

[]arabxetex

مذكرة ماستر

علوم المادة
فيزياء
فيزياء طاقوية والطاقات المتجددة

اعداد الطالبة:

حيدر رانيا

يوم : 03/06/2025

تثبيت تأكل فولاذ (C45) في حمض هيدروكلوريك بواسطة مستخلص مائي
لاوراق التين الاخضر

لجنة المناقشة :

رئيسا	جامعة بسكرة	MCB	بن شعبان غنية
مؤطرا	جامعة بسكرة	MCA	نواحي مليكة
ممتحنا	جامعة بسكرة	MCA	مريم سعيدة

السنة الجامعية : 2025/2024

الإهداء

بسم الله الرحمن الرحيم

"يرفع الله الذين آمنوا منكم والذين اوتوا العلم درجات والله بما تعملون خبير "

صدق الله العظيم.

الحمد لله .

حبا وشكرا وامتنانا على البدء و الختام

ه انا اليوم اتوج لحظات الأخيرة في ذلك الطريق الذي كان يحمل في باطنه العثرات ورغما عنها ظلت
قدي تخطو بكل صبر و طموح وعزيمة وتفاؤل وحسن ظن بالله .

اهدي بكل حب تخرجي

إلى نفسي العظيمة القوية

التي تحملت كل العثرات رغم الصعوبات .

إلى ذلك الرجل العظيم إلى من كان لي العمود الفقري الذي ساندني بكل حب في ضعفي،

الذي اخرج أجمل ما في داخلي وشجعني دائما للوصول إلى طموحاتي إلى من انتظر هذه اللحظات

ليفتخر بي إلى قدوتي مسندي الضوء الذي ينير حياتي إلى

والدي العزيز

ادامك الله ظلا لنا

إلى التي تعجز كل الكلمات عن وصفها إلى التي كانت النور في عمتي إلى التي كان دعاؤها سر نجاحي

إلى المضحيا من أجلي ورافقتني في كل أوقاتي إلى التي تتعب بدون مقابل لإتمام مسيرتي الدراسية إلى

سيدتي العظيمة .

امي الحبيبة .

متعها الله بالصحة والعافية

إلى اخوتي واخواتي

أدامكم الله ضلعا ثابتا لي سندي والكتف الذي استند عليه

إلى زملائي

الذين شاركوني مقاعد الدراسة إلى كل من وقعت عليه عيني من اهل الخير إلى كل من ساندني في

إنجاز هذا العمل

اساتذتنا الكرام

إلى كل من كان له الفضل في وصولي إلى هذه المرحلة اهدي لهم تخرجي .

من جامعة محمد خيضر كلية العلوم الدقيقة

فرع فيزياء طاقوية والطاقات المتجددة

قسم علوم المادة

وذلك بمشيئة الله تعالى

يوم 2025.06.03

علي الساعة 10:30 صباحا

أهدي هذه المذكرة العلمية

التي تمثل جهوداً مضيئة ودراسات معمقة في مجال الفيزياء.

حيث تجسد هذه المذكرة تفانياً وتفريغاً وعملاً دؤوباً،

وتعبر عن تقديري العميق لكل ما قدمته من دعم وتشجيع.

شكر و عرفان

أنتقدم بخالص الشكر والتقدير إلى المؤطرة الكريمة، على جهودها الجبارة وتفانيها في متابعتي وإرشادي لإتمام مذكرتي العلمية والتي ساهمت بشكل كبير في إثراء وتحسين هذا العمل البحثي. أتقدم باحر الشكر والتقدير للأستاذة الفاضلة مفتاح آفاق التي كانت لي خير عون وسند في إنجاز مذكرتي فقد كان لدعمها وتوجيهها الأثر الكبير في تجاوز التحديات وتحقيق هذا الإنجاز. فشكراً من القلب لكرم عطائها وحسن إرشادها.

ولا انسي ان اعبر عن خالص امتناني و تقديري للطالبة الدكتورة عبدلي ليندة على وقوفها بجاني و دعمها لي بكل ماتحتاجه مذكرة تخرجي . لم تبخل علي بنصح و التوجيه فكان لعطائها اثر كبير في نجاح هذا العمل , شكرا من القلب و اتمنى لك المزيد من النجاح و التوفيق في حياتك الاكاديمية و المهنية.

ولأعضاء اللجنة الموقرين، أتمنى أن أكون قد وفقت في تقديم محتوى يليق بتطلعاتهم، وأن يحظى عملي بتقديرهم واستحسانهم.

كما لا يسعني إلا أن أعبر عن امتناني العميق لكل من ساندي و كل من قدم لي الدعم والتشجيع خلال هذه الرحلة العلمية.

الملخص

هذه الدراسة تهدف إلى تحليل فعالية مستخلص مائي طبيعي من أوراق التين الاخضر لتثبيط تآكل الفولاذ C45 في وسط حمضي يحتوي على 1 مول من حمض الهيدروكلوريك (HCl). تم تنفيذ الدراسة باستعمال تقنية الكتلة الضائعة، إلى جانب تحليل سطح الفولاذ باستخدام الفحص المجهرى الإلكتروني (MEB).

من خلال هذه الدراسة تم تقييم مختلف العوامل التي تؤثر على تآكل الفولاذ و المتمثلة في تركيز المثبط , درجة الحرارة و زمن الغمر على كلا من معدل التآكل و الكفاءة تثبيطية للمثبط الاخضر. فمن بين النتائج المستخلصة في هذه الدراسة نجد:

- زيادة في الكفاءة تثبيطية مع زيادة تركيزه، المثبط لتصل إلى (90.98%) تركيز $0.5g/l$.
- كما تزداد الفعالية مع ارتفاع درجة الحرارة، مسجلة (92.60%) عند $318K$.
- تناقص في الكفاءة تثبيطية مع مرور زمن الغمر حيث تتدنى الى (60.00%) وذلك بعد 192 ساعة.
- أظهرت التحاليل الديناميكية الحرارية أن عملية امتزاز جزيئات المثبط على سطح الفولاذ تتمثل في امتزاز فيزيائي ويتبع نموذج *Langmuir*

الكلمات المفتاحية : التآكل، المثبطات، مستخلص مائي لأوراق التين الاخضر، تقنية الكتلة الضائعة، الامتزاز.

ABSTRACT

This study aims to analyze the effectiveness of a natural aqueous extract from green fig leaves in inhibiting the corrosion of C45 steel in an acidic medium containing 1 mole of hydrochloride acid (*HCl*).

The study was conducted using the weight loss technique, alongside surface analysis of the steel using scanning electron microscopy (*SEM*).

Various factors affecting the corrosion of steel were evaluated, including inhibitor concentration, temperature, and immersion time, with respect to both corrosion rate and inhibitory efficiency of the green inhibitor.

Some of the key findings from this study include:

- An increase in inhibitory efficiency with higher inhibitor concentration, reaching (90.98%) at a concentration of 0.5 g/l
- The effectiveness also improves with rising temperature, achieving (92.60%) at 318 K.
- A decrease in inhibitory efficiency over time, dropping to (60.00%) after 192 hours of immersion.
- Thermodynamic analysis showed that the adsorption of inhibitor molecules onto the steel surface occurs through physical adsorption and follows the Langmuir model.

Keywords : Corrosion, inhibitors, aqueous extract of green fig leaves, weight loss technique, adsorption.

المحتويات

الإهداء

I شكر و عرفان

I الملخص

IV قائمة الاشكال

VI قائمة الجداول

1 المقدمة العامة

4 1 عموميات حول التآكل

4 1.1 تعريف التآكل

4 1.1.1 مقدمة

4 2.1.1 تعريف التآكل

5 3.1.1 اهمية دراسة التآكل

7 2.1 انواع التآكل

7 1.2.1 التآكل الكيميائي

7 2.2.1 التآكل البيوكيميائي (التآكل البكتيري)

7 3.2.1 التآكل الكهروكيميائي (الرطب)

8 3.1 اشكال التآكل

8 1.3.1 التآكل العام

9 2.3.1 التآكل الاجهادي (SCC)

11 3.3.1 التآكل الموضعي

11 4.3.1 التآكل النقطي

13	التآكل بين الحبيبات (IGA)	5.3.1
14	التآكل الجلفاني (أو التآكل الثنائي المعدني)	6.3.1
15	تآكل خط الماء	7.3.1
16	آلية التآكل	8.3.1
18	مثبطات التآكل	4.1
18	التعريف لمثبطات التآكل	1.4.1
19	تصنيف لمثبطات التآكل	2.4.1
19	الطبيعة الكيميائية	5.1
19	المثبطات العضوية	1.5.1
20	المثبطات غير العضوية	2.5.1
21	آلية التأثير الكهروكيميائي	3.5.1
21	المثبطات الأنودية للتآكل	4.5.1
21	المثبطات الكاثودية	5.5.1
22	المثبطات المختلطة للتآكل	6.5.1
22	آليات عمل المثبطات عند السطح	6.1
22	الامتزاز على سطح المعدن	7.1
23	الامتزاز الفيزيائي (الإلكتروستاتيكي)	1.7.1
23	الامتزاز الكيميائي	2.7.1
24	تكوين طبقة واقية لحماية المعدن	3.7.1
24	طرق الحماية من التآكل	8.1
25	المثبطات الخضراء للتآكل	9.1
25	تصنيف المثبطات الخضراء للتآكل	1.9.1
26	آلية تثبيط التآكل	2.9.1
26	تأثير التركيز على فعالية المثبط	10.1
26	نموذج لانجموير (<i>Langmuir isotherm</i>)	1.10.1
27	نموذج تيمكين (<i>Temkin isotherm</i>)	2.10.1
28	نموذج فروندليش (<i>Freundlich isotherm</i>)	3.10.1
28	إيزوثرم فرومكين (<i>Frumkin isotherm</i>)	4.10.1
28	إيزوثرم فلوري-هوجينز (<i>FloryHuggins isotherm</i>)	5.10.1
29	إيزوثرم العلوي (<i>El – Alwady isotherm</i>)	6.10.1
29	آليات الامتزاز لمثبطات التآكل	11.1

30	12.1 الخصائص الفيزيائية والكيميائية لأوراق التين الأخضر ودورها في تثبيط التآكل . .
31	1.12.1 التركيب الكيميائي
32	13.1 خلاصة الفصل
33	2 الدراسة التطبيقية للفعالية التثبيطية
33	1.2 مقدمة الفصل الثاني
33	2.2 تعريف الفولاذ
34	1.2.2 استخدامات الفولاذ الكربوني
34	3.2 الاجهزة المستعملة
35	4.2 المواد المستخدمة
35	5.2 تحضير العينات
35	1.5.2 العينات المدروسة
35	2.5.2 قطع العينات
35	3.5.2 الصقل الميكانيكي
36	6.2 تحضير المحاليل
36	1.6.2 تحضير الوسط الآكل (محلول حمض الهيدروكلوريك HCl)
36	2.6.2 تحضير المحلول الام (المثبط)
37	7.2 تقنيات دراسة معدل التآكل
38	1.7.2 تقنية الكتلة الضائعة
39	2.7.2 مبدأ عمل تقنية الكتلة الضائعة
39	8.2 طرق التوصيف
39	1.8.2 المجهر الإلكتروني الماسح (MEB)
40	2.8.2 المكونات الرئيسية للمجهر الإلكتروني الماسح (MEB)
41	9.2 ملخص الفصل
42	3 مناقشة و تفسير النتائج
42	1.3 مقدمة
42	2.3 دراسة قياسات الكتلة الضائعة
42	1.2.3 تأثير التركيز
45	2.2.3 تأثير درجة الحرارة
48	3.2.3 تأثير زمن الغمر
51	4.2.3 تحديد طاقات التنشيط

52	الدراسة التجريبية	5.2.3
58	أنواع متساوي الإمتزاز	6.2.3
59	إيزوثرم فرومكين (<i>Frumkin isotherm</i>)	7.2.3
59	نموذج فروندليش (<i>Freundlich isotherm</i>)	8.2.3
60	إيزوثرم فلوري-هوجينز (<i>FloryHuggins isotherm</i>)	9.2.3
61	نموذج تيمكين (<i>Temkin isotherm</i>)	10.2.3
62	يزوثرم العلوي (<i>El – Alwady isotherm</i>)	11.2.3
63	نموذج لانجموير (<i>Langmuir isotherm</i>)	12.2.3
67	طاقة جيبس للامتزاز <i>Gibbs</i>	13.2.3
67	الدراسة البنيوية	3.3
67	نتائج الماسح المجهر الإلكتروني (<i>MEB</i>)	1.3.3
72	ملخص الفصل	4.3

73 الخلاصة العامة

المصادر

قائمة الأشكال

5	العوامل المؤثرة على التآكل	1.1
9	التآكل العام	2.1
10	التآكل الاحهادي	3.1
11	التآكل الموضعي	4.1
12	التآكل النقطي	5.1
14	التآكل بين الحبيبات	6.1
15	التآكل الجلفاني	7.1
16	لتآكل الجلفاني	8.1
36	جهاز الصقل الميكانيكي	1.2
37	أهم الخطوات المتبعة في تحضير المستخلص المائي لأوراق التين الاخضر	2.2
40	المجهر الإلكتروني الماسح (MEB)	3.2
43	تغير سرعة التآكل بدلالة تركيز المثبط	1.3
44	تغير الكفاءة تثبيطية بدلالة تركيز المثبط	2.3
46	تغير السرعة بدلالة درجة الحرارة في وجود وغياب المثبط	3.3
47	تغير الكفاءة تثبيطية بدلالة درجة الحرارة	4.3
49	تغير معدل التآكل بدلالة زمن الغمر	5.3
50	تغير الكفاءة تثبيطية بدلالة زمن الغمر	6.3
54	تباين مستوي التآكل اللوغارتمي بدلالة مقلوب درجة الحرارة	7.3
56	قيم $\log(T/W_{corr})$ للمعدن بدلالة مقلوب درجة الحرارة	8.3
59	متساوي امتصاص مستخلص لأوراق التين الاخضر وفقا لنموذج <i>Fumki</i>	9.3
60	تساوي امتصاص مستخلص لأوراق التين الاخضر وفقا لنموذج <i>Freundlich</i>	10.3
61	متساوي امتصاص مستخلص لأوراق التين الاخضر وفقا لنموذج <i>FloryHuggins</i>	11.3

62	12.3	متساوي امتصاص مستخلص لأوراق التين الاخضر وفقا لنموذج . . <i>Temkin</i> .
	13.3	متساوي امتصاص مستخلص لأوراق التين الاخضر وفقا لنموذج . <i>El-Alwado</i>
63		
64	14.3	متساوي امتصاص مستخلص لأوراق التين الاخضر وفقا لنموذج . <i>Langmuir</i> .
68	15.3	(ا) مآخوذة بواسطة المجهر الإلكتروني للعينة الشاهدة
69	16.3	الاطياف المنتجة (EDX) بعد 24 ساعة من الغمر في 1M HCl
	17.3	(ب) صورة مجهرية لسطح الفولاذ بعد 24 ساعة من 1M HCl غمر في غياب المثبط
70		
70	18.3	الاطياف المنتجة (EDX) بعد 24 ساعة من الغمر في 1M HCl
	19.3	صورة (ج) مجهرية لسطح الفولاذ بعد 24 ساعة من 1M HCl غمر في وجود المثبط
71		
71	20.3	الاطياف المنتجة (EDX) بعد 24 ساعة من الغمر في 1M HCl

قائمة الجداول

35	1.2	النسب المئوية للعناصر المكونة للفولاذ C45 المستعمل
	1.3	تغيرات معدل التآكل والكفاءة تثبيطية لفولاذ (C45) في (1M) من (HCl) بدلالة تركيز المثبط
42	2.3	تغيرات سرعة التآكل والكفاءة تثبيطية بدلالة درجة الحرارة في غياب المثبط
45	3.3	تغيرات سرعة التآكل والكفاءة تثبيطية بدلالة درجة الحرارة في وجود المثبط
45	4.3	تغيرات سرعة التآكل والكفاءة تثبيطية بدلالة درجة الحرارة في وجود المثبط
48	5.3	مستوى التآكل اللوغاريتمي (في وجود المثبط وغيابه) ودرجة الحرارة المقلوبة بدلالة التركيز.
53	6.3	يوضح قيم $(Log W_{corr} / T)$ لمعدن الفولاذ C45 بدلالة مقلوب درجة الحرارة في غياب و وجود المثبط
55	7.3	مستوى التآكل اللوغاريتمي (في وجود المثبط وغيابه) ومقلوب درجة الحرارة المقابلة لتركيز.
57	8.3	تغيرات تغطية السطح θ بدلالة تركيز المثبط $C(g/l)$
58	9.3	يوضح قيم معامل الارتباط (الميل) لجميع معادلات متساوي الحرارة.
65	10.3	مستوى التآكل اللوغاريتمي (في وجود المثبط وغيابه) ودرجة الحرارة المقلوبة المقابلة لتركيز.
67		

قائمة الرموز

W_{corr}	معدل (سرعة) التآكل
W_{corr0}	معدل التآكل في غياب المثبط
W_{inh}	معدل التآكل في وجود المثبط
N_s	مساحة السطح المغمور
$W(i)$	وزن العينة قبل الغمر
$W(f)$	وزن العينة بعد الغمر
ΔW	التغير في الكتلة
E	كفاءة التثبيط
T	درجة الحرارة المطلقة
R	ثابت العام للغازات
h	ثابت بلانك
W_{corr}	معامل الامتزاز عند التوازن
θ	تغطية السطح
C_{inh}	تركيز المثبط
N_A	عدد افوغادرو
E_a	طاقة التنشيط
ΔG_{ads}^0	الطاقة الحرة (طاقة جيبس)
ΔH_{ads}^0	انتالبي التنشيط
ΔS_{ads}^0	انتروبي التنشيط

المقدمة العامة

الفولاذ هو أحد المعادن الأكثر شيوعًا واستخدامًا في الصناعات المختلفة، نظرًا لخصائصه الميكانيكية الجيدة. فهو يتميز بالمتانة العالية، ومقاومة التآكل، كما أنه متوفر بكثرة وبأسعار مناسبة. يُستخدم الفولاذ على نطاق واسع في العديد من التطبيقات، مثل أنابيب النفط والبترو، معدات البناء، المصانع والجسور، السفن ووسائل النقل البري وغيرها. ورغم مزاياه العديدة، فإنه قد يكون عرضة للتآكل بسهولة في بعض الظروف، مما يستدعي اتخاذ تدابير وقائية مثل الطلاء أو المعالجة السطحية [1]. تآكل المعادن هو مشكلة طبيعية ذات تأثير واسع، حيث يؤدي إلى تدهور المعدن أو فقدان خصائصه نتيجة التفاعل الكيميائي أو الكهروكيميائي مع البيئة المحيطة به. هذه الظاهرة تشكل تحديًا كبيرًا في العديد من الصناعات، نظرًا لما تسببه من خسائر مادية جسيمة بسبب الحاجة إلى استبدال الهياكل المعدنية المتضررة وصيانتها، بالإضافة إلى تأثيرها السلبي على السلامة، مما قد يؤدي إلى خسائر بشرية في بعض الحالات. ولهذا السبب، تُبذل جهود كبيرة للحد من التآكل عبر استخدام التقنيات الحديثة مثل المثبطات، الطلاءات الواقية، العزل، وتقنيات الحماية الكهروكيميائية للحفاظ على جودة المعادن وإطالة عمرها التشغيلي [2].

المحاليل الحمضية التي تعتمد على حمض الهيدروكلوريك تُستخدم على نطاق واسع في العديد من العمليات الصناعية، مثل التخليل، التنظيف الكيميائي، وإزالة الترسبات. هذه العمليات تُساعد في إزالة الشوائب والطبقات غير المرغوبة من الأسطح المعدنية، مما يحسن من جودتها ويهيئها لمراحل تصنيع أخرى. ومع ذلك، فإن هذه المحاليل تُعتبر شديدة العدوانية تجاه المعادن، حيث تؤدي إلى انحلال كبير فيها، مما يجعل من الضروري استخدام موانع التآكل أو تقنيات الحماية المناسبة للحد من تأثيرها السلبي على المواد المعدنية [2].

هناك العديد من الطرق المستخدمة لحماية المعادن من التآكل، ومن أبرزها الحماية الكاثودية، التي تعتمد على تطبيق تيار كهربائي لحماية المعدن، والحماية بالتغطية من خلال طلاء المعدن بطبقة واقية. كذلك، يتم اختيار المعادن المقاومة للتآكل عند التصميم، بالإضافة إلى استخدام محاليل مضادة للصدأ. ومن بين هذه الأساليب، تُعد مثبطات التآكل من أكثر الطرق استخدامًا، حيث تعمل على تقليل سرعة التفاعل الكيميائي بين المعدن والوسط المحيط به [3, 4].

يتم تعريف هذه الطريقة وفقًا للرابطة الوطنية لمهندسي التآكل (NACE) بأنها مادة كيميائية تُضاف بتركيزات صغيرة إلى الوسط العدواني، بهدف تقليل أو منع عملية التآكل. هذه المثبطات تعمل على تشكيل طبقة واقية على سطح المعدن أو تغيير التفاعلات الكيميائية التي تسبب التآكل، مما يساهم في الحفاظ على المعدن لفترة أطول [5].

خلال العقد الماضي، نالت المثبطات العضوية اهتمامًا واسعًا في مجال مكافحة التآكل، حيث تم التركيز على تطوير مركبات أكثر كفاءة وأقل تأثيرًا على البيئة. تمتاز هذه المثبطات بقدرتها على تشكيل طبقات واقية على سطح المعدن، مما يقلل من تأثير العوامل الخارجية التي تسبب التآكل. كما أن الأبحاث الحديثة تسعى إلى تحسين تركيباتها لجعلها أكثر استدامة وفعالية في التطبيقات الصناعية المختلفة [6]. حيث تحظى المثبطات العضوية باهتمام كبير، وذلك لأنها تتميز بأنها صديقة للبيئة، غير سامة، وأقل تكلفة نسبيًا مقارنة بالمثبطات غير العضوية. هذه الخصائص تجعلها خيارًا واعدًا في مجال مكافحة التآكل، حيث يتم استخدامها في العديد من التطبيقات الصناعية دون الإضرار بالبيئة أو الصحة البشرية. كما أن التطورات الحديثة تسعى إلى تحسين فعاليتها وجعلها أكثر استدامة [7].

يلاضافة الى انها تُعرف المثبطات الصديقة للبيئة، أو المثبطات الخضراء، بفعاليتها في الحد من التآكل، وذلك بفضل توفرها في الطبيعة، وعدم سميتها، وانخفاض تكلفتها. كما أنها تمتلك قدرة عالية على التحلل البيولوجي، مما يجعلها خيارًا مستدامًا وصديقًا للبيئة. تعود فعاليتها العالية إلى احتوائها على مركبات تتألف من جزيئات غير متجانسة، تتضمن روابط π ، بالإضافة إلى ذرات الأكسجين (O) النيتروجين (N)، والكبريت (S). ويُعتقد أن هذه الجزيئات تلعب دورًا مهمًا في تعزيز امتصاص المثبطات على سطح المعدن، مما يؤدي إلى انخفاض معدل التآكل عن طريق تكوين طبقة واقية كثيفة على سطح المعدن [8--13].

يركز بحثنا الحالي على تحضير مركبات عضوية باستخدام مستخلص مائي من اوراق التين الاخضر ، وذلك لدراسة قدرتها على تثبيط تآكل الفولاذ C45 في وسط حمضي يحتوي على 1M HCl يتم إجراء هذه الدراسة باستخدام تقنية الكتلة الضائعة، بهدف تقييم فعالية هذه المركبات في تقليل تأثير العوامل المسببة للتآكل وتحسين مقاومة المعدن. هذا العمل مقسّم إلى ثلاثة فصول رئيسية:

- الفصل الأول: يتناول الجانب النظري، حيث يتم تقديم لمحة عامة عن ظاهرة التآكل وطرق الحماية منه باستخدام المثبطات.
- الفصل الثاني: يشرح طريقة تحضير المحلول المستخدم في الدراسة، كما يسلط الضوء على بعض الأجهزة و المواد المستعملة في قياس الفعالية التثبيطية.
- الفصل الثالث: يركز على تحليل ومناقشة النتائج المتحصل عليها من تقنية الكتلة الضائعة، مع دراسة تأثير تغير التركيز، زمن الغمر ودرجة الحرارة. كما يشمل تحليل الفحص المجهرى

بالماسح الإلكتروني (*MEB*)

وأخيرًا، ينتهي البحث بخاتمة عامة تلخص أهم النتائج المستخلصة.

الفصل 1

عموميات حول التآكل

1.1 تعريف التآكل

1.1.1 مقدمة

التآكل هو تدهور المعدن نتيجة تفاعله مع البيئة المحيطة به. بالنسبة للمعادن، يمكن أن يؤدي التآكل إلى خسائر اقتصادية كبيرة ويزيد من مخاطر الحوادث. يُعد الفولاذ وغيره من المواد المعدنية عناصر أساسية في بناء العديد من المنشآت، لكنها تكون معرضة بشدة للتآكل، خاصةً عند تعرضها للمناخات الرطبة، أو غمرها في المياه العذبة أو المالحة، أو حتى دفنها في التربة. مع العلم بأن التكاليف الناتجة عن التآكل كبيرة جداً، لكن يمكن الحد منها من خلال تنفيذ استراتيجيات مثل استخدام المثبطات والطلاءات الواقية، واختيار المواد المناسبة، والتحكم في البيئة للحد من عملية التآكل وتعزيز متانة الهياكل [14, 15].

فتآكل يعتبر تحدياً مستمر في العديد من الصناعات، مما يجعل من الضروري معالجته منذ مراحل التخطيط الأولى للمشروع إلى غاية اكتماله. لضمان بقاء الهيكل أو الاجسام سليمة مع تقليل التكاليف إلى الحد الأدنى.

ويتم ذلك من خلال دمج استراتيجيات الوقاية من التآكل في وقت مبكر، مثل اختيار المواد المناسبة، وتطبيق الطلاءات الواقية، وتنفيذ إجراءات الصيانة، يمكن للمصانع إطالة عمر ممتلكاتها بشكل كبير وتقليل النفقات طويلة الأجل [16].

2.1.1 تعريف التآكل

المعيار الدولي ISO 8044 يعرف التآكل بأنه تفاعل فيزيائي-كيميائي بين المعدن والبيئة المحيطة به. يؤدي هذا التفاعل إلى تغييرات في خصائص المعدن، مما قد يتسبب في تدهور وظيفته. لا يؤثر التآكل

على المعدن فحسب، بل يمكن أن يؤثر أيضًا على البيئة المحيطة به أو النظام التقني الذي يوجد فيه. مثل جميع العمليات الطبيعية، يتبع التآكل القوانين الديناميكية الحرارية، حيث تميل المعادن والسبائك، عند تعرضها للعوامل الكيميائية أو التأثيرات الجوية، إلى العودة إلى حالتها الأصلية. غالبًا ما تكون هذه الحالات عبارة عن أكاسيد أو كبريتيدات أو كربونات أو مركبات أخرى أكثر استقرارًا في البيئة [17].

يحتوي نظام التآكل الأساسي على عنصرين رئيسيين: المادة والبيئة المحيطة بها. ينتج التفاعل بينهما عملية التآكل، والذي يتأثر بظروف فيزيائية-كيميائية وميكانيكية محددة. تحدد هذه الظروف كيفية تطور التآكل، مما يؤثر على معدل ومدى تدهور المادة [18].

يتأثر التآكل بمختلف العوامل الداخلية والخارجية التي يوضحها الشكل التالي :



شكل 1.1: العوامل المؤثرة على التآكل

3.1.1 أهمية دراسة التآكل

التآكل هو عبارة عن عملية طبيعية تتدهور فيها المواد، خاصة المعادن، بسبب تفاعلها مع البيئة المحيطة. قد تكون قد لاحظت ذلك في حياتك اليومية عندما يصدأ سراج الحديد أو عندما تضعف الهياكل الفولاذية مثل القوارب وخطوط الأنابيب مع مرور الوقت. لا يقتصر التآكل على الأسطح الظاهرة فقط، بل يمكن أن يحدث داخليًا أيضًا، كما هو الحال داخل أنابيب المياه في المنازل. كذلك، فإن خطوط الأنابيب تحت الأرض التي تنقل المياه والغاز والنفط معرضة للتآكل، مما قد يؤدي إلى أضرار هيكلية وإصلاحات مكلفة ببساطة يحدث التآكل عندما يتحلل أحد المواد بسبب تفاعل كيميائي

مع العناصر المحيطة به، مثل الهواء أو الماء [19].

لا يتسبب التآكل فقط في تآكل المواد بشكل مرئي، بل يمكنه أيضًا تغيير خصائصها بطرق غير واضحة دون فقدان كبير في الوزن أو حدوث تدهور مرئي. في بعض الحالات، قد يبدو أن المادة لم تتغير من الخارج، لكنها قد تعرضت لتغيرات داخلية تضعف بنيتها. هذه التحولات الخفية يمكن أن تؤدي إلى فشل غير متوقع، حتى وإن لم تكشف الفحوصات البصرية العادية أو قياسات الوزن عن أي ضرر. هذه الحقيقة تذكرنا بأن التآكل يمكن أن يكون خادعًا، حيث يؤثر على المظهر والقوة الداخلية للمادة [19].

