

# Potensi Inhibitor Alam sebagai Pelindung Korosi pada Permukaan Baja Karbon pada Lingkungan Asam

Syarif Hidayatullah  
Universitas Mataram

Suteja  
Universitas Mataram

Alamat : Jl. Majapahit No. 62 Gomong, Mataram, Indonesia.  
Korespondensi penulis : [syarift008@gmail.com](mailto:syarift008@gmail.com).

**Abstrak.** Inhibitor korosi alami menarik perhatian karena efektivitas biaya, biodegradabilitas, dan sifatnya yang ramah lingkungan. Dalam penelitian ini, ekstrak kulit jeruk madu dievaluasi sebagai inhibitor korosi alami untuk baja karbon dalam larutan HCl 1 M. Pengujian dilakukan menggunakan metode elektrokimia yang meliputi polarisasi potensiodinamik (PDP), spektroskopi impedansi elektrokimia (EIS), dan adsorpsi isothermal, pada suhu 27 °C dengan waktu paparan larutan selama 15 menit. Variasi konsentrasi inhibitor blank, 1000, 2000, dan 3000 ppm digunakan untuk menentukan pengaruh terhadap laju korosi. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi inhibitor meningkatkan efisiensi penghambatan dengan nilai tertinggi sebesar 83,39% (PDP) dan 75,41% (EIS) pada konsentrasi 3000 ppm. Mekanisme adsorpsi ekstrak kulit jeruk madu pada permukaan baja karbon mengikuti kombinasi fisisorpsi dan kemisorpsi, membentuk lapisan pelindung yang menghambat reaksi anodik dan katodik. Temuan ini menunjukkan potensi ekstrak kulit jeruk madu sebagai inhibitor korosi yang efisien, murah, dan ramah lingkungan untuk aplikasi industri berbasis logam.

**Katakunci:** Baja karbon, Kulit jeruk madu, Inhibitor korosi, Elektrokimia.

## LATAR BELAKANG

Korosi merupakan proses elektrokimia yang melibatkan reaksi redoks antara oksigen, kelembaban, dan polutan lingkungan dengan permukaan logam, sehingga menghasilkan produk yang lebih stabil secara termodinamika (Dwivedi et al., 2017; Raja et al., 2016). Berbagai faktor seperti tegangan mekanik, kandungan oksigen dalam fluida, dan kecepatan aliran dapat mempercepat proses korosi. Baja karbon disini yang paling sering digunakan oleh sebagian besar industri, terutama dalam pipa untuk pengangkutan minyak dan gas. Kelayakan ekonomis dan sifat materialnya telah membuatnya cocok dan dapat diterima untuk digunakan secara luas oleh para industrialis di berbagai industri. Namun, hambatan utama dalam penggunaan baja karbon adalah ketahanan korosinya, terutama di lingkungan asam (Sowmyashree et al., 2021).

Metode tradisional yang digunakan untuk mencegah korosi pada mesin mahal adalah pelapisan kimia, perlindungan katodik, dan inhibitor korosi (Raja et al., 2016). Di antara ini, penerapan inhibitor korosi telah diidentifikasi sebagai metode yang efektif melawan kerusakan akibat korosi. Peran inhibitor korosi adalah menciptakan penghalang antara permukaan logam dan media korosif dengan cara teradsorpsi pada permukaan logam. Inhibitor yang terserap pada permukaan baja karbon ditemukan bergantung pada beberapa faktor seperti suhu, konsentrasi, dll. Beberapa inhibitor anorganik, organik, dan nanomaterial yang mengandung heteroatom (N, O, P, dan S) dilaporkan menunjukkan aktivitas penghambatan korosi yang sangat baik (Quraishi et al., 2020). Namun, masalah utama dalam penggunaan inhibitor ini adalah efek sampingnya terhadap lingkungan dan hewan air (dalam kasus industri kelautan). Tantangan besar adalah pembuangannya dari jangkauan bahaya setelah digunakan. Oleh karena itu, kelemahan/ancaman ini telah membuka jalan bagi para peneliti untuk mengeksplorasi beberapa inhibitor korosi baru yang ramah lingkungan dan berbiaya rendah yang dapat memenuhi peraturan untuk diterima oleh industri mana pun untuk penggunaan luas.

Dalam konteks ini, ekstrak tumbuhan menjadi perhatian karena sifatnya yang dapat terurai secara hayati, ketersediaan melimpah, dan kandungan fitokimia yang kaya akan gugus fungsional aktif. Kulit jeruk madu merupakan limbah pertanian yang mengandung senyawa bioaktif seperti flavonoid, tanin, dan polifenol, yang diketahui memiliki kemampuan donor elektron dan berpotensi membentuk film adsorpsi pada permukaan logam. Namun, belum banyak penelitian yang mengevaluasi efektivitas ekstrak kulit jeruk madu sebagai inhibitor korosi pada baja karbon, terutama dalam lingkungan asam klorida, sehingga menghadirkan celah penelitian yang penting.

