

## BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Hasil Uji Fitokimia Ekstrak Daun Ara Sungsang

Uji fitokimia bertujuan menentukan kandungan senyawa metabolit sekunder dari ekstrak daun ara sungsang. Pada tabel 4.1 menunjukkan hasil uji fitokimia daun ara sungsang yang positif (+) mengandung adanya alkaloid, fenolik, flavonoid, steroid dan triterpenoid, sedangkan saponin tidak terdeteksi dalam ekstrak. Keberadaan metabolit sekunder ini mengindikasikan potensi ekstrak daun ara sungsang sebagai inhibitor korosi.

Senyawa alkaloid berperan penting dalam proses inhibisi korosi karena mengandung atom nitrogen (N) dengan pasangan elektron bebas yang mampu berinteraksi dengan orbital kosong pada permukaan baja (Syed *et al.*, 2024), selanjutnya senyawa fenolik dan flavonoid menunjukkan adanya gugus hidroksil (-OH) dan sistem cincin aromatik yang kaya akan elektron (Iheaturu *et al.*, 2024). Gugus fungsi tersebut dapat meningkatkan afinitas adsorpsi ekstrak terhadap permukaan baja, baik melalui adsorpsi fisik maupun kimia. Senyawa steroid dan triterpenoid umumnya memiliki struktur molekul besar dan bersifat hidrofobik, struktur dan sifat ini dapat meningkatkan kerapatan lapisan pelindung pada permukaan baja. Selain itu, tidak terdeteksinya saponin dalam ekstrak daun ara sungsang menunjukkan bahwa ekstrak tidak mengandung senyawa yang bersifat surfaktan, sehingga kondisi ini dapat meningkatkan kestabilan lapisan adsorpsi inhibitor pada permukaan baja dan mengurangi kemungkinan desorpsi molekul inhibitor ke dalam larutan (Lavanya & Anna, 2024).

Tabel 4.1 Hasil Uji Fitokimia Ekstrak Daun Ara Sungsang

Senyawa	Hasil Uji
Alkaloid	(+)
Fenolik	(+)
Steroid	(+)
Triterpenoid	(+)
Flavonoid	(+)
Saponin	(-)

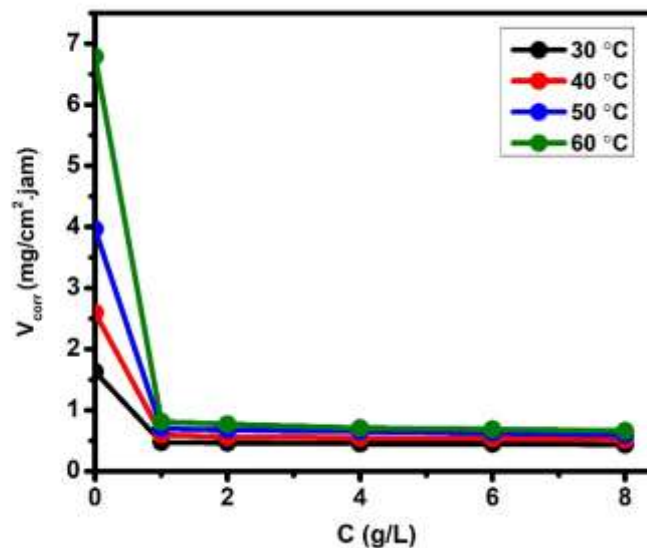
Ket : (+) ada; (-) tidak ada

## 4.2 Analisis dengan Metode Kehilangan Berat (*Weight Loss*)

Analisis metode kehilangan berat (*weight loss*) merupakan analisis untuk mempelajari pengaruh ekstrak daun ara sungsang sebagai inhibitor korosi baja dalam larutan HCl 1 M. Uji ini menggunakan variasi konsentrasi ekstrak sebesar 0; 1; 2; 4; 6; 8 g/L dan variasi suhu 30 °C, 40 °C, 50 °C dan 60 °C.

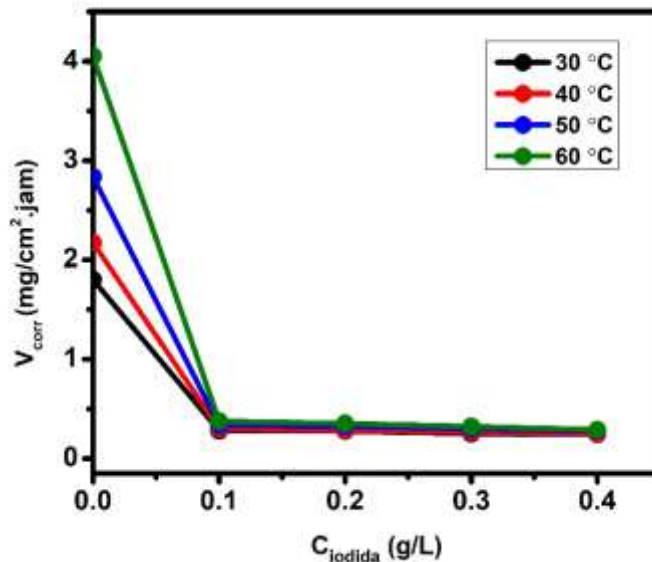
### 2.2.1 Laju korosi dengan penambahan ekstrak daun ara sungsang dalam larutan HCl 1 M dengan variasi suhu tanpa dan dengan penambahan iodida

Gambar 4.1 memperlihatkan hubungan laju korosi dengan penambahan ekstrak daun ara sungsang dengan berbagai variasi konsentrasi dan suhu. Terlihat laju korosi pada baja menurun seiring dengan bertambahnya konsentrasi ekstrak daun ara sungsang, hal ini dikarenakan terdapatnya senyawa yang menempel pada permukaan baja sehingga menurunkan laju korosi (Emriadi *et al.*, 2020). Namun, sebaliknya seiring dengan meningkatnya suhu, laju korosi baja juga semakin meningkat. Hal ini disebabkan oleh energi kinetika antara partikel dalam larutan yang meningkat akibat peningkatan suhu (Emriadi, 2025). Energi kinetika yang meningkat ini menyebabkan pergerakan partikel semakin tidak beraturan sehingga kemampuan antar partikel bertumbukan semakin banyak dan menghasilkan laju korosi yang semakin meningkat (Du *et al.*, 2023).



Gambar 4.1 Pengaruh variasi konsentrasi ekstrak daun ara sungsang terhadap laju korosi baja dalam larutan HCl 1 M selama 7 jam

Peningkatan konsentrasi ekstrak daun ara sungsang pada medium HCl berpengaruh terhadap penurunan kehilangan berat baja. Penurunan kehilangan berat ini mengindikasikan berkurangnya laju korosi akibat proses adsorpsi senyawa aktif pada permukaan logam. Nilai laju korosi tertinggi diperoleh pada kondisi tanpa penambahan ekstrak daun ara sungsang, yaitu  $6,785 \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{jam}$  saat perendaman baja dalam larutan HCl 1 M pada suhu  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ . Sebaliknya, nilai laju korosi terendah diperoleh pada konsentrasi tertinggi  $8 \text{ g/L}$  pada suhu  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  yakni sebesar  $0,432 \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{jam}$ . Hasil ini menunjukkan bahwa laju korosi baja lunak dipengaruhi tidak hanya oleh variasi konsentrasi inhibitor, tetapi juga oleh faktor suhu perendaman. Semakin tinggi konsentrasi ekstrak yang ditambahkan maka laju korosi semakin kecil dan sebaliknya semakin besar suhu perendaman yang digunakan maka laju korosi semakin besar (Rohil *et al.*, 2025). Perhitungan dan data nilai laju korosi baja dengan adanya ekstrak inhibitor dapat dilihat pada lampiran 22-24.



Gambar 4.2 Pengaruh variasi konsentrasi iodida dan suhu perendaman terhadap laju korosi baja dalam larutan HCl 1 M selama 7 jam pada konsentrasi ekstrak daun ara sungsang  $8 \text{ g/L}$

Pengaruh laju korosi pada ekstrak daun ara sungsang  $8 \text{ g/L}$  dengan variasi penambahan kalium iodida dapat dilihat pada Gambar 4.2. Berdasarkan gambar 4.2,

laju korosi terendah diperoleh sebesar  $0,242 \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{jam}$  pada kondisi penambahan konsentrasi kalium iodida  $0,4 \text{ g/L}$  pada suhu  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ . Nilai ini mengindikasikan adanya efek sinergis antara ekstrak dan ion iodida dalam menghambat proses korosi pada baja dengan membentuk lapisan pelindung yang lebih efektif pada permukaan logam. Namun demikian, laju korosi cenderung meningkat seiring dengan kenaikan suhu perendaman. Peningkatan ini berkaitan dengan bertambahnya energi kinetik partikel dalam larutan, sehingga mempercepat reaksi korosi yang terjadi pada permukaan baja. Hal ini juga disebabkan karena ion iodida teradsorpsi pada permukaan baja kemudian menarik senyawa aktif yang terkandung pada ekstrak daun ara sungsang untuk teradsorpsi pada permukaan baja lunak melalui gaya elektrostatik, gaya elektrostatik merupakan gaya tarik antara muatan positif dan muatan negatif sehingga terbentuk pasangan muatan ion pada permukaan baja sehingga membentuk lapisan pelindung yang memperlambat proses korosi terjadi (Wahyuni *et al.*, 2022)

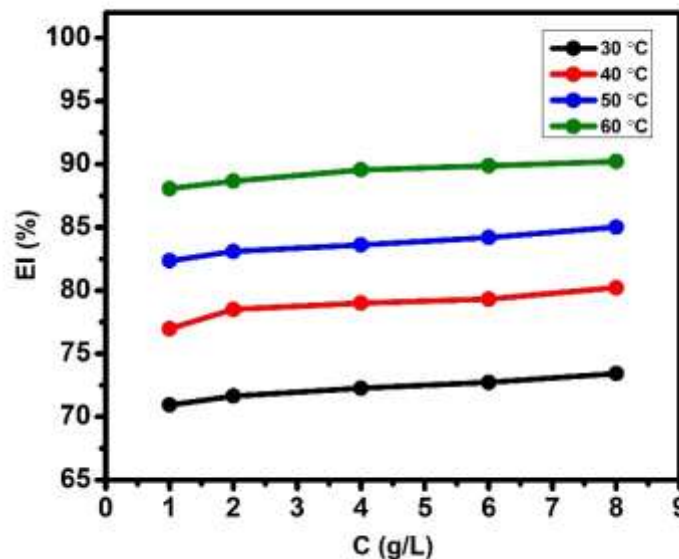
Gambar 4.1 dan 4.2 memperlihatkan bahwa laju korosi baja dalam medium HCl 1 M dengan penambahan KI lebih rendah dibandingkan dengan larutan yang hanya mengandung ekstrak daun ara sungsang. Pada konsentrasi ekstrak  $8 \text{ g/L}$  tanpa penambahan KI, laju korosi tercatat sebesar  $0,432 \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{jam}$  pada suhu  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ . Namun, dengan penambahan KI sebesar  $0,4 \text{ g/L}$  pada konsentrasi ekstrak yang sama, nilai laju korosi menurun menjadi  $0,242 \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{jam}$ . Hasil ini mengindikasikan adanya efek sinergis antara ekstrak daun ara sungsang dan ion iodida, dimana keduanya secara bersamaan berperan aktif dalam medium korosif untuk meningkatkan efisiensi penghambatan korosi baja (Emriadi *et al.*, 2023). Nilai laju korosi baja dengan adanya ekstrak inhibitor dan kalium iodida dapat dilihat pada lampiran 24.

### **2.2.2 Efisiensi inhibisi korosi dengan penambahan ekstrak daun ara sungsang dalam HCl 1 M pada variasi suhu tanpa dan dengan penambahan iodida**

Efisiensi inhibisi korosi merupakan persentase yang menunjukkan kemampuan suatu ekstrak berperan sebagai inhibitor dalam menurunkan laju korosi pada medium HCl 1 M. Perhitungan nilai efisiensi inhibisi korosi baja lunak dihitung melalui persamaan (3). Gambar 4.3 menampilkan pengaruh variasi

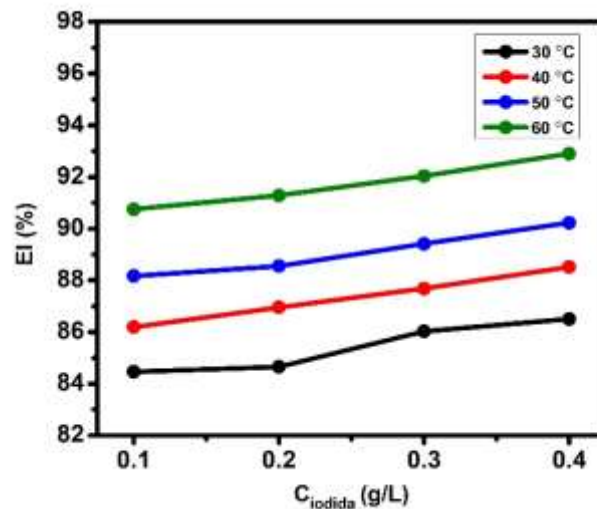
konsentrasi dan suhu terhadap efisiensi inhibisi korosi baja lunak, baik tanpa penambahan maupun dengan penambahan ekstrak daun ara sungsang.