ففي عالم الأعمال الحديث، يجب على الشركات اتخاذ تدابير فعالة لمنع الفشل الناتج عن التآكل، حيث يمكن أن يؤدي إلى عواقب خطيرة مثل الإصابات، فقدان الأرواح، التوقفات المفاجئة، والتلوث البيئي. لتقليل هذه المخاطر، تستثمر المؤسسات بشكل كبير في التحكم في التآكل، سواء أثناء تصميم المعدات أو خلال العمليات اليومية. هذا الأمر بالغ الأهمية خاصة في الصناعات التي تتعامل بشكل روتيني مع المواد الكيميائية القاسية، حيث يمكن أن يحدث التآكل بسرعة ويتسبب في أضرار جسيمة [19].

يمكن أن يتسبب التآكل في أضرار جسيمة للمعدات الصناعية والبنية التحتية، مما يؤدي إلى إصلاحات مكلفة، وخسائر في الإنتاج، وأضرار بيئية، وحتى مخاطر على سلامة العمال. للحفاظ على سلامة الهياكل والآلات، من الضروري تقييم العوامل التي تؤثر على التآكل ومدى سرعة تدهور المواد. من خلال هذه المعلومات، يمكن للشركات والمهندسين اتخاذ قرارات مستنيرة حول الحلول الأكثر فعالية، وتحديد نوع الإصلاحات المطلوبة، وتقدير تكلفتها، ومدى سرعة تنفيذها لمنع المزيد من الأضرار [19].

حيث أن مستويات الصيانة المطلوبة يمكن أن تختلف بشكل كبير اعتمادًا على شدة بيئات التشغيل. بينما قد تتطلب بعض معدات البنية التحتية فقط إعادة طلاء منتظمة وفحصًا دوريًا لأنظمة الكهرباء والسباكة، فإن بعض مصانع معالجة المواد الكيميائية ومحطات توليد الطاقة والمعدات الجوية والبحرية تُدار وفق جداول صيانة مكثفة. حتى أفضل التصاميم لا يمكنها توقع جميع الظروف التي قد تنشأ خلال عمر النظام. يتم استخدام فحص التآكل والمراقبة لتحديد حالة النظام ومدى فعالية برامج التحكم في التآكل والصيانة [19].

تتطلب ممارسات فحص التآكل التقليدية عادة عمليات إيقاف تشغيل دورية مخططة أو انقطاع الخدمة للسماح بعملية الفحص، مما قد يكون مكلفًا من حيث خسائر الإنتاجية، وطاقة إعادة التشغيل، وتوافر المعدات، وتكاليف المواد. ومع ذلك، فإن الانقطاعات أو عمليات الإيقاف غير المخطط لها

يمكن أن تكون أكثر اضطرابًا وكلفة [19].

2.1 انواع التآكل

اعتمادًا على طبيعة البيئة وسلوكها حول المعدن، يمكن تحديد نوع التآكل. بشكل عام، يمكن تلخيص عمليات التآكل المختلفة على النحو التالي:

1.2.1 التآكل الكيميائي

يحدث التآكل الكيميائي، المعروف أيضًا باسم التآكل الجاف، نتيجة تفاعل مباشر بين المعدن (الطور الصلب) والغازات في البيئة المحيطة به. على عكس التآكل الكهروكيميائي الذي يتطلب وجود إلكتروليت، يحدث التآكل الجاف في غياب الوسط السائل.

تتم هذه العملية بشكل أساسي من خلال الأكسدة على المستوى الذري، حيث يتفاعل المعدن مع الغازات مثل الأكسجين وثنائي أكسيد الكبريت أو الكلور. ومع مرور الوقت، يؤدي هذا التفاعل إلى تكوين طبقات أكسيدية أو مركبات أخرى على سطح المعدن، مما قد يضعف قوته الهيكلية [20].

2.2.1 التآكل البيوكيميائي (التآكل البكتيري)

يحدث التآكل البيوكيميائي، المعروف أيضًا باسم التآكل البكتيري، عندما تهاجم بعض الكائنات الحية الدقيقة المواد المعدنية حيث يشكل هذا النوع من التآكل مشكلة كبيرة في الهياكل المدفونة، مثل الأنابيب والخزانات تحت الأرض.

تحدث هذه العملية نتيجة النشاط الأيضي لبعض أنواع البكتيريا، التي تنتج مركبات كيميائية تسرع من تآكل المعادن. من أبرز الأمثلة على ذلك تكوين حمض الكبريتيك بواسطة بكتيريا مثل (*Thiobacillus*) مما يؤدي إلى تآكل سريع لسطح المعدن. ومع مرور الوقت، يمكن أن يؤدي هذا إلى تلف الأنابيب والخزانات، مما قد يسبب تسريبات أو انهيارًا هيكليًا [20].

3.2.1 التآكل الكهروكيميائي (الرطب)

يحدث التآكل الكهروكيميائي، المعروف أيضًا باسم التآكل الرطب، نتيجة تفاعل كهروكيميائي بين سطح المادة والوسائط الإلكتروليتية. يحدث هذا النوع من التآكل عندما يكون أحد المتفاعلات سائلًا

(إلكتروليت) والآخر صلبًا (معدن). بالإضافة إلى ذلك، إذا كان هناك عدم تجانس في المعدن أو الإلكتروليت، فإن عدم التوازن في التركيب يؤدي إلى تكوّن خلية كهروكيميائية. في هذا النظام، تعمل بعض مناطق المعدن كأنودات، بينما تعمل مناطق أخرى ككاثودات. تتعرض المناطق الأنودية لفقدان المادة بسبب عملية الأكسدة، مما يؤدي إلى تآكل المعدن. يعد هذا النوع من التآكل شائعًا في البيئات التي تتعرض فيها المعادن للماء أو الأحماض أو المحاليل [20].

يختلف التآكل الكهروكيميائي عن التآكل الجاف في أنه يتضمن حركة الأيونات بين المعدن والوسط المسبب للتآكل. في هذه العملية، يتم إزاحة الأيونات من المحلول فتتفاعل مع المعدن، مما يؤدي إلى تدهور المادة.

تشمل العوامل المؤكسدة الرئيسية المسؤولة عن التآكل الكهروكيميائي ما يلي:

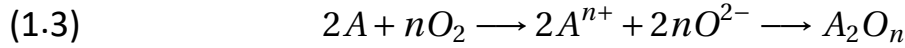
- الأيونات الهيدروجينية (H^+) : تساهم في التآكل الحمضي، مما يسرع أكسدة المعادن.
- الأكسجين الذائب (O_2) : يلعب دورًا كبيرًا في تفاعلات الأكسدة، خاصة في البيئات الرطبة.
- الأيونات المعدنية الموجبة : أيونات المعادن المشحونة إيجابيًا التي تدخل في التفاعلات الكهروكيميائية وتؤثر على استقرار المعدن.
- الأيونات السالبة ($N^-, Cl^-, SO_4^{2-}, NO_3^-$) : أيونات مشحونة سالبة تتفاعل مع سطح المعدن، مما يعزز التآكل.
- الغازات الذائبة : مثل ثاني أكسيد الكربون (CO)

3.1 أشكال التآكل

1.3.1 التآكل العام

المعروف أيضًا باسم التآكل المنتظم، هو نوع من التدهور الذي يؤثر على سطح المعدن بشكل متساوٍ بمرور الوقت. بدلاً من تكوين بقع أو حفر عميقة، ينتشر هذا التآكل بشكل مستمر عبر المنطقة المكشوفة حيث يلعب الأكسجين دورًا رئيسيًا في هذه العملية، فهو يسرع تدهور المعدن عندما يتعرض للرطوبة [21].

تشمل المواد الأكثر عرضة لهذا النوع من التآكل الحديد الزهر والفولاذ. عندما يتلامسان مع بيئة رطبة أو مبللة، يظهر عليهما مظهر يشبه الصدأ، وهو علامة مرئية على حدوث التآكل (أنظر الشكل 1.1). يمكن أن يؤدي هذا التدهور المستمر إلى إضعاف المادة إذا لم تتم معالجته، مما يجعل طرق الحماية مثل الطلاء أو التحكم البيئي ضرورية [21].



في هذا السياق، يشير "A" إلى أي نوع من المعادن. هذه المعادن تتعرض فقط للتآكل السطحي عندما يتم وضعها فوق الماء. وهذا يعني أن التآكل يؤثر بشكل أساسي على الطبقة الخارجية للمعدن دون التأثير بشكل كبير على سلامته الهيكلية [21].



شكل 2.1: التآكل العام

2.3.1 التآكل الاجهادي (SCC)

هو شكل خطير وغير متوقع من فشل المواد التي تؤثر على المعادن عند تعرضها لظروف بيئية معينة. تحدث هذه الظاهرة عندما تتفاعل الإجهادات الشد والتأثيرات التآكلية معًا لإضعاف المعدن، مما يؤدي إلى ظهور تشققات مفاجئة دون أي علامات تحذيرية واضحة. يعد هذا النوع من التدهور مقلقًا بشكل خاص في الصناعات التي تعتمد على السلامة الهيكلية، حيث يمكن أن يتسبب في انهيارات كارثية [21].

فتشققات التآكل الناتجة عن الإجهاد (SCC) تحدث عندما يتعرض المعدن، الذي يكون مستقرًا في البداية في البيئة الخاملة، لضغط فيؤدي إلى ظهور تشققات في بيئة تآكلية. يمكن أن يتسارع هذا النوع

من التآكل بفعل الإجهادات الداخلية المتبقية داخل المعدن أو القوى الخارجية المطبقة عليه. يحدث SCC غالبًا عند درجات حرارة مرتفعة، وهو أكثر شيوعًا في السبائك مقارنةً بالمعادن النقية [21].

لكي يتطور SCC يجب توفر ثلاثة شروط أساسية:

- وجود مادة قابلة للتأثر بهذا النوع من التآكل.

- التعرض لبيئة تآكلية.

- تطبيق إجهاد شد

تُعتبر مشكلة التشققات الناتجة عن التآكل الناتج عن الضغط غير قابلة للتقلص، حيث يستمر عدد السبائك القابلة للتعرض لهذه المشكلة وعدد البيئات التي تسبب التشققات في الزيادة. خلال الـ 25 عامًا الماضية، بُذلت جهود واسعة الانتشار لكنها غير منسقة في البلدان الغربية لمعالجة هذه المشكلة. يلعب الوقت دورًا أساسيًا في فهم آليات التشققات الناتجة عن الضغط. لتحليل هذه الآليات بشكل كمي، من المهم دراسة ليس فقط ما يحدث من الناحية المعدنية أو الكهروكيميائية، ولكن أيضًا فحص مدى سرعة حدوث هذه العمليات. على سبيل المثال، يعتبر توقيت الأحداث، مثل ظهور خطوات الانزلاق أو معدلات إعادة التمرير، عاملاً مهمًا في كيفية انتشار التشققات الناتجة عن الضغط [22] ، كمثال الشكل 2.1.



شكل 3.1: التآكل الإجهادي

3.3.1 التآكل الموضعي

يختلف تمامًا عن التآكل العام. في حين أن التآكل العام يؤثر على مساحات واسعة من سطح المعدن لكن التآكل الموضعي يحدث في مناطق صغيرة ومحددة. فيتحقق هذا النوع من التآكل عندما تكون بعض المناطق الصغيرة من المعدن أكثر عرضة للهجوم في بيئة مسببة للتآكل مقارنة بالسطح ككل. فتتآكل هذه المناطق بسرعة أكبر بسبب وجود وسيط تآكلي. في هذه الحالات، تصبح المناطق ذات الإمداد المحدود من الأكسجين أنودًا (حيث يحدث التآكل)، بينما تصبح المناطق ذات الإمداد الكامل بالكاثود. يمكن تصنيف التآكل الموضعي إلى نوعين رئيسيين: لتآكل النقطي : حيث تتشكل ثقوب أو حفر صغيرة على السطح.

التآكل في الشقوق : حيث يتطور التآكل في الشقوق أو الأماكن الضيقة [21].

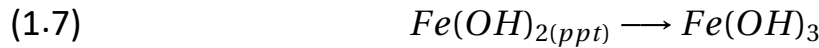
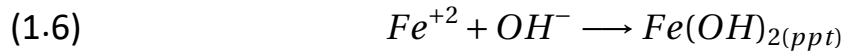
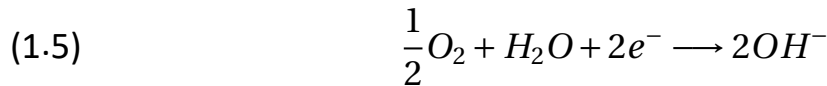


شكل 4.1: التآكل الموضعي

4.3.1 التآكل النقطي

هو نوع من التآكل الموضعي حيث تبدأ مناطق صغيرة على مادة معينة بالتآكل. مع مرور الوقت، تنمو هذه المناطق وتصبح أكبر وأعمق، مما يكون حفرًا أو ثقبًا على السطح. عندما تغطي أجزاء من السطح بالشوائب أو الماء، تكون تركيزات الأكسجين أقل في تلك المناطق، مما يجعلها تعمل كأنود

(حيث يحدث التآكل)، بينما تعمل المناطق الأخرى ككاثود. حيث تتحكم الآليات الكهروكيميائية في عملية إذابة المعدن [21]. هناك نظريتان رئيسيتان تفسران التآكل النقطي: نظرية هوار: تربط هذه النظرية بين تكوّن ونمو الحفر وزيادة مستوى الحموضة في المحاليل عند المناطق النشطة. نظرية الباحثين الروس: تفترض هذه النظرية أن الحفر تتكون بسبب إزاحة الأنيونات من سطح المعدن.



شكل 5.1: التآكل النقطي

التآكل الشقي هو مشكلة شائعة، خاصةً في البيئات البحرية، ويؤثر بشكل أساسي على الفولاذ المقاوم للصدأ. يحدث في المناطق المحصورة، مثل الشقوق أو الوصلات، حيث يكون وصول السوائل العاملة من البيئة المسببة للتآكل محدودًا [21].

الآلية: تتميز المنطقة الداخلية للشق بوجود كمية أقل من الأكسجين مقارنةً بالسطح الخارجي. يؤدي هذا الفرق إلى جعل منطقة الوصلة تعمل كقطب موجب (أنود)، بينما يعمل السطح الخارجي كقطب سالب (كاثود)، مما يحفز حدوث التآكل. غالبًا ما تتراكم أيونات الكلوريد داخل الشق، مما يزيد من تفاقم المشكلة، وتبدأ العملية بسبب تدرجات التركيز.

درجة الحرارة: يحدث التآكل الشقي عادةً في درجات حرارة أقل مقارنةً بتآكل الحفر. العوامل المؤثرة على التآكل الشقي:

فبعض المعادن والسبائك تكون أكثر عرضة للتآكل من غيرها. من بين العوامل التي تؤثر بشكل كبير على حدوثه هي مستوى الحموضة (pH) ودرجة الحرارة، ووجود الكلوريد [21].

5.3.1 التآكل بين الحبيبات (IGA)

فهو يشير إلى الهجوم المحلي الذي يحدث عند حدود حبيبات سطح المعدن، حيث تكون الأطراف أكثر عرضة للبيئة المسببة للتآكل مقارنةً بالنواة المعدنية [21]. يمكن أن يطمس هذا النوع من التآكل قدرة المادة على مقاومة التآكل في ظروف مختلفة، وغالبًا ما يتم تقييمه من خلال اختبار التآكل بين الحبيبات (IGA) [21].

تلعب البنية الدقيقة لسبائك الألومنيوم المَعْمَرَة مثل ($Al - 4\%Cu$) دورًا مهمًا في هذا النوع من التآكل، وقد تم إجراء العديد من الدراسات حوله [22]. تأثير الشوائب:

الشوائب مثل الكربون (C)، والنيتروجين (N) والأكسجين (O) والمنغنيز (Mn) والكبريت (S) لا تؤثر على التآكل بين الحبيبات. ومع ذلك، فإن إضافة السيليكون (Si) والفوسفور (P) له تأثير وقد يزيد من التآكل. وهذا ما يظهره الشكل



شكل 6.1: التآكل بين الحبيبات

6.3.1 التآكل الجلفاني (أو التآكل الثنائي المعدني)

يحدث عندما يتم توصيل معدنين مختلفين كهربائيًا ووضعهما في إلكتروليت (سائل موصل) [21]. حيث يعمل المعدن الأقل تفاعلية كالكاثود ويحظى بالحماية. وأما المعدن الأكثر تفاعلية ك الأنود ويتآكل.

تحدث العملية نتيجة فرق الجهد (الفولتية) بين المعدنين، وتزداد سرعة التآكل مع زيادة فرق الجهد. فهو يتم من خلال تفاعل كيميائي كهربائي حيث يفقد الأنود الإلكترونات، بينما يكتسبها الكاثود.





شكل 7.1: التآكل الجلفاني

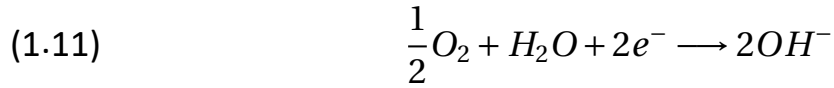
7.3.1 تآكل خط الماء

تآكل خط الماء هو نوع من التآكل الموضعي الذي يحدث في الخزانات المعدنية أو الهياكل التي تكون مغمورة جزئيًا في الماء [21].

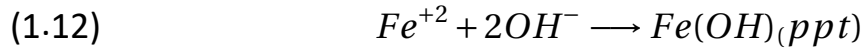
يحدث هذا التآكل حيث أن المنطقة الواقعة تحت خط الماء تحتوي على كمية قليلة من الأكسجين، مما يجعلها المصعد (الأنود) وهي المنطقة التي يحدث فيها التآكل [21]. أما المنطقة الواقعة فوق خط الماء تحتوي على كمية كبيرة من الأكسجين، مما يجعلها المهبط (الكاثود) وهي منطقة محمية من التآكل [21]. نتيجة لذلك، فلمعدن الموجود مباشرة تحت سطح الماء يتآكل بشكل أكبر، بينما يبقى المعدن الموجود فوق مستوى الماء محميًا إلى حد كبير. هذه الظاهرة شائعة في الخزانات، أجسام السفن، والأنابيب [22].



الانود



الكاثود



شكل 8.1: لتآكل الجلفاني

8.3.1 آلية التآكل

يحدث التآكل نتيجة العمليات الكيميائية والكهروكيميائية، وكل منها يؤثر على المعادن بطرق مختلفة:

- التآكل الكيميائي (التآكل الجاف): يحدث في الغازات الجافة أو السوائل غير الموصلة للكهرباء، حيث لا يوجد تدفق للإلكترونات أو تيار كهربائي. التأثير الرئيسي لهذا النوع من التآكل هو تكون

طبقة أكسيدية على سطح المعدن نتيجة الأكسدة في الهواء. يحدث عندما يتفاعل المعادن مباشرة مع الغازات البيئية، مثل الأكسجين أو ثاني أكسيد الكبريت [23].

• التآكل الكهروكيميائي (التآكل الرطب): يحدث في المحاليل السائلة، حيث تتفاعل المواد المعدنية مع الإلكترونات. تعتمد عملية التآكل على اختلاف الجهد الكهربائي عبر سطح المعدن، مما يؤدي إلى تفاعلات أكسدة واختزال. في هذا النوع من التآكل:

• جزء من المعدن كأنود، حيث تحدث الأكسدة، مما يؤدي إلى فقدان المعدن للإلكترونات وتحوله إلى أيونات معدنية.

• تعمل المناطق الكاثودية على تسهيل تفاعلات الاختزال، غالبًا بتفاعل الأكسجين أو أيونات الهيدروجين.

• يُلاحظ هذا النوع من التآكل في المعادن المعرضة للماء أو الأحماض أو البيئات المالحة، مما يؤدي

• إلى تدهور كبير في المواد [23].

في عملية التآكل الكهروكيميائي، يخضع المعدن لعملية الأكسدة عند الأنود، حيث يفقد الإلكترونات ويتحول إلى أيونات معدنية:



أما في الكاثود، فتحدث عملية إزالة الاستقطاب، والتي تتضمن بشكل رئيسي اختزال الأكسجين وأيونات الهيدروجين. يمكن تمثيل تفاعل اختزال الأكسجين كما يلي:



يشير التآكل البيولوجي، المعروف أيضًا باسم التآكل الناتج عن الكائنات الدقيقة إلى تدهور المواد المعدنية بسبب الكائنات الحية الدقيقة. تقوم هذه الكائنات بتكوين غشاء بيولوجي على سطح

المعدن، مما يخلق بيئة مثالية لنموها وتأثيرها التآكلي. [23].

تساهم بعض أنواع البكتيريا بشكل كبير في هذا التآكل وأهمها:

- البكتيريا المختزلة للكبريتات : تقوم بإنتاج كبريتيد الهيدروجين (H_2S)، مما يؤدي إلى تآكل المعدن بسرعة.
- البكتيريا المؤكسدة للكبريت: تنتج حمض الكبريتيك (HSO)، الذي يسرع من تدهور المعادن.

يُعد التآكل البيولوجي مشكلة رئيسية في الأنابيب المدفونة، أنظمة التبريد الصناعية، والهياكل البحرية، حيث تزدهر المستعمرات البكتيرية وتضعف العناصر المعدنية بمرور الوقت [23].

4.1 مثبطات التآكل

في السنوات الأخيرة، كثّف الباحثون جهودهم لإيجاد حلول فعالة تهدف إلى الحد من معدل التآكل قدر الإمكان. حيث يُعتبر استخدام المثبطات أحد أكثر الأساليب العملية لتقليل معدل التآكل بفعالية [24].

1.4.1 التعريف لمثبطات التآكل

المثبطات هي إحدى الوسائل الفعالة لحماية الأسطح المعدنية من التآكل، حيث تساعد في تقليل معدل التلف والتدهور الذي قد تتعرض له المعادن. حيث تُعد هذه الطريقة من أكثر أساليب الوقاية استخدامًا، ليس فقط لفعاليتها العالية ولكن أيضًا لأهميتها في مختلف التطبيقات الصناعية [25].

فهي عبارة عن مواد كيميائية تُضاف بكميات قليلة إلى البيئات العدوانية بهدف تقليل معدل التآكل [26].

يمكن أن تكون مثبطات التآكل صلبة أو سائلة أو غازية، حيث يتم اختيار المثبط المناسب حسب قابليته للذوبان أو التشتت في السوائل.

يؤثر هذا الاختيار بشكل كبير على فعالية المثبط في تقليل التآكل، مما يجعله عاملاً أساسياً في التطبيقات الصناعية المختلفة [27].

تمر عملية التثبيط بمرحلتين رئيسيتين:

- انتقال المثبط إلى سطح المعدن لضمان وصوله إلى المنطقة المستهدفة.
- تفاعل المثبط مع سطح المعدن، مما يساعد في تقليل تأثير العوامل المسببة للتآكل.
- على الرغم من بساطة هذه الخطوات، إلا أن عملية التثبيط تعد ظاهرة معقدة، حيث تعتمد بشكل أساسي على تكوين طبقات واقية على سطح المعدن تعمل كحاجز يمنع التفاعل المباشر مع البيئة العدوانية [28].

يُعد استخدام المثبطات من أكثر الطرق فعالية من حيث التكلفة لحماية الأسطح المعدنية، حيث أنه الأقل تكلفة مقارنة بوسائل الحماية الأخرى. إضافة إلى ذلك، فإن استخدام المثبطات يُعتبر ممارسة معتمدة للحد من معدل التآكل، مما يساهم في إطالة عمر المعدن وتعزيز مقاومته للظروف البيئية القاسية [29].

2.4.1 تصنيف مثبطات التآكل

تُستخدم مثبطات التآكل لتقليل أو منع تفاعل المواد المعدنية مع البيئة المسببة للتآكل. يمكن تصنيف هذه المثبطات وفقاً لعدة عوامل

5.1 الطبيعة الكيميائية

تعتمد فعالية مثبطات التآكل بشكل كبير على تركيبها الكيميائي، حيث تؤثر خواصها على طريقة تفاعلها مع سطح المعدن.

1.5.1 المثبطات العضوية

المثبطات العضوية هي مواد كيميائية تحتوي على ذرات غير متجانسة مثل الأكسجين، الكبريت، والنيتروجين، وتُستخدم على نطاق واسع للحد من التآكل، خاصة في الفولاذ. تقوم هذه المثبطات بتفاعل مع سطح المعدن فهي :

- تمتص على سطح المعدن، مما يؤدي إلى إزاحة جزيئات الماء وتشكيل حاجز واقٍ يقلل من تعرض المعدن للوسط المتآكل.
- تعتمد كفاءتها على البنية الكيميائية والخصائص الفيزيائية الكيميائية، مثل:
- طبيعة المجموعات الوظيفية داخل المركب.

- كثافة الإلكترونات عند الذرة المانحة.

- التركيب الإلكتروني

فهي تقوم بتثبيط التآكل من خلال ثلاث آليات رئيسية:

- امتزاز الجزيئات أو الأيونات على السطح المعدني في مناطق الأنود أو الكاثود، مما يقلل معدل التآكل.

- رفع الجهد الكهربائي للأنود والكاثود، مما يبطئ سرعة التفاعل

- تكوين طبقة واقية تمنع تأثير البيئة المتآكلة على المعدن [30].
فهي آمنة وغير ضارة [31].

2.5.1 المثبطات غير العضوية

تشمل المثبطات غير العضوية أملاح المعادن مثل الزنك، النحاس، النيكل، والزرنيخ، حيث تُعد مركبات الزرنيخ الأكثر شيوعًا في تقليل تأثير التآكل [32].

تعمل على تثبيط عند خلط هذه المركبات مع محلول قلوي، فإنها تقوم بإزالة الطبقات المتضررة من سطح المعدن داخل المنطقة الكاثودية.

يؤدي ذلك إلى تقليل تفاعل أيونات الهيدروجين، مما يساهم في حماية المعدن من التآكل. كما يساعد تكوين كبريتيد الحديد في وسط الفولاذ على تشكيل حاجز يمنع تأثير الأحماض والمواد المتآكلة على المعدن [33].

تحدث تفاعلات الأحماض مع كبريتيد الحديد بشكل ديناميكي، حيث تؤثر الظروف البيئية والكيميائية على سرعة التآكل وفعالية المثبطات. عند استخدام المثبطات غير العضوية، هناك جوانب إيجابية وسلبية يجب أخذها بعين الاعتبار. المزايا:

- تعمل بكفاءة عالية في درجات الحرارة المرتفعة ولفترات طويلة.

العيوب:

- تقل فعاليتها في الأوساط الحمضية ذات تركيز يفوق (17%) من حمض الهيدروكلوريك.

- تواجه صعوبة في الاندماج الكيميائي مع بعض المواد، مما قد يحد من استخدامها في ظروف معينة.

- قد يؤدي استخدامها إلى إطلاق غاز الزرنيخ السام كنتيجة جانبية للتفاعل، مما يشكل خطرًا
- تُعرف بأنها سامة ويمكن أن تُسبب مشكلات بيئية وصحية [32].

3.5.1 آلية التأثير الكهروكيميائي

4.5.1 المثبطات الأنودية للتآكل

تعمل المثبطات الأنودية على حماية المعادن من التآكل عن طريق تكوين طبقة أكسيدية واقية على سطح المعدن، مما يؤدي إلى تخميل السطح وتقليل معدل التآكل بفعل التغير الكبير في الجهد الأنودي. يُطلق على هذا النوع أيضًا مثبطات التخميل، وتشمل عدة مواد، منها:

- الكرومات
- السيليكات
- النيتريت
- الموليبيدات

ورغم فعاليتها، إلا أن المواد القائمة على الكرومات تُعد ضارة وخطرة بسبب خواصها الكيميائية. [34].

5.5.1 المثبطات الكاثودية

تعمل المثبطات الكاثودية على إبطاء التفاعل الكاثودي، مما يقلل من معدل انتشار العناصر المختزلة التي تصل إلى سطح المعدن، وبالتالي تقليل تأثير التآكل. حيث

- تقلل من تفاعلات الاختزال التي تحدث على سطح المعدن، مما يحد من سرعة التآكل.
- تؤثر على امتصاص المعدن للهيدروجين، مما قد يزيد من قابلية المعدن للتشقق الناتج عن الهيدروجين.

يمكن لبعض هذه المثبطات أن تتسبب في تلوث بيئي بسبب احتفاظها بالهيدروجين في صورته الذرية، مما يسهل انتشاره داخل المعدن [34].

للتقليل من الأضرار البيئية، يتم استخدام مثبطات أكثر أمانًا مثل:

- الفوسفات المتعدد

- أملاح الزنك
- أملاح السيريوم

6.5.1 المثبطات المختلطة للتآكل

تمثل المثبطات المعتمدة على الفوسفات خيارًا بديلاً للمثبطات الكاثودية، حيث تعتمد فعاليتها على تشكيل طبقة واقية على السطح الخارجي للمعدن. فعند ارتفاع تركيز الفوسفات، يمكن أن يعمل كمثبط متعدد الوظائف، بينما في بيئات تحتوي على الأكسجين والكلوريد، فإنه يؤدي دور المثبط الأنودي.

المثبطات الفوسفاتية تُستخدم بشكل واسع لأنها تعمل على تقليل التفاعلات الأنودية والكاثودية، مما يجعلها فعالة عند استخدامها كمزيج مع مثبطات أخرى [35].