Oleh karena itu, tujuan eksplisit dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi efektivitas ekstrak kulit jeruk madu sebagai inhibitor korosi alami pada baja karbon dalam larutan HCl, menganalisis mekanisme inhibisi melalui uji elektrokimia (PDP, EIS) dan adsorpsi isothermal, serta mengidentifikasi kontribusi gugus fungsional terhadap proses adsorpsi dan pembentukan film pelindung. Sehingga diharapkan studi ini dapat memberikan pemahaman ilmiah yang lebih mendalam mengenai potensi ekstrak limbah organik sebagai inhibitor hijau yang layak untuk aplikasi industri.

## KAJIAN TEORITIS

Inhibitor korosi alami (*plant-based inhibitors*) adalah ekstrak tumbuhan atau komponennya yang mampu mengurangi laju korosi melalui pembentukan film pelindung pada permukaan logam (Popoola, 2019; Verma et al., 2021). Keunggulan utama pendekatan ini adalah ketersediaan bahan baku yang melimpah, biaya rendah, serta sifat yang relatif tidak toksik dan mudah terurai (Boudalia et al., 2019; Wu et al., 2020). Secara molekuler, ekstrak tumbuhan mengandung campuran senyawa organik seperti flavonoid, tanin, alkaloid, terpenoid, polifenol yang menyediakan gugus fungsional ( $-\text{OH}$ ,  $\text{C}=\text{O}$ ,  $\text{C}-\text{O}$ ,  $-\text{NH}$ ,  $\pi$ -system) yang menjadi situs adsorpsi pada permukaan logam (Jyothi et al., 2019; Sharma et al., 2017).

Kulit jeruk diketahui kaya akan flavonoid (hesperidin, naringin), polifenol, pektin, serta senyawa volatil seperti D-limonene (Gautam, 2018; Sharma et al., 2017). Flavonoid dan polifenol memiliki cincin aromatik terkonjugasi dan gugus hidroksil/karbonil yang menyediakan pasangan elektron bebas dan orbital  $\pi$  fitur kimia yang penting untuk interaksi dengan permukaan logam. Pektin dan polisakarida menghadirkan gugus  $\text{C}-\text{O}-\text{C}$  dan  $-\text{COOH}$  yang dapat berkontribusi pada kelarutan dan pembentukan film. Limonene (terpen nonpolar) kurang berperan langsung sebagai donor elektron tetapi dapat mempengaruhi sifat permukaan film seperti meningkatkan hidrofobisitas lapisan.

komposisi kimia kulit jeruk yang kaya akan flavonoid, polifenol, pektin, dan terpenoid memberikan dasar teoritis yang kuat bagi mekanisme penghambatan korosinya pada baja karbon. Senyawa-senyawa ini memiliki gugus fungsional aktif seperti  $-\text{OH}$ ,  $\text{C}=\text{O}$ ,  $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ , dan cincin aromatik terkonjugasi yang mampu bertindak sebagai donor elektron melalui pasangan elektron bebas maupun sistem  $\pi$  (Jyothi et al., 2019). Dalam medium asam, molekul inhibitor dapat terprotonasi sehingga berinteraksi secara elektrostatik dengan permukaan baja yang telah teradsorpsi ion klorida, menghasilkan tahap awal fisisorpsi. Selanjutnya, gugus karbonil dan hidroksil pada flavonoid dan polifenol dapat membentuk ikatan koordinasi dengan orbital kosong Fe pada permukaan logam, menghasilkan mekanisme kemisorpsi yang lebih stabil (Kokalj, 2022). Interaksi  $\pi$ -d antara cincin aromatik dan atom Fe turut meningkatkan kekuatan adsorpsi, memungkinkan terbentuknya lapisan organik terorganisir yang menghambat transfer muatan dan difusi ion agresif. Senyawa dalam kulit jeruk berkontribusi pada pembentukan matriks film yang lebih tebal dan hidrofobik sehingga memperkecil luas

permukaan logam yang terpapar larutan korosif. Dengan demikian, sifat kimia kulit jeruk terutama gugus donor elektron dan struktur aromatik terkonjugasi secara teoritis berkorelasi langsung dengan penurunan densitas arus korosi, peningkatan resistansi transfer muatan, serta pembentukan lapisan pelindung yang efektif pada permukaan baja karbon.

## **METODE PENELITIAN**

### **Periapan sampel**

Spesimen baja karbon disiapkan dan dilapisi cat dengan menyisakan 1 cm<sup>2</sup>. Selanjutnya, untuk menyiapkan larutan asam klorida (HCl) 1 M digunakan air suling ganda. Asam klorida diperoleh secara komersial dan konsentrasi 1 M digunakan sebagai stok untuk menyiapkan larutan asam klorida 1 M.

### **Persiapan Ekstrak**

Kulit jeruk madu dipotong menjadi potongan-potongan kecil dan dicuci bersih menggunakan air suling ganda untuk menghilangkan kotoran yang menempel di permukaan. Sekitar 10 g yang sudah dibersihkan dimasukkan ke dalam labu Erlenmeyer 500 mL yang berisi 150 mL air suling ganda dan direbus selama 15 menit pada suhu 100 °C. Ekstrak air yang diperoleh disaring menggunakan kertas saring Whatman No. 40. Ekstrak kulit jeruk madu yang dihasilkan disimpan dalam lemari es pada suhu 4 °C untuk penelitian lebih lanjut. Konsentrasi ekstrak yang digunakan dalam pengujian adalah blank, 1000, 2000, dan 3000 ppm.