Berdasarkan Gambar 4.3, terlihat efisiensi inhibisi laju korosi meningkat seiring dengan bertambahnya konsentrasi inhibitor. Nilai efisiensi tertinggi dicapai pada konsentrasi 8 g/L ekstrak daun ara sungsang pada suhu 60 °C dengan persentase inhibisi sebesar 90,23%. Peningkatan efisiensi ini terjadi karena semakin luas permukaan baja yang ditutupi oleh molekul ekstrak daun ara sungsang yang teradsorpsi sehingga membentuk lapisan pelindung. Lapisan tersebut berfungsi sebagai penghalang terhadap interaksi ion-ion agresif dengan permukaan baja, sehingga mampu menurunkan laju korosi dalam medium HCl (Echem *et al.*, 2025).



Gambar 4.3 Pengaruh variasi konsentrasi ekstrak daun ara sungsang terhadap efisiensi inhibisi baja dalam larutan HCl 1 M selama 7 jam

Kenaikan nilai efisiensi inhibisi korosi ini terjadi seiring dengan peningkatan suhu perendaman yang menunjukkan bahwa proses adsorpsi berlangsung lebih stabil pada suhu tinggi. Hal ini terjadi karena semakin banyaknya molekul ekstrak daun ara sungsang yang teradsorpsi pada permukaan baja sehingga membentuk ikatan kovalen koordinasi. Perhitungan dan data efisiensi inhibisi ini dapat dilihat pada lampiran 25-26.



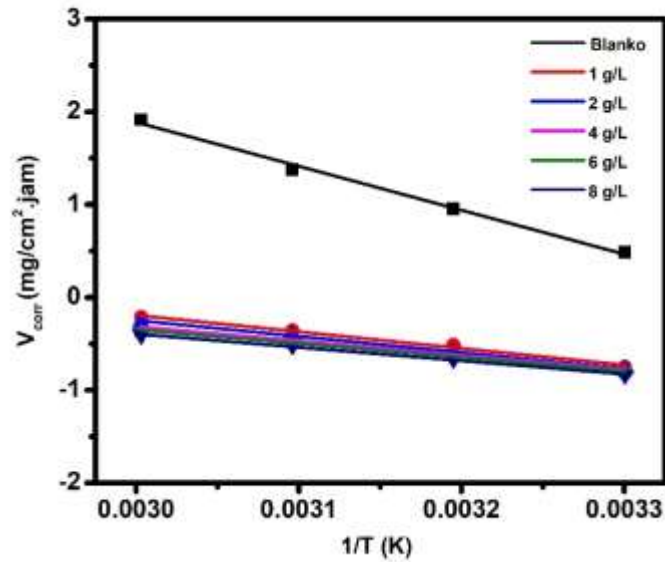
Gambar 4.4 Pengaruh variasi konsentrasi iodida dan suhu perendaman terhadap efisiensi inhibisi baja dalam larutan HCl 1 M selama 7 jam pada konsentrasi ekstrak daun ara sungsang 8 g/L

Berdasarkan gambar 4.4, terlihat bahwa efisiensi inhibisi laju korosi meningkat seiring dengan bertambahnya konsentrasi kalium iodida. Nilai efisiensi tertinggi dicapai pada konsentrasi ekstrak daun ara sungsang 8 g/L dengan penambahan kalium iodida 0,4 g/L yaitu 92,90%. Hal ini disebabkan oleh adanya interaksi sinergis antara ekstrak daun ara sungsang dengan ion iodida. Ion iodida yang memiliki jari - jari relatif besar menunjukkan sifat hidrofobisitas yang tinggi serta elektronegativitas yang lebih rendah dibandingkan dengan ion halida lainnya. Karakteristik ini memperkuat proses adsorpsi pada permukaan baja sehingga meningkatkan efektivitas ekstrak sebagai inhibitor korosi. Sejumlah penelitian menjelaskan bahwa ion halida khususnya  $I^-$  berperan sebagai perantara dalam proses adsorpsi pada permukaan baja yang mengalami korosi. Keberadaan ion iodida di dalam medium korosif mampu memperkuat adsorpsi molekul ekstrak daun ara sungsang pada permukaan baja lunak (Du *et al.*, 2023).

### 4.3 Penentuan Energi Aktivasi, Entalpi Aktivasi dan Entropi Aktivasi

Energi aktivasi merupakan energi minimum yang diperlukan agar suatu reaksi kimia dapat berlangsung (Rohil *et al.*, 2025). Pada penentuan energi aktivasi korosi baja lunak dalam larutan HCl 1 M tanpa dan dengan adanya penambahan ekstrak daun ara sungsang dihitung melalui persamaan Arrhenius pada persamaan

(5) dimana menghubungkan antara  $1/T$  dan  $\ln V_{\text{corr}}$  dari baja yang direndam dalam medium HCl 1 M baik tanpa maupun dengan penambahan ekstrak daun ara sungsgang pada berbagai konsentrasi dan variasi suhu. Grafik hubungan Arrhenius  $1/T$  dan  $\ln V_{\text{corr}}$  dapat dilihat pada gambar 4.5 dimana nilai energi aktivasi diperoleh dari kemiringan persamaan garis lurus.



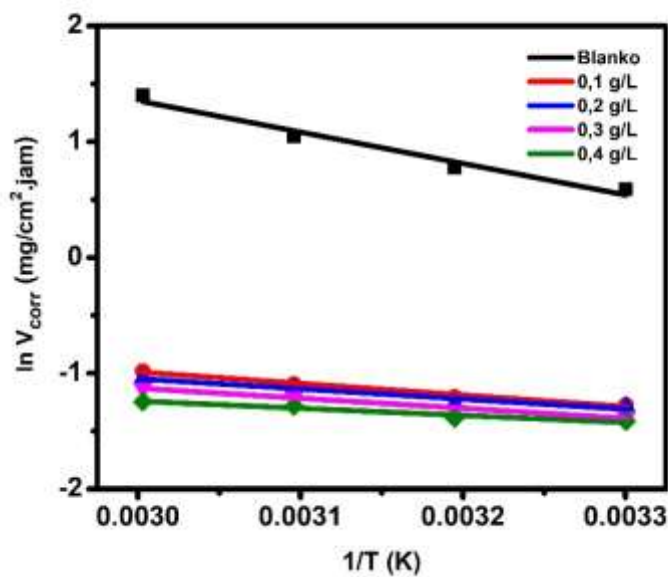
Gambar 4.5 Aluran Arrhenius  $1/T$  vs  $\ln V_{\text{corr}}$  korosi baja lunak dalam HCl 1 M tanpa dan adanya penambahan ekstrak daun ara sungsgang pada berbagai variasi konsentrasi

Tabel 4.2 Nilai energi aktivasi ( $E_a$ ), entalpi aktivasi ( $\Delta H^*$ ) dan entropi aktivasi ( $\Delta S^*$ ) tanpa dan adanya penambahan ekstrak daun ara sungsgang pada berbagai konsentrasi

Medium HCl 1 M + Ekstrak (g/L)	$E_a$ (kJ/mol)	$\Delta H^*$ (kJ/mol)	$\Delta S^*$ (J/mol)
0	39,42	36,78	-119,78
1	14,88	12,24	-210,71
2	14,41	11,77	-212,57
4	12,86	10,22	-217,79
6	12,32	9,68	-219,68
8	12,01	9,37	-221,01

Pengaruh penambahan konsentrasi ekstrak daun ara sungsgang dalam larutan HCl 1 M terhadap energi aktivasi terlihat pada tabel 4.2. Berdasarkan tabel

diketahui bahwa semakin tinggi konsentrasi inhibitor yang ditambahkan nilai energi aktivasi yang diperoleh juga semakin rendah. Hal ini menunjukkan bahwa mekanisme inhibisi korosi yang terjadi kemungkinan berlangsung melalui proses kemisorpsi dimana molekul inhibitor berinteraksi secara kimia dengan permukaan baja melalui transfer muatan, sehingga terbentuk ikatan kovalen koordinasi antara molekul inhibitor dan permukaan baja lunak. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan diperoleh energi aktivasi terendah sebesar 12,01 kJ/mol pada konsentrasi 8 g/L. Perhitungan energi aktivasi dapat dilihat pada lampiran 30.



Gambar 4. 6 Aluran Arrhenius  $1/T$  vs  $\ln V_{\text{corr}}$  korosi baja lunak dalam HCl 1 M tanpa dan adanya penambahan ekstrak daun ara sungsang pada berbagai variasi konsentrasi kalium iodida

Tabel 4. 3 Nilai energi aktivasi ( $E_a$ ), entalpi aktivasi ( $\Delta H^*$ ) dan entropi aktivasi ( $\Delta S^*$ ) tanpa dan adanya penambahan ekstrak daun ara sungsang pada variasi konsentrasi kalium iodida

Medium HCl 1 M + Ekstrak (g/L)	$E_a$ (kJ/mol)	$\Delta H^*$ (kJ/mol)	$\Delta S^*$ (J/mol)
0	22,56	19,92	-174,79
0,1	8,58	5,65	-237,11
0,2	7,52	4,65	-240,58
0,3	7,30	4,58	-241,46
0,4	4,65	2,49	-248,66

Tabel 4.3 memperlihatkan nilai energi aktivasi ( $E_a$ ) semakin menurun seiring dengan adanya penambahan konsentrasi kalium iodida. Nilai energi aktivasi paling kecil diperoleh pada penambahan konsentrasi kalium iodida 0,4 g/L sebesar 4,65 kJ/mol. Perbedaan energi aktivasi ini disebabkan oleh tingginya efektivitas senyawa yang terkandung dalam ekstrak daun ara sungsang dan kalium iodida sebagai inhibitor korosi. Nilai energi aktivasi yang semakin menurun ini menunjukkan bahwa molekul inhibitor berinteraksi lebih kuat dengan permukaan baja lunak melalui kemisorpsi. Interaksi melibatkan transfer muatan dari gugus aktif senyawa inhibitor pada permukaan baja lunak menghasilkan ikatan kovalen koordinasi yang stabil. Dengan terbentuknya ikatan tersebut, molekul inhibitor tersusun rapat pada permukaan baja dan membentuk lapisan pelindung yang lebih teratur, meskipun energi aktivasi menurun keberadaan lapisan pelindung ini mampu menghambat laju korosi (Emriadi *et al.*, 2021).

Nilai entalpi ( $\Delta H^*$ ) dan entropi ( $\Delta S^*$ ) baik tanpa maupun dengan penambahan ekstrak daun ara sungsang serta dengan penambahan kalium iodida dapat dilihat pada tabel 4.2 dan 4.3. Entalpi aktivasi ( $\Delta H^*$ ) menggambarkan jumlah energi yang dibutuhkan sistem untuk mencapai keadaan transisi dalam proses reaksi, sedangkan entropi aktivasi ( $\Delta S^*$ ) menunjukkan derajat ketidakteraturan partikel dalam larutan selama reaksi terjadi (Yahya *et al.*, 2019).

Tabel 4.2 dan 4.3 memperlihatkan nilai entalpi aktivasi ( $\Delta H^*$ ) dan entropi ( $\Delta S^*$ ) yang diperoleh dari kemiringan dan intersep grafik linear. Berdasarkan tabel, nilai entalpi aktivasi yang dihasilkan bernilai positif yang menunjukkan proses bersifat endoterm. Nilai entalpi aktivasi tanpa penambahan ekstrak daun ara sungsang lebih tinggi dibandingkan dengan yang ditambahkan ekstrak serta dengan penambahan kalium iodida. Kondisi ini disebabkan oleh berkurangnya pelepasan ion  $Fe^{2+}$  dari permukaan baja dan juga menurunnya interaksi dengan oksigen akibat keberadaan inhibitor, sehingga laju pembentukan produk korosi/karat ( $Fe_2O_3$ ) menjadi semakin terhambat seiring dengan meningkatnya efektivitas lapisan pelindung yang terbentuk pada permukaan baja (Sajadi *et al.*, 2022). Nilai entalpi aktivasi besar dari nol menunjukkan mekanisme kemisorpsi (Emriadi *et al.*, 2023).

