2. Persiapan Bahan

Kulit kapuk yang telah dikeringkan dipotong kecil dan dihaluskan, kemudian diekstraksi menggunakan metode maserasi dengan pelarut etanol selama 3 hari dalam kondisi gelap. Filtrat hasil ekstraksi disaring dan diuapkan menggunakan hot plate pada suhu 50°C hingga diperoleh ekstrak pekat. Ekstrak kemudian disimpan dalam botol tertutup sebelum digunakan. Spesimen baja lunak dipotong dengan ukuran $\pm 2 \times 2 \times 0.05$ cm³. Permukaan baja diamplas sampai halus, kemudian dibersihkan menggunakan aseton dan akuades, serta dikeringkan menggunakan aliran udara dingin. Spesimen selanjutnya ditimbang untuk memperoleh massa awal sebelum perlakuan.

3. Pengujian *weight loss measurement*

Larutan H₂SO₄ 1 M disiapkan melalui pengenceran larutan pekat. Larutan inhibitor disiapkan dengan variasi konsentrasi ekstrak kulit kapuk yaitu blank, 1000, 2000, dan 3000 ppm. Pengujian dilakukan dengan metode kehilangan berat, dimana spesimen baja direndam dalam larutan korosif dengan dan tanpa inhibitor selama 12 jam pada variasi suhu 27, 35, dan 45 °C. Setelah perendaman, spesimen dicuci, dikeringkan, dan ditimbang kembali untuk menentukan kehilangan massa.

4. Parameter Pengujian

Laju korosi dihitung berdasarkan selisih massa sebelum dan sesudah perendaman menggunakan persamaan kehilangan berat. Efisiensi inhibisi ditentukan berdasarkan perbandingan laju korosi tanpa dan dengan inhibitor. Selain itu, Parameter termodinamika seperti energi aktivasi (E_a), entalpi (ΔH°_{ads}), dan entropi (ΔS°_{ads}) dihitung untuk memahami sifat interaksi inhibitor dengan permukaan logam.

5. *Statistical Analysis*

Data hasil pengujian dianalisis menggunakan pendekatan regresi linear untuk menentukan kesesuaian model. Analisis dilakukan terhadap hubungan antara konsentrasi inhibitor dan perubahan suhu. Seluruh pengujian dilakukan dalam tiga kali pengulangan untuk memastikan reproduibilitas dan keandalan data.

C. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. *Weight Loss Measurement*

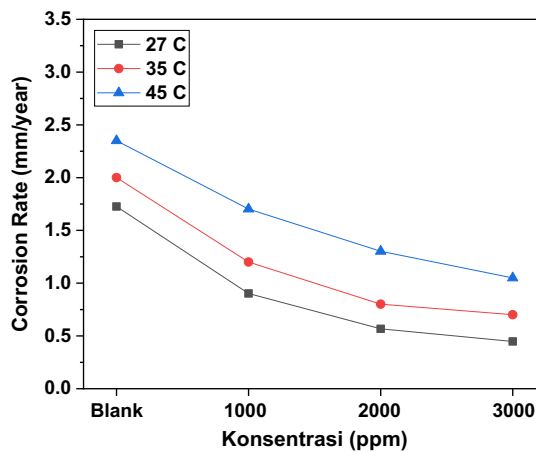
Berdasarkan **Gambar 1** dan **Tabel 1**, laju korosi logam menurun secara signifikan dengan meningkatnya konsentrasi inhibitor dari 0 hingga 3000 ppm pada seluruh variasi suhu. Pada suhu 27°C, laju korosi turun dari 1,726 mm/year menjadi 0,448 mm/year, sedangkan pada suhu 35°C dan 45°C masing-masing menurun dari 2,001 menjadi 0,701 mm/year dan dari 2,350 menjadi 1,050 mm/year. Selain itu, efisiensi inhibisi meningkat seiring bertambahnya konsentrasi inhibitor, dengan nilai tertinggi sebesar 74,06% pada suhu 27°C. Sebaliknya, peningkatan suhu menyebabkan laju korosi meningkat pada setiap konsentrasi inhibitor. Hal ini menunjukkan bahwa suhu merupakan faktor yang mempercepat proses korosi, meskipun keberadaan inhibitor tetap mampu menurunkan laju korosi secara signifikan.