فهو يعمل على تقليل انتشار التفاعلات من خلال:

- الحد من انتشار أيونات الكلوريد بفضل وجود مركبات فوسفاتية مستقرة.
- عند زيادة تركيز الفوسفات مع الكلور والأكسجين، يصبح دوره أنوديًا بدلاً من كونه كاثوديًا.
- الفوسفات يعزز تكوين طبقات حماية من أكسيد الحديد ويساعد في إصلاح العيوب في الطبقات الواقية.

6.1 آليات عمل المثبطات عند السطح

يتم تصنيف المثبطات بناءً على طريقة ارتباطها بسطح المعدن، وتنقسم إلى نوعين رئيسيين:

- المثبطات السطحية (*Adsorption inhibitors*)
- المثبطات البينية (*Interphase inhibitors*) [35].

7.1 الامتزاز على سطح المعدن

يمكن للمثبطات أن تمتص على سطح المعدن من خلال طريقتين رئيسيتين: الامتزاز الفيزيائي والامتزاز الكيميائي، حيث يعمل كل منهما بطريقة مختلفة لحماية المعدن من التآكل.

[35].

1.7.1 الامتزاز الفيزيائي (الإلكتروستاتيكي)

يحدث نتيجة التفاعل الكهربائي الساكن بين أيونات المثبط العضوية وسطح المعدن المشحون. حيث يعتمد على القوى الإلكتروستاتيكية التي تساعد في تثبيت جزيئات المثبط على السطح المعدني [29]. فهو يحدث بسبب قوى فان دير فالس الضعيفة، التي تجذب الجزيئات بشكل طبيعي إلى سطح المادة. على عكس الامتزاز الكيميائي، الذي يعتمد فقط على القوى بين الجزيئات [36]. حيث يتطلب طاقة منخفضة نسبيًا، وتقدر بأقل من 40 كيلوجول/مول. بسبب انخفاض الطاقة اللازمة، لا يحتاج الامتزاز الفيزيائي إلى درجات حرارة عالية أو طاقة تنشيط حتى يحدث. يتم هذا الامتزاز بسهولة عند درجات حرارة منخفضة، بطريقة مشابهة لتكاثف الأبخرة على سطح المواد السائلة. هذه العملية الطبيعية لها تطبيقات مهمة مثل تخزين الغازات وفصلها [37,38].

2.7.1 الامتزاز الكيميائي

يتم من خلال نقل أو مشاركة الشحنة بين جزيئات المثبط وسطح المعدن، مما يؤدي إلى تكوين رابطة تناسقية قوية.

حيث يتطلب طاقة تنشيط عالية بسبب التفاعل الكيميائي الذي عادةً أكبر من 40 كيلوجول/مول [39].

هذا النوع من الامتزاز أكثر ثباتًا، حيث يسمح ببقاء المثبط على سطح المعدن لفترة أطول، مما يعزز الحماية ضد التآكل.

فهو يعمل على امتصاص المثبط من سطح المعدن حيث يقلل من معدل التآكل عن طريق:

- إبطاء عملية الذوبان الأنودية، مما يقلل فقدان المعدن.
- تقليل تفاعل اختزال الهيدروجين الكاثودي، مما يقلل من تأثير التآكل.
- تحقيق كلا التأثيرين معًا لضمان حماية فعال [29].

تساعد هذه التصنيفات الباحثين في فهم آليات الامتزاز والتنبؤ بتفاعلات المواد في التطبيقات المختلفة [40,41].

3.7.1 تكوين طبقة واقية لحماية المعدن

تعتمد عملية تكوين الطبقة الواقية على التفاعل السطحي بين جزيئات المثبط وسطح المعدن، مما يؤدي إلى إنشاء غشاء رقيق يساعد في حماية المعدن من التآكل عن طريق حجب المناطق الأنودية والكاثودية.

حيث يكمن دور المثبطات العضوية في تشكيل طبقة كارهة للماء من انها تلتصق بسطح المعدن، مما يساعد على عزله عن العوامل المسببة للتآكل.

وترتبط المجموعة القطبية للمثبط مباشرة بالمعدن، في حين يتجه الطرف غير القطبي بشكل عمودي على سطح المعدن.

هذا الترتيب يمنع انتشار العوامل المسببة للتآكل، مما يخلق حاجزًا فعالًا ضد الهجمات الكيميائية والكهروكيميائية والكهروكيميائي [42].

8.1 طرق الحماية من التآكل

يُعتبر تآكل المعادن مشكلة كبيرة تؤثر على متانتها وعمرها الافتراضي، لذا من الضروري حماية الأسطح المعدنية من هذه الظاهرة.

الحماية السطحية أكثر أهمية من الحماية العامة لأن السطح يتعرض بشكل مباشر للظروف البيئية، مثل الرطوبة والتغيرات الحرارية، إضافة إلى العوامل الميكانيكية والمذيبات التي قد تتسبب في إضعافه [19].

لذلك هناك العديد من الطرق التي تُستخدم لحماية المعادن وسبائكها من التآكل، ومنها:

- استخدام مركبات كيميائية تساعد على تشكيل طبقة واقية على سطح المعدن.
- تمرير تيار كهربائي محرض لحماية الأجزاء الكاثودية.
- في بعض الحالات، يمكن الحد من التآكل عبر عملية الأكسدة الذاتية.
- تمثل مثبطات التآكل أحد أكثر الأساليب شيوعًا في الحد من ظاهرة التآكل، وتُطبق ضمن أربعة بيئات رئيسية:

- المياه وفق نطاق معين من pH .

- المحاليل الحمضية المائية.

- بيئات مصافي النفط، والتي تشمل مراحل الإنتاج الأولي والثانوي.
- بيئات متنوعة تتطلب حماية المعادن من التآكل [43].

9.1 المثبطات الخضراء للتآكل

تشير المثبطات الخضراء أو المثبطات الصديقة للبيئة إلى المواد التي تتمتع بتوافق بيولوجي مع الطبيعة، حيث تُستخدم للحد من التآكل دون الإضرار بالبيئة. تُعتبر المستخلصات النباتية مثلاً شائعاً لهذا النوع، نظراً لكونها مستمدة من مصادر طبيعية غير ضارة [44--46]. بالإضافة إلى كونها آمنة بيئياً، تمتلك هذه المثبطات العديد من الفوائد، مثل:

- تكلفة منخفضة مقارنة بالمثبطات الاصطناعية.

- وفرة وسهولة الإنتاج، مما يجعلها خياراً عملياً.

- الاعتماد على مصادر متجددة، مما يساهم في الاستد

تحتوي المستخلصات النباتية على مركبات فيتوكيميائية تشابه التركيب الجزيئي والإلكتروني لمثبطات التآكل العضوية التقليدية، مما يمنحها القدرة على الامتزاز على سطح المعدن وتشكيل طبقة واقية ضد التآكل. [44].

1.9.1 تصنيف المثبطات الخضراء للتآكل

على غرار التصنيفات التقليدية لمثبطات التآكل، يمكن تقسيم المثبطات الخضراء إلى فئتين رئيسيتين وفقاً لتركيبها الكيميائي: [43].

- المثبطات الخضراء العضوية

- المثبطات الخضراء غير العضوية

يمكن المقارنة بين المثبطات العضوية وغير عضوية من خلال: ان المركبات العضوية لها فعالية أكبر في تثبيط التآكل مقارنة بالمثبطات غير العضوية.

بالإضافة أنها تمتلك المثبطات العضوية مجموعة واسعة من التطبيقات لحماية المعادن في بيئات مختلفة، وتشمل:

- الأحماض الأمينية
- البوليمرات والبيوبوليمرات
- المواد الدوائية الكيميائية
- المواد الخافضة للتوتر السطحي
- السوائل الأيونية (مواد كيميائية مصممة خصيصًا)
- المستخلصات النباتية [?].

2.9.1 آلية تثبيط التآكل

تعتمد عملية تثبيط التآكل في المثبطات المدروسة بشكل أساسي على ظاهرة الامتزاز، حيث تتأثر هذه الظاهرة بطبيعة المعدن وشحنه السطحية إضافةً إلى التركيب الكيميائي للمثبطات. فعند غمر المعدن في الإلكتروليت، تتكون شحنة كهربائية عند السطح، مما يؤثر على كيفية ارتباط جزيئات المثبط بالمعدن. حيث ترتبط هذه الأخيرة بذرات المعدن، مما يؤدي إلى تغطية سطحه بجزيئات المثبط المتميزة. يعمل هذا التفاعل على إبطاء العمليات الكهروكيميائية التي تسبب التآكل، مما يساهم في تقليل سرعة التآكل وحماية المعادن [34].

10.1 تأثير التركيز على فعالية المثبط

يمكن تمثيل العلاقة بين كمية المثبط المتميزة وتركيزه من خلال عدد من نماذج متساوي الحرارة (الإيزوثرمات) الكلاسيكية التي تصف كيفية تغير الامتزاز وفقًا لتركيز المثبط.

1.10.1 نموذج لانجموير (Langmuir isotherm)

يعبر إيزوثرم لانجموير بشكل كمي عن تكوين طبقة أحادية من المادة المتميزة على السطح الخارجي للممتاز، وبعد ذلك يتوقف الامتزاز تمامًا.

يمثل هذا النموذج التوازن الديناميكي لأيونات المعدن بين الطور الصلب والسائل، مما يساعد في فهم آلية ارتباط المواد المتميزة بالأسطح الصلبة في مختلف البيئات [42].

يقوم نموذج لانجموير على مجموعة من الفرضيات الأساسية، منها:

- أن عملية الامتزاز قابلة للعكس، أي أن الجزيئات يمكن أن ترتبط بالمعدن أو تتحرر منه بصورة ديناميكية.
 - عدم حدوث تفاعلات جانبية بين الجزيئات الممتزة، حيث تعمل كل جزيئة بشكل مستقل عن الأخرى.
 - توزيع متساوٍ للطاقة السطحية للمعدن، بحيث تكون جميع المواقع على سطح المعدن ذات قدرة متساوية على الامتزاز.
- يتم التعبير عن هذا النموذج رياضياً من خلال المعادلة (1.17) والتي تحدد العلاقة بين تركيز المادة الممتزة وسلوك الامتزاز على سطح المعدن.

$$(1.17) \quad C_{inh}/\theta = (1/K_{ads}) + C_{inh}$$

C_{inh} : هو التركيز المثبط (g/l)

K_{ads} : ثابت عملية الإمتزاز

تمثل العلاقة بين نسبة التغطية (θ) وسطح المعدن مع تركيز المثبط (C_{inh}) وثابت الامتزاز (K_{ads})

- لإيجاد قيمة (K_{ads}) :

يتم استخدام القيم التجريبية لنسبة الامتزاز (θ) وتركيز المثبط (C_{inh}) يمكن إعادة ترتيب المعادلة لحساب ثابت الاتزان مباشرة. عند رسم العلاقة بين ($\frac{\theta}{1-\theta}$) مقابل (C_{inh}) يمكن الحصول على منحنى خطي يسمح بتحديد (K_{ads})

2.10.1 نموذج تيمكين (*Temkin isotherm*)

يتضمن نموذج تيمكين للامتزاز عاملاً يعكس التفاعل بين المادة الممتزة والمادة المازة، حيث يتميز بتوزيع منتظم لطاقة الارتباط [47].

فهو

- يفترض أن حرارة الامتزاز لجميع الجزيئات في الطبقة تتناقص تدريجيًا مع زيادة التغطية، نتيجة التفاعل بين المادة الممتزة وسطح المادة المازة.
- يساعد هذا النموذج في فهم التغيرات الطاقية أثناء عملية الامتزاز، مما يساهم في تحليل أداء المثبطات ضمن البيئات المختلفة [47].

تم وصف نموذج إيزوثرم تيمكين للامتزاز رياضيًا باستخدام المعادلة (1)، والتي تحدد العلاقة بين الامتزاز وطاقة الارتباط [47].

$$(1.18) \quad \theta = -(1/2 \times \alpha) \times \ln K_{ads} - (1/2 \times \alpha) \ln C_{inh}$$

3.10.1 نموذج فروندليش (*Freundlich isotherm*)

تُستخدم علاقة فروندليش بشكل نادر في دراسة تأثير المثبطات الممتزة على المعدن المدروس [?].

$$(1.19) \quad \ln \theta = \ln K_{ads} + n \ln C_{inh}$$

4.10.1 إيزوثرم فرومكين (*Frumkin isotherm*)

يتم التعبير عن إيزوثرم فرومكين بعد إعادة ترتيب المعادلة وفق المعادلة (1.19) والتي توضح تأثير التغطية على طاقة الامتزاز [48].

$$(1.20) \quad \ln \theta = \ln K_{ads} + x \ln C_{inh}$$

5.10.1 إيزوثرم فلوري-هوجينز (*Flory-Huggins isotherm*)

يعكس نموذج فلوري-هوجينز طبيعة عملية الامتزاز من حيث إمكانية حدوثها وعفويتها.

فهو يستخدم لتقييم مدى قابلية عملية الامتزاز للتطبيق وتلقائيتها.

يتم التعبير عنه رياضيًا بواسطة المعادلة (20.1)، التي تربط تركيز المادة الممتزة بسلوك الامتزاز [?].

$$(1.21) \quad \log(\theta / C_{inh}) = \log x K_{ads} + x \log(1 - \theta)$$

6.10.1 يزوترم العلوي (*El – Alwady isotherm*)

يعبر عن خصائص الإيزوترم من خلال المعادلة (21.1)، التي تحدد العلاقة بين الامتزاز وثابت التوازن [49].

$$(1.22) \quad \log(\theta / 1 - \theta) = \log K_{ads} + n \log C_{inh}$$

11.1 آليات الامتزاز لمثبطات التآكل

عند استخدام مثبطات التآكل في البيئات المسببة له، فإنها تتركز على المواقع النشطة ذات الطاقة العالية على سطح المعدن، مما يؤدي إلى تشكيل طبقة واقية. هذه الطبقة تعمل كحاجز يفصل المعدن عن العوامل البيئية التي تسبب التآكل، وبالتالي تساعد في منع حدوثه [?].

يتم تحديد طاقة امتزاز المثبط باستخدام معادلات الديناميكا الحرارية التي تصف العلاقة بين جزيئات المثبط وسطح المعدن.

$$(1.23) \quad [\Delta G_{ads} = -RT \ln(1000 K_{ads})]$$

حيث:

- (ΔG_{ads}) : هو طاقة جيبس الحرة للامتزاز،
- (R) : هو ثابت الغازات العام،
- (T) : هو درجة الحرارة المطلقة بالكلفن،
- (K_{ads}) : هو ثابت الامتزاز.

تستخدم هذه المعادلة في الكيمياء، الديناميكا الحرارية، والهندسة لتحديد سلوك الأنظمة الكيميائية والفيزيائية.

العلاقة التيرموديناميكية التي وصفها العالم جيبس (Gibbs) تُعرف بمعادلة جيبس للامتزاز. هذه المعادلة تصف كيف يمكن أن يكون تركيز مادة مذابة في سائل أعلى على سطح السائل مقارنةً بداخل السائل نفسه، وذلك بناءً على التوازن الحراري والطاقي للمنظومة [50].

طاقة جيبس الحرة هي كمية الطاقة المتاحة لإنجاز عمل في نظام معين عند درجة حرارة وضغط ثابتين. تُستخدم هذه الطاقة لتحديد إمكانية حدوث تفاعل تلقائي [51]. المعادلة الأساسية لطاقة جيبس الحرة هي:

$$(1.24) \quad [\Delta G_{ads} = \Delta H_{ads} - T\Delta S_{ads}]$$

- (ΔG_{ads}) هو تغير طاقة جيبس الحرة
- (ΔH_{ads}) هو تغير الإنثالبي (الطاقة الداخلية للنظام)
- (T) هو درجة الحرارة المطلقة بالكلفن،
- (ΔS_{ads}) هو تغير الإنتروبيا (مقياس العشوائية أو الترتيب في النظام).

إذا كانت:

- $(\Delta G < 0)$ ← يكون التفاعل تلقائيًا
- $(\Delta G > 0)$ ← يكون التفاعل غير تلقائي ويتطلب طاقة خارجية ليحدث.
- $(\Delta G = 0)$ ← يكون النظام في حالة اتزان.

12.1 الخصائص الفيزيائية والكيميائية لأوراق التين الأخضر ودورها في تثبيط التآكل

يتمتع مستخلص المائي بتركيب كيميائي يساعد بشكل كبير في منع تآكل الفولاذ، حيث يعمل كمثبط طبيعي وصديق للبيئة مقارنة بالطرق التقليدية. تعود فعالية هذا المستخلص إلى المركبات العضوية التي يحتوي عليها، والتي تمتلك القدرة على الامتصاص على سطح الفولاذ، مما يؤدي إلى تكوين طبقة واقية تمنع حدوث التآكل. تدعم هذه العملية تقنيات كهروكيميائية مختلفة ونماذج نظرية، مما يثبت قدرة المستخلص على العمل كمثبط مختلط في ظروف متعددة، حيث يؤثر على التفاعلات الأنودية والكاثودية معًا، مما يقلل

من معدل التآكل بشكل فعال [52].

تلعب الخصائص الفيزيائية والكيميائية لأوراق التين الأخضر، دورًا كبيرًا في فعاليتها كمثبطات للتآكل. تحتوي هذه الأوراق على ذرات غير متجانسة مثل الكربون (C) والنيتروجين (N) والأكسجين (O) مما يعزز قدرتها على الامتصاص على الأسطح المعدنية. بالإضافة إلى ذلك، فإن وجود المجموعات الوظيفية، مثل مجموعات الهيدروكسيل (OH^-) يساعد في تكوين طبقة واقية على المعدن، مما يقلل من معدل التآكل ويحمي السطح من العوامل الخارجية [53].

1.12.1 التركيب الكيميائي

التركيب الكيميائي لأوراق تين الأخضر الذي يساعد بشكل كبير في منع تآكل الفولاذ يتمثل في :

- الذرات غير المتجانسة (*Heteroatoms*): يحتوي مستخلص أوراق التين الأخضر على الكربون (C) والنيتروجين (N) والأكسجين (O) والتي تلعب دورًا رئيسيًا في تثبيط التآكل. تساهم هذه الذرات في تعزيز عملية الامتصاص على الأسطح المعدنية، مما يساعد على تكوين طبقة واقية تقلل من تعرض المعدن للعوامل المؤدية إلى التآكل [53].

- المجموعات الوظيفية : (*Functional Groups*) يحتوي المستخلص على مجموعات الهيدروكسيل (OH) إلى جانب مجموعات وظيفية أخرى، مما يساعد في تشكيل غشاء وقائي على سطح المعدن. يؤدي هذا الغشاء إلى خفض معدل التآكل بشكل ملحوظ من خلال منع التفاعل المباشر بين المعدن والعوامل المؤكسدة [53].

- تحتوي أوراق التين كذلك على الفلافونويدات والتانينات والمركبات الفينولية، وهي معروفة بخصائصها المضادة للأكسدة.

- تعمل هذه المركبات على تشكيل طبقات واقية على سطح المعدن، مما يساعد في تقليل معدل التآكل.

- يساهم وجود هذه المركبات في تحسين آلية الامتصاص على المعدن، مما يؤدي إلى خفض معدلات التآكل بشكل فعال [54].

- يمكن لهذه الخصائص الكيميائية أن تعزز فعالية مستخلص أوراق التين الأخضر كمثبط طبيعي للتآكل في البيئات القاسية، مما يجعله خيارًا مستدامًا مقارنة بالمواد الكيميائية التقليدية.
- رغم أن فعالية مستخلص أوراق التين موثقة جيدًا، إلا أنه قد تتأثر بالظروف البيئية المختلفة ونوع المعدن المستهدف للحماية. لذلك، هناك حاجة إلى بحث إضافي لتحسين طرق الاستخلاص وتحديد التركيزات المثلى لزيادة الفعالية وتحسين التطبيق في البيئات الصناعية [55, 56].

13.1 خلاصة الفصل

التآكل هو تحدٍ كبير في العديد من الصناعات، لكن من خلال فهم أنواعه وآلياته وطرق الحماية منه، يمكن تقليل تأثيره بشكل كبير، مما يساهم في تقليل الخسائر الاقتصادية وضمان سلامة المنشآت والمعدات.

مثبطات التآكل العضوية تُعد مجالًا هامًا للبحث بسبب استخدامها الواسع في مختلف الصناعات. تعتمد فعاليتها بشكل كبير على استقرار الشيلات التي تتكون نتيجة للتفاعل بين جزيئات المثبط وسطح المعدن. تتميز جزيئات المثبطات العضوية بوجود مراكز خاصة تسمح بتكوين روابط مع سطح المعدن من خلال آليات نقل الإلكترونات. تعمل هذه المثبطات أساسًا عن طريق الامتصاص على سطح المعدن، حيث تقوم بإزاحة جزيئات الماء وإنشاء حاجز وقائي. [19].

الفصل 2

الدراسة التطبيقية للفعالية التثبيطية

1.2 مقدمة الفصل الثاني

في هذا الفصل سنوضح كيفية تحضير عينات الفولاذ والمحاليل التي تشمل المستخلص المائي لأوراق التين الأخضر وحمض الهيدروكلوريك (HCl). بالإضافة إلى ذلك سنشرح الطريقة المستخدمة لدراسة الفولاذ (C45) والتي تعتمد على تقنية الكتلة الضائعة كنهج أساسي في هذه الدراسة.

2.2 تعريف الفولاذ

تُشكل مشكلة التآكل عبئًا ماليًا كبيرًا على مستوى العالم، حيث تؤثر على العديد من الصناعات، التطبيقات المنزلية، والقطاعات العامة. هذه المشكلة تؤكد الحاجة إلى تعزيز التدابير لتحسين طرق مكافحة التآكل. تُعتبر استراتيجيات منع التآكل فعالة ولها قيمة اقتصادية عالية، حيث تُقدّر التكلفة السنوية للتآكل بحوالي (3 – 4%) من الناتج المحلي الإجمالي في الدول المتقدمة.

حيث يعتبر الفولاذ الكربوني المادة المفضلة في البناء عبر العديد من الصناعات، حيث إنه خيار اقتصادي أكثر من السبائك المقاومة للتآكل باهظة الثمن. يحتوي الفولاذ الكربوني عادةً على أقل من (1.5%) من الكربون مع وجود كميات صغيرة من المنغنيز والسيليكون والفوسفور والكبريت. ويتم تصنيفه إلى ثلاثة أنواع بناءً على نسبة الكربون:

- الفولاذ منخفض الكربون (أقل من 25% كربون).
- الفولاذ متوسط الكربون (25 – 70% كربون).
- الفولاذ عالي الكربون (70 – 105% كربون).

اختلاف نسبة الكربون يُؤثر على الخصائص الميكانيكية مثل القوة، والليونة، والصلابة. [57].

1.2.2 استخدامات الفولاذ الكربوني

هنا نستعرض استخدام الفولاذ الكربوني كأحد أكثر المواد استخدامًا في إنشاء خطوط الأنابيب التي تنقل النفط والغاز. العديد من مشكلات التآكل في صناعات النفط والغاز مرتبطة بشروط تعرض خطوط الأنابيب، وهو ما يحدد اختيار نوع الفولاذ الكربوني المناسب. يتم أحيانًا إضافة كميات صغيرة من عناصر السبائك مثل الكروم (Cr) والنيكل (Ni) إلى الفولاذ الكربوني لجعله أكثر ملاءمة لهذا القطاع. تؤثر التركيبة الكيميائية وعمليات التصنيع على خصائص الفولاذ مثل النسيج (ساخن أو بارد)، حجم الحبيبات، العيوب، وكثافة الخلل، مما يحدد مدى استخداماته [57].

لفولاذ الكربوني عرضة للتآكل في ظروف التشغيل الصناعي، لذا فإن ضمان وجود تقنيات فعالة لمكافحة التآكل ضروري لعمليات آمنة وفعالة من حيث التكلفة، وهو ما يوسع نطاق استخدام الفولاذ الكربوني. في قطاع النفط والغاز، قد تُسهم مكونات معينة في النفط الخام، مثل النيتروجين، الكبريت، والراتنجات العطرية، في تقليل التآكل بشكل طبيعي. ومع ذلك، فإن الطريقة الأكثر شيوعًا لمنع التآكل تتمثل في استخدام مثبطات التآكل العضوية أو غير العضوية، التي تشكل طبقة واقية سلبية على سطح الفولاذ [57].

3.2 الاجهزة المستعملة

- جهاز الصقل الميكانيكي
- الاوراق الكاشطة
- الميزان الالكتروني ذو لحساسية 0.0001
- جهاز الماسح الالكتروني (MEB)
- فرن التجفيف
- قدم قنوية الكترونية
- جهاز التسخين و الرج الكهربائي

4.2 المواد المستخدمة

- حمض الهيدروكلوريك بتركيز (37% HCl)
- الماء المقطر
- أوراق التين الاخضر

5.2 تحضير العينات

1.5.2 العينات المدروسة

العينات عبارة عن سبائك الفولاذ متوسط الكربون (C45) و العناصر الداخلة في تركيبه موضحة في الجدول 1.2 .

جدول 1.2: النسب المئوية للعناصر المكونة للفولاذ C45 المستعمل .

المكونات	%S	P%	Mo%	Ni%	Cr%	Si%	C%	%Mn
النسبة المئوية	0.045	0.045	0.1	0.4	0.4	0.4	0.45	0.80

2.5.2 قطع العينات

قطعنا عدة مكعبات مختلفة الاحجام (عدم الدقة) باستخدام المنشار عن طريق القطع البارد .

3.5.2 الصقل الميكانيكي

تم صقل العينات مختلفة الابعاد والحجوم باستخدام آلة الصقل المزودة بالورق الكاشط والماء الذي يتم سكبه طوالاً مدة الصقل .

يتم الانتقال من ورق كاشط الى اخر تدريجيا بداية من 80, 180, 240, 400, 600, 800, 1000, 1200, حيث كل ما زاد رقم الورق الكاشط قلت خشونته وبتدوير العينة بزاوية 90° مع مراعاة ان تمحى كل الاخاديد الناتجة عن الورق السابق حتى نتحصل على سطح كالمرآة وبعد الانتهاء من كل مرحلة كانت العينات تغسل بالماء المقطر لتنظيف السطح وازالت الشوائب الغير مرغوب فيها تجفف بعد ذلك جيدا و تحفظ في مكان بعيد عن الرطوبة لتفادي حدوث تآكل لها حيث يوضح الشكل 1.2 جهاز الصقل الميكانيكي



شكل 1.2: جهاز الصقل الميكانيكي

6.2 تحضير المحاليل

1.6.2 تحضير الوسط الآكل (محلول حمض الهيدروكلوريك HCl)

تم تحضير محاليل حمض الهيدروكلوريك العدوانية بتخفيف (37%) من حمض الهيدروكلوريك بالماء المقطر للحصول على (1M HCl) .

2.6.2 تحضير المحلول الام (المثبط)

يتم تحضير محلول المثبط الاخضر (اوراق التين الاخضر) على النحو التالي:

1. قطف اوراق التين الاخضر قبل جفافها
2. غسل اوراق التين الاخضر جيدا تحت الماء الجاري ثم تجفيفها في الظل لعدة أسابيع (لتسهيل عملية السحق وعدم تعفن الاوراق) .
3. تطحن اوراق التين الجافة بواسطة مهراس حتى نتحصل على مسحوق ناعم جدا .
4. وزن 40 غرام من مسحوق اوراق التين .
5. نضع العينة في بيشر حجمه 2 لتر ونضيف الماء المقطر نحركه جيدا حتى يتمازج الخليط ونقوم بتغطيته بغلف شفاف لتفادي تفاعله مع الجو

6. تسخين عند 60 درجة مئوية لمدة ساعتين تقريبا
 7. بعد ساعتين من التسخين ، نتركه يبرد
 8. وبعد ذلك نقوم بترشيحه بورق الترشيح لازالة اي جزيئات لاوراق التين الموجود في المستخلص
 9. تحضير تراكيز مختلفة للمثبط وهي (0,02g/l,0.2g/l,0.5g/l)
 10. نضع العينة في بيشر يحتوي على (400ml) من الماء المقطر نحركه جيدا حتى يتمازج الخليط ونقوم بتغطيته بغلف شفاف لتفادي تفاعله مع الجو
- هذا ما يظهره الشكل 3.2 الذي يوضح اهم الخطوات المتبعة لتحضير المستخلص المائي لاوراق التين الاخضر



شكل 2.2: أهم الخطوات المتبعة في تحضير المستخلص المائي لاوراق التين الاخضر

7.2 تقنيات دراسة معدل التآكل

معدل التآكل هو مقياس لمدى سرعة تدهور المادة (عادة معادن) بسبب العوامل البيئية يتم قياسه من خلال تحديد كمية المادة الضائعة أو المفقودة لكل وحدة زمنية على سطح محدد. يساعد هذا القياس في فهم مدى تآكل المادة ويعتبر أساسيًا للتنبؤ بعمر الهياكل والمعدات [58] .

1.7.2 تقنية الكتلة الضائعة

طريقة فقدان الوزن (الطريقة الوزنية) : تُعد هذه الطريقة من أكثر الطرق شيوعًا لقياس معدلات التآكل (W_{corr}) لأنها بسيطة ولا تتطلب قياسات كهربائية. [59] .