### **Pengujian elektrokimia**

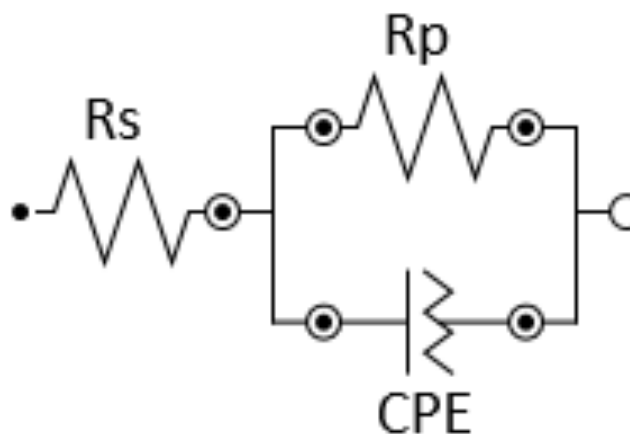
Kinerja penghambatan korosi ekstrak pada baja karbon dievaluasi menggunakan uji elektrokimia dalam sistem tiga elektroda. Elektroda referensi adalah elektroda [3M KCl], elektroda kerja adalah baja ringan (luas paparan efektif 1 cm<sup>2</sup>), dan elektroda platina dipilih sebagai elektroda lawan sistem pengujian. Seluruh spesimen direndam dalam larutan pengujian selama 15 menit untuk mencapai kestabilan sebelum pengujian. Waktu pengukuran OCP dari seluruh pengujian elektrokimia adalah 300 detik dan frekuensi impedansi elektrokimia diatur sebagai 0.1-10<sup>5</sup> Hz dengan amplitudo 5 mV. Rentang pemindaian kurva Tafel adalah tegangan rangkaian terbuka  $\pm 0.25$  V dan laju pemindaian adalah 0.5 mV/s. Setiap pengujian dilakukan pada kondisi suhu  $27 \pm 1$  °C. Persamaan umum digunakan dapat dilihat di bawah ini (Gapsari et al., 2022; Hidayatullah et al., 2024) :

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

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

## HASIL DAN PEMBAHASAN

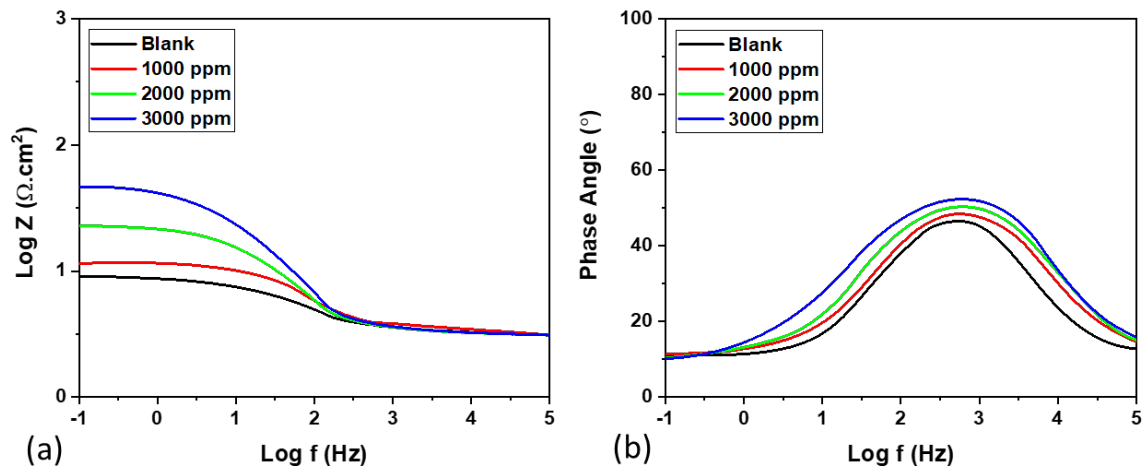
Pengujian elektrokimia adalah salah satu metode paling umum yang digunakan dalam bidang penghambatan korosi logam. Rangkaian ekuivalen pada Gambar 1 digunakan dalam penelitian ini untuk menganalisis hasil pengujian elektrokimia. Data tercantum dalam Tabel 1 dan 2 efisiensi inhibisi korosi (IE) EIS dan PDP.



Gambar 1. Diagram ekuivalen elektrokimia.