Tabel 1. Parameter uji *weight loss* dan temperatur

T (°C)	T (K)	Konsentrasi (ppm)	ΔW (g)	CR (mm/year)	Efisiensi (%)
27	300	Blank	0.013	1.726	-
27	300	1000	0.007	0.902	47.72
27	300	2000	0.004	0.567	67.15
27	300	3000	0.003	0.448	74.06
35	308	Blank	0.015	2.001	-
35	308	1000	0.009	1.200	40.01
35	308	2000	0.006	0.801	60.03
35	308	3000	0.005	0.701	65.02
45	318	Blank	0.018	2.350	-
45	318	1000	0.013	1.702	27.66
45	318	2000	0.010	1.302	44.68
45	318	3000	0.008	1.050	55.32

Hasil penelitian ini sejalan dengan berbagai studi sebelumnya yang menyatakan bahwa metode *weight loss* merupakan pendekatan yang umum digunakan untuk menentukan laju korosi dan memberikan gambaran langsung terhadap degradasi material (Méndez et al., 2023; Narenkumar et al., 2019). Penurunan laju korosi dengan meningkatnya konsentrasi inhibitor menunjukkan bahwa molekul inhibitor semakin banyak teradsorpsi pada permukaan logam, membentuk lapisan pelindung yang menghambat reaksi korosi.

Pengaruh suhu yang meningkatkan laju korosi juga konsisten dengan teori kinetika reaksi, dimana kenaikan suhu mempercepat difusi ion dan reaksi elektrokimia pada permukaan logam (Méndez et al., 2023). Namun, berbeda dengan beberapa sistem biologis atau kompleks dimana efek suhu dapat dipengaruhi oleh faktor lain seperti media dan aktivitas mikroba, pada sistem ini pengaruh suhu terlihat dominan dalam meningkatkan laju korosi. Temuan ini menegaskan bahwa konsentrasi inhibitor dan suhu merupakan parameter utama yang mengontrol laju korosi logam. Peningkatan konsentrasi inhibitor secara efektif menurunkan laju korosi melalui mekanisme adsorpsi, sedangkan peningkatan suhu mempercepat proses korosi akibat peningkatan kinetika reaksi. Secara ilmiah, hasil ini memperkuat pemahaman bahwa efektivitas inhibitor bergantung pada keseimbangan antara proses adsorpsi dan desorpsi yang dipengaruhi oleh suhu. Secara praktis, penggunaan inhibitor pada konsentrasi tinggi sangat direkomendasikan, terutama pada kondisi suhu rendah hingga sedang, untuk mencapai perlindungan optimal terhadap korosi dalam aplikasi industri.



Gambar 1. Pengaruh konsentrasi inhibitor dan suhu terhadap laju korosi logam

Berdasarkan Tabel 2, nilai laju korosi (CR) meningkat dengan kenaikan suhu baik pada kondisi blank maupun pada konsentrasi inhibitor 3000 ppm. Pada kondisi tanpa inhibitor, CR meningkat dari 1,726 menjadi 2,350 mm/year, sedangkan pada kondisi dengan inhibitor meningkat dari 0,448 menjadi 1,050 mm/year. Nilai $\ln(\text{CR})$ juga menunjukkan tren peningkatan seiring kenaikan suhu, yang menandakan bahwa proses korosi semakin cepat pada temperatur yang lebih tinggi. Selain itu, nilai $\ln(\text{CR}/T)$ terhadap $1/T$ menunjukkan kecenderungan linear, yang mengindikasikan bahwa sistem mengikuti persamaan Arrhenius dan pendekatan teori keadaan transisi. Nilai $\ln(\text{CR}/T)$ pada sistem dengan inhibitor lebih rendah dibandingkan blank, menunjukkan bahwa laju reaksi korosi lebih kecil pada kondisi terinhibisi.

Hasil ini sejalan dengan berbagai penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa hubungan linier antara $\ln(\text{CR})$ dan $1/T$ mencerminkan perilaku Arrhenius, dimana kemiringan kurva digunakan untuk menentukan energi aktivasi (Priya, 2021). Peningkatan nilai $\ln(\text{CR})$ dengan suhu menunjukkan bahwa energi kinetik partikel meningkat sehingga mempercepat reaksi korosi. Perbedaan antara kondisi blank dan dengan inhibitor menunjukkan bahwa keberadaan inhibitor meningkatkan energi aktivasi (E_a), sehingga reaksi pelarutan logam menjadi lebih sulit terjadi. Hal ini konsisten dengan literatur yang menyatakan bahwa inhibitor bekerja melalui mekanisme adsorpsi yang membentuk penghalang energi tambahan pada permukaan logam (Hegde & Raghavendra, 2024; Nasser et al., 2023). Selain itu, analisis $\ln(\text{CR}/T)$ terhadap $1/T$ menunjukkan bahwa parameter entalpi aktivasi (ΔH°) cenderung positif dan meningkat dengan adanya inhibitor, yang mengindikasikan proses aktivasi yang bersifat endoterm (Kumari et al., 2023).