وكذلك، فهي تعتبر طريقة تدميرية لأنها تعتمد على قياس الفرق في وزن العينة قبل وبعد التآكل [60]

تعمل هذه الطريقة وفقا لي :

- قياس الوزن الأولي ($W(i)$): يتم وزن العينة قبل تعريضها للوسط التآكلي.
- لتعرض للتآكل: يتم غمر العينة في بيئة تآكلية لفترة محددة من الزمن (t)
- قياس الوزن النهائي ($W(f)$): يتم وزن العينة بعد انتهاء فترة الغمر، بعد تنظيفها ولضمان إزالة الشوائب الغير مرتبطة بالتآكل الفعلي
- حساب معدل التآكل (W_{corr}) باستخدام المعادلة :

$$(2.1) \quad W_{corr} = \frac{W_i - W_f}{S \times t}$$

مساحة الجزء المغمور تحسب بعلاقة التالية :

$$(2.2) \quad S = (2 \times h \times e) + (2 \times h \times L) + (2 \times L \times e)$$

معدل التآكل : $W_{corr}(g/cm^2.h)$

$S(cm^2)$: حيث تمثل المساحة : الارتفاع (h) العرض (e) الطول (L)

يتم تقييم الكفاءة تثبيطية للمركب (E%) عن طريق قياس معدلات التآكل للنظام الكهروكيميائي في غياب المثبط ووجوده .

$$(2.3) \quad E = \frac{W_{corr0} - W_{corr_{inh}}}{W_{corr0}} \times 100$$

حيث (W_{corr0}) و ($W_{corr_{inh}}$) هما على التوالي قيم معدل التآكل في غياب المثبط (المانع) ووجوده

2.7.2 مبدأ عمل تقنية الكتلة الضائعة

تعتبر تقنية الكتلة الضائعة من أسهل التقنيات وأشهرها فهي غير مكلفة فتتطلب هذه الطريقة كل من قياس فقدان كتلة ميكرومتر لمعرفة مقدار الكتلة الضائعة ويتم تنفيذها وفق الخطوات التالية :

- تحضير العينة: يتم وزن العينة أولاً وحساب مساحتها. ثم يتم تغطية الأجزاء التي لا نرغب في تعريضها للهجوم الكيميائي العدواني.
- الغمر في المحلول الحمضي : تُغمر العينة في 60 مل من المحلول الحمضي وتُترك لفترة زمنية محددة
- اخراج العينة ومعالجتها : بعد انتهاء المدة، تُزال العينة من المحلول، وتُغسل بالماء المقطر، ثم تُترك لتجف.
- قياس التآكل : يتم وزن العينة بعد التجفيف لحساب مقدار الكتلة المفقودة وتحديد معدل التآكل.
- تكرار التجربة مع المثبط: تُعاد التجربة ولكن مع إضافة تركيزات مختلفة من المثبط إلى الوسط الحمضي لمراقبة تأثيره في تقليل التآكل

8.2 طرق التوصيف

1.8.2 المجهر الإلكتروني الماسح (MEB)

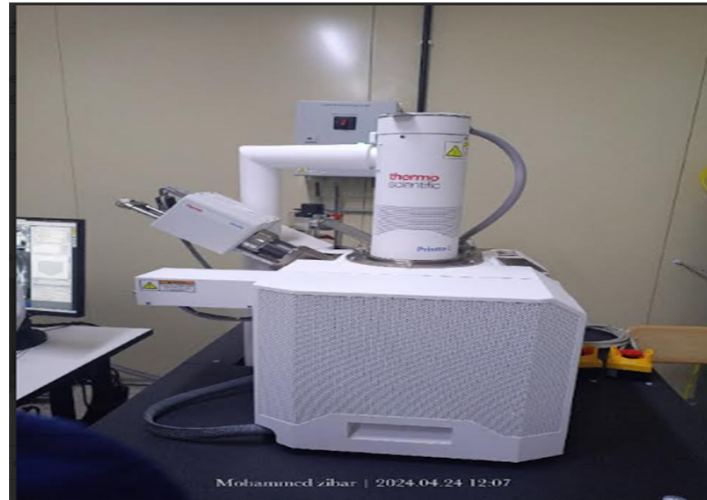
يُعد المجهر الإلكتروني الماسح (MEB) أداة متقدمة ومتعددة الاستخدامات تُستخدم لدراسة خصائص السطح للمواد. يعمل عن طريق توجيه إلكترونات عالية الطاقة نحو العينة، ثم يتم تحليل الإلكترونات أو الأشعة السينية الناتجة للحصول على معلومات تفصيلية [61].

- يعتمد على حزم إلكترونية بدلاً من الضوء، مما يوفر قدرة تكبير أعلى بكثير تصل إلى 300,000 مرة أو حتى 1,000,000 مرة في بعض النماذج المتقدمة
- يُنتج صوراً تفصيلية بتدرجات الرمادي، مما يوفر دقة أعلى بكثير مقارنةً بالمجهر البصري.
- يُستخدم مع مطياف الأشعة السينية المشتتة للطاقة (EDS) الذي يساعد في تحديد التركيب العنصري للمواد.

- يوفر المجهر الإلكتروني بيانات لا يمكن الحصول عليها من الاختبارات المخبرية التقليدية.
 - يمكن للجهاز فحص عينات بقطر يصل إلى 200 مم وارتفاع 80 مم.
 - يستطيع المجهر الإلكتروني تحليل المواد العضوية وغير العضوية الصلبة، بما في ذلك المعادن والبوليمرات.
- رغم فعاليته العالية، فإن المجهر الإلكتروني أكثر تكلفة ويتطلب صيانة معقدة [62].

يساعد (MEB) الباحثين في الحصول على معلومات نوعية حول المادة، بما في ذلك نسيجها، شكلها، ترتيب ذراتها، وتحديد العناصر المكونة لها ونسبها النسبية. لذا، يُعتبر (MEB) أداة أساسية في دراسة وتحليل المواد بدقة عالية [61].

حيث يظهر الشكل 3.2 جهاز المجهر الإلكتروني الماسح



شكل 3.2: المجهر الإلكتروني الماسح (MEB).

2.8.2 المكونات الرئيسية للمجهر الإلكتروني الماسح (MEB)

لمحة عن المكونات الرئيسية للمجهر الإلكتروني الماسح (MEB) [62].
مدفع الإلكترونات : يستخدم (MEB) مصدرًا يولد إلكترونات عالية الطاقة، يُعرف باسم مدفع الإلكترونات، وهو ضروري لبدء عملية التصوير.

عمود الإلكترونات : تتحرك الإلكترونات للأسفل عبر عمود يحتوي على عدسات كهرومغناطيسية. تعمل هذه العدسات على تركيز وتوجيه حزمة الإلكترونات نحو العينة. نظام الانحراف : تساعد ملفات المسح في التحكم في حركة حزمة الإلكترونات، مما يسمح لها بمسح العينة بشكل منتظم. كاشف الإلكترونات : يحتوي المجهر الإلكتروني على كاشفات تلتقط الإلكترونات المرتدة والإلكترونات الثانوية، وهي ضرورية لإنتاج صور دقيقة ومفصلة. حجرة العينة : تعتبر الحجرة المكان الذي يتم فيه وضع العينة من أجل التصوير، حيث توفر الظروف المناسبة لتفاعل الإلكترونات معها. نظام الحاسوب : يُستخدم الحاسوب بشاشة عرض لعرض الصور الممسوحة ضوئياً، بينما تتيح لوحة المفاتيح للمستخدم التحكم في وظائف حزمة الإلكترونات.

9.2 ملخص الفصل

يُمثل هذا الفصل أساساً علمياً ومنهجياً لفهم تفاعل المعادن مع البيئات المختلفة، وتحديد العوامل المؤثرة على التآكل، واستخدام أدوات التوصيف لتحليل النتائج بدقة، مما يساهم في تطوير استراتيجيات فعالة لحماية المعادن من التآكل وتحسين أدائها في التطبيقات العملية.

الفصل 3

مناقشة و تفسير النتائج

1.3 مقدمة

في هذا الفصل يتم دراسة العوامل التي تؤثر بشكل واضح على تآكل الفولاذ في وسط حمض الهيدروكلوريك. تشمل هذه العوامل تركيز المثبط، مدة الغمر، ودرجة الحرارة. بالإضافة إلى ذلك، تم إجراء سلسلة من التجارب بهدف تحديد معدل التآكل والكفاءة التثبيطية تحت ظروف تجريبية مختلفة باستخدام تقنية قياس الكتلة الضائعة. كما تم تفسير نتائج الفحص البنيوي بواسطة المجهر الإلكتروني الماسح (MEB) لتحليل سطح الفولاذ ودراسة تأثير العوامل المختلفة عليه.

2.3 دراسة قياسات الكتلة الضائعة

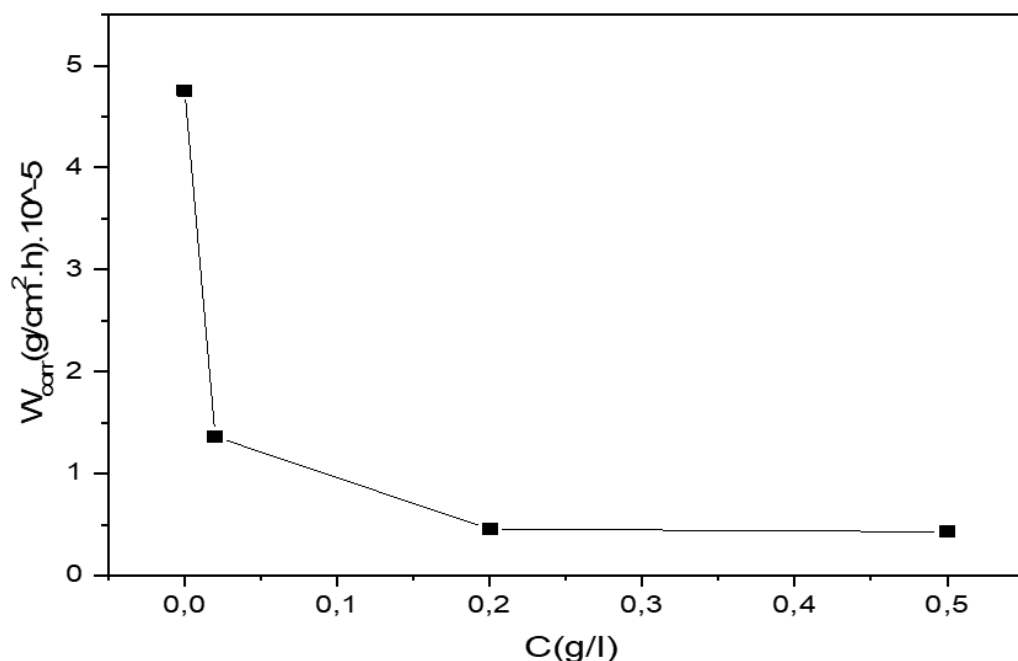
1.2.3 تأثير التركيز

أجريت دراسة الكتلة الضائعة لعينات الفولاذ (C45) باستخدام محلول الهيدروكلوريك (HCl) ذو التركيز (1M) في وجود وغياب المثبط وتم تحديد معدل التآكل والكفاءة تثبيطية بعد غمر العينات خلال 24 ساعة عند درجة حرارة الغرفة 298K والنتائج موضحة في الجدول التالي 1.3

جدول 1.3: تغيرات معدل التآكل والكفاءة تثبيطية لفولاذ (C45) في (1M) من (HCl) بدلالة تركيز المثبط

$C(g/l)$	$S(cm^2)$	$(\Delta m(g))$	$W_{corr}(g/cm^2.h)$	$t(h)$	$E(\%)$
0	17.0772	0.0195	$4,7578 \times 10^{-5}$	24	0
0.02	16.8131	0.0055	1.3630×10^{-5}	24	71.35
0.2	17.3353	0.0019	0.4566×10^{-5}	24	90.40
0.5	17.4822	0.0018	0.4290×10^{-5}	24	90.98

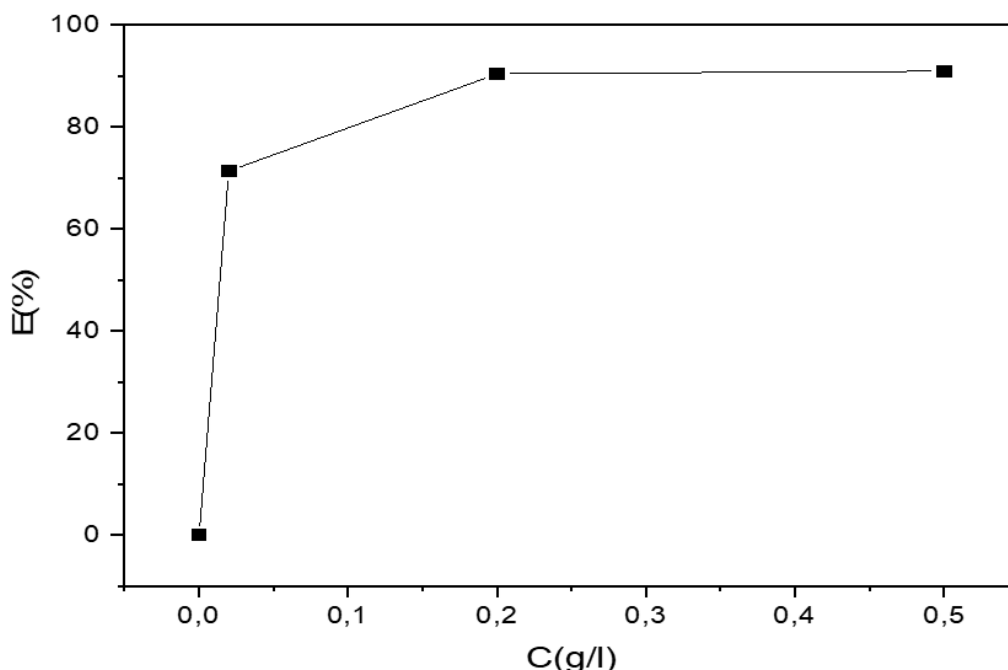
يوضح الشكل 1.3 تغيرات سرعة التآكل بدلالة تركيز المثبط



شكل 1.3: تغير سرعة التآكل بدلالة تركيز المثبط .

يوضح الجدول استخدام المستخلص المائي لأوراق التين الاخضر كمثبط للتآكل لدراسة معدل التآكل و الكفاءة التثبيطية خلال فترة 24 ساعة وتحت تراكيز مختلفة من المثبط

- عند غياب المثبط كان معدل التآكل مرتفعاً جداً، حيث سجل ($4.7578 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}$) وذلك نتيجة للهجوم العدواني لحمض الهيدروكلوريك على سطح المعدن .
- مع إضافة (0.02 g/L) من المستخلص المائي لأوراق التين الاخضر ، لوحظ انخفاض واضح في معدل التآكل إلى ($1.3630 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}$) مما أدى إلى تحسن ملحوظ في الكفاءة التثبيطية التي بلغت (71.35%).
- عند زيادة التركيز إلى (0.5 g/l) كان هناك انخفاض شديد في معدل التآكل الذي وصل إلى ($0.4290 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}$) بينما ارتفعت الكفاءة التثبيطية إلى (90.98%) مما يدل على فعالية المستخلص في مقاومة التآكل.



شكل 2.3: تغير الكفاءة تثبيطية بدلالة تركيز المثبط .

تحليل النتائج يوضح أن استخدام المستخلص المائي لأوراق التين الاخضر كمثبط للتآكل كان فعالاً في تقليل معدل التآكل وزيادة الكفاءة التثبيطية. بناءً على القياسات خلال فترة 24 ساعة وتحت تراكيز مختلفة .

الخلاصة: كلما زاد تركيز المستخلص المائي، تناقص معدل التآكل وازدادت الكفاءة التثبيطية. يفسر هذا السلوك على أنه نتيجة لامتماز جزيئات المثبطات على سطح المعدن، مما يؤدي إلى تكوين طبقة ثنائية الأبعاد من المثبط على السطح الفولاذي. هذه الطبقة تعمل كحاجز يمنع التلامس المباشر بين سطح المعدن والبيئة العدوانية، وبالتالي يساهم في تقليل التآكل. بفضل هذه الحماية، تتحقق كفاءة عالية للمستخلص كمثبط للتآكل، مما يجعله فعالاً في إطالة عمر المعدن وتقليل تأثير العوامل الخارجية عليه [63, 64].

يلاضافة الى ذلك يفسر هذا السلوك إلى حدوث تفاعل قوي بين المثبط وسطح المعدن. هذا التفاعل يؤدي إلى امتزاز الجزيئات على سطح المعدن، مما يُشكّل طبقة واقية تقلل من تعرض المعدن للبيئة العدوانية، [65].

المواد الكيميائية النباتية الموجودة في المستخلص تتفاعل مع سطح الفولاذ عن طريق الامتزاز،

مما يؤدي إلى تكوين طبقة واقية. هذه الطبقة تغطي المواقع النشطة على سطح المعدن، مما يحد من تعرضها للعوامل المسببة للتآكل. وبهذا، يعمل المستخلص كحاجز يمنع حدوث التفاعل الكيميائي الذي يؤدي إلى تآكل المعدن، مما يعزز مقاومته واستدامته [66].

2.2.3 تأثير درجة الحرارة

لفهم كيفية تفاعل المادة في بيئة عدوانية، وكذلك طبيعة العلاقة بين المعدن والمثبت في تلك البيئة، كان من الضروري دراسة تأثير درجة الحرارة على عملية التآكل لذلك، تم إجراء التجارب في درجات حرارة مختلفة ($328K, 318K, 308K, 289K$) حيث تم غمر العينات في حمض الهيدروكلوريك لمدة ساعتين، وذلك في حالي غياب المثبط ووجوده بتركيز ($0.5g/L$) الهدف من هذه الدراسة كان تحديد معدل الهجوم الكيميائي للعينات كدالة لدرجة الحرارة، والنتائج المدونة في الجدول توضح تأثير الحرارة على كفاءة التثبيطية في تقليل معدل التآكل. يوضح الجدولين 3.3 و 2.3 تغيرات سرعة التآكل بدلالة الحرارة في غياب المثبط علي التوالي

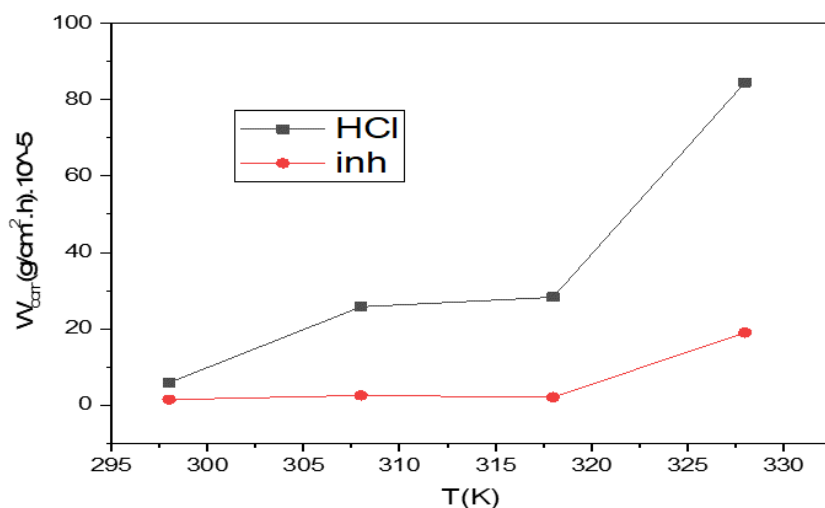
جدول 2.3: تغيرات سرعة التآكل والكفاءة تثبيطية بدلالة درجة الحرارة في غياب المثبط .

$T(K)$	$t(h)$	$\Delta m(g)$	$S(cm^2)$	$W_{corr}(g/cm^2.h)$
298	2	0.0021	17.7816	5.9049×10^{-5}
308	2	0.0088	17.0780	25.7641×10^{-5}
318	2	0.0095	16.8014	28.2714×10^{-5}
328	2	0.0290	17.1518	84.5392×10^{-5}

جدول 3.3: تغيرات سرعة التآكل والكفاءة تثبيطية بدلالة درجة الحرارة في وجود المثبط .

$T(K)$	$\Delta m(g)$	$S(cm^2)$	$T_{corr}(g/cm^2.h)$	$E(\%)$
298	0.0005	17.3011	1.4449×10^{-5}	75.53
308	0.0008	15.5041	2.5799×10^{-5}	89.98
318	0.0007	16.7481	2.0897×10^{-5}	92.60
328	0.0066	17.3521	19.0178×10^{-5}	77.50

يظهر منحنى الشكل 3.3 العلاقة بين معدل التآكل ودرجة الحرارة في حالي وجود المثبط وغيابه بتركيز ($0.5g/L$).



شكل 3.3: تغير السرعة بدلالة درجة الحرارة في وجود وغياب المثبط

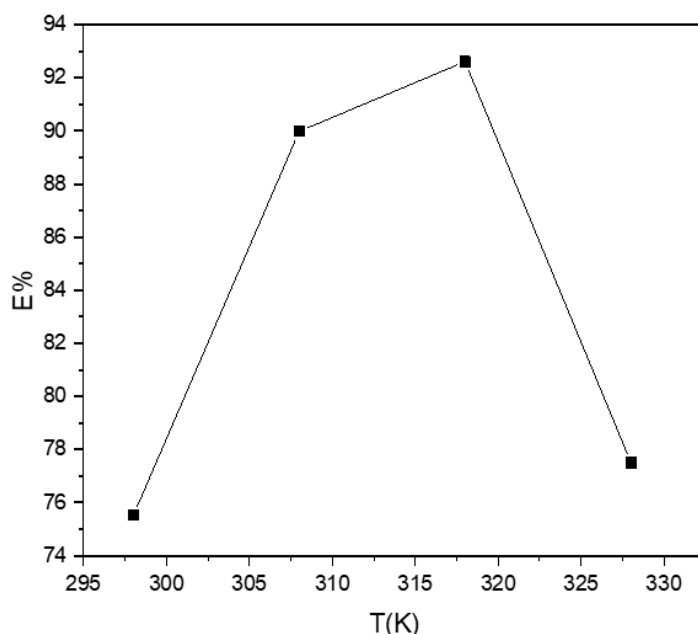
- في غياب المثبط: لوحظ أن معدل التآكل يزداد عند ارتفاع درجة الحرارة، حيث ارتفع من $(5.9049 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2.\text{h})$ الى $(19.0178 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2.\text{h})$

يعود هذا إلى :

- تسارع التفاعلات الكيميائية بفعل ارتفاع الحرارة.
- تقليل ذوبان الأكسجين، مما يسمح بزيادة التفاعلات الكاثودية.
- انخفاض حجم المحلول مع ارتفاع درجة الحرارة مما يعزز انتشار أيونات الحديد ويؤدي إلى نشاط أكبر على سطح المعدن.
- عند إضافة المثبط: كان هناك انخفاض ملحوظ في معدل التآكل.
- وذلك لأن:

- جزيئات المثبط تتوضع على سطح الفولاذ، مما يشكل طبقة رقيقة واقية. هذه الطبقة تقلل تعرض المعدن لحمض الهيدروكلوريك، وبالتالي تحد من تأثيره التآكلي

النتائج توضح أن درجة الحرارة تؤثر على معدل التآكل، ولكن وجود المثبط يساعد في تقليل تأثيرها العدواني على المعدن. [67].



شكل 4.3: تغير الكفاءة تثبيطية بدلالة درجة الحرارة .

تحليل الشكل 4.3 يوضح زيادة مستمرة في الكفاءة تثبيطية للمستخلص مع زيادة درجة حرارة حيث بلغت (92.60%) ومع ارتفاع درجة الحرارة،

– لوحظ انخفاض في الكفاءة التثبيطية عند درجة الحرارة العظيمة المقدرة بـ (328K) حيث قدرة كفاءته بـ (77.50%)

السبب في ذلك يعود إلى عدم استقرار جزيئات المثبط عند درجات حرارة أعلى، حيث تتأثر آلية الامتزاز على سطح المعدن، مما يقلل من فعالية الحماية ضد التآكل. هذا يشير إلى أن درجة الحرارة العالية لها تأثير سلبي على قدرة المثبط في الحفاظ على كفاءته، حيث تفقد الجزيئات المثبطة فعاليتها تدريجياً مع زيادة الحرارة.

بالتالي، يمكن القول إن الفعالية التثبيطية للمستخلص مرتبطة بدرجة الحرارة، حيث يكون المثبط أكثر فاعلية عند درجات حرارة معتدلة، بينما تضعف حمايته عند درجات الحرارة

المرتفعة [68].

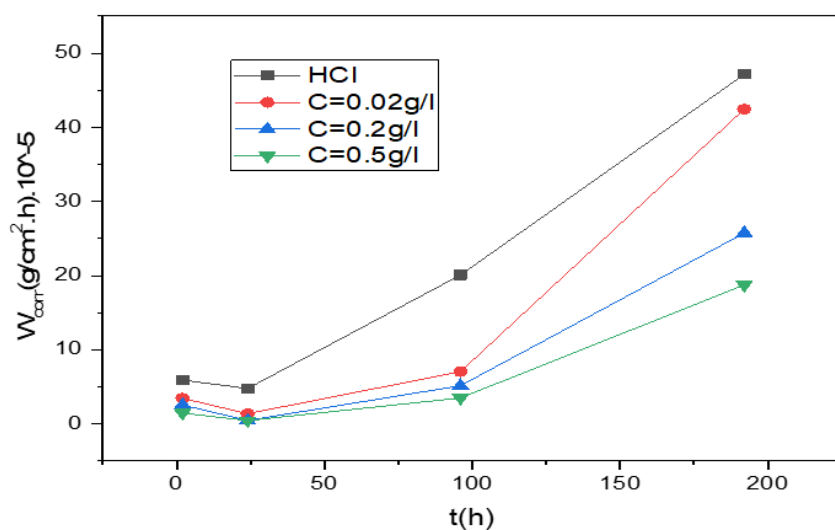
3.2.3 تأثير زمن الغمر

زمن الغمر يؤثر بشكل كبير على فعالية المثبط وعلى معدل التآكل. في هذه التجربة، تم غمر عينات الفولاذ لفترات مختلفة (2، 24، 96، 192 ساعة)، وذلك في حالي وجود المثبط وغيابه وبتركيزات مختلفة، عند درجة حرارة (298K) .

يوضح الجدول 4.3 تغيرات سرعة التآكل وكفاءة تثبيطية بدلالة درجة الحرارة في وجود المثبط

جدول 4.3: تغيرات سرعة التآكل والكفاءة تثبيطية بدلالة درجة الحرارة في وجود المثبط .

$C(g)$	$t(h)$	$\Delta m(g)$	$S(cm^2)$	$W_{corr}(g/cm^2.h)$	$E(\%)$
0	2	0.0021	17.7816	5.9049×10^{-5}	—
0	24	0.0195	17.0772	4.7578×10^{-5}	—
0	96	0.3264	16.9396	20.0713×10^{-5}	—
0	192	1.5767	17.4164	47.1508×10^{-5}	—
0,02	2	0.0012	17.4311	3.4421×10^{-5}	41.70
0.02	24	0.0055	16.8131	1.3630×10^{-5}	71.3523
0.02	96	0.1155	17.1020	7.0349×10^{-5}	64.94
0.02	192	1.3936	17.0959	42.4565×10^{-5}	09.95
0.2	2	0.0009	17.7315	2.5378×10^{-5}	57.0221
0.2	24	0.0019	17.3353	0.4566×10^{-5}	90.40
0.2	96	0.0814	16.5317	5.1290×10^{-5}	74.44
0.2	192	0.8701	17.6061	25.7397×10^{-5}	45.41
0.5	2	0,0005	17.3011	1.4449×10^{-5}	75.53
0.5	24	0.0018	17.4822	0.4290×10^{-5}	90.98
0.5	96	0.0550	16.4352	3.4859×10^{-5}	82.63
0.5	192	0,6189	17.2031	18.7375×10^{-5}	60.26



شكل 5.3: تغير معدل التآكل بدلالة زمن الغمر .

يُظهر منحنى الشكل 5.3 تغير معدل التآكل بدلالة زمن الغمر، في حالتي غياب المثبط ووجوده

في غياب المثبط: لوحظ ارتفاع واضح في معدل التآكل وذلك بسبب

– كون سطح المعدن نشطًا في الوسط العدواني.

– تعرضه المباشر للتفاعل الكيميائي مما يؤدي إلى تلف سطح المعدن تدريجيًا.

عند إضافة مستخلص أوراق تين الاخضر .