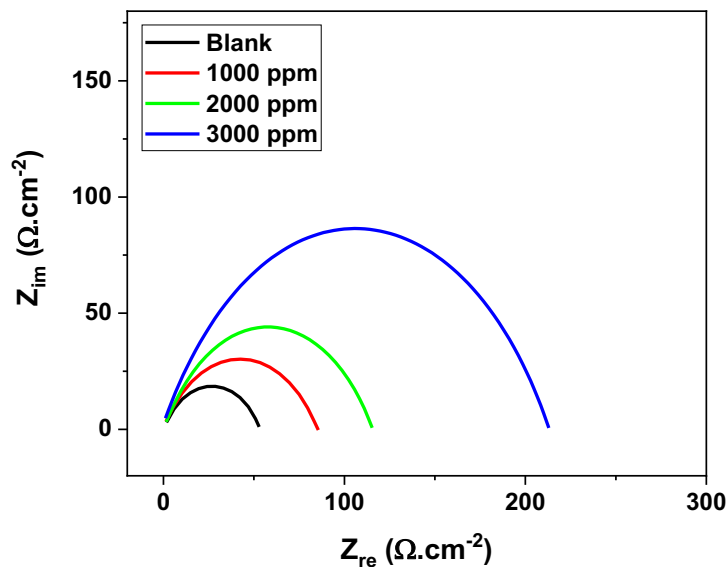
### Analisis electrochemical impedance Spectroskopy (EIS)

Gambar 3 menggambarkan pengaruh konsentrasi inhibitor terhadap spektrum Nyquist baja karbon rendah pada 1,0 M HCl (100 ml) pada suhu ruangan ditunjukkan pada Gambar 3. Kita dapat secara intuitif menemukan bahwa diameter grafik Nyquist meningkat seiring dengan peningkatan konsentrasi Inhibitor tetapi struktur cincin tunggal tidak berubah. Demikian pula, peningkatan diameter plot Nyquist dengan lebih signifikan dengan pengaplikasian inhibitor. Sementara itu, Gambar 2(a) dan(b) (kurva Bode dan phase yang sesuai dengan konsentrasi inhibitor korosi yang berbeda) hanya menunjukkan satu konstanta waktu. Oleh karena itu, hasil di atas menunjukkan bahwa Inhibitor tidak mengubah mekanisme korosi baja karbon dalam HCl 1,0 M tetapi teradsorpsi pada permukaan baja karbon dan menghambat perilaku korosi baja karbon dengan mengontrol transfer muatan.



**Gambar 2.** Bode (a) Modulus dan (b) Phase

Parameter elektrokimia dalam Tabel 1 diperoleh dengan mencocokkan data menggunakan rangkaian ekuivalen yang ditunjukkan pada Gambar 1. Nilai  $\chi^2$  yang lebih kecil menunjukkan kesesuaian yang lebih baik, mengkonfirmasi rasionalitas model rangkaian ekuivalen yang dipilih. Dibandingkan dengan sistem tanpa inhibitor, nilai N meningkat setelah penambahan inhibitor yang terutama disebabkan oleh adsorpsi inhibitor pada permukaan baja karbon, membentuk lapisan pelindung yang seragam. Hasil ini menunjukkan bahwa proses adsorpsi inhibitor pada permukaan elektroda berlangsung cepat dan terbentuk lapisan pelindung yang padat. Selain itu, dapat dilihat dari nilai (IE) EIS pada Tabel 1 bahwa efek inhibisi korosi Inhibitor berkorelasi positif dengan konsentrasinya.



**Gambar 3.** Plot EIS

Nilai CPE menurun seiring dengan peningkatan konsentrasi Inhibitor, menunjukkan bahwa molekul Inhibitor secara bertahap menggantikan molekul air yang teradsorpsi dan ion elektrolit pada permukaan logam melalui adsorpsi untuk memperkecil area elektroda yang terpapar. Dengan demikian, lapisan ganda listrik yang lebih tebal dan konstanta dielektrik lokal yang lebih rendah dapat dicapai (de Sousa Rodrigues et al., 2021; Mahross et al., 2021). Nilai IE EIS inhibitor 1000 ppm lebih rendah daripada 3000 ppm yang membuktikan bahwa kapasitas adsorpsi lebih kuat terjadi pada konsentrasi 3000 ppm. Hal ini terutama karena konsentrasi tinggi memiliki lebih banyak jembatan azometin dan awan elektron  $\pi$  dari cincin aromatik, sehingga lebih mudah diserap pada permukaan logam. Seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1 dan 2, efisiensi inhibisi maksimum Inhibitor adalah 83.39% dan 75.41% yang menunjukkan bahwa inhibitor tersebut memiliki potensi korosi yang luar biasa dalam pencegahan (Negi et al., 2024). Selain itu, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1 dan 2, Inhibitor menunjukkan daya saing yang kuat sebagai inhibitor dengan beberapa inhibitor korosi yang dilaporkan sebelumnya.