Tabel 2. Parameter plot arrhenius dan plot $\ln(\text{CR}/T)$ vs $1/T$ untuk blank dan 3000 ppm inhibitor

Konsentrasi (ppm)	T (K)	$1/T$ (K^{-1})	CR	$\ln(\text{CR})$	CR/T	$\ln(\text{CR}/T)$
Blank	300	0.0033	1.726	0.546	0.006	-5.05
	308	0.0032	2.001	0.693	0.006	-4.88
	318	0.0031	2.350	0.855	0.007	-4.75
3000	300	0.0033	0.448	-0.804	0.001	-6.10
	308	0.0032	0.701	-0.357	0.002	-5.70
	318	0.0031	1.050	0.049	0.003	-5.50

Temuan ini memperkuat hasil sebelumnya bahwa suhu meningkatkan laju korosi, namun keberadaan inhibitor mampu menghambat proses tersebut melalui peningkatan energi aktivasi dan pembentukan lapisan adsorpsi yang stabil. Hubungan linier pada plot Arrhenius dan plot $\ln(\text{CR}/T)$ menunjukkan bahwa mekanisme korosi mengikuti model kinetika yang terkontrol oleh energi aktivasi. Secara ilmiah, hal ini menunjukkan bahwa mekanisme inhibisi didominasi oleh proses adsorpsi yang meningkatkan hambatan energi terhadap reaksi korosi. Secara praktis, penggunaan inhibitor pada konsentrasi tinggi seperti 3000 ppm memberikan perlindungan yang efektif, meskipun pada suhu tinggi, sehingga relevan untuk aplikasi industri yang melibatkan variasi temperatur.

Berdasarkan Tabel 3, nilai energi aktivasi (E_a) meningkat dari 15.82 kJ/mol pada kondisi blank menjadi 26.75 kJ/mol pada konsentrasi inhibitor 3000 ppm. Nilai entalpi aktivasi (ΔH°) juga mengalami peningkatan dari 13.33 kJ/mol menjadi 24.26 kJ/mol. Sementara itu, nilai entropi aktivasi (ΔS°) tetap bernilai negatif, yaitu -48.52 J/mol·K pada blank dan -36.21 J/mol·K pada sistem dengan inhibitor. Peningkatan nilai E_a dan ΔH° menunjukkan bahwa reaksi korosi menjadi lebih sulit terjadi setelah penambahan inhibitor, sedangkan nilai ΔS° yang negatif mengindikasikan bahwa proses aktivasi berlangsung dengan keteraturan yang lebih tinggi pada permukaan logam.