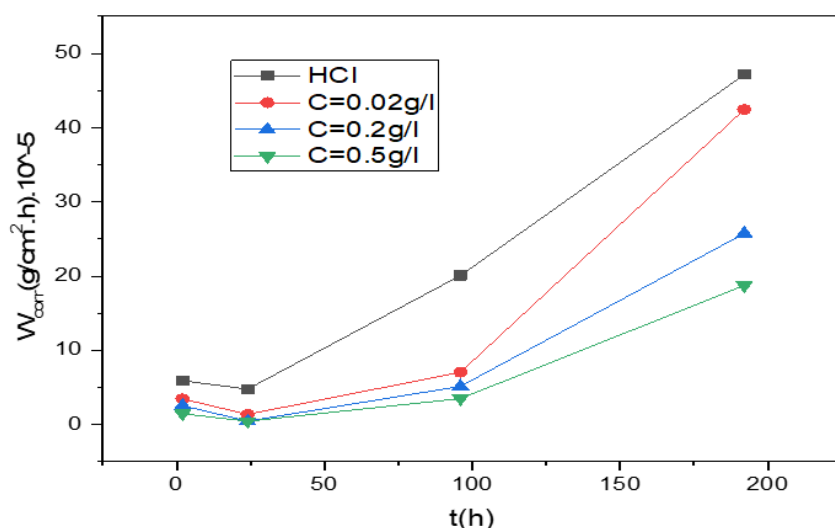
– في الفترات الزمنية القصيرة (2 و 24 ساعة): بدأ تأثير المثبط يظهر، لكنه لم يكن واضحًا جدًا، حيث بدأت الجزيئات تتوضع على سطح المعدن.

– عند الوصول إلى 96 و 192 ساعة: أصبح المثبط أكثر تأثيرًا، حيث تشكّلت طبقة واقية أكثر استقرارًا، مما أدى إلى انخفاض معدل التآكل فهذا يدل على أن مدة التعرض للمثبط تعزز فعاليته في مقاومة التآكل

سبب هذه الزيادة بتمثل في :

- تراكم جزيئات المثبط على سطح المعدن.
- تشكيل طبقة واقية تمنع تأثير الهجوم الحمضي [69].

الخلاصة: زمن الغمر يؤثر على فعالية المثبط، حيث كلما زاد الوقت، زاد تراكم جزيئاته، مما يعزز الحماية ويقلل معدل التآكل .



شكل 6.3: تغير الكفاءة تثبيطية بدلالة زمن الغمر .

يُظهر الشكل 6.3 تغير الكفاءة تثبيطية مع زمن الغمر، حيث تم تسجيل اتجاه متزايد للكفاءة تثبيطية من 2 ساعة إلى 24 ساعة، ويعود ذلك إلى:

- تراكم جزيئات المثبط على سطح المعدن بشكل تدريجي.
- تشكّل طبقة واقية تمنع تأثير التآكل الحمضي على سطح المعدن.

لكن بعد 24 ساعة وحتى 192 ساعة، لوحظ اتجاه تنازلي للكفاءة التثبيطية، ويرجع ذلك إلى:

- تفاعل جزيئات المثبط مع الأيونات، مما يؤدي إلى فقدان بعض الجزيئات المثبطة بمرور الوقت.

- استنفاد جزيئات المثبط الموجودة في النظام، مما يقلل تدريجياً من فعاليتها.

- تكوين روابط تنسيق بين ذرات المعدن والمثبط، مما يؤثر على ثبات الطبقة الواقية ويقلل من تأثيرها التنشيطي.

بالتالي، يظهر أن الكفاءة تثبيطية تكون مرتفعة في الساعات الأولى من الغمر، لكنها تتراجع تدريجياً مع مرور الوقت بسبب التفاعلات الكيميائية التي تؤثر على استقراره تم تسجيل أعلى كفاءة تثبيطية لمستخلص أوراق التين الاخضر عند مرور 24 ساعة بتركيز (0.5 g/l) حيث بلغت (90.98%). هذا يشير إلى أن المثبط يعمل بأقصى فعاليته خلال هذه الفترة الزمنية، حيث تتراكم جزيئات المثبط على سطح المعدن وتشكل طبقة واقية قوية ضد تأثير التآكل الحمضي، مما يعزز حماية المعدن ويقلل بشكل كبير من معدل التآكل.

4.2.3 تحديد طاقات التنشيط

لفهم الخواص الحركية لعملية التآكل، يتم دراسة طاقة التنشيط والإنتالبي والانتروبي التنشيطي بناءً على تأثير درجة الحرارة.

تعتمد هذه الدراسة على معادلة أرينيوس (*Arrhenius equation*) التي تربط بين سرعة التآكل ودرجة الحرارة، مما يسمح باستخراج القيم الحركية.

فمعادلة أرينيوس تصف كيف يتغير ثابت المعدل (k) للتفاعل مع درجة الحرارة (T) تُكتب المعادلة على النحو التالي:

$$(3.1) \quad [k = Ae^{-Ea/k_B T}]$$

حيث:

- (A) هو معامل أرينيوس (أو عامل التكرار)، الذي يمثل احتمالية تصادم جزيئات المواد المتفاعلة بطريقة ناجحة تؤدي إلى حدوث التفاعل.

- (Ea) هي طاقة التنشيط، أي الحد الأدنى من الطاقة اللازمة لبدء التفاعل.

– (k_B) هو ثابت بولتزمان.

– (T) هي درجة الحرارة بالكلفن.

بما أن A يُفترض أنه مستقل عن درجة الحرارة، توضح المعادلة أن درجة الحرارة وطاقة التنشيط تؤثران بشكل كبير على معدل التفاعل. لتحديد Ea ، يقوم العلماء برسم $\ln(k)$ مقابل $1/T$ وهو ما يُعرف باسم مخطط أرينيوس يؤدي هذا إلى ظهور خط مستقيم يكون ميله

$$(3.2) \quad a = Ea/K_B$$

من خلال تحليل هذا الميل، يمكن تقدير طاقة التنشيط، والتي غالبًا ما تكون مرتبطة بالحاجز الطاقوي الذي يجب التغلب عليه لكي يحدث التفاعل. يُعتبر فهم Ea مهمًا لدراسة آليات التفاعل، حيث يساعد في معرفة كمية الطاقة المطلوبة لحدوث العملية، مما يمكن أن يوجه الكيميائيين لتحسين شروط التفاعل أو تصميم المحفزات.

من بين اهم العوامل المؤثرة على الديناميكية الحرارية هي :

– حرارة الامتزاز: تشير إلى كمية الحرارة المنبعثة أو الممتصة عندما تلتصق الجزيئات بسطح ما.

– طاقة الامتزاز: هي إجمالي الطاقة المرتبطة بعملية الامتزاز.

– طاقة التنشيط: تمثل الحد الأدنى من الطاقة اللازمة لحدوث الامتزاز.

هذه المعايير الثلاثة مترابطة ومهمة جدًا في ديناميكيات الامتزاز، حيث تساعد الباحثين على فهم كيفية تفاعل المواد، سواء في عمليات التنقية أو التحفيز أو فصل المواد في الصناعات المختلفة [69, 70].

على الرغم من تطور الأدوات والأساليب العلمية، لا تزال بعض المفاهيم النظرية تُعرض بشكل غير واضح أو تفتقر إلى الدقة في الأدبيات العلمية [71].

5.2.3 الدراسة التجريبية

هذه الدراسة تبحث في تأثير درجة الحرارة على تآكل الفولاذ C45 ضمن نطاق $298K$ إلى $328K$. النقاط الأساسية:

- تم قياس طاقة التنشيط (Ea) لتحديد مدى تأثير الحرارة على معدل التآكل.
- تم أيضًا تحديد قيم الإنتالبية التنشيطية (ΔH_{ads}^0) والانتروبي التنشيطي (ΔS_{ads}^0) في حالتي وجود وغياب المثبط.
- استخدمت المعادلة الأرينية ($Arrheniusequation$) لرسم العلاقة بين معدل التآكل ودرجة الحرارة.
- من خلال هذه العلاقة، تم حساب طاقة التنشيط (Ea) باستخدام النماذج الرياضية المناسبة.

$$(3.3) \quad \log(W_{corr}) = -(Ea/2.303.RT) + \log(A)$$

حيث:

- W_{corr} : يمثل معدل التآكل
- R : يمثل ثابت العام للغازات ($8.314 \text{ J.mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$)
- T : درجة الحرارة المطلقة ب (K)
- A : يمثل معامل ما قبل الاسي
- Ea : تمثل طاقة التنشيط
- (2.303): تمثل قيمة التحويل من اللوغاريتم الطبيعي (Ln) إلى اللوغاريتم العشري (Log)

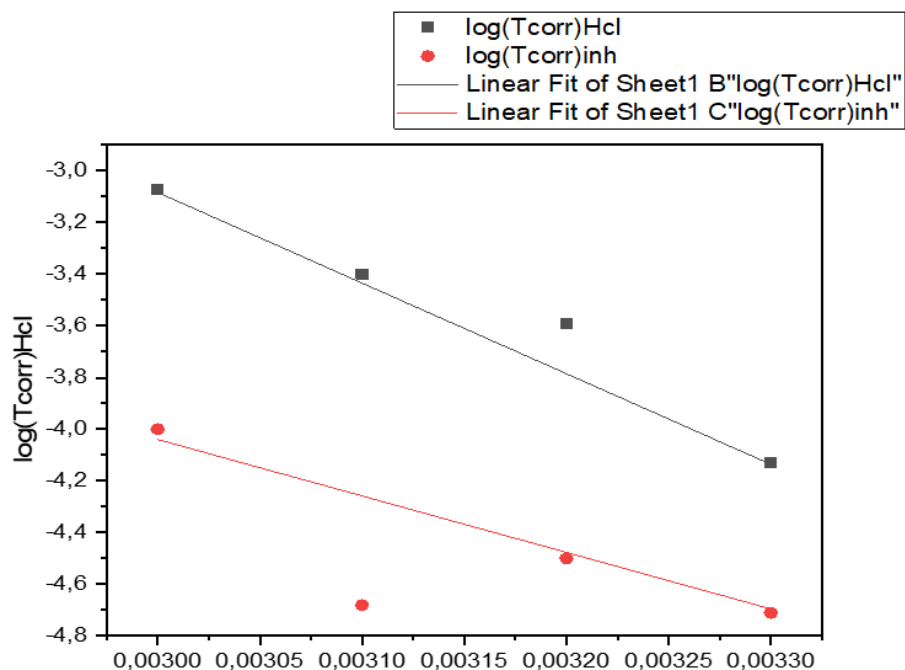
جدول 5.3: مستوى التآكل اللوغاريتمي (في وجود المثبط وغيابه) ودرجة الحرارة المقلوبة بدلالة التركيز.

$1/T(K^{-1})$	$\log(W_{corr}HCl)$	$\log(W_{corr}HCl + inh)$
0.0033	-4.1287	-4.7100
0.0032	-3.5889	-4.5000
0.0031	-3.4000	-4.6799
0.0030	-3.0729	-4.0000

الجدول 5.3 يعرض مستوى التآكل اللوغاريتمي عند وجود المثبط وغيابه، إلى جانب مقلوب درجة الحرارة المرتبطة بتركيز معين.

هذا النوع من البيانات يُستخدم عادةً في تحليل التأثير الحراري على معدل التآكل من خلال تطبيق معادلة أرينيوس.

انظر الشكل 7.3



شكل 7.3: تبين مستوي التآكل اللوغارتمي بدلالة مقلوب درجة الحرارة.

ما نتحدث عنه هو طريقة لتحديد طاقة التنشيط (Ea) من خلال تمثيل رياضي يعتمد على العلاقة بين درجة الحرارة وثابت معدل التفاعل.

فإذا قمنا برسم العلاقة بين $\log(W_{corr})$ مقابل $1/T$ نحصل على خط مستقيم يتبع معادلة من الشكل:

$$(3.4) \quad [y = ax + b]$$

حيث:

– الميل (a) يمثل العلاقة التالية:

$$(3.5) \quad [a = -\frac{E_a}{R \times 2.303}]$$

وبالتالي، يمكن استنتاج طاقة التنشيط (E_a) بمجرد حساب الميل a .

- التقاطع مع المحور (b) يعطينا: $[b = \log(A)]$ مما يمكننا من تحديد عامل التردد (A).

نستنتج : انه من خلال هذا الرسم البياني، نستطيع استخلاص قيم طاقة التنشيط بدقة اعتماداً على ميل الخط، وهذا يستخدم كثيراً في الدراسات الكيميائية والحركية لتفسير تأثير درجة الحرارة على سرعة التفاعل.

الجدول 6.3 يوضح قيم $(\log W_{corr}/T)$ لمعدن الفولاذ C45 بدلالة مقلوب درجة الحرارة في غياب و وجود المثبط

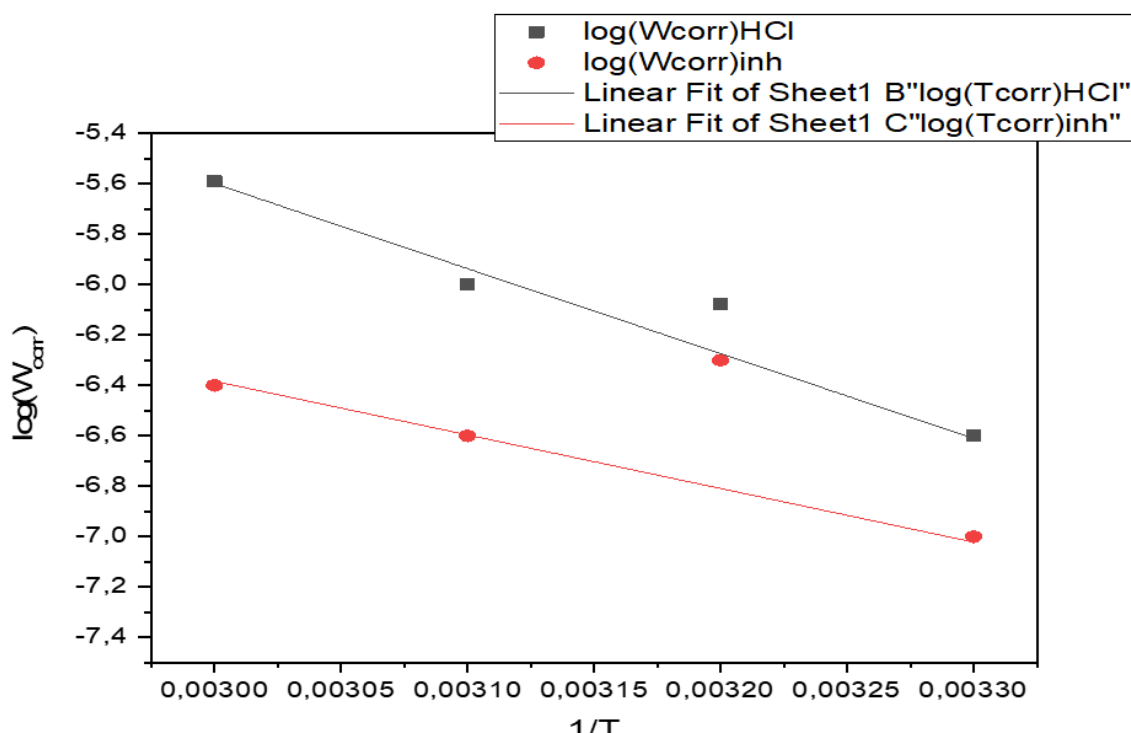
جدول 6.3: يوضح قيم $(\log W_{corr}/T)$ لمعدن الفولاذ C45 بدلالة مقلوب درجة الحرارة في غياب و وجود المثبط .

$1/T(K^{-1})$	$\log(W_{corr}/T)$	$\log(W_{corr}/T)(HCl + inh)$
0.0033	-6.6000	-6.8000
0.0032	-6.0775	-6.3000
0.0031	-6.0000	-6.6000
0.0030	-5.5888	-6.4000

يتم تحديد قيم إنتالبي التنشيط (ΔH_{ads}^0) وإنتروبي التنشيط (ΔS_{ads}^0) للفولاذ C45 في محلول 1M HCl في حالي الغياب والوجود للمثبط باستخدام المعادلة (3.6) هذه القيم تعكس الطاقة الحرارية والتغيرات الترموديناميكية التي تحدث أثناء عملية التنشيط والتفاعل بين الفولاذ والمحلول الحمضي.

$$(3.6) \quad \log(W_{corr}/T) = -\Delta H/2.303.RT + \Delta S/2.303.RT + \log(R/N_A.h)$$

بشكل عام:



شكل 8.3: قيم $(\log(T/W_{corr}))$ للمعدن بدلالة مقلوب درجة الحرارة .

- إنتالبي التنشيط (ΔH_{ads}^0) : يمثل كمية الطاقة المطلوبة لتنشيط التفاعل الكيميائي، أي الطاقة اللازمة لكسر الروابط الأولية وبدء التفاعل.

- نتروبي التنشيط (ΔS_{ads}^0) : يعبر عن التغير في العشوائية أو الترتيب الجزيئي أثناء عملية التنشيط، حيث يمكن أن يكون موجباً أو سالباً حسب طبيعة التفاعل.

- N_A : عدد أفوقادرو ($6.02 \times 10^{23} \text{ mol}$)

- H : ثابت بلانك ($6.63 \times 10^{-34} \text{ JS}$)

عند وجود المثبط، من المتوقع أن تتغير هذه القيم، حيث يعمل المثبط على تقليل طاقة التنشيط، مما يؤدي إلى إبطاء معدل التفاعل بين الفولاذ والمحلول الحمضي، وبالتالي تحسين مقاومة التآكل.

وهذا ما يفسره الشكل التالي

بالنظر إلى الجدول 7.3 يتضح أن طاقة التنشيط تكون أقل عند وجود المستخلص المائي لأوراق التين الاخضر مقارنة بعدم وجوده. والسبب في ذلك يعود إلى أن المثبط يقلل من معدل

جدول 7.3: مستوى التآكل اللوغاريتمي (في وجود المثبط وغيابه) ومقلوب درجة الحرارة المقابلة لتركيز.

<i>I</i>	<i>HCl</i>	<i>HCl + inh</i>
<i>Ea</i> (KJ/mol)	67.1262	41.8412
ΔH_{ads} (KJ/mol)	64.4775	40.7197
ΔS_{ads} (J/mol)	111.2047	197.4632

الامتصاص، مما يسهل الوصول إلى حالة التوازن عند درجات حرارة أعلى وفقاً لما جاء به كل من "Holliday" و "Hoar"، فإن هذه الظاهرة تحدث لأن التفاعل يصبح أكثر كفاءة عند وجود المثبط، مما يؤدي إلى انخفاض في حاجز الطاقة المطلوب لحدوثه. [72].

"Hurd و "Riggs" يوضحان أن هذا التأثير ليس فقط بسبب انخفاض معدل الامتصاص، كما أشار "Hoar" ولكن أيضاً بسبب التغير في مكان حدوث التفاعل نفسه [73].

ما وجده "Schmid" و "Huang" يتماشى مع الدراسات السابقة ولكنه يضيف تفصيلاً مهماً: بان الجزيئات العضوية تمنع التفاعلات الجزيئية الأنودية والكاثودية على سطح القطب، أي أنها تؤثر على كلٍّ من جوانب التأكسد والاختزال في التفاعل بالإضافة إلى ذلك، يحدث تفاعل موازٍ في المناطق المغطاة بالمثبط، لكنه يكون بمعدل أقل بكثير مقارنة بالمناطق المكشوفة

هذا يعني أن المثبط لا يوقف التفاعل بالكامل، لكنه يغيّر مساره ويوجّهه بحيث يكون أقل نشاطاً في الأماكن التي يغطيها مقارنة بالدراسة الحالية، يمكن القول إن هذا يدعم فكرة أن المثبط يعمل عن طريق تعديل التفاعل بدلاً من إيقافه تماماً [74, 75].

الإشارة الموجبة لقيمة (ΔHa) تشير إلى أن عملية الامتزاز للمثبط هي ماصة للحرارة، أي أنها تحتاج إلى امتصاص الطاقة لكي تحدث هذا يعني أن زيادة درجة الحرارة تعزز عملية الامتزاز بدلاً من أن تعيقها، مما يدل على وجود تفاعل حراري يؤدي إلى تثبيت الجزيئات على سطح المعدن [76].

عندما تكون طاقة التنشيط (Ea) أعلى من حرارة التفاعل (ΔHa) فهذا يشير إلى أن تفاعل التآكل يتطلب طاقة إضافية لتجاوز حاجز التنشيط، مما يؤدي إلى إنتاج غاز الهيدروجين. هذا

يعني أن جزءًا من الطاقة يُستهلك في عمليات أخرى داخل التفاعل، مثل تفكك الماء أو اختزال أيونات الهيدروجين، مما يساهم في تكوّن الغاز. بمعنى آخر، تفاعل التآكل ليس مجرد عملية سطحية، بل يتضمن تفاعلات كهروكيميائية تؤدي إلى انبعاث الهيدروجين، خاصة في البيئات الحمضية أو عند وجود محفزات معينة [77].

أن الفرق بين طاقة التنشيط (Ea) و حرارة التفاعل (ΔHa) يتوافق تقريبًا مع القيمة النظرية RT حيث تتراوح درجة الحرارة (T) بين $298K$ و $328K$ هذه العلاقة تشير إلى أن التفاعل يخضع لقيود حرارية تتماشى مع التوقعات النظرية، مما يعزز صحة النموذج المستخدم لوصف عملية التآكل والتثبيط. بعبارة أخرى، هذا التوافق يدعم الفرضية القائلة بأن المثبط يؤثر على التفاعل بطريقة متوقعة حراريًا، ويثبت أن هناك تناسقًا بين البيانات التجريبية والنتائج النظرية [78].

وهذا ما توضحه المعادلة التالية [79, 80].

$$(3.7) \quad Ea - \Delta H_{ads}^0 = RT$$

6.2.3 أنواع متساوي الإمتزاز

ان فهم تأثير درجة الحرارة في عملية الامتزاز أمر بالغ الأهمية، خاصة عند دراسة آليات تثبيط التآكل.

الهدف من هذه الدراسة هو تحديد العلاقة بين درجة الحرارة وسلوك الامتزاز، مما يساعد في اختيار النموذج الحراري الأكثر دقة لتمثيل عملية تثبيط التآكل وكذلك بلاستعانة بمعادلات الرياضية. [50, 81].

8.3 من خلال القيم التي يوضحها الجدول

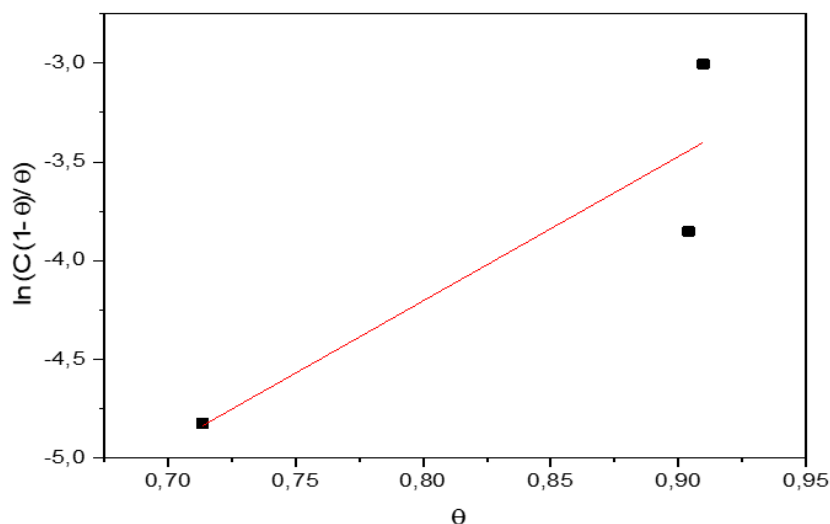
جدول 8.3: تغيرات تغطية السطح θ بدلالة تركيز المثبط $C(g/l)$

$C(g/l)$	θ
0.02	0.7135
0.2	0.9040
0.5	0.9098

7.2.3 إيزوثرم فرومكين (*Frumkin isotherm*)

يتم التعبير عن إيزوثرم فرومكين بعد إعادة ترتيب المعادلة وفق المعادلة (1.19) والتي توضح تأثير التغطية على طاقة الامتزاز [48].

$$(3.8) \quad \ln \theta = \ln K_{ads} + x \ln C_{inh}$$



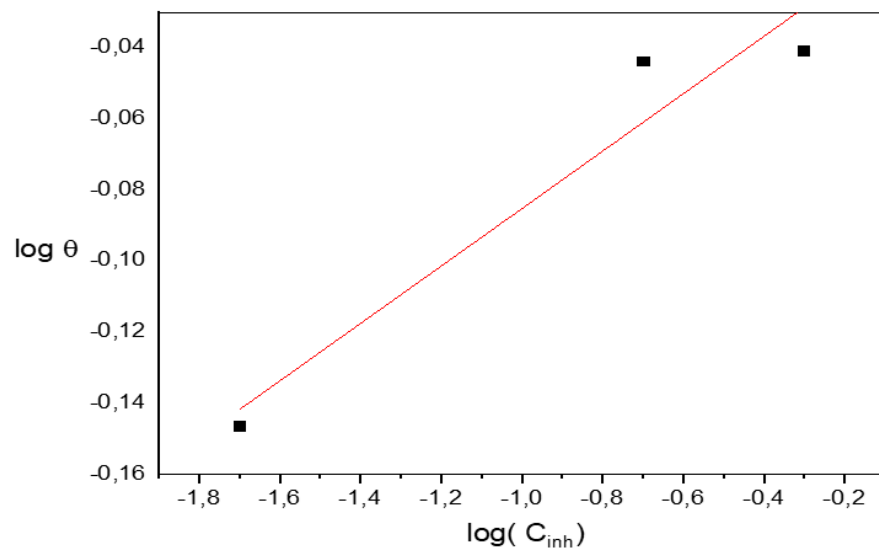
شكل 9.3: متساوي امتصاص مستخلص لأوراق التين الاخضر وفقا لنموذج *Fumki*.

8.2.3 نموذج فروندليش (*Freundlich isotherm*)

تُستخدم علاقة فروندليش بشكل نادر في دراسة تأثير المثبطات الممتازة على المعدن المدروس [?].

كما هو موضح في الشكل

$$(3.9) \quad \ln \theta = \ln K_{ads} + n \ln C_{inh}$$

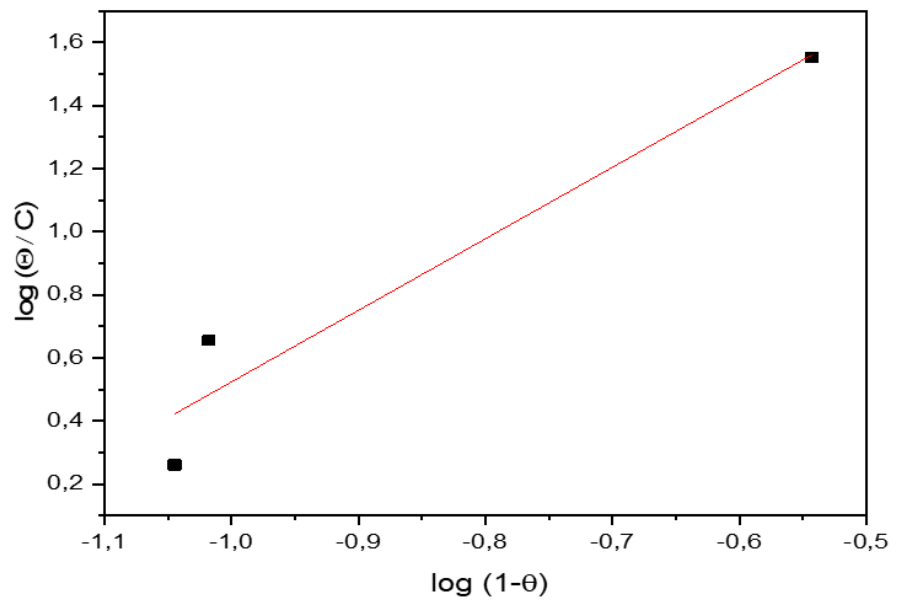


شكل 10.3: تساوي امتصاص مستخلص لأوراق التين الاخضر وفقا لنموذج . *Freundlich*.

9.2.3 إيزوثرم فلوري-هوجينز (*FloryHuggins isotherm*)

يعكس نموذج فلوري-هوجينز طبيعة عملية الامتزاز من حيث إمكانية حدوثها وعفويتها [?].

$$(3.10) \quad \log(\theta/C_{inh}) = \log xK_{ads} + x \log(1 - \theta)$$

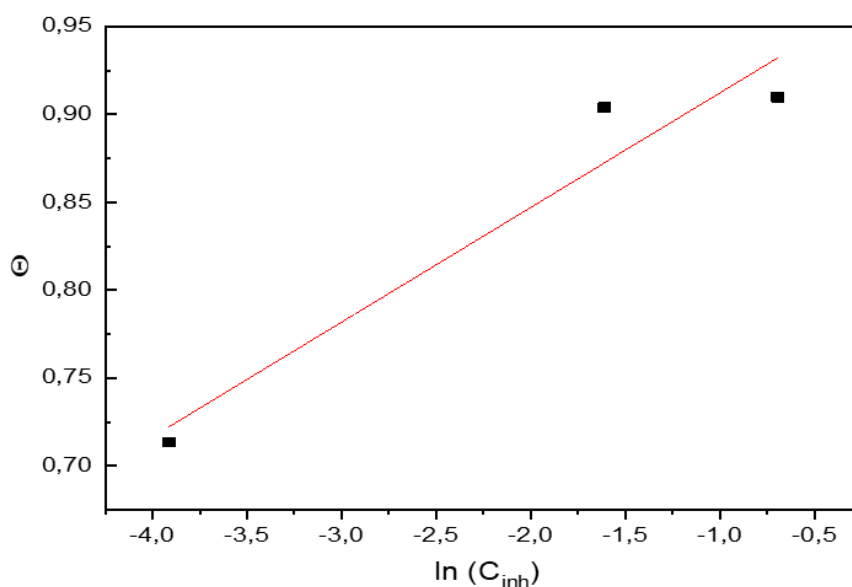


شكل 11.3: متساوي امتصاص مستخلص لأوراق التين الاخضر وفقا لنموذج *FloryHuggins*.