**Tabel 1.** Parameter plot nyquist

C	CPE ( $\mu\text{F.cm}^2$ )	$R_p$ ( $\Omega.\text{cm}^2$ )	$R_s$ ( $\Omega.\text{cm}^2$ )	N	$\chi^2$	IE (%)
Blank	129.7	52.15	1.59	0.83	0.92	-
1000	75.94	85.09	1.21	0.91	1.09	38.71
2000	61.69	115.74	1.09	0.91	0.45	54.94
3000	49.17	212.16	1.14	0.92	0.87	75.41

Perlu dicatat bahwa nilai IE EIS dari Inhibitor terjadi peningkatan seiring penambahan konsentrasi inhibitor. Fenomena ini mungkin disebabkan oleh keseimbangan dinamis antara perilaku adsorpsi dan desorpsi molekul inhibitor korosi pada permukaan logam. Dimana, aktivitas  $H^+$  akan meningkat yang menyebabkan percepatan korosi logam tetapi peningkatan inhibitor juga akan meningkatkan aktivitas adsorpsi molekul inhibitor korosi dan kemampuan untuk menghambat korosi logam akan meningkat. Keduanya berada dalam hubungan kesetimbangan dinamis. Ketika peningkatan konsentrasi pada aktivitas inhibitor korosi lebih besar dari pada peningkatan pada aktivitas  $H^+$ , nilai efisiensi EIS akan meningkat juga. Ini juga menjelaskan secara wajar fenomena nilai efisiensi EIS pada penambahan konsentrasi.

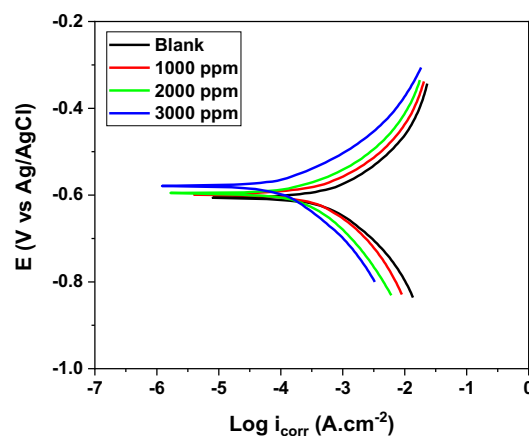
## Uji potensiodinamik polarisasi (PDP)

Gambar 4 menunjukkan kurva polarisasi potensiodinamik baja karbon pada dalam larutan HCl 1.0 M dengan konsentrasi Inhibitor yang berbeda dan parameter polarisasi spesifik tercantum dalam Tabel 2. Hasil dari Gambar 4 menunjukkan bahwa kurva katoda dan anoda dari kurva polarisasi Tafel bergeser positif seiring dengan peningkatan konsentrasi inhibitor, yang mengindikasikan bahwa inhibitor tidak hanya dapat menghambat pelarutan anoda baja karbon pada 1.0 M HCl tetapi juga menghambat pengendapan H<sub>2</sub> katoda (Syarif Hidayatullah et al., 2025). Oleh karena itu, inhibitor termasuk dalam inhibitor korosi molekuler campuran (katoda dan anoda).

**Tabel 2.** Parameter plot PDP

C	$\beta_a$ (V/dec)	$\beta_c$ (V/dec)	$E_{corr}$ (V)	$i_{corr}$ (A/cm <sup>2</sup> )	IE (%)
blank	0.71	0.81	-0.61	$7.21 \times 10^{-4}$	-
1000	0.73	0.89	-0.60	$3.91 \times 10^{-4}$	45.64
2000	0.74	0.93	-0.59	$2.32 \times 10^{-4}$	67.80
3000	0.76	0.97	-0.57	$1.19 \times 10^{-4}$	83.39

Dengan menganalisis Tabel 2, dapat dilihat dari data bahwa pergeseran relatif nilai  $E_{corr}$  terhadap kelompok kontrol pada konsentrasi Inhibitor yang berbeda semuanya kurang dari 85 mV. Pergeseran maksimum nilai  $E_{corr}$  untuk Inhibitor masing-masing sebesar 10 mV dan 40 mV (lihat Tabel 2), yang selanjutnya membuktikan bahwa Inhibitor dapat menghambat baik pelarutan anodik maupun evolusi hidrogen katodik baja karbon dalam 1.0 M HCl. Hal ini terutama karena struktur molekul ekstrak kulit jeruk madu mengandung atom N, H, O dan benzena yang berinteraksi kuat dengan atom Fe pada permukaan baja karbon menyebabkan Inhibitor terserap pada permukaan baja karbon membentuk lapisan pelindung mencegah reaksi antara H dan Fe.



**Gambar 4.** Plot tafel

Selain itu, pergeseran positif nilai  $E_{\text{corr}}$  lebih lanjut menunjukkan bahwa Inhibitor dapat lebih baik menghambat pelarutan logam anodik (Zhang et al., 2020). Alasannya adalah molekul Inhibitor menggantikan molekul  $\text{H}_2\text{O}$  pada permukaan spesimen logam dan elektron dari molekul Inhibitor berpindah menuju situs korosif elektroda anodik, meningkatkan kepadatan elektron lokal pada situs-situs ini dan dengan demikian menghambat reaksi oksidasi logam (Suhasaria et al., 2020).