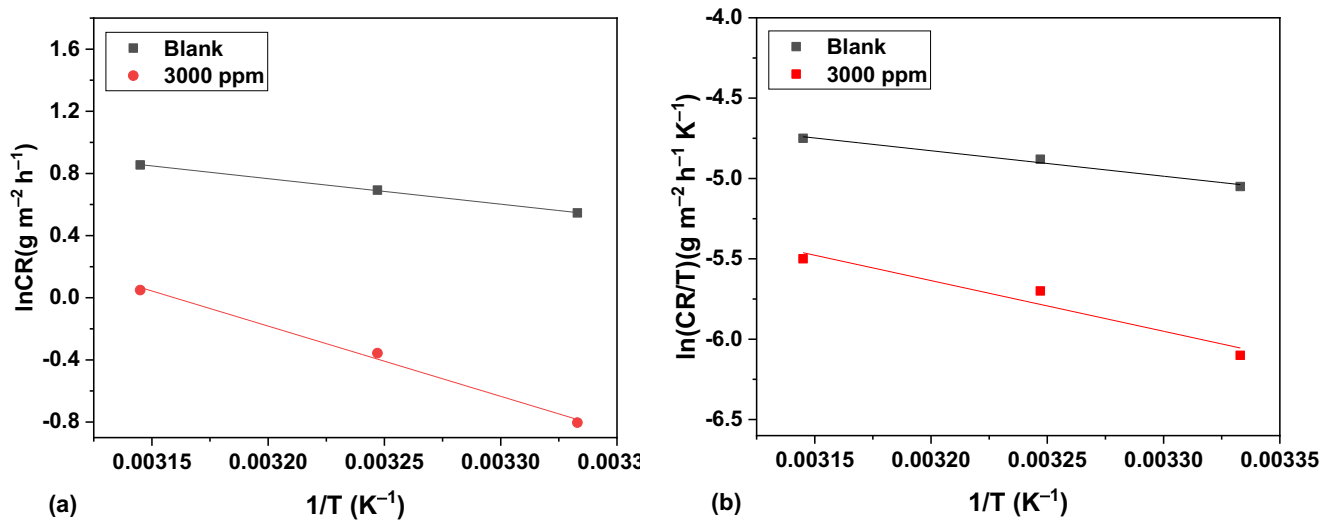
Tabel 3. Parameter termodinamika korosi

Konsentrasi (ppm)	Ea (kJ/mol)	ΔH° (kJ/mol)	ΔS° (J/mol·K)
Blank	15.82	13.33	-48.52
3000	26.75	24.26	-36.21

Hasil ini konsisten dengan konsep termodinamika korosi yang menyatakan bahwa pembentukan lapisan pelindung pada permukaan logam dapat meningkatkan hambatan energi terhadap reaksi pelarutan logam. Peningkatan energi aktivasi pada sistem dengan inhibitor menunjukkan bahwa proses korosi memerlukan energi yang lebih besar, yang berkaitan dengan terbentuknya lapisan adsorpsi yang stabil pada permukaan logam (Frankel et al., 2018; Singh et al., 2017). Secara kuantitatif, nilai Ea meningkat dari 15.82 kJ/mol pada blank menjadi 26.75 kJ/mol pada sistem dengan inhibitor 3000 ppm, atau meningkat sekitar 69.1%. Nilai ΔH° juga meningkat dari 13.33 menjadi 24.26 kJ/mol, atau sekitar 82.0%. Peningkatan ini menunjukkan bahwa ekstrak kulit kapuk meningkatkan kebutuhan energi untuk berlangsungnya reaksi korosi. Tren tersebut sejalan dengan laporan pada inhibitor alami lain, misalnya ekstrak daun *Acacia cyanophylla* pada baja lunak dalam 1 M H₂SO₄ yang meningkatkan Ea dari 34.7 kJ/mol menjadi 56.0 kJ/mol (Avcı & Keleş, 2011). Selain itu, ekstrak daun kapuk (*Ceiba pentandra*) dengan sinergi ion iodida pada baja karbon dalam 0.5 M H₂SO₄ dilaporkan menghasilkan efisiensi inhibisi lebih dari 90–95%, sehingga memperkuat potensi biomassa kapuk sebagai inhibitor korosi alami (Wan et al., 2022). Perbedaan nilai absolut Ea antarpencapaian dapat dipengaruhi oleh jenis biomassa, metode ekstraksi, media korosif, jenis logam, rentang temperatur, dan metode pengujian. Nilai ΔH° yang positif menunjukkan bahwa proses aktivasi bersifat endotermik, sedangkan nilai ΔS° yang negatif menunjukkan terbentuknya keadaan transisi yang lebih teratur akibat adsorpsi molekul inhibitor pada permukaan baja. Hal ini sesuai dengan literatur yang menyatakan bahwa passivasi melalui pembentukan film oksida atau lapisan adsorpsi dapat menurunkan laju korosi dengan meningkatkan keteraturan antarmuka logam-larutan.

Temuan ini memperkuat hasil sebelumnya pada analisis Arrhenius dan laju korosi, dimana inhibitor bekerja dengan meningkatkan energi aktivasi dan membentuk lapisan pelindung yang stabil. Secara keseluruhan, parameter termodinamika menunjukkan bahwa mekanisme inhibisi dikendalikan oleh interaksi antara faktor termodinamika dan kinetika, khususnya melalui pembentukan lapisan adsorpsi yang menghambat transfer muatan dan difusi ion korosif. Secara ilmiah, hal ini menegaskan bahwa efektivitas inhibitor berasal dari kemampuannya meningkatkan stabilitas permukaan logam melalui mekanisme adsorpsi dan passivasi. Secara praktis, penggunaan inhibitor pada konsentrasi tinggi seperti 3000 ppm memberikan perlindungan yang optimal terhadap korosi, terutama dalam lingkungan yang bersifat agresif.