10.2.3 نموذج تيمكين (*Temkin isotherm*)

يتضمن نموذج تيمكين للامتزاز عاملاً يعكس التفاعل بين المادة الممتزة والمادة المازة، حيث يتميز بتوزيع منتظم لطاقة الارتباط [47].

$$(3.11) \quad \theta = -(1/2 \times \alpha) \times \ln K_{ads} - (1/2 \times \alpha) \ln C_{inh}$$



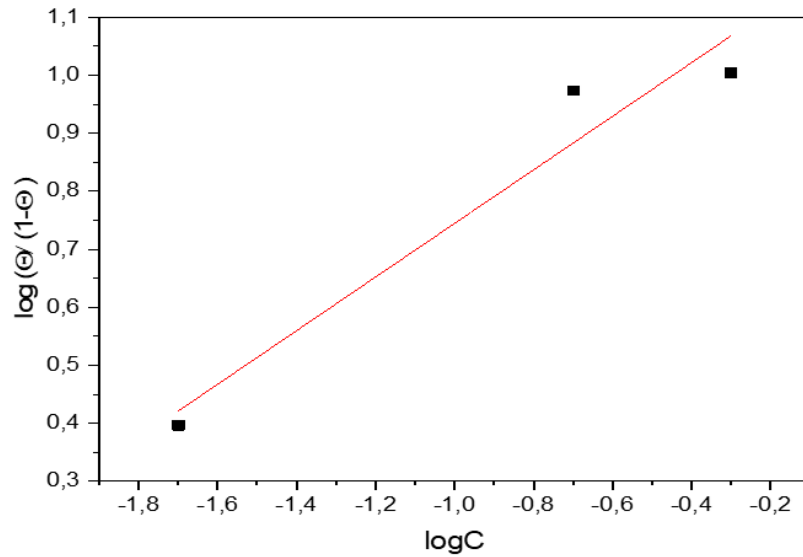
شكل 12.3: متساوي امتصاص مستخلص لأوراق التين الاخضر وفقا لنموذج . *Temkin* .

11.2.3 يزوترم العلوي (*El – Alwady isotherm*)

يعبر عن خصائص الإيزوترم من خلال المعادلة (21.1)، التي تحدد العلاقة بين الامتزاز وثابت التوازن.

يتم عرض هذا النموذج بيانياً حيث يوضح كيفية ارتباط المشتقات بالمواقع النشطة وتأثيرها على عملية الامتزاز [49].

$$(3.12) \quad \log(\theta/1 - \theta) = \log K_{ads} + n \log C_{inh}$$



شكل 13.3: متساوي امتصاص مستخلص لأوراق التين الاخضر وفقا لنموذج . *El – Alwado* .

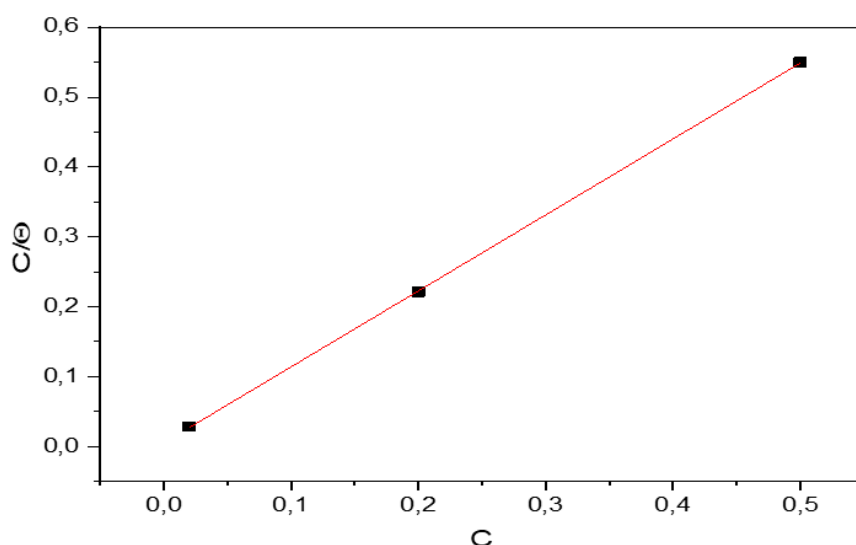
12.2.3 نموذج لانجموير (*Langmuir isotherm*)

يعبر إيزوثرم لانجموير بشكل كمي عن تكوين طبقة أحادية من المادة الممتزة على السطح الخارجي للممتز، وبعد ذلك يتوقف الامتزاز تمامًا.

$$(3.13) \quad C_{inh}/\theta = (1/K_{ads}) + C_{inh}$$

C_{inh} : تركيز المثبط (g/l)

K_{ads} : ثابت عملية الإمتزاز



شكل 14.3: متساوي امتصاص مستخلص لأوراق التين الاخضر وفقا لنموذج *Langmuir*.

انطلاقا من المنحنيات السابقة تم استخراج الميل R^2 لكل معادلة متساوي الحرارة المذكورة في الفصل الاول والموضحة في نتائج الجدول التالي [50,81].

من خلال تحليل المنحنيات المستخرجة من دراسة نماذج الامتزاز والنتائج المعروضة في الجدول 9.3 نلاحظ أن جميع قيم الميل R مرتفعة في مختلف درجات الحرارة، وأكبر قيمة للميل 0.9999 وهي قريبة جدًا من 1. هذا يؤكد أن الامتزاز في هذه الحالة يتبع نموذج *Langmuir* فقد يشير إلى أن:

– المثبط يقوم بعملية الامتزاز بطريقة أحادية الطبقة، أي أنه يشكل طبقة واحدة على سطح المعدن دون حدوث تكدس أو تداخل بين الجزيئات.

جدول 9.3: يوضح قيم معامل الارتباط (الميل) لجميع معادلات متساوي الحرارة.

نموذج متساوي الحرارة	R^2
<i>Fumkin</i>	0.6089
<i>Freundlich</i>	0.8711
<i>FloryHuggins</i>	0.8726
<i>Temkin</i>	0.8737
<i>El – Alwado</i>	0.8904
<i>Langmuir</i>	0.9999

– معظم المواقع الفعالة على سطح المعدن يتم احتلالها بواسطة المثبط، مما يحد من تفاعل المعدن مع الوسط المحيط.

– نموذج *Langmuir* يعتمد على فرضية أن الامتزاز يحدث على سطح متجانس، حيث يكون لكل موقع امتزاز جزيء واحد فقط دون تأثير متبادل بين الجزيئات الممتزة.

بالتالي، هذه النتيجة تدل على أن المثبط يعمل بفعالية عالية، حيث يشكل حاجزًا محكمًا يحمي المعدن من التفاعل غير المرغوب فيه [82].

فهذا النموذج يساعد بشكل كبير في فهم سلوك الامتزاز وتفسير التجارب العملية، وهو يستخدم في العديد من التطبيقات، مثل دراسة امتصاص الغازات والسوائل على المواد الصلبة، وتحليل كفاءة المثبطات في حماية المعادن من التآكل [76--79].

وكذلك لا توجد تفاعلات بين الأنواع الممتزة، وبالتالي من المتوقع أن يتم: وفقًا لما ذكرته الباحثة فطيمة بوهلال (*FatimaBouhlal*) فإن نموذج *Langmuir* يعتمد على تفاعل الجزيئات المثبطة عبر قوى التنافر، حيث يتم امتصاص الجزيئات المثبطة وتكثيفها على سطح المعدن لتكوين طبقة مثبطة واحدة. هذا التفسير يتماشى مع فرضية نموذج *Langmuir* التي تفترض:

– عدم وجود تفاعلات بين الأنواع الممتزة، أي أن كل جزيء ممتز يتفاعل مع السطح بشكل مستقل عن الجزيئات الأخرى.

– تكون طبقة أحادية من الجزيئات على سطح المعدن، بحيث يتم احتلال المواقع الفعالة بشكل كامل.

- آلية التنافر تلعب دورًا في ترتيب الجزيئات، مما يساهم في تحسين توزيع المثبط على السطح وتوفير حماية فعالة ضد التآكل.

بالتالي، يمكن القول إن مستخلص أوراق التين الاخضر يعمل كمثبط فعال عبر آلية الامتزاز الفيزيائي وفقًا لنموذج *Langmuir*، مما يساعد في تكوين حاجز يمنع التفاعل المباشر بين المعدن والوسط المحيط [83, 84].
فهو يقوم علي ان :

اختلاف قيمة الميل (R) عن الوحدة يمكن تفسيره بناءً على عاملين رئيسيين [85, 86].

- تغيرات حرارة الامتزاز : تعتمد عملية الامتزاز على تفاعل الجزيئات مع السطح، والذي يمكن أن يكون إما طاردًا للحرارة أو ماصًا لها. أي تغير في درجة الحرارة يؤثر على سرعة وتوازن هذه العملية، مما يؤدي إلى تغير قيمة (R).

- تغطية السطح : عندما تكون مواقع الامتزاز على السطح مشبعة أو قريبة من التشبع، فإن الجزيئات الجديدة تجد صعوبة في الامتزاز بنفس الكفاءة كما في البداية، مما يؤدي إلى انخفاض قيمة (R). كما أن التغير في طبيعة السطح بسبب التفاعل المستمر قد يؤثر على التوزيع العام لعملية الامتزاز.

بعبارة أخرى، هذه العوامل تجعل سلوك الامتزاز غير مثالي في بعض الحالات، مما يؤدي إلى اختلافات في القياسات المتعلقة بالنموذج المستخدم.
استنادًا إلى النتائج المبينة في الجدول ومعادلة لانجمير للامتزاز، يمكن حساب قيمة ثابت الاتزان (K_{ads}) المرتبط بمعدل الامتزاز.
المعادلة التي ذكرتها:

$$(3.14) \quad C_{inh}/\theta = (1/K_{ads}) + C_{inh}$$

C_{inh} : هو التركيز المثبط (g/l)

K_{ads} : هي قيمة التوازن ثابت لعملية الإمتزاز (g/l)

تمثل العلاقة بين نسبة التغطية (θ) وسطح المعدن مع تركيز المثبط (C_{inh}) وثابت الامتزاز (K_{ads})

- لإيجاد قيمة (K_{ads}) :

يتم استخدام القيم التجريبية لنسبة الامتزاز (θ) وتركيز المثبط (C_{inh}) من الجدول. يمكن إعادة ترتيب المعادلة لحساب ثابت الاتزان مباشرة. عند رسم العلاقة بين ($\frac{\theta}{1-\theta}$) مقابل (C_{inh}) يمكن الحصول على منحنى خطي يسمح بتحديد (K_{ads})

13.2.3 طاقة جيبس للامتزاز *Gibbs*

طاقة جيبس الحرة هي كمية الطاقة المتاحة لإنجاز عمل في نظام معين عند درجة حرارة وضغط ثابتين. تُستخدم هذه الطاقة لتحديد إمكانية حدوث تفاعل تلقائي [51]. المعادلة الأساسية لطاقة جيبس الحرة هي:

$$[\Delta G = -RT \ln(1000K_{ads})] \quad (3.15)$$

حيث:

جدول 10.3: مستوى التآكل اللوغاريتمي (في وجود المثبط وغيابه) ودرجة الحرارة المقلوقة المقابلة لتركيز.

<i>isotherm</i>	R^2	$K_{ads}(l/g)$	$\Delta G_{ads}^0(KJ/mol)$
<i>Langmuir</i>	0.9999	189.03591	-13.3778

تشير القيم السالبة لـ ΔG_{ads}^0 إلى أن المثبط قد تميز على سطح المعدن بطريقة فيزيائية، حيث أن القيم القريبة من -20 كيلوجول تدل على أن امتزاز مستخلص اوراق التين الاخضر على سطح الفولاذ يتم عبر الامتزاز الفيزيائي .

3.3 الدراسة البنيوية

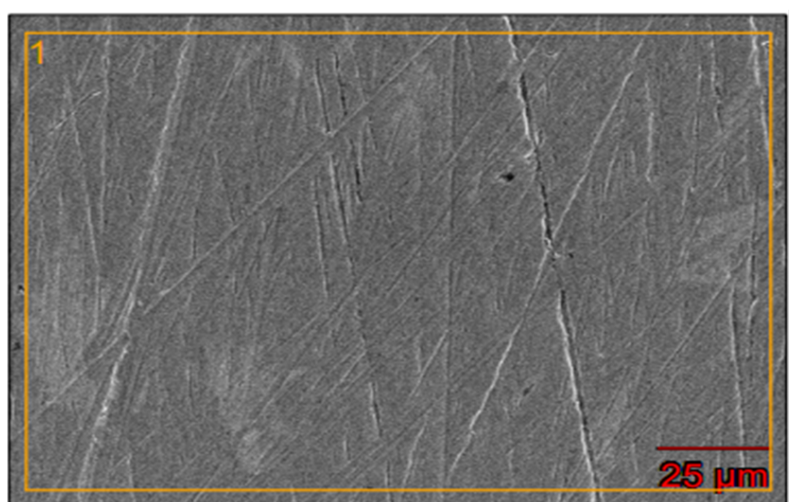
1.3.3 نتائج الماسح المجهر الإلكتروني (MEB)

هذه الدراسة تتناول تقنية الكتلة الضائعة، لكنها تؤكد أن مجرد تحليلها لا يكفي لفهم كيفية حدوث التآكل أو تحديد نوعه وشكله. بل يجب أيضًا التركيز على كيفية حماية السطح من هذا التآكل. ولذلك، يعد الفحص المجهرى أمرًا ضروريًا للحصول على صورة دقيقة حول الظاهرة. ولذلك تم الاعتماد على جهاز الماسح المجهر الإلكتروني الموجود في جامعة محمد خيضر بسكرة، والذي مكّننا من تصوير البنية المجهرية للسطح المتأثر بالتآكل، كما هو موضح في الصور المرفقة بالدراسة.

المجهر الإلكتروني الماسح (MEB) يتيح رؤية مفصلة ودقيقة لسطح المادة، مما يساعد في تحليل خصائصها المجهرية. باستخدام هذا الجهاز، يمكن دراسة التركيب البنيوي والتعرف على العيوب أو التغيرات التي تحدث نتيجة عوامل مثل التآكل أو المعالجة الحرارية.

هذه الصور تساهم في دراسة تأثير حمض الهيدروكلوريك (HCl) على سطح الفولاذ C45، حيث تمت مقارنة العينات بعد غمرها لمدة 24 ساعة عند درجة حرارة 25 درجة مئوية.

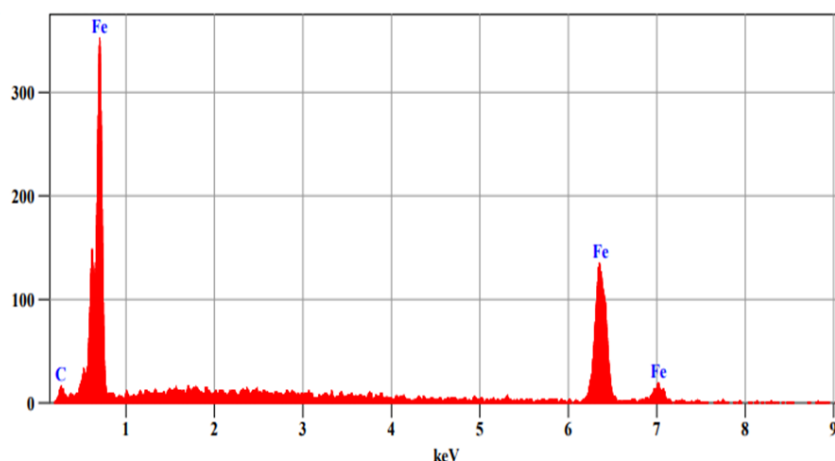
- الصورة (أ): تمثل عينة فولاذ C45 العادية دون أي معالجة.
- الصورة (ب) و(ج): صور مأخوذة بواسطة المجهر الإلكتروني لسطح العينة بعد تعرضها لمحلول 1M من HCl سواء في غياب المثبط (ب) أو وجوده (ج) مما يسمح بتحليل مدى تأثير التآكل وأداء المادة الحامية.



شكل 15.3: (أ) مأخوذة بواسطة المجهر الإلكتروني للعينة الشاهدة

الصورة (أ)

عند فحص سطح الفولاذ C45 تحت المجهر الإلكتروني الماسح (MEB) بعد عملية الصقل الميكانيكي، يمكن رؤية هذه الخطوط البيضاء الرفيعة، والتي تعد مؤشراً على أن عملية الصقل لم تتم بشكل مثالي. يعود ظهور هذه الخطوط إلى عدم تجانس عملية الصقل، حيث قد تكون بعض المناطق قد



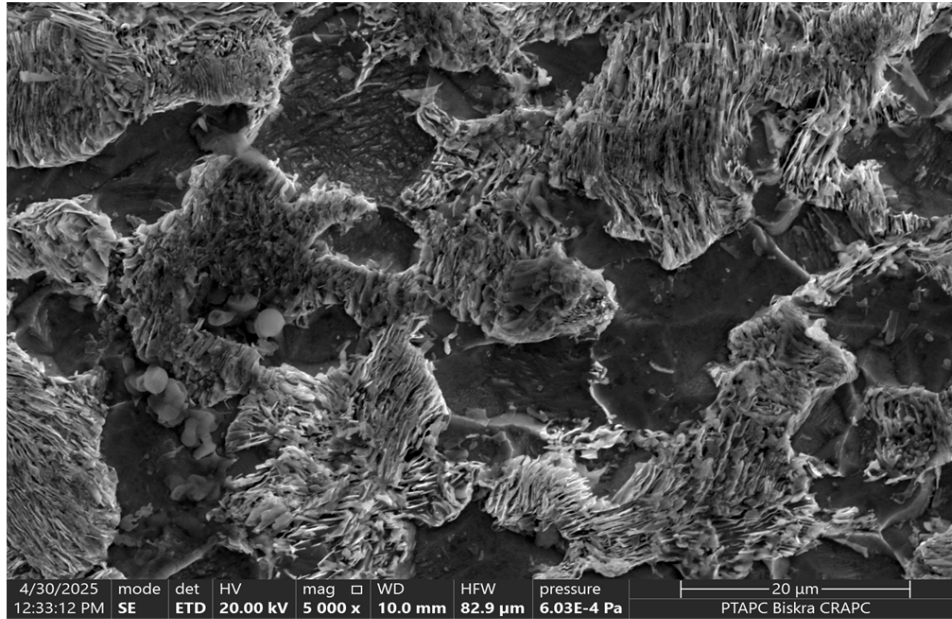
شكل 16.3: الاطياف المنتجة (EDX) بعد 24 ساعة من الغمر في 1M HCl

تعرضت لتفاوت في الضغط أو حركة غير منتظمة أثناء عملية التلميع، مما يؤدي إلى ترك آثار مرئية على السطح. هذه العيوب يمكن أن تؤثر على دقة الفحص اللاحق، خاصة عند دراسة تأثير العوامل البيئية مثل التآكل.

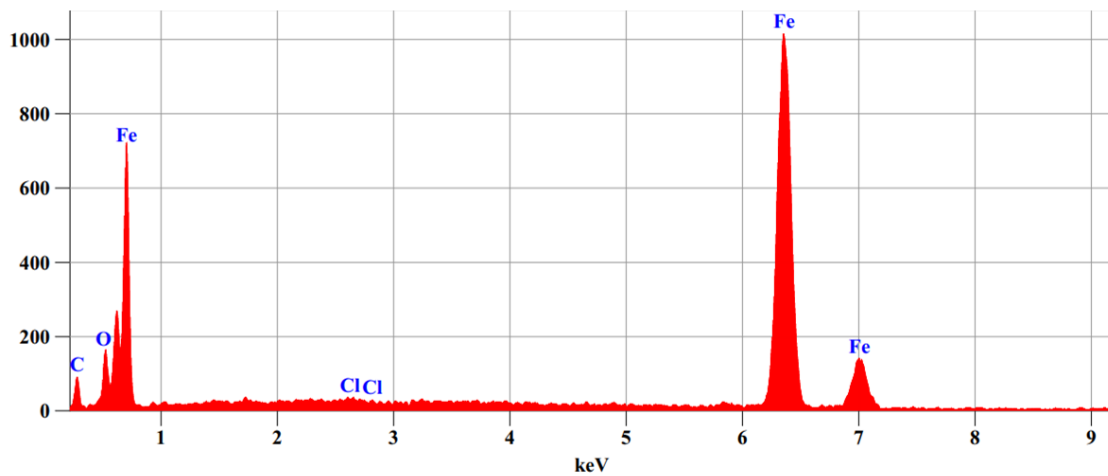
الصورة (ب)

تُظهر الصورة سطح الفولاذ C45 بعد غمره في محلول HCl بتركيز 1M لمدة 24 ساعة. يكشف الفحص بواسطة المجهر الإلكتروني الماسح (MEB) تأثيرات التآكل على سطح الفولاذ. بشكل خاص، تعرض الهيكل الأصلي لسطح الفولاذ للتلف كما كان متوقعًا، مما أدى إلى ظهور أضرار واضحة على السطح. يتجلى هذا التلف في اختفاء الشكل المميز لسطح الفولاذ، مما يشير بوضوح إلى تحلل المادة.

حيث يفسر التآكل الظاهر على سطح الفولاذ بأنه تآكل سطحي، حيث يظهر على هيئة خطوط بيضاء تمثل شقوقًا على حدود الحبيبات المعدنية. هذه الشقوق تحدث نتيجة ضعف الروابط بين الحبيبات بسبب التفاعلات الكهروكيميائية في الوسط الآكل [87]. أما المناطق الداكنة فهي تمثل ذرات الحديد التي تعرضت للتآكل وانفصلت عن السطح، مما يدل على عملية فقدان المادة بشكل تدريجي. هذا النوع من التآكل يؤثر على بنية الفولاذ ويضعف خصائصه الميكانيكية، مما قد يؤدي إلى فقدان المتانة بمرور الوقت.



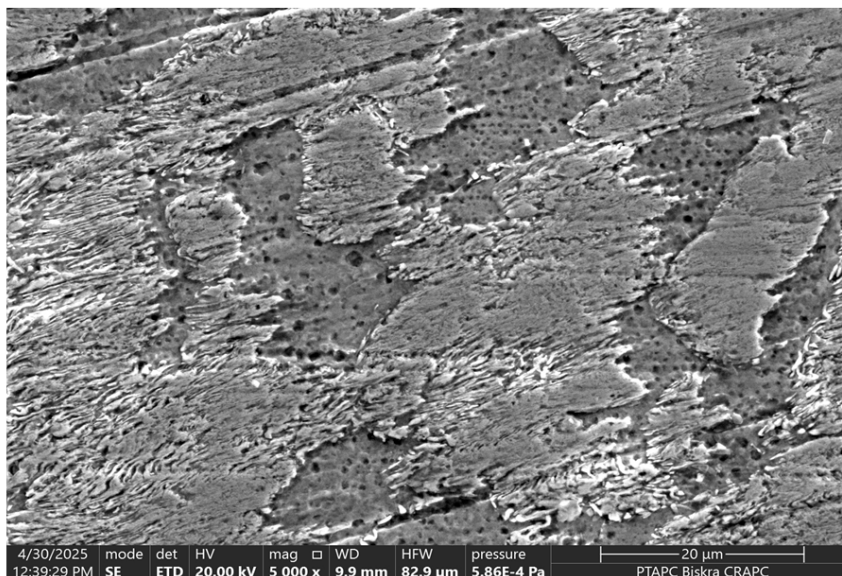
شكل 17.3: (ب) صورة مجهرية لسطح الفولاذ بعد 24 ساعة من $1M HCl$ غمر في غياب المثبط



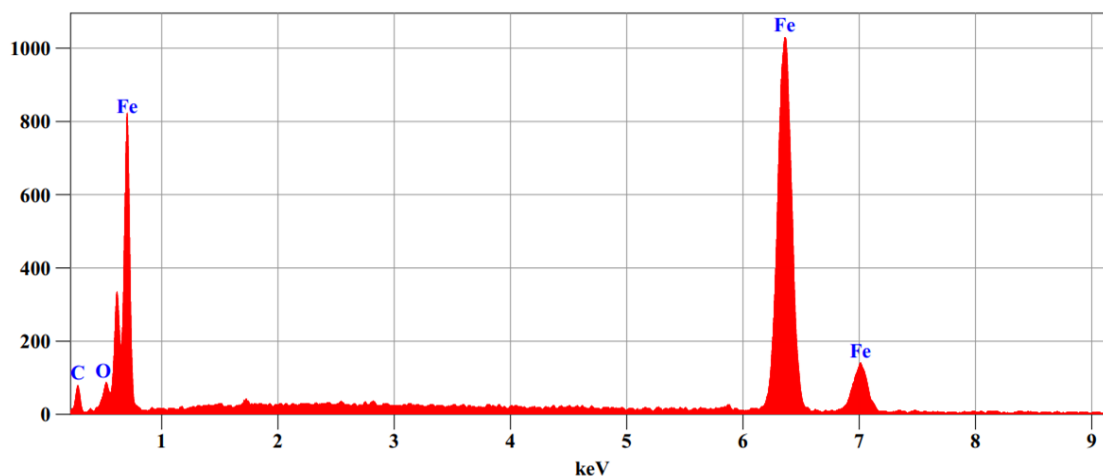
شكل 18.3: الاطياف المنتجة (EDX) بعد 24 ساعة من الغمر في $1M HCl$

الصورة (ج)

تُظهر الصورة سطح الفولاذ C45 بعد غمره في محلول HCl بتركيز $1M$ مع إضافة المثبط (المستخلص المائي لاوراق التين الاخضر) بتركيز $0.5g/l$ وذلك بعد مرور 24 ساعة.



شكل 19.3: صورة(ج)مجهرية لسطح الفولاذ بعد 24 ساعة من $1M HCl$ غمر في وجود المثبط



شكل 20.3: الاطياف المنتجة (EDX) بعد 24 ساعة من الغمر في $1M HCl$

يكشف الفحص بواسطة المجهر الإلكتروني الماسح (MEB) عن تشكّل طبقة مثبّطة موزعة بشكل متجانس تقريبًا على سطح المعدن. حيث اختفت الندوب التي كانت موجودة في الصورة السابقة يشير ذلك الى :

حدوث تفاعل بين المركبات الموجودة في مستخلص أوراق التين الاخضر مع سطح الفولاذ، مما يشكّل حاجزًا يحمي المعدن من التفاعلات الكهروكيميائية التي تسبب التآكل [88].

4.3 ملخص الفصل

المثبطات الخضراء (المستخلص المائي لاوراق التين الاخضر) تقلل من تآكل الفولاذ بشكل كبير من خلال تكوين طبقة واقية تعتمد على الامتزاز الفيزيائي. كما ان كفاءتها تتأثر بعوامل مثل تركيز المثبط، درجة الحرارة، وزمن الغمر. بلاضافة الى التحليل باستخدام *MEB* ونموذج لانجموير، وكذلك حساب طاقة جيبس، تمكنا من فهم آلية الامتزاز وأداء المثبط تحت مختلف الظروف.

الخلاصة العامة

يهدف هذا العمل إلى تقييم فعالية المثبط العضوي المستخرج من أوراق التين الأخضر في حماية الفولاذ C45 من التآكل في وسط حمض الهيدروكلوريك بتركيز 1M يتميز هذا المثبط بكونه غير سام، منخفض التكلفة، وسهل الحصول عليه من مصادر متجددة، مما يجعله خيارًا صديقًا للبيئة. حيث يُعتبر التآكل ظاهرة حتمية، ولكن يمكن الحد منها والتحكم بها باستخدام المثبطات العضوية الصديقة للبيئة، التي تتميز بفعاليتها العالية، مما يجعلها خيارًا مثاليًا لحماية المعادن.

في البداية، تم دراسة معدل تآكل الفولاذ في وسط الحمض الهيدروكلوريك بدون إضافة المثبط ومعه، بهدف فهم مدى تأثيره الوقائي. كما تم تحليل العوامل المؤثرة على عملية التآكل، مثل تركيز المثبط، زمن الغمر، ودرجة الحرارة، وذلك باستخدام تقنية الكتلة الضائعة لقياس التغيرات الحاصلة بدقة.