Dapat dilihat dari data pada Tabel 2 bahwa nilai  $\beta_a$  dan  $\beta_c$  berubah seiring dengan penambahan konsentrasi molekul inhibitor korosi. Variasi nilai  $\beta_c$  dapat dikaitkan dengan pengaruh inhibitor terhadap kinetika reaksi evolusi hidrogen. Variabilitas ini terutama disebabkan oleh adsorpsi inhibitor pada permukaan baja karbon yang menghambat proses penerimaan elektron oleh ion  $\text{H}^+$  untuk membentuk gas hidrogen. Seiring dengan peningkatan konsentrasi inhibitor, nilai  $\beta_a$  untuk Inhibitor meningkat dari 0.71 menjadi 0.73, 0.74 dan 0.76 secara berurutan, menunjukkan bahwa reaksi anodik (pelarutan besi) secara bertahap ditekan dan efek inhibisi menjadi lebih kuat. Inhibisi ini terutama disebabkan oleh adsorpsi inhibitor pada permukaan baja karbon yang menghambat transformasi Fe menjadi  $\text{Fe}^{2+}$ . Selain itu, inhibitor menunjukkan efek penghambatan yang kuat dan konsisten dengan hasil EIS. Selain itu, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2 dan Gambar 4, keteraturan nilai  $\beta_a$  lebih lemah dibandingkan dengan nilai  $\beta_c$ . Hal ini terutama karena korosi anodik melibatkan pelarutan logam yang dapat mengakibatkan menempelnya produk korosi pada permukaan elektroda. Namun, distribusi produk korosi tidak merata yang menyebabkan tingkat ketidakrataan tertentu dalam nilai  $\beta_a$ .

Seperti yang terlihat dari Tabel 2, penambahan Inhibitor dapat secara signifikan mengurangi nilai  $i_{\text{corr}}$  dan dengan peningkatan penambahan inhibitor, nilai  $i_{\text{corr}}$  secara teratur terus menurun.

Dari sudut pandang nilai IE (efisiensi), hukum perubahan kemampuan penghambatan korosi inhibitor terhadap konsisten dengan hasil EIS. Ketika konsentrasi inhibitor adalah 3000 ppm nilai IE maksimum mencapai 83.39 %. Pada saat yang sama, ini disebabkan oleh keunggulan jumlah atom nitrogen yang banyak dalam struktur untuk konsentrasi tinggi yang membuat cakupan permukaan elektroda baja karbon dalam proses adsorpsi lebih tinggi dan kemampuan pengikatan lebih kuat.

## Adsorpsi isothermal

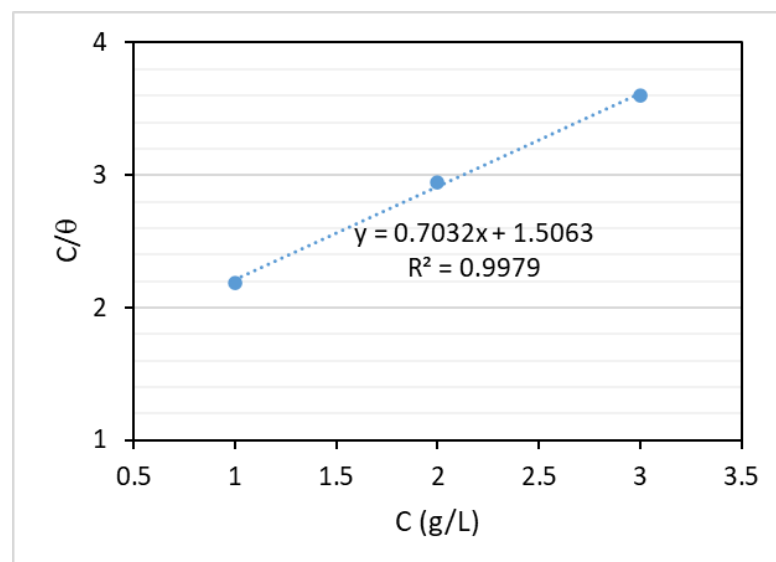
Gambar 5 menunjukkan kurva isoterm adsorpsi yang disesuaikan berdasarkan data pada Tabel 2. Hasil penelitian menunjukkan bahwa adsorpsi Inhibitor pada baja karbon mengikuti model adsorpsi isothermal Langmuir yang mengindikasikan adsorpsi lapisan tunggal. Selain itu, energi bebas adsorpsi ( $\Delta G_{ads}$ ) merupakan parameter penting untuk mempelajari adsorpsi dan desorpsi serta spontanitas yang dapat ditentukan dengan Persamaan (3) dan (4) (Oubaaqa et al., 2021; Saraswat & Yadav, 2021).

$$\Delta G_{ads} = -2.303RT \log(K_{ads} 55.5K) \quad (3)$$

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

Di mana  $R = 8,314 \text{ Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$ ,  $C$  adalah berat molekul inhibitor korosi,  $55,5$  mewakili konsentrasi molar air, dan  $T$  adalah suhu pengujian (K).