Nilai entropi aktivasi ( $\Delta S^*$ ) yang diperoleh bernilai negatif. Kondisi ini mengindikasikan bahwa pada tahap pembentukan kompleks teraktivasi sistem lebih

cenderung mengalami asosiasi dimana molekul-molekul inhibitor bergabung menempel pada permukaan baja sehingga membentuk kompleks yang terbih teratur dibandingkan membentuk disosiasi yaitu dimana terjadi pelepasan atau pemisahan partikel-partikel sehingga menjadi sistem yang lebih acak dan tidak teratur. Sehingga, hal ini menunjukkan mekanisme adsorpsi yang teratur membentuk lapisan pelindung yang stabil (Stiadi *et al.*, 2020).

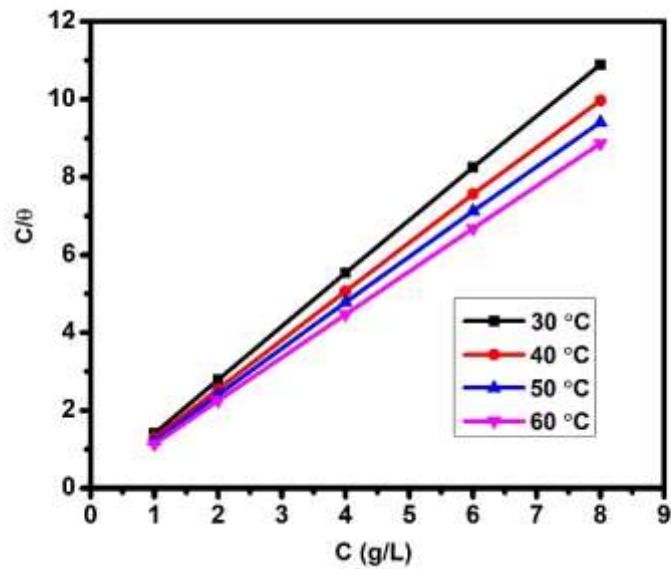
#### 4.4 Penentuan Isoterm Adsorpsi

Isoterm adsorpsi merupakan metode yang digunakan untuk mempelajari mekanisme penghambatan korosi pada permukaan baja. Proses adsorpsi berhubungan dengan penyerapan molekul inhibitor pada permukaan baja dalam larutan HCl 1 M yang berperan dalam membentuk lapisan pelindung sehingga menurunkan laju korosi. Isoterm adsorpsi juga digunakan untuk memahami mekanisme yang terjadi pada proses penghambatan korosi oleh inhibitor. Melalui isoterm adsorpsi dapat diperoleh informasi mengenai interaksi yang terjadi antara permukaan logam dengan molekul inhibitor (Yousif *et al.*, 2025).

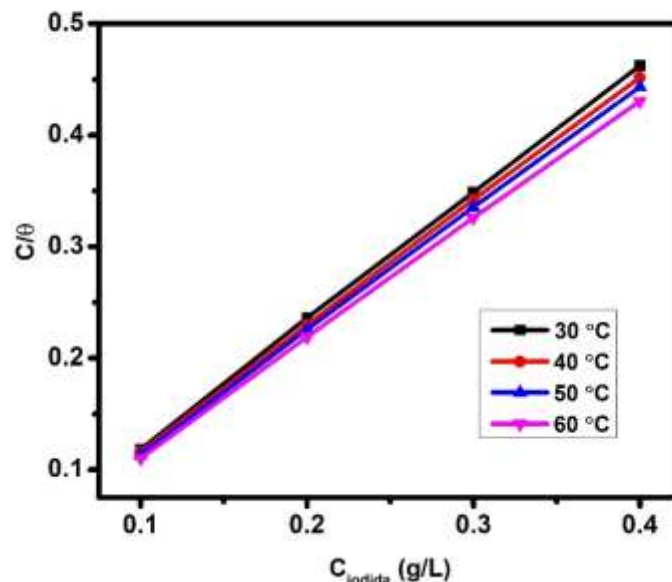
Isoterm adsorpsi langmuir menunjukkan bahwa lapisan yang terbentuk pada permukaan baja bersifat tunggal (monolayer) yang berarti molekul inhibitor teradsorpsi secara homogen hanya satu lapisan. Model ini juga menggambarkan proses adsorpsi yang melibatkan pembentukan ikatan ionik atau kovalen antara adsorben dan adsorbat ini menandakan adanya interaksi kuat antara senyawa aktif dalam inhibitor ekstrak daun ara sungsang dan ion iodida dengan permukaan baja, sehingga membentuk lapisan tunggal pelindung tanpa terjadi interaksi antara molekul inhibitor yang telah teradsorpsi.

Penambahan kalium iodida pada ekstrak daun ara sungsang mampu meningkatkan efisiensi inhibisi menurunkan laju korosi pada permukaan baja. Mekanisme adsorpsi yang terjadi melibatkan dua tahap utama. Pertama, ion I- teradsorpsi pada permukaan baja dan berperan sebagai jembatan penghubung antara senyawa aktif ekstrak daun ara sungsang yang terprotonasi dengan permukaan logam melalui interaksi elektrostatis (fisorpsi). Kedua, molekul inhibitor dalam ekstrak dapat berinteraksi langsung dengan atom Fe melalui mekanisme kemisorpsi yaitu dengan menyumbangkan pasangan elektron bebas dari atom hetero dan elektron  $\pi$  dari cincin aromatik ke orbital d atom Fe. Kombinasi kedua mekanisme

tersebut menghasilkan pembentukan lapisan tunggal (monolayer) pada permukaan baja yang sesuai dengan model isoterm adsorpsi Langmuir, seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.7 dan 4.8.



Gambar 4.7 Grafik isoterm adsorpsi Langmuir pada korosi baja dalam HCl 1 M setelah perendaman 7 jam dengan ekstrak daun ara sungsang berdasarkan metode kehilangan berat pada berbagai variasi konsentrasi



Gambar 4.8 Grafik isoterm adsorpsi Langmuir korosi baja dalam HCl 1 M selama perendaman 7 jam dengan ekstrak daun ara sungsang pada berbagai variasi konsentrasi kalium iodida berdasarkan metode kehilangan berat

Gambar 4.7 dan 4.8 menunjukkan hubungan antara  $C/\theta$  terhadap  $C$  untuk proses adsorpsi inhibitor pada permukaan baja dalam medium HCl 1 M. Grafik memperlihatkan garis lurus dengan nilai koefisien determinasi ( $R^2$ ) yang mendekati 1 menandakan bahwa adsorpsi mengikuti model isoterm Langmuir. Pada grafik gambar 4.7 tanpa penambahan kalium iodida menunjukkan hubungan linear yang kuat antara  $C/\theta$  dan  $C$  yang menandakan kemampuan adsorpsi yang cukup baik dalam menghambat korosi baja. Namun, pada gambar 4.8 grafik dengan penambahan kalium iodida mengalami kenaikan yang menandakan adanya pengaruh antara ekstrak daun ara sungsgang dengan ion iodida ( $I^-$ ). Kalium iodida membantu meningkatkan adsorpsi molekul inhibitor sehingga memperkuat ikatan antara inhibitor dan permukaan baja. Parameter adsorpsi Langmuir dapat menentukan nilai energi Gibbs ( $\Delta G_{ads}$ ), nilai konstanta adsorpsi ( $K_{ads}$ ), nilai entropi ( $\Delta S_{ads}$ ) dan nilai entalpi ( $\Delta H_{ads}$ ).

Penentuan isoterm adsorpsi ekstrak daun ara sungsgang dan kalium iodida pada permukaan baja serta nilai derajat penutupannya dilakukan menggunakan persamaan isoterm Langmuir, Temkin, Freundlich, El-Awady, Frumkin dan Flory Huggins. Nilai koefisien determinasi ( $R^2$ ) dari masing-masing model isoterm dapat dilihat pada lampiran 32. Analisis isoterm adsorpsi bertujuan untuk mengetahui mekanisme yang mendasari proses inhibisi korosi oleh inhibitor serta memeberikan gambaran mengenai interaksi antar permukaan baja dengan molekul inhibitor.

Tabel 4.4 Nilai koefisien determinasi ( $R^2$ ) pada berbagai jenis isoterm adsorpsi tanpa kalium iodida

Suhu (K)	Koefisien determinasi ( $R^2$ )					
	Langmuir	Freundlich	Temkin	Frumkin	El-Awady	Flory Huggins
303	0,9999	0,9275	0,9722	0,9752	0,9696	0,9670
313	0,9999	0,9289	0,9420	0,9504	0,9423	0,9402
323	0,9999	0,9272	0,9488	0,9573	0,9401	0,9363
333	0,9999	0,9286	0,9948	0,9958	0,9936	0,9932

Tabel 4.5 Nilai koefisien determinasi ( $R^2$ ) pada berbagai jenis isoterm adsorpsi dengan kalium iodida

Suhu (K)	Koefisien determinasi ( $R^2$ )					
	Langmuir	Freundlich	Temkin	Frumkin	El-Awady	Flory Huggins
303	0,9999	0,9583	0,8397	0,8735	0,8372	0,8307
313	0,9999	0,9592	0,9534	0,9657	0,9429	0,9391
323	0,9999	0,9585	0,8832	0,9131	0,8713	0,8655
333	0,9999	0,9588	0,9118	0,9414	0,8926	0,8874

Berdasarkan tabel terlihat bahwa koefisien determinasi ( $R^2$ ) menunjukkan model isoterm Langmuir yang memiliki nilai tertinggi mendekati 1 pada semua variasi suhu baik penambahan dengan ekstrak daun ara sungsang maupun dengan penambahan ekstrak daun ara sungsang dan kalium iodida (KI). Hal ini menandakan bahwa proses adsorpsi inhibitor mengikuti model Langmuir yaitu pembentukan lapisan tunggal (monolayer) pada permukaan baja tanpa adanya interaksi antar molekul inhibitor. Penambahan KI juga tidak mengubah jenis isoterm adsorpsi namun memberikan efek sinergis yang meningkatkan kestabilan adsorpsi.

Tabel 4.6 dan 4.7 memperlihatkan nilai konstanta adsorpsi ( $K_{ads}$ ) yang menunjukkan kemampuan ekstrak daun ara sungsang teradsorpsi pada permukaan baja baik tanpa maupun dengan penambahan kalium iodida. Hasil penelitian menunjukkan nilai  $K_{ads}$  meningkat seiring dengan kenaikan suhu yang mengindikasikan semakin kuatnya interaksi atau ikatan antara molekul inhibitor dengan permukaan baja pada suhu yang lebih tinggi. Nilai energi bebas Gibbs ( $\Delta G_{ads}$ ) yang bernilai negatif yang menandakan bahwa proses adsorpsi berlangsung secara spontan dan menghasilkan lapisan adsorpsi yang stabil pada permukaan baja.

Tabel 4.6 Parameter termodinamika adsorpsi ekstrak daun ara sungsang pada permukaan baja dalam larutan HCl 1 M dengan variasi suhu berdasarkan isoterm Langmuir.

Suhu (K)	$K_{ads}$ (g/L)	$\Delta G_{ads}$ (kJ/mol)	$\Delta H_{ads}$ (kJ/mol)	$\Delta S_{ads}$ (J/mol)
303	12,68	-23,79		
313	13,69	-24,78		
323	15,37	-25,88	16,66	132,88
333	23,85	-27,90		

Pada tabel parameter termodinamika adsorpsi ekstrak daun ara sungsang pada permukaan baja dapat dilihat bahwa nilai  $K_{ads}$  naik dari 12,68 g/L pada suhu 303 K menjadi 23,85 g/L pada suhu 333 K. Kenaikan  $K_{ads}$  seiring dengan peningkatan suhu menunjukkan bahwa proses adsorpsi bersifat endotermik. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan suhu meningkatkan energi kinetika molekul, sehingga proses adsorpsi menjadi lebih mudah terjadi pada suhu tinggi. Selanjutnya, nilai energi Gibbs ( $\Delta G_{ads}$ ) yang bernilai negatif menunjukkan bahwa proses adsorpsi berlangsung secara spontan dan dapat membentuk lapisan pelindung pada permukaan baja. Nilai energi gibbs yang bernilai antara -20 sampai -40 kJ/mol menunjukkan bahwa mekanisme adsorpsi campuran, dimana molekul inhibitor berinteraksi dengan permukaan baja melalui kombinasi gaya elektrostatis dan sebagian ikatan kimia.