استنادًا إلى النتائج المستخلصة من الدراسة، يمكن تلخيص أبرز النقاط كما يلي:

- تأثير التركيز على الكفاءة تثبيطية: تم اختبار ثلاث تراكيز مختلفة للمستخلص المائي ($0.02g/l$, $0.5g/l$, $10.2g/l$) وأظهرت النتائج أن التركيز $0.5g/l$ هو الأكثر فعالية، حيث أدى إلى انخفاض ملحوظ في معدل التآكل وحقق كفاءة تثبيطية بلغت (90.98%)
- تأثير زمن الغمر: أظهرت البيانات أن أعلى كفاءة تثبيطية تم تسجيلها بعد 24 ساعة بتركيز $0.5g/l$ حيث بلغت (90.98%) ومع مرور الزمن لوحظ انخفاض في الكفاءة
- تأثير درجة الحرارة: لوحظ أن الكفاءة تثبيطية تزداد مع ارتفاع درجة الحرارة، مما يدل على امتلاك المثبط لاستقرار حراري جيد. بلغت أعلى كفاءة تثبيطية عند درجة حرارة $328K$ بتركيز $0.5g/l$ حيث سجلت (92.60%) وهذه النتيجة تؤكد أن ارتفاع الحرارة لا يعني بالضرورة زيادة معدل التآكل، بل قد يكون له تأثير إيجابي في تعزيز فعالية المثبط.
- تشير معادلة متساوي الحرارة إلى أن جزيئات المثبط (المستخلص المائي لأوراق التين الأخضر) تتمركز على سطح المعدن وفقًا لنموذج لانجمير، وهو ما يوضح انتظام عملية الامتزاز. بالإضافة إلى ذلك فإن :

- تشير قيم طاقة التنشيط المختلفة إلى أن طاقة التنشيط في وجود المثبط (عند التركيز g/l 0.5) قل مما هي عليه في غياب المثبط يعود هذا الانخفاض إلى تقليل معدل امتصاص المثبط مع اقتراب النظام من حالة التوازن عند درجات حرارة أعلى.

- القيم الموجبة لـ ΔH_{ads} تشير إلى أن عملية الامتزاز للمثبط هي ماصة للحرارة، مما يعني أن زيادة درجة الحرارة تساعد في تعزيز الامتزاز على سطح المعدن. هذا يتوافق مع النتائج التي أظهرت ارتفاع الكفاءة تثبيطية عند درجات حرارة أعلى، مما يؤكد أن المثبط يمتلك استقرارًا حراريًا جيدًا ويعمل بكفاءة متزايدة في الظروف المرتفعة الحرارة.

كشفت قيم الطاقة الحرة ΔG_{ads} أن آلية التثبيط الحاصلة هي فيزيائية، مما يؤكد أن جزيئات المثبط ترتبط بالسطح دون حدوث تفاعل كيميائي قوي. أما نتائج الفحص المجهر الإلكتروني (MEB) فقد أظهرت التأثير القوي للمثبط في حماية سطح المعدن من التآكل، حيث اختفت المناطق المتآكلة وتم تكوين طبقة متمزة منتظمة على سطح الفولاذ، مما يعزز مقاومته للتآكل ويوضح فعالية المثبط في تقليل تأثير البيئة العدوانية.

هذه النتائج توفر رؤية واضحة حول فعالية المستخلص النباتي في تقليل تأثير التآكل وتحسين الحماية للمعدن.

المصادر

- [1] H. M. Abd El-Lateef, S. Shaaban, M. M. Khalaf, A. Toghan, and K. Shalabi, ``Synthesis, experimental, and computational studies of water soluble anthranilic organoselenium compounds as safe corrosion inhibitors for j55 pipeline steel in acidic oilfield formation water," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. ,625 p. ,126894 .2021
- [2] A. Thoume, D. B. Left, A. Elmakssoudi, F. Benhiba, A. Zarrouk, N. Benzbiria, I. Warad, M. Dakir, M. Azzi, and M. Zertoubi, ``Chalcone oxime derivatives as new inhibitors corrosion of carbon steel in 1 m hcl solution," *Journal of Molecular Liquids*, vol. ,337 p. ,116398 .2021
- [3] D. B. Left, M. Zertoubi, A. Irhzo, and M. Azzi, ``Revue: Huiles et extraits de plantes comme inhibiteurs de corrosion pour différents métaux et alliages dans le milieu acide chlorhydrique.(review: oils and extracts plants as corrosion inhibitors for different metals and alloys in hydrochloric acid medium).," *J. Mater. Environ. Sci.*, vol. ,4 pp. ,866--855 .2013
- [4] D. Benmessaoud Left, M. Zertoubi, A. Irhzo, and M. Azzi, ``Revue: Huiles et extraits de plantes comme inhibiteurs de corrosion pour différents métaux et alliages dans le milieu acide chlorhydrique," .2013
- [5] D. Daoud, ``Etude du pouvoir complexant et inhibiteur de nouveaux ligands bases de schif," .2018

- [6] H. Marmi, *Amélioration de la résistance à la corrosion électrochimique des aciers par utilisation des inhibiteurs*. PhD thesis, Université Mohamed Khider-Biskra, .2017
- [7] M. Bedair, M. Metwally, S. Soliman, A. Al-Sabagh, A. Salem, and T. Mohamed, "Extracts of mint and tea as green corrosion inhibitors for mild steel in hydrochloric acid solution," *Al-Azhar Bulletin of Science*, vol. ,26 no. 1-A, pp. ,14--1 .2015
- [8] G. Vasyliiev and V. Vorobiova, "Rape grist extract (brassica napus) as a green corrosion inhibitor for water systems," *Materials Today: Proceedings*, vol. ,6 pp. ,186--178 .2019
- [9] A. Satapathy, G. Gunasekaran, S. Sahoo, K. Amit, and P. Rodrigues, "Corrosion inhibition by justicia gendarussa plant extract in hydrochloric acid solution," *Corrosion science*, vol. ,51 no. ,12 pp. ,2856--2848 .2009
- [10] A. Chaouiki, H. Lgaz, R. Salghi, M. Chafiq, H. Oudda, K. Bhat, I. Cretescu, I. Ali, R. Marzouki, I. Chung, *et al.*, "Assessing the impact of electron-donating-substituted chalcones on inhibition of mild steel corrosion in hcl solution: Experimental results and molecular-level insights," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. ,588 p. ,124366 .2020
- [11] A. Singh, K. Ansari, D. S. Chauhan, M. Quraishi, H. Lgaz, and I.-M. Chung, "Comprehensive investigation of steel corrosion inhibition at macro/micro level by ecofriendly green corrosion inhibitor in 15% hcl medium," *Journal of colloid and interface science*, vol. ,560 pp. ,236--225 .2020
- [12] R. Kumar, S. Chahal, S. Kumar, S. Lata, H. Lgaz, R. Salghi, and S. Jodeh, "Corrosion inhibition performance of chromone-3-acrylic acid derivatives for low alloy steel with theoretical modeling and experimental aspects," *Journal of Molecular Liquids*, vol. ,243 pp. ,450--439 .2017

- [13] A. Singh, K. Ansari, J. Haque, P. Dohare, H. Lgaz, R. Salghi, and M. Quraishi, "Effect of electron donating functional groups on corrosion inhibition of mild steel in hydrochloric acid: Experimental and quantum chemical study," *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, vol. ,82 pp. ,251--233 .2018
- [14] E. Bardal, *Corrosion and protection*. Springer, .2004
- [15] B. I. Abderrahim, *Comportement à la corrosion d'un acier doux, dans un milieu à différents pH, en présence de ZnCl₂*. PhD thesis, Batna, Université El Hadj Lakhdar. Faculté des Sciences de l'Ingenieur, .2010
- [16] I. Anoune, *Résistance à la corrosion des revêtements composites nickel-alumine sur différents substrats*. PhD thesis, Université de Batna ,2 .2014
- [17] M. ALLALI and A. N. HADJ, *Synthèse bibliographique sur les inhibiteurs pour lutter contre la corrosion électrochimique*. PhD thesis, Université KASDI-MERBAH Ouargla.
- [18] M. BENARIOUA, *Inhibtion de la corrosion d'un acier ordinaire par les chromates et les molybdates*. PhD thesis, Université de Batna ,2 .2014
- [19] H. Aljibori, A. Alamiery, and A. Kadhum, "Advances in corrosion protection coatings: A comprehensive review," *Int. J. Corros. Scale Inhib*, vol. ,12 no. ,4 pp. ,1520--1476 .2023
- [20] I. B. SEBTI and R. B. KADDOUR, "Etude théorique par dft d'une série d'inhibiteurs de la corrosion,"
- [21] A. E. Hughes, R. Parvizi, and M. Forsyth, "Microstructure and corrosion of aa2024," *Corrosion Reviews*, vol. ,33 no. ,2-1 pp. --1 ,30 .2015
- [22] S. Harsimran, K. Santosh, and K. Rakesh, "Overview of corrosion and its control: A critical review," *Proc. Eng. Sci*, vol. ,3 no. ,1 pp. -13 ,24- .2021

- [23] B. E. Brycki, I. H. Kowalczyk, A. Szulc, O. Kaczerewska, and M. Pakiet, "Organic corrosion inhibitors," *Corrosion inhibitors, principles and recent applications*, vol. ,3 p. ,33 .2018
- [24] A. J. AL-Lamei, N. K. Muftin, F. Hussein, and A. S. Mahdi, "Organic compounds as corrosion inhibitors from natural products," *Int J Adv Res Phys Sci*, vol. ,7 pp. ,35--25 .2020
- [25] C. G. Dariva and A. F. Galio, "Corrosion inhibitors--principles, mechanisms and applications," *Developments in corrosion protection*, vol. ,16 pp. ,378--365 .2014
- [26] J. A. Rodríguez, J. Cruz-Borbolla, P. A. Arizpe-Carreón, and E. Gutiérrez, "Mathematical models generated for the prediction of corrosion inhibition using different theoretical chemistry simulations," *Materials*, vol. ,13 no. ,24 p. ,5656 .2020
- [27] G. Palanisamy, "Corrosion inhibitors," in *Corrosion inhibitors*, IntechOpen, .2019
- [28] A. Alrebh, *Investigation of 2-(2-methylaminoethyl) pyridine as a green corrosion inhibitor for carbon steel for applications in the oil and gas industry*. McGill University (Canada), .2016
- [29] M. Znini, "Application of essential oils as green corrosion inhibitors for metals and alloys in different aggressive mediums," *Arabian Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, vol. ,5 no. ,3 pp. ,34--1 .2019
- [30] B. A. Rani and B. B. J. Basu, "Green inhibitors for corrosion protection of metals and alloys: an overview," *International Journal of corrosion*, vol. ,2012 no. ,1 p. ,380217 .2012
- [31] A. Sedik, D. Lerari, A. Salci, S. Athmani, K. Bachari, İ. Gecibesler, and R. Solmaz, "Dardagan fruit extract as eco-friendly corrosion inhibitor for mild steel in 1 m hcl: Electrochemical and surface morphological studies," *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, vol. ,107 pp. ,200--189 .2020

- [32] M. Toorani, M. Aliofkhazraei, M. Mahdavian, and R. Naderi, "Superior corrosion protection and adhesion strength of epoxy coating applied on az31 magnesium alloy pre-treated by peo/silane with inorganic and organic corrosion inhibitors," *Corrosion Science*, vol. ,178 p. ,109065 .2021
- [33] K. Tamalmani and H. Husin, "Review on corrosion inhibitors for oil and gas corrosion issues," *Applied Sciences*, vol. ,10 no. ,10 p. ,3389 .2020
- [34] I. W. Ma, S. Ammar, S. S. Kumar, K. Ramesh, and S. Ramesh, "A concise review on corrosion inhibitors: types, mechanisms and electrochemical evaluation studies," *Journal of Coatings Technology and Research*, pp. ,28--1 .2022
- [35] M. Faustin, *Étude de l'effet des alcaloïdes sur la corrosion de l'acier C38 en milieu acide chlorhydrique 1M: application à Aspidosperma album et Geissospermum laeve (Apocynacées)*. PhD thesis, Université des Antilles et de la Guyane (UAG), .2013
- [36] N. M. Aljamali, "Experimental methods for preparation of mannich bases, formazan, normal and cyclic sulfur compounds," *Evince pub Publishing House*, .2018
- [37] P. A. Dub and J. C. Gordon, "The role of the metal-bound n--h functionality in noyori-type molecular catalysts," *Nature Reviews Chemistry*, vol. ,2 no. ,12 pp. ,408--396 .2018
- [38] S. Lim, K. Ting, T. Bradshaw, N. Zeenathul, C. Wiart, T. Khoo, K. Lim, and H. Loh, "Acalypha wilkesiana extracts induce apoptosis by causing single strand and double strand dna breaks," *Journal of ethnopharmacology*, vol. ,138 no. ,2 pp. ,623--616 .2011
- [39] N. M. Aljamali and H. S. Hassen, "Review on azo-compounds and their applications," *Journal of Catalyst & Catalysis*, vol. ,8 no. ,2 pp. ,16--8 .2021

- [40] H. Nollet, M. Roels, P. Lutgen, P. Van der Meeren, and W. Verstraete, "Removal of pcbs from wastewater using fly ash," *Chemosphere*, vol. ,53 no. ,6 pp. ,665--655 .2003
- [41] S. Shen, T. Pan, X. Liu, L. Yuan, Y. Zhang, J. Wang, and Z. Guo, "Adsorption of pd (ii) complexes from chloride solutions obtained by leaching chlorinated spent automotive catalysts on ion exchange resin diaion wa21j," *Journal of colloid and interface science*, vol. ,345 no. ,1 pp. ,18--12 .2010
- [42] M. Taghavikish, N. K. Dutta, and N. Roy Choudhury, "Emerging corrosion inhibitors for interfacial coating," *Coatings*, vol. ,7 no. ,12 p. ,217 .2017
- [43] S. Kundu, M. Das, and D. Mitra, "Current status, opportunities and challenges of green corrosion inhibitors," *Sustainable Corrosion Inhibitors*, vol. ,107 p. ,1 .2021
- [44] D. Kesavan, M. Gopiraman, and N. Sulochana, "Green inhibitors for corrosion of metals: a review," *Chem. Sci. Rev. Lett*, vol. ,1 no. ,1 pp. ,8--1 .2012
- [45] S. Devikala, P. Kamaraj, M. Arthanareeswari, and S. Pavithra, "Green corrosion inhibition of mild steel by asafoetida extract extract in 5%.3 nacl," *Materials Today: Proceedings*, vol. ,14 pp. ,601--590 .2019
- [46] S. Abdelaziz, M. Benamira, L. Messaadia, Y. Boughoues, H. Lahmar, and A. Boudjerda, "Green corrosion inhibition of mild steel in hcl medium using leaves extract of arbutus unedo l. plant: An experimental and computational approach," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. ,619 p. ,126496 .2021
- [47] O. A. Olusegun and K. N. Olabisi, "Adsorption isotherms, kinetics and thermodynamic studies of the removal of manganese from

- aqueous solutions using activated carbon produced from lantana camara stem," .2020
- [48] H. Hamani, *Synthèse, caractérisation et étude du pouvoir inhibiteur de nouvelles molécules bases de sch.* PhD thesis, .2018
- [49] M. A. Al-Ghouti and D. A. Da'ana, ``Guidelines for the use and interpretation of adsorption isotherm models: A review," *Journal of hazardous materials*, vol. ,393 p. ,122383 .2020
- [50] S. Chen, S. Chen, B. Zhu, C. Huang, and W. Li, ``Magnolia grandiflora leaves extract as a novel environmentally friendly inhibitor for q235 steel corrosion in 1 m hcl: Combining experimental and theoretical researches," *Journal of Molecular Liquids*, vol. ,311 p. ,113312 .2020
- [51] S. Mikhail, M. Lyubov, D. Lucia, P. Kira, K. Viktoriia, and G. Alexandra, ``Comprehensive study of the action of corrosion inhibitors based on quaternary ammonium compounds in solutions of hydrochloric and sulfamic acids," *Energies*, vol. ,15 no. ,1 p. ,24 .2021
- [52] T. H. Ibrahim, E. E. Gomes, I. B. Obot, M. Khamis, and M. A. Sabri, ``Mild steel green inhibition by ficus carica leaves extract under practical field conditions," *Journal of adhesion science and Technology*, vol. ,31 no. ,24 pp. ,2718--2697 .2017
- [53] J. Flores-De los Ríos, M. Sánchez-Carrillo, C. Nava-Dino, J. Chacón-Nava, J. González-Rodríguez, E. Huape-Padilla, M. Neri-Flores, and A. Martínez-Villafañe, ``Opuntia ficus-indica extract as green corrosion inhibitor for carbon steel in 1 m hcl solution," *Journal of Spectroscopy*, vol. ,2015 no. ,1 p. ,714692 .2015
- [54] T. H. Ibrahim and M. Abou Zour, ``Corrosion inhibition of mild steel using fig leaves extract in hydrochloric acid solution," *International Journal of Electrochemical Science*, vol. ,6 no. ,12 pp. ,6455--6442 .2011

- [55] H. A. Matter, T. M. Ayad, and A. A. Alkatly, "Grape leaves and ziziphus spina-christi, extracts as a green inhibitors corrosion for the carbon steel and oil pipelines in 1M H₂SO₄," *Journal of Materials Research*, no. 6, pp. 145--124. 2024
- [56] H. Anh, N. Vu, L. Huyen, N. Tran, H. Thu, L. Bach, Q. Trinh, S. P. Vattikuti, and N. Nam, "Ficus racemosa leaf extract for inhibiting steel corrosion in a hydrochloric acid medium," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 59, no. 6, pp. 4462--4449. 2020
- [57] D. Dwivedi, K. Lepková, and T. Becker, "Carbon steel corrosion: a review of key surface properties and characterization methods," *RSC advances*, vol. 7, no. 8, pp. 4610--4580. 2017
- [58] K. Heusler, D. Landolt, and S. Trasatti, "Electrochemical corrosion nomenclature," *Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry*, vol. 274, no. 2-1, pp. 348--345. 1989
- [59] F. Malaret and X.-S. Yang, "Exact calculation of corrosion rates by the weight-loss method," *Experimental results*, vol. 3, p. e13. 2022
- [60] B. E. Ibrahimi, J. V. Nardeli, and L. Guo, "An overview of corrosion," *Sustainable corrosion inhibitors I: fundamentals, methodologies, and industrial applications*, pp. 19--1. 2021
- [61] K. Akhtar, S. A. Khan, S. B. Khan, and A. M. Asiri, *Scanning electron microscopy: Principle and applications in nanomaterials characterization*. Springer, 2018
- [62] A. Mohammed and A. Abdullah, *Scanning electron microscopy (SEM): A review*, vol. 2018. 2018
- [63] N. LEHRAKI, "Dépôt et caractérisation des couches minces de ZnO par spray ultrasonique," 2021
- [64] H. Ouici, O. Benali, Y. Harek, C. Selles, et al., *INHIBITION DE LA CORROSION D'UN ACIER DOUX PAR LE 5-(3-METHOXYPHENYL)-4-TRIAZOLE 3-THIONE MPTT DANS UNE SOLUTION D'ACIDE CHLORHYDRIQUE*. 2012

- [65] A. Begum, ``Rosmarinus officinalis L. herb as corrosion inhibitor for mild steel in sulphuric acid medium," *Int. J. Pharm. Sci. Rev. Res*, vol. ,10 no. ,1 pp. ,169--167 .2011
- [66] S. K. LAIADHI Feriel, ``Etude de l'efficacité de l'inhibiteur organique (extrait d'oignon) sur la corrosion de l'acier c45 en milieu acide,"
- [67] F. Z. L. Nesrine Boughezala, ``Inhibition of the corrosion of c45 steel in the middle of hydrochloric acid 5.0 m hcl by a water extract of mint leaves,"
- [68] Z. A. Piskulich, O. O. Mesele, and W. H. Thompson, ``Activation energies and beyond," *The Journal of Physical Chemistry A*, vol. ,123 no. ,33 pp. ,7194--7185 .2019
- [69] D. D. Do, *Adsorption analysis: Equilibria and kinetics (with cd containing computer MATLAB programs)*, vol. .2 World Scientific, .1998
- [70] M. Suzuki, *Adsorption Engineering. Co published by Kodansha LTD.* Amsterdam: Tokyo and Elsevier Science Publishers BV, .1990
- [71] A. L. Myers and F. Siperstein, ``Characterization of adsorbents by energy profile of adsorbed molecules," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. ,187 pp. ,81--73 .2001
- [72] T. Hoar and R. Holliday, ``The inhibition by quinolines and thioureas of the acid dissolution of mild steel," *Journal of Applied Chemistry*, vol. ,3 no. ,11 pp. ,513--502 .1953
- [73] O. L. Riggs Jr and R. M. Hurd, ``Temperature coefficient of corrosion inhibition," *Corrosion*, vol. ,23 no. ,8 pp. ,260--252 .1967
- [74] G. Schmid and H. Huang, ``Spectro-electrochemical studies of the inhibition effect of ,4 7-diphenyl-1, 10-phenanthroline on the corrosion of 304 stainless steel," *Corrosion Science*, vol. ,20 no. ,9-8 pp. ,1057--1041 .1980

- [75] H.-J. Huang, "Spectro-electrochemical studies of the inhibition effect of ,4 7-diphenyl--1, 10-phenanthroline on the corrosion of 304 stainless steel," *Dissertation Abstracts International*, vol. ,39 no. ,10 p. ,129 .1979
- [76] A. Fouda, M. Hegazi, and A. El-Azaly, "Henna extract as green corrosion inhibitor for carbon steel in hydrochloric acid solution," *International Journal of Electrochemical Science*, vol. ,14 no. ,5 pp. ,4682--4668 .2019
- [77] A. Fouda, A. Al-Sarawy, F. S. Ahmed, and H. El-Abbasy, "Corrosion inhibition of aluminum 6063 using some pharmaceutical compounds," *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, vol. ,45 pp. ,643--635 .2009
- [78] A. H. Al-Moubaraki and S. D. Al-Malwi, "Experimental and theoretical evaluation of aqueous black mustard seeds extract as sustainable-green inhibitor for mild steel corrosion in h2so4 acid solutions," *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. ,36 no. ,24-23 pp. ,2643--2612 .2022
- [79] I. El Ouali, B. Hammouti, A. Aouniti, Y. Ramli, M. Azougagh, E. Essassi, and M. Bouachrine, "Thermodynamic characterisation of steel corrosion in hcl in the presence of 2-phenylthieno ,3) 2-b) quinoxaline," *J. Mater. Environ. Sci*, vol. ,1 no. ,1 pp. ,8--1 .2010
- [80] H. A. Matter, T. M. Ayad, and A. A. Alkatly, "Grape leaves and ziziphus spina-christi, extracts as a green inhibitors corrosion for the carbon steel and oil pipelines in 1m h2so4," *Journal of Materials and Environmental Engineering*, vol. ,14 no. ,6 pp. ,145--124 .2024
- [81] K. Dahmani, M. Galai, A. Ech-Chebab, N. Al-Zaqri, M. Ouakki, A. Elgendy, R. Ez-Zriouli, S.-C. Kim, M. E. Touhami, and M. Cherkaoui, "Investigating the inhibitory properties of cupressus sempervirens extract against copper corrosion in 5.0 m h2so4: Combining quantum (density functional theory calculation--monte

- carlo simulation) and electrochemical-surface studies," *ACS omega*, vol. ,8 no. ,27 pp. ,24232--24218 .2023
- [82] F. Bouhlal, N. Labjar, F. Abdoun, A. Mazkour, M. Serghini-Idrissi, M. El Mahi, E. M. Lotfi, A. Skalli, and S. El Hajjaji, "Chemical and electrochemical studies of the inhibition performance of hydro-alcoholic extract of used coffee grounds (hecg) for the corrosion of c38 steel in 1m hydrochloric acid," *Egyptian Journal of Petroleum*, vol. ,29 no. ,1 pp. ,52--45 .2020
- [83] L. Huang, W.-Q. Chen, S.-S. Wang, Q. Zhao, H.-J. Li, and Y.-C. Wu, "Starch, cellulose and plant extracts as green inhibitors of metal corrosion: a review," *Environmental Chemistry Letters*, vol. ,20 no. ,5 pp. ,3264--3235 .2022
- [84] B. Lin, J. Shao, C. Zhao, X. Zhou, F. He, and Y. Xu, "Passiflora edulis sims peel extract as a renewable corrosion inhibitor for mild steel in phosphoric acid solution," *Journal of Molecular Liquids*, vol. ,375 p. ,121296 .2023
- [85] R. Alsadiq, F. Mansour, and T. Abdullaha, "the effect of moringa inhibitor on the corrosion of mild steels in studying c and 50 c at temperatures 40 4 so 2 5.0 mh,"
- [86] M. K. Khaoula, M. K. IKRAM, and M. M. WIAM, "Conception et évaluation des systèmes de peintures pour conteneurs au milieu marin,"
- [87] R. Loto and A. Busari, *Inhibtiion effect of rosemary oil on mild steel corrosion in a water-based petrochemical drilling fluid*, vol. .770 .2020
- [88] A. A. Alamiery, "Study of corrosion behavior of n'-(2-(2-oxomethylpyrrol-1-yl) ethyl) piperidine for mild steel in the acid environment," *Biointerface Res. Appl. Chem*, vol. ,12 no. ,3 pp. ,3646--3638 .2022

- [89] M. ALLALI and A. N. HADJ, *Synthèse bibliographique sur les inhibiteurs pour lutter contre la corrosion électrochimique*. PhD thesis, Université KASDI-MERBAH Ouargla.
- [90] M. BENARIOUA, *Inhibition de la corrosion d'un acier ordinaire par les chromates et les molybdates*. PhD thesis, Université de Batna ,2 .2014
- [91] M. G. Fontana, N. D. Greene, *et al.*, *Corrosion engineering*. McGraw-hill, .2018
- [92] A. Abdel-Gaber, B. Abd-El-Nabey, E. Khamis, and D. Abd-El-Khalek, "Investigation of fig leaf extract as a novel environmentally friendly antiscalent for CaCO_3 calcareous deposits," *Desalination*, vol. ,230 no. ,3-1 pp. ,328--314 .2008
- [93] S. K. LAIADHI Feriel, "Etude de l'efficacité de l'inhibiteur organique (extrait d'oignon) sur la corrosion de l'acier c45 en milieu acide,"
- [94] T. Anirudhan and P. Radhakrishnan, "Thermodynamics and kinetics of adsorption of Cu (II) from aqueous solutions onto a new cation exchanger derived from tamarind fruit shell," *The Journal of Chemical Thermodynamics*, vol. ,40 no. ,4 pp. ,709--702 .2008
- [95] S. Chowdhury, R. Mishra, P. Saha, and P. Kushwaha, "Adsorption thermodynamics, kinetics and isosteric heat of adsorption of malachite green onto chemically modified rice husk," *Desalination*, vol. ,265 no. ,3-1 pp. ,168--159 .2011
- [96] M. E. Argun, "Use of clinoptilolite for the removal of nickel ions from water: kinetics and thermodynamics," *Journal of Hazardous Materials*, vol. ,150 no. ,3 pp. ,595--587 .2008
- [97] L. C. Go, D. Depan, A. Holmes, William E and Gallo, K. Knierim, T. Bertrand, and R. Hernandez, "Kinetic and thermodynamic analyses of the corrosion inhibition of synthetic extracellular polymeric substances," *PeerJ Materials Science*, vol. ,2 p. e4, .2020

- [98] X. Wang, L. Chen, F. Yang, Q. Xiang, and J. Liu, "Corrosion inhibition mechanism and extraction technology of plant corrosion inhibitors: a review," *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 37, no. 21, pp. 2943--2919. 2023
- [99] M. Farhat, M. May, T. Abdullah, et al., *Comparison of different concentrations efficiency of Artemisia and Sesamum plants extractors as corrosion inhibitors for medium steel specimens in 5.0 M HCl at temperature of 25° C*, vol. 3. 2024
- [100] مستخلص بواسطة الهيدروكلوريك حمض وسط في الفولاذ تآكل تثبيط فريدة, [9]. [9]. الزيتون, "رق الأول مائي"
- [101] H. L. Y. Sin, A. A. Rahim, C. Y. Gan, B. Saad, M. I. Salleh, and M. Umeda, "Aquilaria subintergra leaves extracts as sustainable mild steel corrosion inhibitors in hcl," *Measurement*, vol. 109, pp. 345--334. 2017
- [102] H.-Y. Lin, S.-H. Juan, S.-C. Shen, F.-L. Hsu, and Y.-C. Chen, "Inhibition of lipopolysaccharide-induced nitric oxide production by flavonoids in raw264. 7 macrophages involves heme oxygenase-1," *Biochemical pharmacology*, vol. 66, no. 9, pp. 1832--1821. 2003
- [103] I. El Ouali, B. Hammouti, A. Aouniti, Y. Ramli, M. Azougagh, E. Essassi, and M. Bouachrine, "Thermodynamic characterisation of steel corrosion in hcl in the presence of 2-phenylthieno, 3) 2-b) quinoxaline," *J. Mater. Environ. Sci*, vol. 1, no. 1, pp. 8--1. 2010
- [104] H. Mobtaker, M. Azadi, and M. Rassouli, "The corrosion inhibition of carbon steel in 1 m hcl solution by oestrus ovis larvae extract as a new bio--inhibitor," *Heliyon*, vol. 8, no. 12. 2022
- [105] D. Daoud, *Etude du pouvoir complexant et inhibiteur de nouveaux ligands bases de schfi*. PhD thesis, 2018
- [106] A. Dehghani, G. Bahlakeh, and B. Ramezanzadeh, "A detailed electrochemical/theoretical exploration of the aqueous chinese gooseberry fruit shell extract as a green and cheap corrosion