Menurut data pada Tabel 2 (parameter penyesuaian adsorpsi isothermal), kemiringan penyesuaian mendekati 1 yang membuktikan bahwa penyesuaian tersebut efektif. Terlebih lagi, nilai  $\Delta G_{ads}$  dari Inhibitor ( $-26,04 \text{ kJ.mol}^{-1}$ ) selama adsorpsi pada baja karbon semuanya berada di antara  $-20 \text{ kJ.mol}^{-1}$  dan  $-40 \text{ kJ.mol}^{-1}$ , menunjukkan bahwa adsorpsi inhibitor pada permukaan baja karbon adalah adsorpsi campuran spontan fisik dan kimia (Oubaaqa et al., 2021). Konstanta kesetimbangan adsorpsi ( $K_{ads}$ ) menunjukkan kesamaan antara sistem adsorbat dan adsorben dan nilai  $K_{ads}$  yang tinggi biasanya menunjukkan efisiensi adsorpsi molekul inhibitor yang baik pada permukaan logam (Verma et al., 2021). Dimana nilai  $K_{ads}$   $663,87 \text{ L.mol}^{-1}$ , yang mengindikasikan kapasitas adsorpsi inhibitor yang lebih besar pada permukaan logam.



**Gambar 5.** Adsorpsi isothermal langmuir

### **Mekanisme adsorpsi dari inhibitor**

Model adsorpsi molekul Inhibitor ditampilkan pada Gambar 5. Isoterm adsorpsi dan hasil elektrokimia menunjukkan bahwa molekul Inhibitor teradsorpsi pada permukaan logam. Untuk Inhibitor, adsorpsi molekul terjadi terutama melalui interaksi ikatan kimia terhadap permukaan logam yang sebagian besar berasal dari keberadaan atom hetero H, N, S, dan O yang memiliki beberapa interaksi ikatan balik dari atom Fe. Mekanisme adsorpsi dan penghambatan korosi inhibitor pada permukaan baja karbon dapat diusulkan sebagai berikut:

Pertama, molekul inhibitor memiliki elektron pasangan bebas dan atom hetero N dan O yang dapat menyumbangkan elektron ke orbital tiga dimensi kosong atom Fe di permukaan baja ringan dan sangat mendorong pembentukan ikatan koordinasi (yaitu, kemisorpsi).

Kedua, orbital  $\pi$ -antibonding ruang dari cincin benzena dapat menerima elektron dalam orbital tiga dimensi yang diisi oleh atom Fe (melalui mekanisme umpan balik dari energi), sehingga meningkatkan kekuatan adsorpsi inhibitor pada permukaan logam.

### **KESIMPULAN**

Penelitian ini menunjukkan bahwa ekstrak kulit jeruk madu, sebagai limbah pertanian yang melimpah dan berbiaya rendah, efektif berfungsi sebagai inhibitor korosi alami untuk baja karbon dalam media HCl 1 M. Efisiensi inhibisi tertinggi mencapai 83.39% (PDP) dan 75.41% (EIS) pada konsentrasi inhibitor terbesar yang digunakan. Peningkatan efisiensi seiring dengan meningkatnya konsentrasi ekstrak mengonfirmasi kemampuan inhibitor untuk menekan reaksi anodik dan katodik secara simultan. Analisis isoterm adsorpsi dan konstanta adsorpsi yang tinggi menunjukkan adanya interaksi kuat antara senyawa aktif kulit jeruk—yang kaya flavonoid, polifenol, dan gugus donor elektron—dengan permukaan baja karbon melalui mekanisme kombinasi fisorpsi dan kemisorpsi.

Secara praktis, temuan ini mengindikasikan bahwa ekstrak kulit jeruk madu berpotensi digunakan sebagai alternatif ramah lingkungan untuk menggantikan inhibitor sintesis yang toksik dalam aplikasi industri berbasis baja, terutama pada proses pembersihan asam atau perawatan peralatan. Namun, penelitian ini masih terbatas pada kondisi laboratorium dengan satu jenis media korosif dan waktu paparan yang relatif

singkat. Oleh karena itu, studi lanjutan perlu mengevaluasi performa inhibitor ini pada berbagai kondisi pH, suhu, waktu imersi jangka panjang, serta media industri yang lebih kompleks, termasuk sistem yang mengandung ion klorida tinggi atau aliran fluida. Pengujian skala industri dan analisis karakterisasi lanjutan seperti XPS atau GC–MS juga diperlukan untuk memvalidasi stabilitas jangka panjang serta mengidentifikasi senyawa aktif yang paling berkontribusi.