Tabel 4.7 Parameter termodinamika adsorpsi ekstrak daun ara sungsang dengan penambahan kalium iodida pada permukaan baja dalam HCl 1 M pada berbagai suhu berdasarkan isoterm Langmuir.

Suhu (K)	$K_{ads}$ (g/L)	$\Delta G_{ads}$ (kJ/mol)	$\Delta H_{ads}$ (kJ/mol)	$\Delta S_{ads}$ (J/mol)
303	188,14	-30,59		
313	197,05	-31,72		
323	213,68	-32,95	5,12	117,83
333	224,55	-34,11		

Pada parameter termodinamika adsorpsi ekstrak daun ara sungsang dengan penambahan kalium iodida terlihat  $K_{ads}$  meningkat dengan penambahan kalium iodida dan seiring dengan kenaikan suhu  $K_{ads}$  juga naik, menunjukkan bahwa terjadi kestabilan proses adsorpsi dengan penambahan kalium iodida yang memperkuat interaksi inhibitor dengan permukaan baja dan menghasilkan lapisan pelindung yang lebih efektif dalam menghambat laju korosi.

Nilai entalpi adsorpsi ( $\Delta H_{ads}$ ) yang positif menunjukkan bahwa proses adsorpsi bersifat endotermik artinya proses adsorpsi memerlukan penyerapan energi panas dari lingkungan agar dapat berlangsung. Hal ini mengindikasikan bahwa peningkatan suhu dapat meningkatkan kecenderungan molekul inhibitor dari ekstrak daun ara sungsang untuk teradsorpsi pada permukaan baja.

Nilai entropi adsorpsi ( $\Delta S_{ads}$ ) yang bernilai positif menunjukkan bahwa selama proses adsorpsi, terjadi peningkatan ketidakteraturan sistem yang artinya

ketika molekul inhibitor dari ekstrak daun ara sungsang menempel pada permukaan baja, sebagian molekul air yang sebelumnya menutupi permukaan baja terlepas dan digantikan oleh molekul inhibitor. Pergantian ini menyebabkan sistem menjadi lebih acak karena molekul - molekul di sekitar permukaan logam menjadi lebih bebas bergerak. Ketika ekstrak daun ara sungsang ditambahkan kalium iodida nilai  $\Delta S_{ads}$  lebih tinggi yang menandakan bahwa penambahan kalium iodida memperkuat interaksi antara inhibitor yang membantu pembentukan lapisan adsorpsi yang lebih padat, kuat dan stabil pada permukaan logam sehingga meningkatkan efektivitas penghambatan korosi.

#### 4.5 Efek Sinergetik

Nilai efek sinergetik dihitung untuk menentukan adanya interaksi sinergis dalam proses inhibisi korosi yang diperoleh berdasarkan derajat penutupan permukaan oleh anion, kation serta kombinasi keduanya sesuai dengan persamaan X. Nilai S yang lebih besar dari satu seperti pada tabel 4.8 - 4.11 menunjukkan bahwa terjadinya efek sinergetik antara ekstrak daun ara sungsang dan kalium iodida.

Tabel 4.8 Nilai efek sinergetik ekstrak daun ara sungsang dengan kalium iodida pada variasi suhu

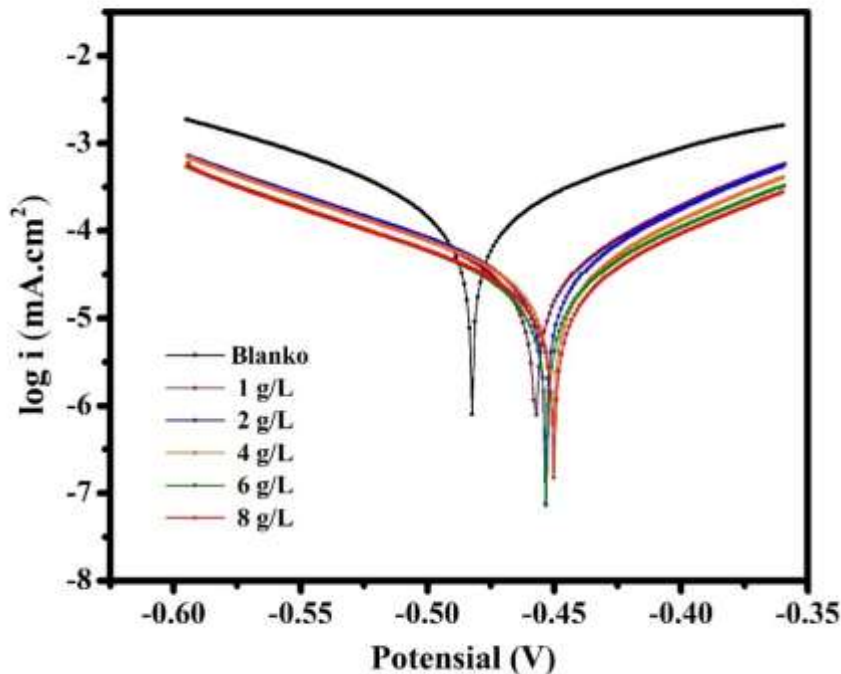
C (g/L)	T (K)			
	303	313	323	333
0,1	2,24	2,18	2,14	2,10
0,2	2,21	2,15	2,12	2,08
0,3	2,16	2,12	2,10	2,07
0,4	2,14	2,10	2,08	2,05

Pada dasarnya, stabilisasi ion iodida yang teradsorpsi bersama inhibitor bermuatan kation dapat memperluas area permukaan, sehingga mampu menurunkan laju korosi dan meningkatkan efisiensi inhibisi. Senyawa organik bermuatan positif dalam ekstrak daun ara sungsang cenderung teradsorpsi lemah pada permukaan baja karena permukaan baja juga bermuatan positif dalam larutan HCl. Namun, keberadaan ion iodida menyebabkan penurunan muatan positif pada permukaan baja melalui pembentukan ikatan Fe-I, sehingga memungkinkan terjadinya adsorpsi kation organik dari ekstrak (Gusti *et al.*, 2022).

Berdasarkan tabel 4.8 pada suhu 30 °C nilai efek sinergetik berkisar pada 2-14 hingga 2,24 dengan nilai paling tinggi pada konsentrasi KI 0,1 g/L. Nilai yang tinggi ini menunjukkan bahwa pada suhu rendah penambahan ion iodida dapat meningkatkan daya adsorpsi senyawa aktif dalam ekstrak daun ara sungsang pada permukaan logam, sehingga menghasilkan perlindungan yang lebih efektif. (Abd El Wanees *et al.*, 2024). Oleh karena itu, kombinasi ekstrak daun ara sungsang dengan kalium iodida terbukti memberikan efek sinergis yang efektif dalam menghambat laju korosi, terutama pada kondisi suhu rendah.

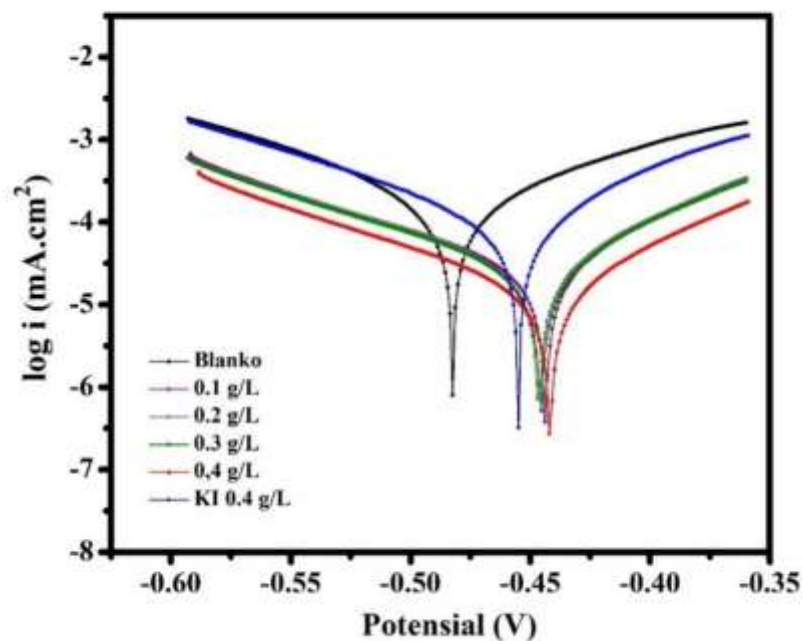
#### 4.6 Pengukuran Polarisasi Potensiodinamik

Pengaruh ekstrak daun ara sungsang terhadap laju korosi dapat di analisis melalui pengukuran polarisasi potensiodinamik pada baja lunak dalam larutan HCl 1 M. Analisis dilakukan dengan variasi konsentrasi ekstrak daun ara sungsang serta dengan penambahan kalium iodida yang ditampilkan dalam bentuk tafel plot. Perubahan yang diamati digunakan untuk menentukan mekanisme karakteristik kerja inhibitor (anodik, katodik atau campuran).



Gambar 4.9 Kurva polarisasi potensiodinamik tanpa dan dengan adanya ekstrak daun ara sungsang dalam HCl 1 M pada berbagai variasi konsentrasi

Gambar 4.9 dan 4.10 terlihat bahwa kurva tafel mengalami pergeseran baik ke arah anodik maupun ke arah katodik setelah penambahan ekstrak daun ara sungsang dan dengan penambahan kalium iodida. Pergeseran ini menunjukkan bahwa keduanya bekerja sebagai inhibitor campuran yaitu mampu menghambat reaksi pelarutan baja (anodik) sekaligus mengurangi reaksi reduksi ion hidrogen (katodik). Penurunan densitas arus korosi ( $I_{corr}$ ) yang signifikan dibandingkan blanko mendukung kesimpulan bahwa laju korosi baja lunak menurun seiring dengan bertambahnya konsentrasi inhibitor (Mahraz *et al.*, 2024).



Gambar 4.10 Kurva polarisasi potensiodinamik tanpa dan dengan adanya ekstrak daun ara sungsang 8 g/L pada berbagai variasi konsentrasi kalium iodida

Kurva polarisasi potensiodinamik juga memperlihatkan adanya interaksi antara molekul ekstrak daun ara sungsang dengan permukaan baja lunak. Mekanisme inhibisi terjadi melalui proses adsorpsi senyawa aktif ekstrak ara sungsang pada permukaan logam yang menutupi situs aktif sehingga menghambat laju korosi. Adsorpsi ini tidak hanya mengurangi reaksi oksidasi pada sisi anodik tetapi juga menekan reduksi ion  $H^+$  menjadi gas  $H_2$  pada sisi katodik. Hal ini terlihat dari pergeseran potensial korosi ( $E_{corr}$ ) yang tidak dominan ke salah satu arah, melainkan berada di antara anodik dan katodik. Oleh karena itu, dapat dipastikan

bahwa ekstrak daun ara sungsang berperan sebagai inhibitor campuran yang efektif menekan laju korosi baja lunak pada medium HCl 1 M (Mahraz *et al.*, 2024).

Tabel 4.9 Nilai potensial korosi, arus korosi serta efisiensi inhibisi korosi baja tanpa dan dengan adanya penambahan ekstrak daun ara sungsang

Konsentrasi Ekstrak (g/L)	$E_{corr}$ (V)	$I_{corr}$ (mA.cm <sup>2</sup> )	EI%
Blanko	-0,483	210,38	0
1	-0,454	52,26	75,15
2	-0,453	46,45	77,92
4	-0,452	44,81	78,69
6	-0,451	33,57	84,04
8	-0,450	33,50	84,08

Tabel 4.10 Nilai potensial korosi, arus korosi serta efisiensi inhibisi korosi baja tanpa dan dengan adanya penambahan kalium iodida

Konsentrasi (g/L)	$E_{corr}$ (V)	$I_{corr}$ (mA.cm <sup>2</sup> )	EI%
Blanko	-0,483	210,38	0
KI 0,4	-0,455	136,04	35,33
Ekstrak + KI 0,1	-0,447	44,08	79,04
Ekstrak + KI 0,2	-0,446	43,37	79,38
Ekstrak + KI 0,3	-0,444	40,72	80,64
Ekstrak + KI 0,4	-0,442	23,56	88,80

Berdasarkan tabel 4.9 dan 4.10 terlihat bahwa peningkatan konsentrasi ekstrak daun ara sungsang baik dengan maupun tanpa penambahan kalium iodida berbanding lurus dengan penurunan laju korosi. efisiensi inhibisi yang diperoleh melalui metode kehilangan berat juga menunjukkan kecenderungan yang serupa. Sehingga, dapat dipastikan bahwa ekstrak daun ara sungsang efektif dalam menekan laju korosi baja lunak baik dengan ekstrak saja maupun dikombinasikan dengan kalium iodida. Penurunan arus korosi terjadi akibat berkurangnya transfer elektron dari logam yang mengami oksidasi dalam larutan HCl. Selain itu, nilai potensial korosi ( $E_{corr}$ ) mengalami pergeseran ke arah yang lebih positif yang menandakan terbentuknya lapisan pelindung pada permukaan akibat adsorpsi inhibitor.