Berdasarkan Gambar 2(a), plot $\ln(CR)$ terhadap $1/T$ menunjukkan hubungan linier baik pada kondisi blank maupun pada konsentrasi inhibitor 3000 ppm. Nilai $\ln(CR)$ pada kondisi blank lebih tinggi dibandingkan dengan sistem yang mengandung inhibitor, yang menunjukkan bahwa laju korosi tanpa inhibitor lebih besar pada seluruh rentang suhu. Selain itu, kemiringan garis pada sistem dengan inhibitor terlihat lebih besar dibandingkan blank. Pada Gambar 2(b), plot $\ln(CR/T)$ terhadap $1/T$ juga menunjukkan hubungan linier. Nilai $\ln(CR/T)$ pada sistem dengan inhibitor lebih rendah dibandingkan blank, yang menunjukkan bahwa laju reaksi korosi lebih terhambat pada sistem yang mengandung inhibitor.



Gambar 2. Plot Arrhenius dan plot $\ln(\text{CR}/T)$ vs $1/T$

Hasil ini sejalan dengan teori Arrhenius yang menyatakan bahwa hubungan linier antara $\ln(\text{CR})$ dan $1/T$ menunjukkan bahwa proses korosi dikendalikan oleh energi aktivasi. Kemiringan garis yang lebih besar pada sistem dengan inhibitor menunjukkan peningkatan energi aktivasi, yang berarti reaksi korosi menjadi lebih sulit terjadi. Hal ini konsisten dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa inhibitor meningkatkan energi aktivasi melalui pembentukan lapisan adsorpsi pada permukaan logam. Selain itu, plot $\ln(\text{CR}/T)$ terhadap $1/T$ menunjukkan bahwa parameter termodinamika seperti entalpi aktivasi (ΔH°) juga meningkat dengan adanya inhibitor. Namun, beberapa literatur menyatakan bahwa interpretasi plot Arrhenius perlu dilakukan dengan hati-hati, karena pada sistem tertentu dapat terjadi pengaruh non-linearitas atau faktor lain yang memodifikasi kemiringan kurva, terutama pada kondisi operasi yang berbeda.

Hasil ini memperkuat temuan sebelumnya bahwa keberadaan inhibitor meningkatkan energi aktivasi dan menurunkan laju korosi melalui mekanisme adsorpsi. Hubungan linier pada plot menunjukkan bahwa model kinetika sederhana masih dapat digunakan untuk menjelaskan sistem ini. Secara ilmiah, hal ini menunjukkan bahwa mekanisme inhibisi dikendalikan oleh peningkatan hambatan energi akibat pembentukan lapisan pelindung pada permukaan logam. Secara praktis, penggunaan inhibitor pada konsentrasi tinggi efektif dalam menekan laju korosi pada berbagai kondisi suhu, meskipun interpretasi parameter kinetika tetap perlu mempertimbangkan kemungkinan adanya faktor non-linear dalam sistem.

D. SIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini berhasil menunjukkan bahwa penambahan inhibitor ekstrak kulit kapuk secara signifikan menurunkan laju korosi baja dalam media asam sulfat. Laju korosi menurun seiring dengan peningkatan konsentrasi inhibitor, dimana efisiensi inhibisi tertinggi diperoleh pada konsentrasi 3000 ppm. Sebaliknya, peningkatan suhu menyebabkan laju korosi meningkat, namun keberadaan inhibitor tetap mampu memberikan perlindungan yang efektif terhadap logam. Analisis kinetika melalui plot Arrhenius dan plot $\ln(\text{CR}/T)$ vs $1/T$ menunjukkan hubungan linier yang mengindikasikan bahwa proses korosi mengikuti mekanisme yang dikendalikan oleh energi aktivasi. Nilai energi aktivasi (E_a) dan entalpi aktivasi (ΔH°) meningkat secara signifikan dengan penambahan inhibitor, yang menunjukkan bahwa reaksi korosi menjadi lebih sulit terjadi. Selain itu, nilai entropi aktivasi (ΔS°)

yang negatif mengindikasikan terbentuknya sistem yang lebih teratur akibat adsorpsi inhibitor pada permukaan logam.