## DAFTAR PUSTAKA

- Boudalia, M., Fernández-Domene, R. M., Tabyaoui, M., Bellaouchou, A., Guenbour, A., & García-Antón, J. (2019). Green approach to corrosion inhibition of stainless steel in phosphoric acid of *Artemisia herba albamedium* using plant extract. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(6), 5763–5773. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.09.045>
- de Sousa Rodrigues, F. A., Gonçalves, Y. M. H., Horta, B. A. C., da Silva Santos, I., Silva, B. V., & D’Elia, E. (2021). Experimental and theoretical studies of isonitrosoacetanilides derivatives as corrosion inhibitors for mild steel in 1 mol L<sup>-1</sup> HCl. *Journal of Molecular Structure*, 1245, 131256.
- Dwivedi, D., Lepková, K., & Becker, T. (2017). Carbon steel corrosion: a review of key surface properties and characterization methods. *RSC Advances*, 7(8), 4580–4610. <https://doi.org/10.1039/C6RA25094G>
- Gapsari, F., Hidayatullah, S., Hadi Setyarini, P., Madurani, K. A., & Hermawan, H. (2022). Effectiveness of a fish scales-derived chitosan coating for corrosion protection of carbon steel. *Egyptian Journal of Petroleum*, 31(1), 25–31. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2022.02.001>
- Gautam, S. D. (2018). GC-MS analysis of Citrus limetta Risso (Sweet lime) peel extract. *The Pharma Innovation Journal*, 7(6), 1–4.
- 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>
- Jyothi, S., Rao, Y. V. S., & Ratnakumar, P. S. S. (2019). Natural product as corrosion inhibitors in various corrosive media: A review. *Rasayan Journal of Chemistry*, 12(2), 537–544. <https://doi.org/10.31788/RJC.2019.1225000>
- Kokalj, A. (2022). Corrosion Inhibitors: Physisorbed or Chemisorbed? *Corros. Sci.*, 196, 109939.
- Mahross, M. H., Taher, M. A., Mostfa, M. A., Chong, K. F., & Ali, G. A. M. (2021). Experimental and quantum investigations of novel corrosion inhibitors based triazene derivatives for mild steel. *Journal of Molecular Structure*, 1242, 130831. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2021.130831>

- Negi, R., Thakur, S., Singh, R., Kaur, V., & Singh, K. (2024). Double-layer protection of stainless steel by using triethylammonium-3-silatranylpropyldithiocarbamate as a corrosion inhibitor: Experimental and computational studies. *Journal of Molecular Structure*, 1309. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2024.138166>
- Oubaaqa, M., Ouakki, M., Rbaa, M., Abousalem, A. S., Maatallah, M., Benhiba, F., Jarid, A., Ebn Touhami, M., & Zarrouk, A. (2021). Insight into the corrosion inhibition of new amino-acids as efficient inhibitors for mild steel in HCl solution: Experimental studies and theoretical calculations. *Journal of Molecular Liquids*, 334, 116520. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.116520>
- Popoola, L. T. (2019). *Organic green corrosion inhibitors (OGCIs): a critical review*. 37(2), 71–102. <https://doi.org/doi:10.1515/correv-2018-0058>
- Quraishi, M. A., Chauhan, D. S., & Saji, V. S. (2020). 1 - Heterocyclic corrosion inhibitors. In M. A. Quraishi, D. S. Chauhan, & V. S. Saji (Eds.), *Heterocyclic Organic Corrosion Inhibitors* (pp. 1–19). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818558-2.00001-1>
- Raja, P. B., Ismail, M., Ghoreishiamiri, S., Mirza, J., Ismail, M. C., Kakooei, S., & Rahim, A. A. (2016). Reviews on corrosion inhibitors: a short view. *Chemical Engineering Communications*, 203(9), 1145–1156.
- Saraswat, V., & Yadav, M. (2021). Improved corrosion resistant performance of mild steel under acid environment by novel carbon dots as green corrosion inhibitor. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 627, 127172. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.127172>
- Sharma, K., Mahato, N., Cho, M. H., & Lee, Y. R. (2017). Converting citrus wastes into value-added products: Economic and environmentally friendly approaches. *Nutrition*, 34, 29–46. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nut.2016.09.006>
- Sowmyashree, A. S., Somya, A., Kumar, C. B. P., & Rao, S. (2021). Novel nano corrosion inhibitor, integrated zinc titanate nano particles: Synthesis, characterization, thermodynamic and electrochemical studies. *Surfaces and Interfaces*, 22, 100812. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100812>
- Suhasaria, A., Murmu, M., Satpati, S., Banerjee, P., & Sukul, D. (2020). Bis-benzothiazoles as efficient corrosion inhibitors for mild steel in aqueous HCl: Molecular structure-reactivity correlation study. *Journal of Molecular Liquids*, 313, 113537. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113537>
- 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>
- Verma, D. K., Kazi, M., Alqahtani, M. S., Syed, R., Berdimurodov, E., Kaya, S., Salim, R., Asatkar, A., & Haldhar, R. (2021). N–hydroxybenzothioamide derivatives as green and efficient corrosion inhibitors for mild steel: Experimental, DFT and MC simulation approach. *Journal of Molecular Structure*, 1241, 130648. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2021.130648>

Wu, Y., Zhang, Y., Jiang, Y., Qian, Y., Guo, X., Wang, L., & Zhang, J. (2020). Orange peel extracts as biodegradable corrosion inhibitor for magnesium alloy in NaCl solution: Experimental and theoretical studies. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 115, 35–46. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jtice.2020.10.010>

Zhang, W., Li, H.-J., Chen, L., Zhang, S., Ma, Y., Ye, C., Zhou, Y., Pang, B., & Wu, Y.-C. (2020). Fructan from *Polygonatum cyrtoneura* Hua as an eco-friendly corrosion inhibitor for mild steel in HCl media. *Carbohydrate Polymers*, 238, 116216. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116216>