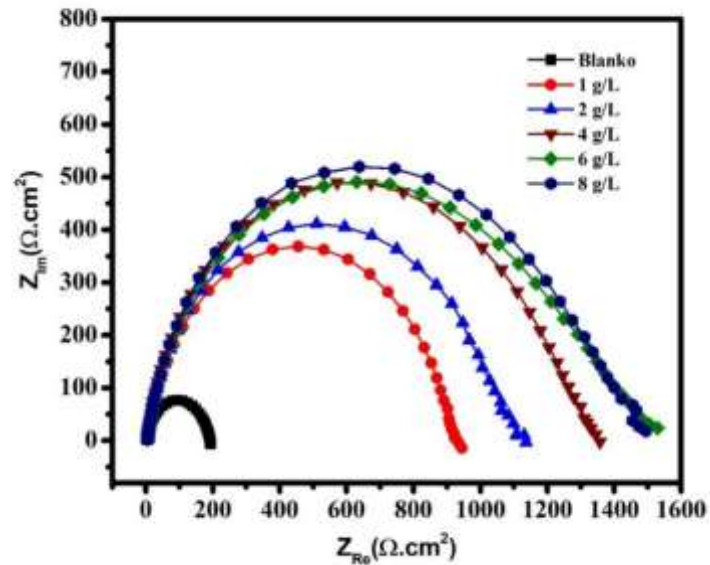
Tabel 4.9 dan 4.10 memperlihatkan bahwa semakin tinggi konsentrasi ekstrak yang ditambahkan, semakin besar pula penurunan arus korosi ( $I_{\text{corr}}$ ). Hal ini disebabkan karena berkurangnya pergerakan elektron dari baja yang teroksidasi dalam medium HCl 1 M seiring dengan meningkatnya adsorpsi molekul ekstrak pada permukaan baja. Penurunan nilai potensial korosi ( $E_{\text{corr}}$ ) menunjukkan bahwa ekstrak daun ara sungsgang dalam larutan asam mampu bertindak sebagai inhibitor yang efektif dalam melindungi baja dari lingkungan korosif. Efisiensi inhibisi meningkat seiring dengan penambahan konsentrasi ekstrak yang menandakan semakin banyak reaksi korosi yang berhasil ditekan. Hal ini berkaitan dengan adanya gugus amina dan hidroksi pada senyawa aktif ekstrak yang dapat berinteraksi dengan permukaan baja dan membentuk lapisan pelindung, sehingga menghambat serangan anodik oleh ion  $\text{Cl}^-$  dan reaksi reduksi  $\text{H}^+$  pada katoda dalam larutan HCl (Solanki *et al.*, 2025).

Perubahan  $E_{\text{corr}}$  terbesar terlihat pada ekstrak daun ara sungsgang dengan konsentrasi 8 g/L dengan nilai  $E_{\text{corr}}$  -0,453 V dan pada penambahan ekstrak daun ara sungsgang dengan kalium iodida konsentrasi 0,4 g/L menunjukkan nilai  $E_{\text{corr}}$  0,442 V. Nilai pergeseran ini jauh lebih kecil dari -0,85 mV (-0,00085 V) sehingga menunjukkan bahwa keberadaan ekstrak daun ara sungsgang dan kalium iodida mampu mengurangi laju reaksi korosi pada kedua sisi elektrokimia anodik dan katodik. Ini menunjukkan bahwa ekstrak daun ara sungsgang dapat diklasifikasikan sebagai inhibitor campuran. Efisiensi inhibisi meningkat seiring dengan peningkatan konsentrasi ekstrak daun ara sungsgang, efisiensi tertinggi terdapat pada konsentrasi 8 g/L dengan nilai 84,08% dan meningkat lagi setelah ditambahkan kalium iodida pada konsentrasi 0,4 g/L dengan nilai efisiensi sebesar 88,80%. Hal ini membuktikan adanya efek sinergis antara senyawa aktif ekstrak daun ara sungsgang dengan ion iodida dalam memperkuat lapisan adsorpsi pada permukaan baja.

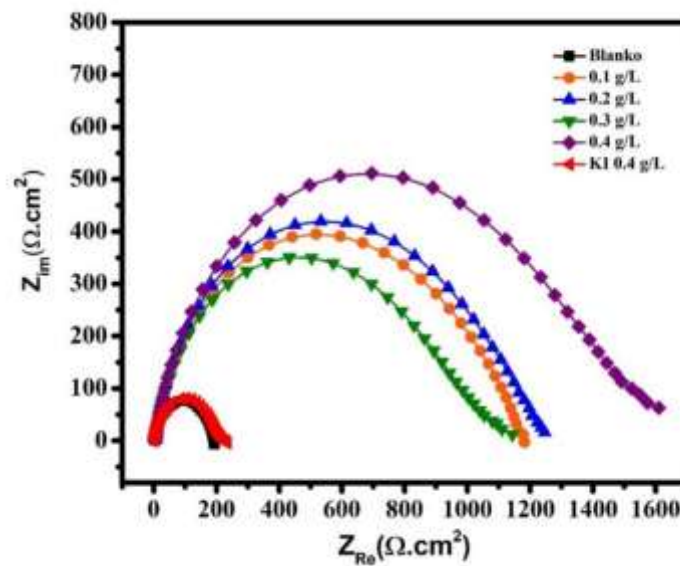
#### 4.7 Metode EIS (Spektroskopi Impedansi Elektrokimia)

Metode EIS merupakan metode yang digunakan untuk menggambarkan reaksi pada antarmuka logam/elektrolit serta karakteristik korosi. Pengukuran EIS pada baja lunak dilakukan pada variasi konsentrasi inhibitor dari ekstrak daun ara sungsgang dengan tambahan kalium iodida. Plot nyquist memperlihatkan pola

setengah lingkaran yang sesuai dengan proses transfer muatan yang berhubungan pada proses transfer massa, variasi frekuensi, kekasaran pada permukaan dan ketidakhomogenan pada elektroda. Dengan demikian, keberadaan inhibitor maupun iodida tidak mengubah mekanisme korosi elektrokimia baja lunak dalam medium asam klorida.



Gambar 4.11 Diagram nyquist baja lunak dalam larutan HCl 1 M dengan variasi konsentrasi ekstrak daun ara sungsang



Gambar 4.12 Diagram nyquist baja lunak dalam larutan HCl 1 M dengan ekstrak daun ara sungsang pada berbagai variasi konsentrasi kalium iodida

Gambar 4.11 dan 4.12 merupakan plot Nyquist tanpa dan dengan ekstrak daun ara sungsang dan kalium iodida, yang menampilkan bentuk setengah lingkaran. Penambahan inhibitor ke dalam larutan HCl menyebabkan diameter setengah lingkaran bertambah besar yang menandakan terbentuknya lapisan peling pada permukaan baja akibat adanya ekstrak daun ara sungsang serta peningkatan ketahanan terhadap korosi.

Tabel 4. 11 Nilai parameter EIS ekstrak daun ara sungsang

Konsentrasi Ekstrak (g/L)	$R_{ct}(\Omega.cm^2)$	EI (%)
Blanko	190,07	0
1	939,05	79,76
2	1131,77	83,21
4	1352,89	85,95
6	1489,59	87,24
8	1524,33	87,53

Tabel 4.12 Nilai parameter EIS ekstrak daun ara sungsang dengan penambahan kalium iodida

Konsentrasi (g/L)	$R_{ct}(\Omega.cm^2)$	EI (%)
Blanko	190,07	0
KI 0,4	225,14	17,55
Ekstrak + KI 0,1	1138,17	83,30
Ekstrak + KI 0,2	1176,67	83,85
Ekstrak + KI 0,3	1241,26	84,69
Ekstrak + KI 0,4	1605,16	88,16

Tabel 4.11 dan 4.12 menunjukkan bahwa nilai resistansi transfer muatan lapisan ganda ( $R_{ct}$ ) meningkat seiring dengan bertambahnya konsentrasi ekstrak daun ara sungsang dan penambahan kalium iodida (KI). Peningkatan nilai  $R_{ct}$  ini menandakan bahwa laju korosi baja menurun, yang berarti kemampuan penghambatan korosi (efisiensi inhibisi) meningkat. Pada diagram nyquist, nilai  $R_{ct}$  diperoleh dari selisih nilai  $Z'$  pada rekuensi rendah (nilai  $Z''$  terbesar) dan nilai

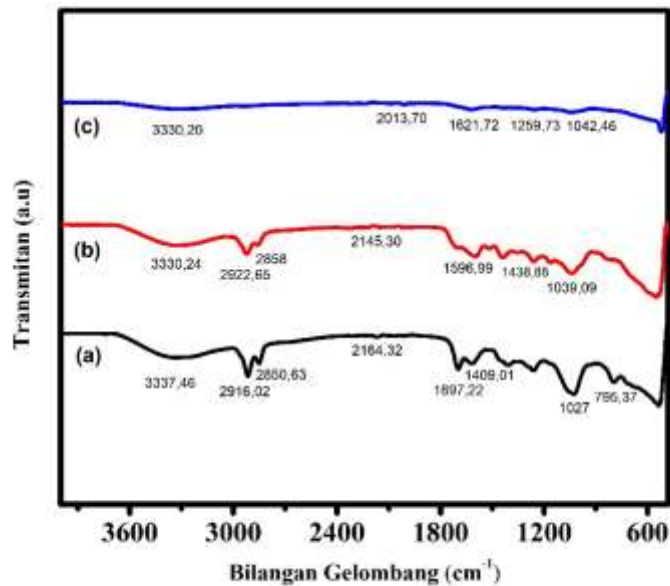
$Z'$  pada frekuensi tinggi (nilai  $Z''$  terkecil). Selisih ini terlihat sebagai jarak horizontal antara dua ujung setengah lingkaran pada diagram.

Semakin tinggi nilai  $R_{ct}$  menunjukkan bahwa permukaan baja yang terlapisi inhibitor memiliki ketahanan korosi yang lebih baik karena proses transfer muatan berlangsung lebih lambat. Sebaliknya, nilai  $R_{ct}$  yang rendah menandakan baja lebih rentan terhadap korosi akibat laju transfer muatan yang lebih cepat (Chinedu *et al.*, 2025). Seiring dengan meningkatnya konsentrasi inhibitor ekstrak daun ara sungsang, diameter setengah lingkaran pada diagram Nyquist semakin besar, yang menunjukkan peningkatan efisiensi inhibisi korosi. Efisiensi inhibisi tertinggi mencapai 87,53% pada konsentrasi ekstrak 8 g/L, ketika dikombinasikan dengan kalium iodida (KI) efisiensi inhibisi meningkat menjadi 88,16% yang menunjukkan adanya efek sinergis antara kedua inhibitor tersebut. Kombinasi ini terbukti memberikan kinerja penghambatan korosi yang sangat baik terhadap baja lunak karena kedua bahan mampu menghambat reaksi elektrokimia baik pada sisi anodik maupun katodik. Oleh karena itu, hasil kombinasi ini dapat dikategorikan sebagai inhibitor korosi tipe campuran yang bekerja secara efektif dalam mengurangi laju korosi baja.

#### 4.8 Analisis *Fourier Transform Infra Red* (FTIR)

Analisis gugus fungsi dilakukan untuk mengidentifikasi senyawa yang terdapat dalam ekstrak daun ara sungsang yang berperan sebagai inhibitor korosi. Pada penelitian ini, gugus fungsi yang terkandung dalam ekstrak daun ara sungsang serta interaksinya dengan permukaan baja dan kalium iodida dapat diketahui melalui analisis *Fourier Transform Infra Red* (FTIR). Hasil analisis dapat dilihat pada gambar 4.13 dalam bentuk spektrum FTIR.

Pada spektrum bagian (a) teridentifikasi beberapa gugus fungsi yang terdapat dalam ekstrak daun ara sungsang. Pita serapan pada bilangan gelombang  $3337,46\text{ cm}^{-1}$  menunjukkan keberadaan gugus -OH dari fenolik dan flavonoid, pada bilangan gelombang  $2916,02\text{ cm}^{-1}$  simetris C-H. Pada bilangan gelombang  $1697,22\text{ cm}^{-1}$  yang merupakan C=C kemudian pada bilangan gelombang  $1027\text{ cm}^{-1}$  yang merupakan gugus aromatik C-O serta pada  $795,37\text{ cm}^{-1}$  yang berhubungan dengan gugus aromatik C-H.