- inhibitor for mild steel in acidic solution," *Journal of Molecular Liquids*, vol. ,282 pp. ,384--366 .2019
- [107] L. Ma, Y. Qiang, and W. Zhao, ``Designing novel organic inhibitor loaded mgal-ldhs nanocontainer for enhanced corrosion resistance," *Chemical Engineering Journal*, vol. ,408 p. ,127367 .2021
- [108] M. Quraishi, D. S. Chauhan, and F. A. Ansari, ``Development of environmentally benign corrosion inhibitors for organic acid environments for oil-gas industry," *Journal of Molecular Liquids*, vol. ,329 p. ,115514 .2021
- [109] F. M. Galleguillos Madrid, A. Soliz, L. Cáceres, M. Bergendahl, S. Leiva-Guajardo, C. Portillo, D. Olivares, N. Toro, V. Jimenez-Arevalo, and M. Páez, ``Green corrosion inhibitors for metal and alloys protection in contact with aqueous saline," *Materials*, vol. ,17 no. ,16 p. ,3996 .2024

المصادر

- [1] H. M. Abd El-Lateef, S. Shaaban, M. M. Khalaf, A. Toghan, and K. Shalabi, ``Synthesis, experimental, and computational studies of water soluble anthranilic organoselenium compounds as safe corrosion inhibitors for j55 pipeline steel in acidic oilfield formation water," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. ,625 p. ,126894 .2021
- [2] A. Thoume, D. B. Left, A. Elmakssoudi, F. Benhiba, A. Zarrouk, N. Benzbiria, I. Warad, M. Dakir, M. Azzi, and M. Zertoubi, ``Chalcone oxime derivatives as new inhibitors corrosion of carbon steel in 1 m hcl solution," *Journal of Molecular Liquids*, vol. ,337 p. ,116398 .2021
- [3] D. B. Left, M. Zertoubi, A. Irhzo, and M. Azzi, ``Revue: Huiles et extraits de plantes comme inhibiteurs de corrosion pour différents métaux et alliages dans le milieu acide chlorhydrique.(review: oils and extracts plants as corrosion inhibitors for different metals and alloys in hydrochloric acid medium).," *J. Mater. Environ. Sci.*, vol. ,4 pp. ,866--855 .2013
- [4] D. Benmessaoud Left, M. Zertoubi, A. Irhzo, and M. Azzi, ``Revue: Huiles et extraits de plantes comme inhibiteurs de corrosion pour différents métaux et alliages dans le milieu acide chlorhydrique," .2013
- [5] D. Daoud, ``Etude du pouvoir complexant et inhibiteur de nouveaux ligands bases de schif," .2018

- [6] H. Marmi, *Amélioration de la résistance à la corrosion électrochimique des aciers par utilisation des inhibiteurs*. PhD thesis, Université Mohamed Khider-Biskra, .2017
- [7] M. Bedair, M. Metwally, S. Soliman, A. Al-Sabagh, A. Salem, and T. Mohamed, "Extracts of mint and tea as green corrosion inhibitors for mild steel in hydrochloric acid solution," *Al-Azhar Bulletin of Science*, vol. ,26 no. 1-A, pp. ,14--1 .2015
- [8] G. Vasyliiev and V. Vorobiova, "Rape grist extract (brassica napus) as a green corrosion inhibitor for water systems," *Materials Today: Proceedings*, vol. ,6 pp. ,186--178 .2019
- [9] A. Satapathy, G. Gunasekaran, S. Sahoo, K. Amit, and P. Rodrigues, "Corrosion inhibition by justicia gendarussa plant extract in hydrochloric acid solution," *Corrosion science*, vol. ,51 no. ,12 pp. ,2856--2848 .2009
- [10] A. Chaouiki, H. Lgaz, R. Salghi, M. Chafiq, H. Oudda, K. Bhat, I. Cretescu, I. Ali, R. Marzouki, I. Chung, *et al.*, "Assessing the impact of electron-donating-substituted chalcones on inhibition of mild steel corrosion in hcl solution: Experimental results and molecular-level insights," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. ,588 p. ,124366 .2020
- [11] A. Singh, K. Ansari, D. S. Chauhan, M. Quraishi, H. Lgaz, and I.-M. Chung, "Comprehensive investigation of steel corrosion inhibition at macro/micro level by ecofriendly green corrosion inhibitor in 15% hcl medium," *Journal of colloid and interface science*, vol. ,560 pp. ,236--225 .2020
- [12] R. Kumar, S. Chahal, S. Kumar, S. Lata, H. Lgaz, R. Salghi, and S. Jodeh, "Corrosion inhibition performance of chromone-3-acrylic acid derivatives for low alloy steel with theoretical modeling and experimental aspects," *Journal of Molecular Liquids*, vol. ,243 pp. ,450--439 .2017

- [13] A. Singh, K. Ansari, J. Haque, P. Dohare, H. Lgaz, R. Salghi, and M. Quraishi, "Effect of electron donating functional groups on corrosion inhibition of mild steel in hydrochloric acid: Experimental and quantum chemical study," *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, vol. ,82 pp. ,251--233 .2018
- [14] E. Bardal, *Corrosion and protection*. Springer, .2004
- [15] B. I. Abderrahim, *Comportement à la corrosion d'un acier doux, dans un milieu à différents pH, en présence de ZnCl₂*. PhD thesis, Batna, Université El Hadj Lakhdar. Faculté des Sciences de l'Ingenieur, .2010
- [16] I. Anoune, *Résistance à la corrosion des revêtements composites nickel-alumine sur différents substrats*. PhD thesis, Université de Batna ,2 .2014
- [17] M. ALLALI and A. N. HADJ, *Synthèse bibliographique sur les inhibiteurs pour lutter contre la corrosion électrochimique*. PhD thesis, Université KASDI-MERBAH Ouargla.
- [18] M. BENARIOUA, *Inhibtion de la corrosion d'un acier ordinaire par les chromates et les molybdates*. PhD thesis, Université de Batna ,2 .2014
- [19] H. Aljibori, A. Alamiery, and A. Kadhum, "Advances in corrosion protection coatings: A comprehensive review," *Int. J. Corros. Scale Inhib*, vol. ,12 no. ,4 pp. ,1520--1476 .2023
- [20] I. B. SEBTI and R. B. KADDOUR, "Etude théorique par dft d'une série d'inhibiteurs de la corrosion,"
- [21] A. E. Hughes, R. Parvizi, and M. Forsyth, "Microstructure and corrosion of aa2024," *Corrosion Reviews*, vol. ,33 no. ,2-1 pp. --1 ,30 .2015
- [22] S. Harsimran, K. Santosh, and K. Rakesh, "Overview of corrosion and its control: A critical review," *Proc. Eng. Sci*, vol. ,3 no. ,1 pp. -13 ,24- .2021

- [23] B. E. Brycki, I. H. Kowalczyk, A. Szulc, O. Kaczerewska, and M. Pakiet, "Organic corrosion inhibitors," *Corrosion inhibitors, principles and recent applications*, vol. ,3 p. ,33 .2018
- [24] A. J. AL-Lamei, N. K. Muftin, F. Hussein, and A. S. Mahdi, "Organic compounds as corrosion inhibitors from natural products," *Int J Adv Res Phys Sci*, vol. ,7 pp. ,35--25 .2020
- [25] C. G. Dariva and A. F. Galio, "Corrosion inhibitors--principles, mechanisms and applications," *Developments in corrosion protection*, vol. ,16 pp. ,378--365 .2014
- [26] J. A. Rodríguez, J. Cruz-Borbolla, P. A. Arizpe-Carreón, and E. Gutiérrez, "Mathematical models generated for the prediction of corrosion inhibition using different theoretical chemistry simulations," *Materials*, vol. ,13 no. ,24 p. ,5656 .2020
- [27] G. Palanisamy, "Corrosion inhibitors," in *Corrosion inhibitors*, IntechOpen, .2019
- [28] A. Alrebh, *Investigation of 2-(2-methylaminoethyl) pyridine as a green corrosion inhibitor for carbon steel for applications in the oil and gas industry*. McGill University (Canada), .2016
- [29] M. Znini, "Application of essential oils as green corrosion inhibitors for metals and alloys in different aggressive mediums," *Arabian Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, vol. ,5 no. ,3 pp. ,34--1 .2019
- [30] B. A. Rani and B. B. J. Basu, "Green inhibitors for corrosion protection of metals and alloys: an overview," *International Journal of corrosion*, vol. ,2012 no. ,1 p. ,380217 .2012
- [31] A. Sedik, D. Lerari, A. Salci, S. Athmani, K. Bachari, İ. Gecibesler, and R. Solmaz, "Dardagan fruit extract as eco-friendly corrosion inhibitor for mild steel in 1 m hcl: Electrochemical and surface morphological studies," *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, vol. ,107 pp. ,200--189 .2020

- [32] M. Toorani, M. Aliofkhazraei, M. Mahdavian, and R. Naderi, "Superior corrosion protection and adhesion strength of epoxy coating applied on az31 magnesium alloy pre-treated by peo/silane with inorganic and organic corrosion inhibitors," *Corrosion Science*, vol. ,178 p. ,109065 .2021
- [33] K. Tamalmani and H. Husin, "Review on corrosion inhibitors for oil and gas corrosion issues," *Applied Sciences*, vol. ,10 no. ,10 p. ,3389 .2020
- [34] I. W. Ma, S. Ammar, S. S. Kumar, K. Ramesh, and S. Ramesh, "A concise review on corrosion inhibitors: types, mechanisms and electrochemical evaluation studies," *Journal of Coatings Technology and Research*, pp. ,28--1 .2022
- [35] M. Faustin, *Étude de l'effet des alcaloïdes sur la corrosion de l'acier C38 en milieu acide chlorhydrique 1M: application à Aspidosperma album et Geissospermum laeve (Apocynacées)*. PhD thesis, Université des Antilles et de la Guyane (UAG), .2013
- [36] N. M. Aljamali, "Experimental methods for preparation of mannich bases, formazan, normal and cyclic sulfur compounds," *Evince pub Publishing House*, .2018
- [37] P. A. Dub and J. C. Gordon, "The role of the metal-bound n--h functionality in noyori-type molecular catalysts," *Nature Reviews Chemistry*, vol. ,2 no. ,12 pp. ,408--396 .2018
- [38] S. Lim, K. Ting, T. Bradshaw, N. Zeenathul, C. Wiart, T. Khoo, K. Lim, and H. Loh, "Acalypha wilkesiana extracts induce apoptosis by causing single strand and double strand dna breaks," *Journal of ethnopharmacology*, vol. ,138 no. ,2 pp. ,623--616 .2011
- [39] N. M. Aljamali and H. S. Hassen, "Review on azo-compounds and their applications," *Journal of Catalyst & Catalysis*, vol. ,8 no. ,2 pp. ,16--8 .2021

- [40] H. Nollet, M. Roels, P. Lutgen, P. Van der Meeren, and W. Verstraete, "Removal of pcbs from wastewater using fly ash," *Chemosphere*, vol. ,53 no. ,6 pp. ,665--655 .2003
- [41] S. Shen, T. Pan, X. Liu, L. Yuan, Y. Zhang, J. Wang, and Z. Guo, "Adsorption of pd (ii) complexes from chloride solutions obtained by leaching chlorinated spent automotive catalysts on ion exchange resin diaion wa21j," *Journal of colloid and interface science*, vol. ,345 no. ,1 pp. ,18--12 .2010
- [42] M. Taghavikish, N. K. Dutta, and N. Roy Choudhury, "Emerging corrosion inhibitors for interfacial coating," *Coatings*, vol. ,7 no. ,12 p. ,217 .2017
- [43] S. Kundu, M. Das, and D. Mitra, "Current status, opportunities and challenges of green corrosion inhibitors," *Sustainable Corrosion Inhibitors*, vol. ,107 p. ,1 .2021
- [44] D. Kesavan, M. Gopiraman, and N. Sulochana, "Green inhibitors for corrosion of metals: a review," *Chem. Sci. Rev. Lett*, vol. ,1 no. ,1 pp. ,8--1 .2012
- [45] S. Devikala, P. Kamaraj, M. Arthanareeswari, and S. Pavithra, "Green corrosion inhibition of mild steel by asafoetida extract extract in 5%.3 nacl," *Materials Today: Proceedings*, vol. ,14 pp. ,601--590 .2019
- [46] S. Abdelaziz, M. Benamira, L. Messaadia, Y. Boughoues, H. Lahmar, and A. Boudjerda, "Green corrosion inhibition of mild steel in hcl medium using leaves extract of arbutus unedo l. plant: An experimental and computational approach," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. ,619 p. ,126496 .2021
- [47] O. A. Olusegun and K. N. Olabisi, "Adsorption isotherms, kinetics and thermodynamic studies of the removal of manganese from

- aqueous solutions using activated carbon produced from lantana camara stem," .2020
- [48] H. Hamani, *Synthèse, caractérisation et étude du pouvoir inhibiteur de nouvelles molécules bases de sch.* PhD thesis, .2018
- [49] M. A. Al-Ghouti and D. A. Da'ana, ``Guidelines for the use and interpretation of adsorption isotherm models: A review," *Journal of hazardous materials*, vol. ,393 p. ,122383 .2020
- [50] S. Chen, S. Chen, B. Zhu, C. Huang, and W. Li, ``Magnolia grandiflora leaves extract as a novel environmentally friendly inhibitor for q235 steel corrosion in 1 m hcl: Combining experimental and theoretical researches," *Journal of Molecular Liquids*, vol. ,311 p. ,113312 .2020
- [51] S. Mikhail, M. Lyubov, D. Lucia, P. Kira, K. Viktoriia, and G. Alexandra, ``Comprehensive study of the action of corrosion inhibitors based on quaternary ammonium compounds in solutions of hydrochloric and sulfamic acids," *Energies*, vol. ,15 no. ,1 p. ,24 .2021
- [52] T. H. Ibrahim, E. E. Gomes, I. B. Obot, M. Khamis, and M. A. Sabri, ``Mild steel green inhibition by ficus carica leaves extract under practical field conditions," *Journal of adhesion science and Technology*, vol. ,31 no. ,24 pp. ,2718--2697 .2017
- [53] J. Flores-De los Ríos, M. Sánchez-Carrillo, C. Nava-Dino, J. Chacón-Nava, J. González-Rodríguez, E. Huape-Padilla, M. Neri-Flores, and A. Martínez-Villafañe, ``Opuntia ficus-indica extract as green corrosion inhibitor for carbon steel in 1 m hcl solution," *Journal of Spectroscopy*, vol. ,2015 no. ,1 p. ,714692 .2015
- [54] T. H. Ibrahim and M. Abou Zour, ``Corrosion inhibition of mild steel using fig leaves extract in hydrochloric acid solution," *International Journal of Electrochemical Science*, vol. ,6 no. ,12 pp. ,6455--6442 .2011

- [55] H. A. Matter, T. M. Ayad, and A. A. Alkatly, "Grape leaves and ziziphus spina-christi, extracts as a green inhibitors corrosion for the carbon steel and oil pipelines in 1M H₂SO₄," *Journal of Materials Research*, no. 6, pp. 145--124. 2024
- [56] H. Anh, N. Vu, L. Huyen, N. Tran, H. Thu, L. Bach, Q. Trinh, S. P. Vattikuti, and N. Nam, "Ficus racemosa leaf extract for inhibiting steel corrosion in a hydrochloric acid medium," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 59, no. 6, pp. 4462--4449. 2020
- [57] D. Dwivedi, K. Lepková, and T. Becker, "Carbon steel corrosion: a review of key surface properties and characterization methods," *RSC advances*, vol. 7, no. 8, pp. 4610--4580. 2017
- [58] K. Heusler, D. Landolt, and S. Trasatti, "Electrochemical corrosion nomenclature," *Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry*, vol. 274, no. 2-1, pp. 348--345. 1989
- [59] F. Malaret and X.-S. Yang, "Exact calculation of corrosion rates by the weight-loss method," *Experimental results*, vol. 3, p. e13. 2022
- [60] B. E. Ibrahimi, J. V. Nardeli, and L. Guo, "An overview of corrosion," *Sustainable corrosion inhibitors I: fundamentals, methodologies, and industrial applications*, pp. 19--1. 2021
- [61] K. Akhtar, S. A. Khan, S. B. Khan, and A. M. Asiri, *Scanning electron microscopy: Principle and applications in nanomaterials characterization*. Springer, 2018
- [62] A. Mohammed and A. Abdullah, *Scanning electron microscopy (SEM): A review*, vol. 2018. 2018
- [63] N. LEHRAKI, "Dépôt et caractérisation des couches minces de ZnO par spray ultrasonique," 2021
- [64] H. Ouici, O. Benali, Y. Harek, C. Selles, et al., *INHIBITION DE LA CORROSION D'UN ACIER DOUX PAR LE 5-(3-METHOXYPHENYL)-4-TRIAZOLE 3-THIONE MPTT DANS UNE SOLUTION D'ACIDE CHLORHYDRIQUE*. 2012

- [65] A. Begum, ``Rosmarinus officinalis L. herb as corrosion inhibitor for mild steel in sulphuric acid medium," *Int. J. Pharm. Sci. Rev. Res*, vol. ,10 no. ,1 pp. ,169--167 .2011
- [66] S. K. LAIADHI Feriel, ``Etude de l'efficacité de l'inhibiteur organique (extrait d'oignon) sur la corrosion de l'acier c45 en milieu acide,"
- [67] F. Z. L. Nesrine Boughezala, ``Inhibition of the corrosion of c45 steel in the middle of hydrochloric acid 5.0 m hcl by a water extract of mint leaves,"
- [68] Z. A. Piskulich, O. O. Mesele, and W. H. Thompson, ``Activation energies and beyond," *The Journal of Physical Chemistry A*, vol. ,123 no. ,33 pp. ,7194--7185 .2019
- [69] D. D. Do, *Adsorption analysis: Equilibria and kinetics (with cd containing computer MATLAB programs)*, vol. .2 World Scientific, .1998
- [70] M. Suzuki, *Adsorption Engineering. Co published by Kodansha LTD.* Amsterdam: Tokyo and Elsevier Science Publishers BV, .1990
- [71] A. L. Myers and F. Siperstein, ``Characterization of adsorbents by energy profile of adsorbed molecules," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. ,187 pp. ,81--73 .2001
- [72] T. Hoar and R. Holliday, ``The inhibition by quinolines and thioureas of the acid dissolution of mild steel," *Journal of Applied Chemistry*, vol. ,3 no. ,11 pp. ,513--502 .1953
- [73] O. L. Riggs Jr and R. M. Hurd, ``Temperature coefficient of corrosion inhibition," *Corrosion*, vol. ,23 no. ,8 pp. ,260--252 .1967
- [74] G. Schmid and H. Huang, ``Spectro-electrochemical studies of the inhibition effect of ,4 7-diphenyl-1, 10-phenanthroline on the corrosion of 304 stainless steel," *Corrosion Science*, vol. ,20 no. ,9-8 pp. ,1057--1041 .1980

- [75] H.-J. Huang, "Spectro-electrochemical studies of the inhibition effect of ,4 7-diphenyl--1, 10-phenanthroline on the corrosion of 304 stainless steel," *Dissertation Abstracts International*, vol. ,39 no. ,10 p. ,129 .1979
- [76] A. Fouda, M. Hegazi, and A. El-Azaly, "Henna extract as green corrosion inhibitor for carbon steel in hydrochloric acid solution," *International Journal of Electrochemical Science*, vol. ,14 no. ,5 pp. ,4682--4668 .2019
- [77] A. Fouda, A. Al-Sarawy, F. S. Ahmed, and H. El-Abbasy, "Corrosion inhibition of aluminum 6063 using some pharmaceutical compounds," *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, vol. ,45 pp. ,643--635 .2009
- [78] A. H. Al-Moubaraki and S. D. Al-Malwi, "Experimental and theoretical evaluation of aqueous black mustard seeds extract as sustainable-green inhibitor for mild steel corrosion in h2so4 acid solutions," *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. ,36 no. ,24-23 pp. ,2643--2612 .2022
- [79] I. El Ouali, B. Hammouti, A. Aouniti, Y. Ramli, M. Azougagh, E. Essassi, and M. Bouachrine, "Thermodynamic characterisation of steel corrosion in hcl in the presence of 2-phenylthieno ,3) 2-b) quinoxaline," *J. Mater. Environ. Sci*, vol. ,1 no. ,1 pp. ,8--1 .2010
- [80] H. A. Matter, T. M. Ayad, and A. A. Alkatly, "Grape leaves and ziziphus spina-christi, extracts as a green inhibitors corrosion for the carbon steel and oil pipelines in 1m h2so4," *Journal of Materials Research*, vol. ,34 no. ,6 pp. ,145--124 .2024
- [81] K. Dahmani, M. Galai, A. Ech-Chebab, N. Al-Zaqri, M. Ouakki, A. Elgendy, R. Ez-Zriouli, S.-C. Kim, M. E. Touhami, and M. Cherkaoui, "Investigating the inhibitory properties of cupressus sempervirens extract against copper corrosion in 5.0 m h2so4: Combining quantum (density functional theory calculation--monte

- carlo simulation) and electrochemical-surface studies," *ACS omega*, vol. ,8 no. ,27 pp. ,24232--24218 .2023
- [82] F. Bouhlal, N. Labjar, F. Abdoun, A. Mazkour, M. Serghini-Idrissi, M. El Mahi, E. M. Lotfi, A. Skalli, and S. El Hajjaji, "Chemical and electrochemical studies of the inhibition performance of hydro-alcoholic extract of used coffee grounds (hecg) for the corrosion of c38 steel in 1m hydrochloric acid," *Egyptian Journal of Petroleum*, vol. ,29 no. ,1 pp. ,52--45 .2020
- [83] L. Huang, W.-Q. Chen, S.-S. Wang, Q. Zhao, H.-J. Li, and Y.-C. Wu, "Starch, cellulose and plant extracts as green inhibitors of metal corrosion: a review," *Environmental Chemistry Letters*, vol. ,20 no. ,5 pp. ,3264--3235 .2022
- [84] B. Lin, J. Shao, C. Zhao, X. Zhou, F. He, and Y. Xu, "Passiflora edulis sims peel extract as a renewable corrosion inhibitor for mild steel in phosphoric acid solution," *Journal of Molecular Liquids*, vol. ,375 p. ,121296 .2023
- [85] R. Alsadiq, F. Mansour, and T. Abdullaha, "the effect of moringa inhibitor on the corrosion of mild steels in studying c and 50 c at temperatures 40 4 so 2 5.0 mh,"
- [86] M. K. Khaoula, M. K. IKRAM, and M. M. WIAM, "Conception et évaluation des systèmes de peintures pour conteneurs au milieu marin,"
- [87] R. Loto and A. Busari, *Inhibtiion effect of rosemary oil on mild steel corrosion in a water-based petrochemical drilling fluid*, vol. .770 .2020
- [88] A. A. Alamiery, "Study of corrosion behavior of n'-(2-(2-oxomethylpyrrol-1-yl) ethyl) piperidine for mild steel in the acid environment," *Biointerface Res. Appl. Chem*, vol. ,12 no. ,3 pp. ,3646--3638 .2022

- [89] M. ALLALI and A. N. HADJ, *Synthèse bibliographique sur les inhibiteurs pour lutter contre la corrosion électrochimique*. PhD thesis, Université KASDI-MERBAH Ouargla.
- [90] M. BENARIOUA, *Inhibition de la corrosion d'un acier ordinaire par les chromates et les molybdates*. PhD thesis, Université de Batna ,2 .2014
- [91] M. G. Fontana, N. D. Greene, *et al.*, *Corrosion engineering*. McGraw-hill, .2018
- [92] A. Abdel-Gaber, B. Abd-El-Nabey, E. Khamis, and D. Abd-El-Khalek, "Investigation of fig leaf extract as a novel environmentally friendly antiscalent for CaCO_3 calcareous deposits," *Desalination*, vol. ,230 no. ,3-1 pp. ,328--314 .2008
- [93] S. K. LAIADHI Feriel, "Etude de l'efficacité de l'inhibiteur organique (extrait d'oignon) sur la corrosion de l'acier c45 en milieu acide,"
- [94] T. Anirudhan and P. Radhakrishnan, "Thermodynamics and kinetics of adsorption of Cu (II) from aqueous solutions onto a new cation exchanger derived from tamarind fruit shell," *The Journal of Chemical Thermodynamics*, vol. ,40 no. ,4 pp. ,709--702 .2008
- [95] S. Chowdhury, R. Mishra, P. Saha, and P. Kushwaha, "Adsorption thermodynamics, kinetics and isosteric heat of adsorption of malachite green onto chemically modified rice husk," *Desalination*, vol. ,265 no. ,3-1 pp. ,168--159 .2011
- [96] M. E. Argun, "Use of clinoptilolite for the removal of nickel ions from water: kinetics and thermodynamics," *Journal of Hazardous Materials*, vol. ,150 no. ,3 pp. ,595--587 .2008
- [97] L. C. Go, D. Depan, A. Holmes, William E and Gallo, K. Knierim, T. Bertrand, and R. Hernandez, "Kinetic and thermodynamic analyses of the corrosion inhibition of synthetic extracellular polymeric substances," *PeerJ Materials Science*, vol. ,2 p. e4, .2020

- [98] X. Wang, L. Chen, F. Yang, Q. Xiang, and J. Liu, "Corrosion inhibition mechanism and extraction technology of plant corrosion inhibitors: a review," *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 37, no. 21, pp. 2943--2919. 2023
- [99] M. Farhat, M. May, T. Abdullah, et al., *Comparison of different concentrations efficiency of Artemisia and Sesamum plants extractors as corrosion inhibitors for medium steel specimens in 5.0 M HCl at temperature of 25° C*, vol. 3. 2024
- [100] مستخلص بواسطة الهيدروكلوريك حمض وسط في الفولاذ تآكل تثبيط فريدة, [9]. [9]. الزيتون, "رق الأول مائي"
- [101] H. L. Y. Sin, A. A. Rahim, C. Y. Gan, B. Saad, M. I. Salleh, and M. Umeda, "Aquilaria subintergra leaves extracts as sustainable mild steel corrosion inhibitors in hcl," *Measurement*, vol. 109, pp. 345--334. 2017
- [102] H.-Y. Lin, S.-H. Juan, S.-C. Shen, F.-L. Hsu, and Y.-C. Chen, "Inhibition of lipopolysaccharide-induced nitric oxide production by flavonoids in raw264. 7 macrophages involves heme oxygenase-1," *Biochemical pharmacology*, vol. 66, no. 9, pp. 1832--1821. 2003
- [103] I. El Ouali, B. Hammouti, A. Aouniti, Y. Ramli, M. Azougagh, E. Essassi, and M. Bouachrine, "Thermodynamic characterisation of steel corrosion in hcl in the presence of 2-phenylthieno, 3) 2-b) quinoxaline," *J. Mater. Environ. Sci*, vol. 1, no. 1, pp. 8--1. 2010
- [104] H. Mobtaker, M. Azadi, and M. Rassouli, "The corrosion inhibition of carbon steel in 1 m hcl solution by oestrus ovis larvae extract as a new bio--inhibitor," *Heliyon*, vol. 8, no. 12. 2022
- [105] D. Daoud, *Etude du pouvoir complexant et inhibiteur de nouveaux ligands bases de schfi*. PhD thesis, 2018
- [106] A. Dehghani, G. Bahlakeh, and B. Ramezanzadeh, "A detailed electrochemical/theoretical exploration of the aqueous chinese gooseberry fruit shell extract as a green and cheap corrosion

- inhibitor for mild steel in acidic solution," *Journal of Molecular Liquids*, vol. ,282 pp. ,384--366 .2019
- [107] L. Ma, Y. Qiang, and W. Zhao, ``Designing novel organic inhibitor loaded mgal-ldhs nanocontainer for enhanced corrosion resistance," *Chemical Engineering Journal*, vol. ,408 p. ,127367 .2021
- [108] M. Quraishi, D. S. Chauhan, and F. A. Ansari, ``Development of environmentally benign corrosion inhibitors for organic acid environments for oil-gas industry," *Journal of Molecular Liquids*, vol. ,329 p. ,115514 .2021
- [109] F. M. Galleguillos Madrid, A. Soliz, L. Cáceres, M. Bergendahl, S. Leiva-Guajardo, C. Portillo, D. Olivares, N. Toro, V. Jimenez-Arevalo, and M. Páez, ``Green corrosion inhibitors for metal and alloys protection in contact with aqueous saline," *Materials*, vol. ,17 no. ,16 p. ,3996 .2024



Département des Sciences de la matière

Filière: Physique

قسم : علوم المادة



تصري-ح شرف-ي

خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لإنجاز بحث

(ملحق القرار 1082 المؤرخ في 27/12/2021)

أنا الممضي أسفله،

السيد(ة): السيد ر. أ. ميسا

تخصص: فيزياء والمطابقات المتجددة الصفة: طالب سنة ثانية ماستر

الحامل(ة) لبطاقة التعريف الوطنية رقم: 20.5.3.7.30.7.2. الصادرة بتاريخ: 2020.08.08

المسجل بكلية: (العلوم) السيد(ة) قسم: علوم المادة:

والمكلف بإنجاز أعمال بحث : مذكرة

عنوانها: خ. أ. ب. في السيد ر. أ. ميسا

..... السيد(ة) السيد(ة) السيد(ة)

أصرح بشرفي أنني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية ومعايير الأخلاقيات المهنية والنزاهة الأكاديمية المطلوبة في إنجاز البحث المذكور أعلاه وفق ما ينص عليه القرار رقم 1082 المؤرخ في 27/12/2021 المحدد للقواعد المتعلقة بالوقاية من السرقة العلمية ومكافحتها.

التاريخ: 26 05 2025

امضاء المعني بالأمر