Secara keseluruhan, mekanisme inhibisi dikendalikan oleh proses adsorpsi yang membentuk lapisan pelindung pada permukaan baja, sehingga meningkatkan hambatan energi terhadap reaksi korosi. Hasil ini memperkuat bahwa penggunaan inhibitor berbasis bahan alami merupakan metode yang efektif dan ramah lingkungan dalam pengendalian korosi. Penelitian ini memberikan kontribusi dalam pemahaman hubungan antara parameter kinetika dan termodinamika dengan mekanisme inhibisi, meskipun kajian lebih lanjut masih diperlukan untuk mengeksplorasi pengaruh struktur kimia inhibitor dan kondisi operasional yang lebih kompleks.

DAFTAR RUJUKAN

- Abuelela, A. M., Bedair, M. A., Zoghaib, W. M., Wilson, L. D., & Mohamed, T. A. (2021). Molecular structure and mild steel/HCl corrosion inhibition of 4,5-Dicyanoimidazole: Vibrational, electrochemical and quantum mechanical calculations. *Journal of Molecular Structure*, 1230. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2020.129647>
- Ahmed, M. A., Amin, S., & Mohamed, A. A. (2024). Current and Emerging Trends of Inorganic, Organic and Eco-Friendly Corrosion Inhibitors. *RSC Advances*, 14(43), 31877–31920. <https://doi.org/10.1039/d4ra05662k>
- Avci, G., & Keleş, Y. (2011). Aqueous extract of Acacia cyanophylla leaves as environmentally friendly inhibitor for mild steel corrosion in 1 M H₂SO₄ solution. *Surface and Interface Analysis*, 43(10), 1311–1317. <https://doi.org/10.1002/sia.3714>
- Frankel, G. S., Vienna, J. D., Lian, J., Scully, J. R., Gin, S., Ryan, J. V., Wang, J., Kim, S. H., Windl, W., & Du, J. (2018). A Comparative Review of the Aqueous Corrosion of Glasses, Crystalline Ceramics, and Metals. *NPJ Materials Degradation*, 2(1). <https://doi.org/10.1038/s41529-018-0037-2>
- Gaber, G. A., & Shahan, S. (2020). Fenugreek Seeds Extract Performance as a Green Corrosion Inhibitor for Alpha-Brass in Nitric Acid Solution. *Al-Azhar Bulletin of Science*, 31(2), 65–71. <https://doi.org/10.21608/absb.2020.45897.1089>
- Hegde, M., & Raghavendra, N. (2024). Terminalia Bellirica Fruit Shell Extract by Microwave Assisted Extraction as a Green Inhibitor for Mild Steel Acid Corrosion: Insight From Chemical, Electrochemical and Computational Studies. *Discov. Chem.*, 1(1). <https://doi.org/10.1007/s44371-024-00070-2>
- Kumari, P., Anusha, G., Mishma, J. N. C., Sinha, R. K., Suvarna, A. S., & Gaonkar, S. L. (2023). New Benzisoxazole Derivative: A Potential Corrosion Inhibitor for Mild Steel in 0.5 M Hydrochloric Acid Medium -Insights From Electrochemical and Density Functional Theory Studies. *Heliyon*, 9(10), e21014. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21014>
- Lashgari, S. M., Bahlakeh, G., & Ramezanzadeh, B. (2021a). Detailed theoretical DFT computation molecular simulation and electrochemical explorations of Thymus vulgaris leave extract for effective mild-steel corrosion retardation in HCl solution. *J. Mol. Liq.*, 335, 115897.
- Lashgari, S. M., Bahlakeh, G., & Ramezanzadeh, B. (2021b). Detailed theoretical DFT computation molecular simulation and electrochemical explorations of Thymus vulgaris leave extract for effective mild-steel corrosion retardation in HCl solution. *J. Mol. Liq.*, 335, 115897.
- Menaka, R., & Subhashini, S. (2016). Chitosan Schiff Base as Effective Corrosion Inhibitor for Mild Steel in Acid Medium. *Polymer International*, 66(3), 349–358. <https://doi.org/10.1002/pi.5245>
- Méndez, C. M., Gervasi, C. A., Pozzi, G., & Ares, A. E. (2023). Corrosion Inhibition of Aluminum in Acidic Solution by Ilex Paraguariensis (Yerba Mate) Extract as a Green Inhibitor. *Coatings*, 13(2), 434. <https://doi.org/10.3390/coatings13020434>
- Mohd, N. K. (2020). Corrosion Inhibition, Adsorption Behaviour and Thermodynamic Properties of N-Cinnamalidene Palmitohydrazide on Mild Steel in Hydrochloric Acid Solution. *Journal of Oil Palm Research*. <https://doi.org/10.21894/jopr.2020.0012>
- Moslehpour, M., Kawada, T., Sunagawa, K., Sugimachi, M., & Mukkamala, R. (2016). Nonlinear Identification of the Total Baroreflex Arc: Higher-Order Nonlinearity. *Ajp Regulatory Integrative and Comparative Physiology*, 311(6), R994–R1003. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00101.2016>
- Narenkumar, J., AlSalhi, M. S., Prakash, A. A., Abilaji, S., Devanesan, S., Rajasekar, A., & Alfuraydi, A. A. (2019). Impact and Role of Bacterial Communities on Biocorrosion of Metals Used in the Processing Industry. *Acs Omega*, 4(25), 21353–21360. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b02954>