Gambar 4. 13 Spektrum FTIR (a) ekstrak daun ara sungsang, (b) produk korosi dalam HCl 1 M + ekstrak daun ara sungsang 8g/L dengan perendaman 7 hari, (c) produk korosi dalam HCl 1 M + ekstrak daun ara sungsang 8 g/L + kalium iodida 0,4 g/L dengan perendaman 7 hari

Pada spektrum bagian (b), menunjukkan adanya beberapa pergeseran bilangan gelombang pada gugus fungsi ekstrak daun ara sungsang setelah berinteraksi dengan baja. Pergeseran ini mencerminkan adanya proses adsorpsi pada permukaan logam. Gugus OH bergeser ke  $3330,24 \text{ cm}^{-1}$  yaitu ke bilangan gelombang yang lebih rendah yang menunjukkan terbentuknya ikatan yang kuat antara gugus OH dari ekstrak daun ara sungsang dengan ion logam. Hal ini mengindikasikan bahwa gugus hidroksil fenolik/flavonoid berperan penting dalam proses adsorpsi dengan permukaan logam. Selanjutnya, gugus C-H mengalami pergeseran ke  $2922,65 \text{ cm}^{-1}$  ke bilangan gelombang yang lebih tinggi yang menandakan ikatan hidrogen berkurang sehingga C-H menjadi lebih kuat dan stabil. Pergeseran yang signifikan juga terjadi pada gugus C=O ke bilangan gelombang  $1596,99 \text{ cm}^{-1}$  yaitu pergeseran ke arah yang lebih rendah yang menandakan melemahnya ikatan C=C akibat interaksi kuat dengan ion logam. Kemudian pada gugus C-O bergeser ke bilangan gelombang  $1039,09 \text{ cm}^{-1}$  yang merupakan pergeseran bilangan gelombang yang lebih tinggi, hal ini menandakan lemahnya ikatan hidrogen disekitar gugus fungsi akibat interaksi dengan permukaan logam. (Vinayagam *et al.*, 2024)

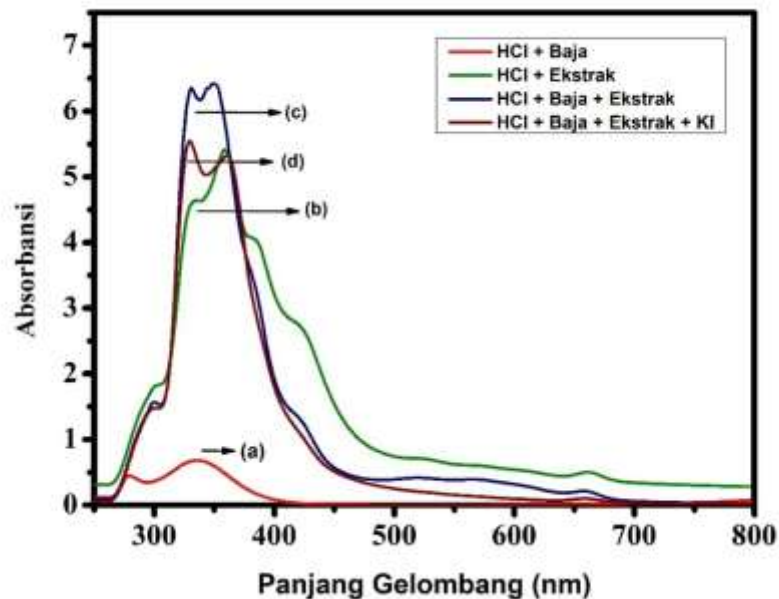
Pada spektrum bagian (c), menunjukkan pergeseran bilangan gelombang ke  $3330,20\text{ cm}^{-1}$  yang merupakan pergeseran yang tidak terlalu signifikan, meskipun begitu penurunan pergeseran bilangan gelombang ini akibat terbentuknya ikatan koordinasi dengan ion logam pada permukaan baja. Sementara itu, hilangnya serapan khas C-H dan munculnya puncak baru disekitar  $2013,70\text{ cm}^{-1}$  menandakan adanya pembentukan kompleks logam dengan bahan organik pada permukaan logam. Kemudian, terjadinya pergeseran bilangan gelombang ke  $1621,72\text{ cm}^{-1}$  pada gugus C=C dan bilangan gelombang  $1259,73$  ke bilangan gelombang yang lebih tinggi yang menandakan kuatnya peran C-O dalam adsorpsi (Fouda *et al.*, 2021).

#### 4.9 Analisis Spektrofotometri Ultraviolet-Visible (UV-Vis)

Analisis UV-Vis bertujuan untuk mengidentifikasi terbentuknya senyawa kompleks antara inhibitor dengan ion besi pada baja. Prinsip kerja UV-Vis didasarkan pada transisi elektronik, yaitu perpindahan elektron menuju tingkat energi yang lebih tinggi ketika menyerap cahaya pada panjang gelombang tertentu. Indikasi adanya interaksi kompleks antara senyawa aktif dalam ekstrak daun ara sungsang dengan ion besi dapat diamati melalui perubahan intensitas absorbansi serta adanya pergeseran panjang gelombang serapan. Hasil pengukuran spektrofotometri UV-Vis dapat dilihat pada Gambar 4.13.

Gambar 4.14 (a) spektrum penyerapan HCl + Baja yang telah dilakukan perendaman selama 7 hari, spektrum tidak menunjukkan puncak absorbansi yang signifikan karena baja dalam larutan korosif belum berinteraksi dengan ekstrak daun ara sungsang.

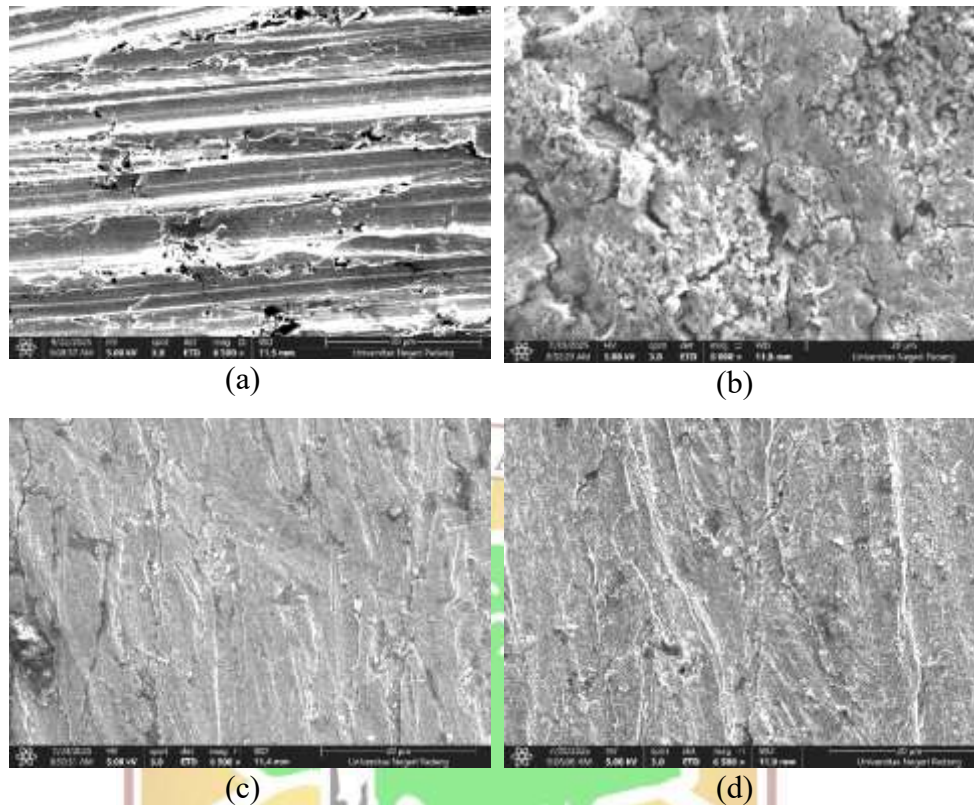
Gambar 4.14 (b) merupakan spektrum penyerapan ekstrak daun ara sungsang dengan penambahan HCl tanpa adanya perendaman dengan baja, spektrum memperlihatkan puncak serapan maksimum muncul pada panjang gelombang  $358\text{ nm}$  dengan nilai absorbansi maksimum  $5,413\text{ A}$ , absorbansi pada daerah ini umumnya berkaitan dengan keberadaan senyawa flavonoid atau fenolik yang memiliki sistem ikatan rangkap terkonjugasi ( $\pi-\pi^*$ ) pada cincin aromatik. Hal ini sesuai dengan penelitian (Skoko *et al.*, 2020) yang menunjukkan bahwa senyawa flavonoid memiliki puncak serapan khas pada rentang  $350-370\text{ nm}$ .



Gambar 4.14 Spektrum UV-Vis (a) HCl 1 M + Baja (b) Ekstrak daun ara sungsang 8 g/L (c) HCl 1 M + Baja + Ekstrak daun ara sungsang 8 g/L (d) HCl 1 M + Baja + Ekstrak daun ara sungsang 8 g/L + Kalium iodida 0,4 g/L

Gambar 4.14 (c) merupakan spektrum ekstrak daun ara sungsang dalam larutan korosif HCl dengan perendaman baja. Setelah dilakukan perendaman baja, puncak serapan bergeser ke arah panjang gelombang lebih pendek yaitu 349-350 nm disertai dengan peningkatan absorbansi hingga 6,419 A. Pergeseran ini merupakan hypsochromic shift dimana terjadinya pergeseran puncak serapan ke arah panjang gelombang yang lebih pendek, hal ini terjadi akibat interaksi senyawa dalam ekstrak daun ara sungsang dengan ion logam yang terlarut dari baja ( $Fe^{2+}/Fe^{3+}$ ) di medium HCl. Peningkatan absorbansi juga menandakan adanya pembentukan senyawa kompleks baru yang lebih kuat menyerap cahaya pada daerah UV. Gambar 9 (d) spektrum penyerapan ekstrak daun ara sungsang dengan baja dan kalium iodida dalam larutan korosif HCl, pada spektrum terlihat setelah penambahan dengan kalium iodida puncak serapan bergeser ke panjang gelombang yang lebih panjang yaitu 360-361 nm pergeseran ini dikenal dengan bathochromic shift disertai dengan penurunan absorbansi hingga 5,323 A, ini disebabkan oleh interaksi ion iodida ( $I^-$ ) dengan ion Fe terlarut maupun dengan senyawa aktif dalam ekstrak sehingga mendorong proses adsorpsi yang kompleks (Shahmoradi *et al.*, 2020).

#### 4.10 Analisis FE-SEM (*Field Emission Scanning Electron Microcopy*)



Gambar 4.15

Gambar 4.15 Hasil FE-SEM permukaan baja dengan skala 20  $\mu\text{m}$  (a) baja sebelum direndam (tanpa perlakuan) (b) baja setelah direndam dengan HCl 1 M (c) baja setelah direndam HCl 1 M + ekstrak daun ara sunghang 8 g/L (d) baja setelah direndam dengan HCl 1 M + ekstrak daun ara sunghang 8 g/L + kalium iodida 0,4 g/L

Pengujian FE-SEM dilakukan untuk mengamati morfologi permukaan baja lunak serta karakteristik lapisan pelindung yang terbentuk akibat adanya inhibitor. Analisis ini dipergunakan untuk memberikan informasi mengenai perubahan struktur mikro pada permukaan baja, sekaligus memberikan gambaran efektivitas lapisan pelindung dalam menghambat korosi.

Gambar 4.15 (a) menunjukkan morfologi permukaan baja tanpa perlakuan. Permukaan baja tampak masih relatif rata dengan adanya goresan halus akibat proses pengamplasan. Belum terlihat kerusakan yang signifikan pada permukaan baja karena baja belum berinteraksi dengan medium korosif HCl 1 M.

Gambar 4.15 (b) menunjukkan morfologi permukaan baja yang telah mengalami proses korosi, ditandai dengan adanya kerusakan berupa retakan serta

permukaan yang tidak rata akibat interaksi dengan medium HCl 1 M. Struktur yang keropos dan adanya retakan mengindikasikan bahwa baja yang direndam dalam medium HCl tanpa penambahan inhibitor mengalami serangan dari lingkungan yang agresif (Kartal *et al.*, 2025).

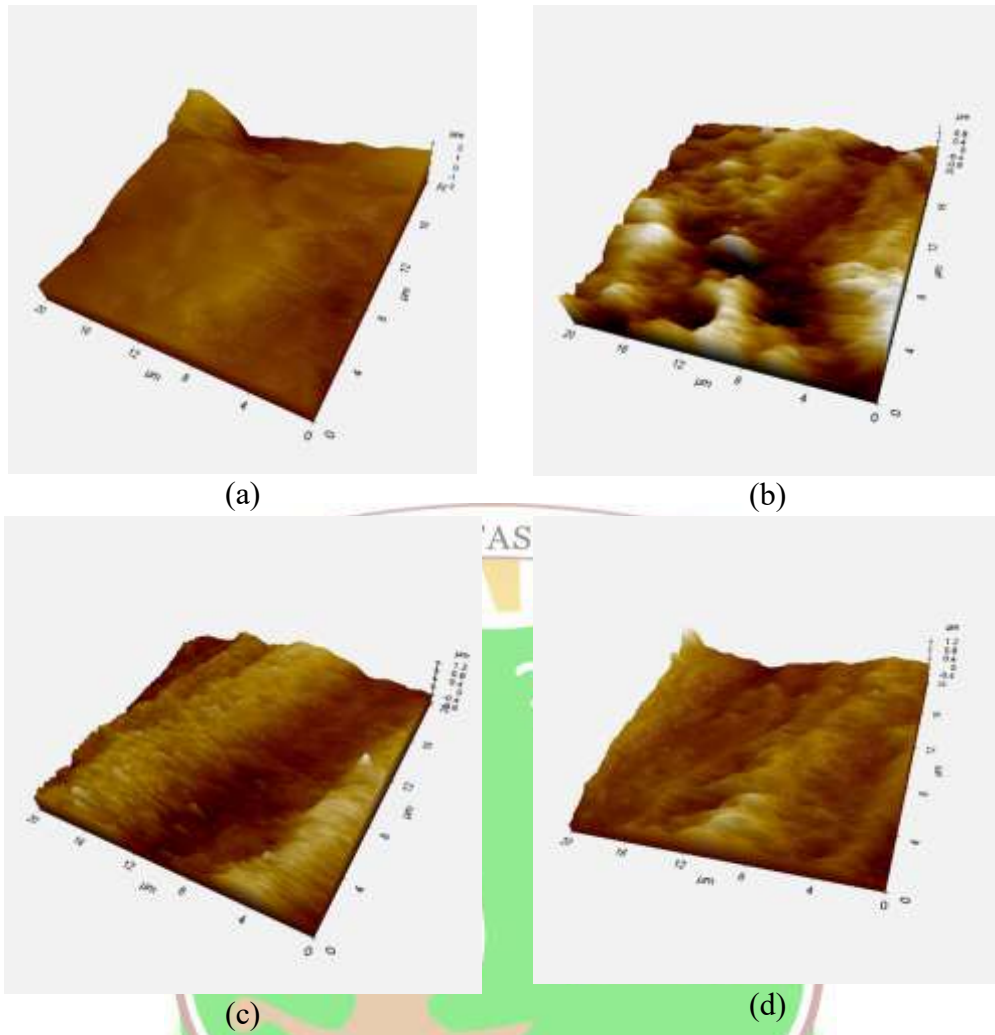
Gambar 4.15 (c) menunjukkan morfologi permukaan baja yang tampak lebih rata dengan retakan yang tertutupi akibat penambahan ekstrak daun ara sungsang 8 g/L. Hal ini menunjukkan bahwa molekul inhibitor yang teradsorpsi pada permukaan baja yang membentuk lapisan pelindung yang mampu menghambat interaksi langsung antara baja dengan medium korosif sehingga dapat mencegah terjadinya proses korosi (Döner *et al.*, 2025).

Gambar 4.15 (d) menunjukkan morfologi permukaan baja yang tampak lebih halus dan rata dibandingkan dengan baja yang hanya direndam dalam medium HCl 1 M dengan penambahan ekstrak 8 g/L. Permukaan baja menunjukkan kerusakan yang lebih sedikit akibat adanya penambahan kalium iodida 0,4 g/L. Hal ini disebabkan oleh adsorpsi ion iodida pada permukaan baja, sehingga kombinasi antara ekstrak dan kalium iodida menghasilkan efek sinergis yang lebih efektif dalam menurunkan laju korosi (Lgaz *et al.*, 2021).

#### 4.11 Analisis AFM (*Atomic Force Microscope*)

Analisis AFM merupakan analisa yang bertujuan untuk melihat perubahan permukaan baja baik dengan maupun tanpa penambahan inhibitor. AFM dapat menunjukkan tingkat kekasaran permukaan, ketinggian lapisan serta adanya lubang atau kerusakan akibat korosi (Emriadi, 2025).  $R_a$  merupakan nilai kekasaran rata-rata,  $R_q$  kekasaran kuadrat rata-rata dan  $R_{max}$  tinggi maksimum masing-masing sampel ditunjukkan pada tabel 4.13.

Pada baja tanpa perlakuan ditunjukkan pada gambar 4.16 (a) dimana memperlihatkan masih terdapat goresan halus dari proses pengamplasan serta beberapa tonjolan permukaan yang cukup menonjol, sehingga menghasilkan nilai  $R_a$  sebesar 0,281  $\mu\text{m}$ ,  $R_q$  sebesar 0,330  $\mu\text{m}$  dan nilai  $R_{max}$  2,279  $\mu\text{m}$ . Nilai ini menunjukkan walaupun permukaan baja relatif rata namun masih terdapat goresan halus yang berasal dari proses pengamplasan serta beberapa tonjolan permukaan yang cukup menonjol sehingga, menghasilkan nilai  $R_{max}$  yang cukup tinggi.



Gambar 4.16 Hasil AFM permukaan baja dengan skala  $20 \times 20 \mu\text{m}$  (a) baja sebelum direndam (tanpa perlakuan) (b) baja setelah direndam dengan HCl 1 M (c) baja setelah direndam HCl 1 M + ekstrak daun ara sungsang 8 g/L (d) baja setelah direndam dengan HCl 1 M + ekstrak daun ara sungsang 8 g/L + kalium iodida 0,4 g/L

Tabel 4.13 Nilai Parameter AFM ekstrak daun ara sungsang tanpa dan dengan penambahan kalium iodida pada permukaan baja lunak

Sampel	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_q$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_{\text{max}}$ ( $\mu\text{m}$ )
Baja	0,281	0,330	2,279
Baja + HCl	0,379	0,509	4,435
Baja + Ekstrak 8 g/L	0,233	0,303	2,276
Baja + Ekstrak 8 g/L + Kalium Iodida 0,4 g/L	0,192	0,245	2,183

Pada baja yang direndam dengan HCl 1 M, nilai  $R_a$  meningkat menjadi  $0,379 \mu\text{m}$ ,  $R_q$   $0,509 \mu\text{m}$  dan  $R_{\text{max}}$   $4,435 \mu\text{m}$ . Peningkatan ini menunjukkan

terjadinya proses korosi yang menimbulkan ketidakrataan pada permukaan baja berupa retakan, pitting (lubang) dan tonjolan kasar. Nilai  $R_{max}$  yang hampir dua kali lipat lebih tinggi dari baja tanpa perlakuan menunjukkan bahwa interaksi baja dengan medium asam menghasilkan kerusakan yang tinggi pada permukaan baja.

Pada baja yang direndam dengan HCl 1 M dengan penambahan ekstrak daun ara sungsgang 8 g/L menunjukkan nilai kekasaran yang menurun, dimana  $R_a$  0,233  $\mu\text{m}$ ,  $R_q$  0,303  $\mu\text{m}$  dan  $R_{max}$  2,276  $\mu\text{m}$ . Penurunan ini menunjukkan bahwa molekul inhibitor dari ekstrak daun ara sungsgang teradsorpsi pada permukaan baja, membentuk lapisan pelindung yang mampu mengurangi laju korosi (Du *et al.*, 2025).

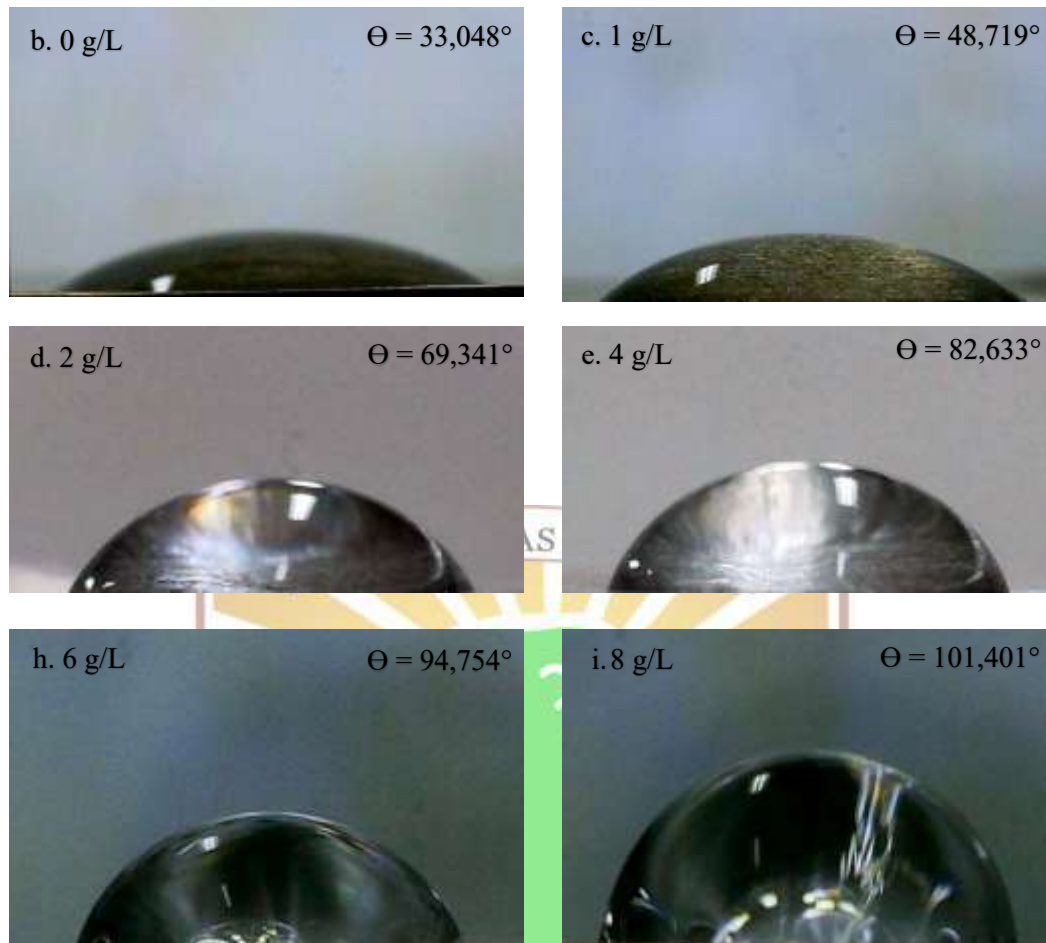
Efek perlindungan yang lebih optimal diperoleh dengan penambahan ekstrak daun ara sungsgang 8 g/L yang dikombinasikan dengan kalium iodida 0,4 g/L yang menghasilkan nilai  $R_a$  0,192  $\mu\text{m}$ ,  $R_q$  0,245  $\mu\text{m}$  dan  $R_{max}$  2,183  $\mu\text{m}$ . Nilai ini menunjukkan terbentuknya lapisan pelindung yang lebih rapat dan stabil. Penurunan kekasaran yang cukup tinggi karena adanya mekanisme koadsorpsi ion iodida ( $I^-$ ) yang meningkatkan densitas adsorpsi molekul inhibitor pada permukaan baja sehingga memberikan efek sinergis dalam memperlambat laju korosi yang ditandai dengan permukaan yang lebih rata dan halus (Zeng *et al.*, 2025).