- Nasser, A., Migahed, M. A., Basiony, N. M. E., Abd-El-Bary, H. M., & Mohamed, T. A. (2023). Electrochemical, Surface Analysis, Computational and Anticorrosive Studies of Novel Di-Imine Schiff Base on X65 Steel Surface. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-37321-8>
- Onukwuli, O. D., Nnanwube, I. A., Ochili, F. O., & Omotoma, M. (2024). DFT, experimental and optimization studies on the corrosion inhibition of aluminium in H₂SO₄ with danacid as inhibitor. *Results in Engineering*, 24, 103113. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103113>
- Priya, M. (2021). Study of Inhibitive Action of Bio-Degradable Crab Shell Extract on Mild Steel in Acidic Medium. *Egyptian Journal of Chemistry*, 0(0), 0–0. <https://doi.org/10.21608/ejchem.2021.88826.4277>
- Salleh, S. Z., Yusoff, A. H., Zakaria, S. K., Taib, M. A. A., Abu Seman, A., Masri, M. N., Mohamad, M., Mamat, S., Ahmad Sobri, S., Ali, A., & Teo, P. Ter. (2021). Plant extracts as green corrosion inhibitor for ferrous metal alloys: A review. *Journal of Cleaner Production*, 304, 127030. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127030>
- Shaukat, A. R., Peng, L., Wang, J., & Wang, T. (2020). In-Plane Nonlinear Postbuckling Analysis of Circular Arches Using Absolute Nodal Coordinate Formulation With Arc-Length Method. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part K Journal of Multi-Body Dynamics*, 235(3), 297–311. <https://doi.org/10.1177/1464419320971412>
- Singh, A. K., Zhou, L., Shinde, A., Suram, S. K., Montoya, J. H., Winston, D., Gregoire, J. M., & Persson, K. A. (2017). Electrochemical Stability of Metastable Materials. *Chemistry of Materials*, 29(23), 10159–10167. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.7b03980>
- Soltani, H., Hanini, K., Benahmed, M., Boudiba, S., Boudiba, L., Tamfu, A. N., Zellagui, A., & Akkal, S. (2024). Investigating Centaurea Napifolia Extracts for Zinc Electroplating Efficiency and Corrosion Prevention: Experimental and Surface Analysis. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4232896/v1>
- Tan, B., Xiang, B., Zhang, S., Qiang, Y., Xu, L., Chen, S., & He, J. (2021). Papaya Leaves Extract As A Novel Eco-friendly Corrosion Inhibitor for Cu in H₂SO₄ Medium. *J. Colloid Interface Sci.*, 582, 918.
- Toghan, A., Fawzy, A., Alakhras, A. I., Alqarni, N., Zaki, M. E. A., Sanad, M. M., & Farag, A. A. (2023). Experimental Exploration, RSM Modeling, and DFT/MD Simulations of the Anticorrosion Performance of Naturally Occurring Amygdalin and Raffinose for Aluminum in NaOH Solution. *Coatings*, 13(4), 704. <https://doi.org/10.3390/coatings13040704>
- 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. *Industrial Crops and Products*, 178, 114649. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114649>
- 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>