#### 4.12 Pengukuran Sudut Kontak

a. Baja tanpa perlakuan

$$\Theta = 69,844^\circ$$

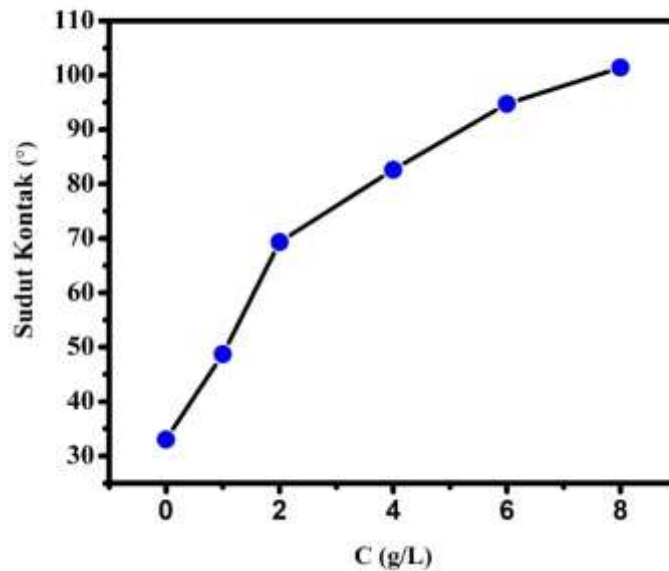




Gambar 4.17 Sudut kontak perendaman baja dengan dan tanpa berbagai konsentrasi inhibitor

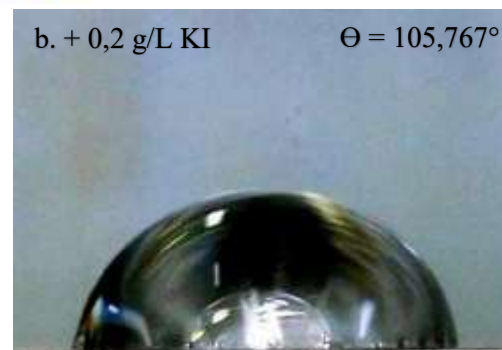
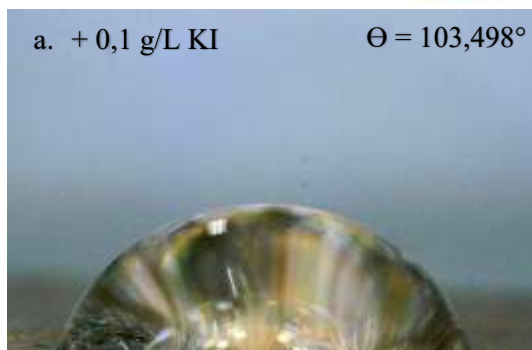
Hasil pengukuran sudut kontak menunjukkan adanya perubahan yang signifikan terhadap sifat keterbasahan permukaan baja akibat penambahan ekstrak daun ara sungsgang pada berbagai variasi konsentrasi. Baja tanpa perlakuan memiliki sudut kontak sebesar  $69,844^\circ$  yang menunjukkan sifat semi hidrofilik dimana, permukaan baja masih relatif mudah dibasahi oleh air atau lebih disukai air. Pada konsentrasi 0 g/L atau baja yang direndam dengan medium korosif HCl 1 M memiliki nilai sudut kontak  $33,048^\circ$  nilai ini menurun drastis dibandingkan dengan baja tanpa perlakuan, hal ini menandakan bahwa permukaan menjadi sangat hidrofilik. Pada konsentrasi 2 g/L sudut kontak mencapai  $69,841^\circ$  yang hampir identik dengan baja tanpa perlakuan. Nilai ini dapat dianggap sebagai nilai transisi, dimana permukaan baja beralih dari sifat hidrofilik menuju semi hidrofobik. Selanjutnya, pada konsentrasi 4 g/L nilai sudut kontak meningkat menjadi  $82,633^\circ$  yang menandakan permukaan telah lebih hidrofobik dibandingkan baja tanpa

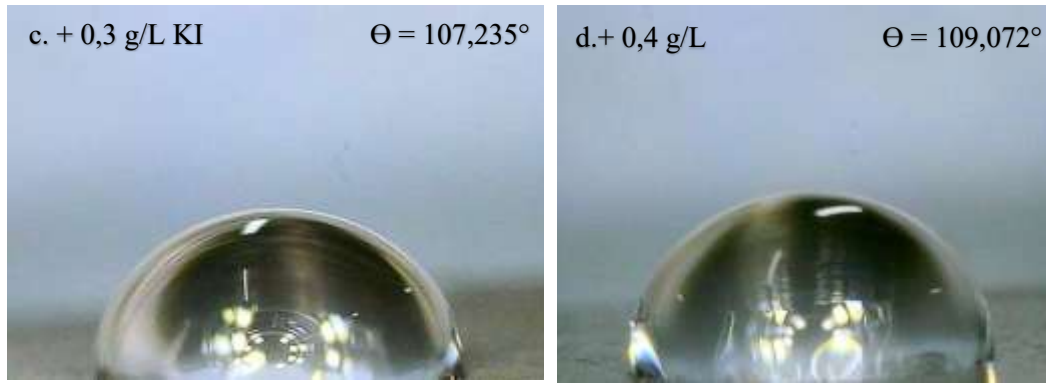
perlakuan. Kemudian, terus terjadi peningkatan sudut kontak pada konsentrasi 6 g/L dan 8 g/L yang menunjukkan bahwa permukaan baja telah mengalami sifat hidrofobik akibat lapisan ekstrak yang semakin terbentuk dan merata.



Gambar 4.18 Grafik sudut kontak pada berbagai konsentrasi inhibitor ekstrak daun ara sungsang

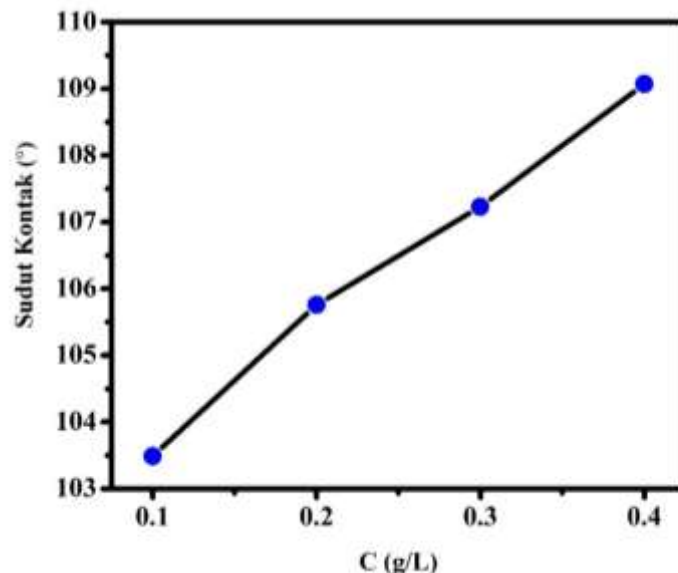
Gambar 4.18 menunjukkan kenaikan sudut kontak berlangsung relatif lebih cepat pada konsentrasi rendah hingga konsentrasi 4 g/L, sementara pada konsentrasi tinggi 6 g/L dan 8 g/L grafik mulai melandai. Fenomena ini menunjukkan adanya efek saturasi dimana penambahan ekstrak tidak lagi menghasilkan peningkatan sudut kontak yang signifikan karena permukaan baja sudah tertutupi secara optimal oleh senyawa aktif dalam ekstrak daun ara sungsang.





Gambar 4.19 Sudut kontak perendaman baja dengan dan tanpa berbagai konsentrasi inhibitor ekstrak daun ara sungsang dan kalium iodida

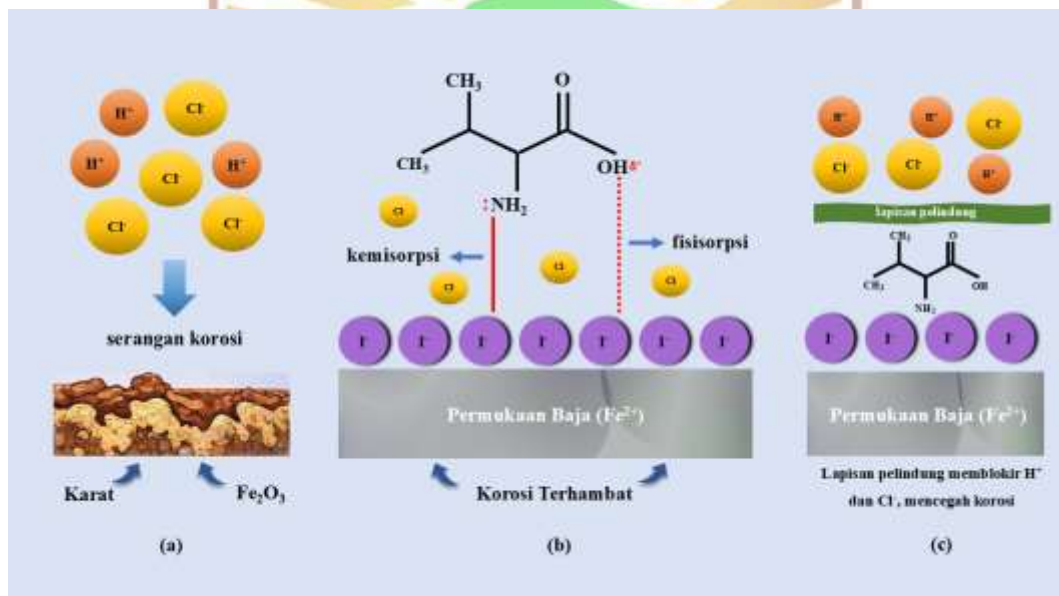
Hasil pengukuran sudut kontak pada baja dengan penambahan kalium iodida. Terlihat gambar 4.19 tetesan air tampak semakin membulat seiring dengan kenaikan konsentrasi KI 0,1 g/L hingga 0,4 g/L. Pada konsentrasi 0,1 g/L sudut kontak sebesar 103,498 yang menunjukkan kondisi hidrofobik karena sudut diatas nilai 90 yang menandakan air sulit membasahi permukaan. Selanjutnya, nilai sudut kontak meningkat hingga bernilai 109,072 pada konsentrasi 0,4 g/L. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi KI maka semakin besar pula sudut montak yang terbentuk sehingga sifat hidrofobik permukaan semakin dominan (Wan *et al.*, 2022).



Gambar 4.20 Gafik sudut kontak pada berbagai konsentrasi inhibitor ekstrak daun ara sungsang dengan penambahan kalium iodida

Gambar 4.20 menunjukkan kenaikan sudut kontak hampir linear dengan bertambahnya konsentrasi kalium iodida, kenaikan yang stabil ini menunjukkan bahwa kalium iodida berperan aktif dalam meningkatkan pembentukan lapisan pelindung pada permukaan baja. Hal ini dipengaruhi oleh kemampuan ion iodida ( $I^-$ ) untuk beradsorpsi pada permukaan baja sehingga memperkuat interaksi antara molekul inhibitor organik dengan Fe. Adsorpsi ini menghasilkan lapisan tipis yang stabil dan membentuk permukaan baja yang semula bersifat cenderung semi-hidrofobik berubah menjadi hidrofobik yang berdampak terhadap ketahanan baja dari medium korosif. Hal ini membuktikan bahwa iodida dapat berperan sebagai agen sinergis yang memperkuat kinerja ekstrak dalam melindungi permukaan baja.

#### 4.13 Mekanisme Inhibitor



Gambar 4.21 Mekanisme (a). Serangan korosi (b). Adsorpsi inhibitor organik (c). Adsorpsi inhibitor organik dengan penambahan KI pada permukaan baja

Gambar 4.21 menunjukkan mekanisme inhibisi korosi baja dalam medium HCl yang dikendalikan oleh proses adsorpsi inhibitor organik pada permukaan baja. Dalam medium asam, permukaan baja cenderung bermuatan positif, sehingga adsorpsi inhibitor organik yang terprotonasi menjadi terbatas akibat adanya kompetisi dengan ion klorida ( $Cl^-$ ) yang bersifat agresif. Ion  $Cl^-$  dengan jari jari ion relatif lebih kecil ( $\pm 1,81 \text{ \AA}$ ) yang mampu menembus permukaan baja sehingga mempercepat pelarutan besi serta mengganggu pembentukan lapisan adsorpsi inhibitor (Chen & Lu, 2023).

Penambahan kalium iodida (KI) mampu meningkatkan proses adsorpsi inhibitor melalui mekanisme kompetisi ionik antara  $\text{Cl}^-$  dan  $\text{I}^-$ . Ion iodida memiliki jari – jari ion ( $\pm 2,20 \text{ \AA}$ ) yang lebih besar dibandingkan  $\text{Cl}^-$ , sehingga kecenderungan untuk teradsorpsi pada permukaan baja menjadi lebih kuat. Adsorpsi  $\text{I}^-$  pada permukaan baja membentuk lapisan pelindung bermuatan negatif yang dapat menekan sifat agresif  $\text{Cl}^-$  sekaligus memfasilitasi adsorpsi inhibitor organik melalui interaksi elektrostatis dan pembentukan ikatan koordinasi. Dengan demikian, inhibitor organik dapat teradsorpsi secara lebih stabil dan membentuk lapisan pelindung yang efektif dalam menghambat reaksi anodik serta katodik, sehingga laju korosi baja dalam lingkungan HCl dapat diperlambat (Liu *et al.*, 2025).

