المجلة الدولية للهندسة وتقنية المعلومات
journal homepage:www.ijeit.misuratau.edu.ly

دراسة تأثير مثبط نتريت الصوديوم على معدل التآكل للصلب الكربوني في محلول كلوريد الصوديوم

علي علي احمد ابوفلغة
جامعة مصراته- كلية الهندسة، قسم الهندسة النفطية، مصراته، ليبيا
aabufalgha74@gmail.com

سالم علي الصديق قراب
جامعة مصراته- كلية الهندسة، قسم هندسة وعلوم المواد، مصراته، ليبيا
sgarrab@eng.misuratau.edu.ly

محمد علي مفتاح بلعم
جامعة مصراته- كلية الهندسة، قسم هندسة وعلوم المواد، مصراته، ليبيا
mohamed.ballem@eng.misuratau.edu.ly

ابتسام عادل علي الزدام
مركز الطاقات المتجددة- جامعة مصراته، مصراته، ليبيا
ibtisam.zedam22@gmail.com

الملخص— **يعتبر مثبط نتريت الصوديوم من أشهر المثبطات الكيميائية لوفرته ورخص ثمنه واستخدامه في كثير من الأوساط الآكلة. تتضمن هذه الورقة دراسة تأثير مثبط نتريت الصوديوم بتراكيز (300ppm، 500ppm، 700ppm) على تآكل الصلب الكربوني في وسط راكد من محلول كلوريد الصوديوم بتراكيز (1%، 2%، 3%،4%) وآخر متحرك بسرعات (0، 60، 100 دورة في الدقيقة) من نفس المحلول. أظهرت النتائج أن إضافة مثبط نتريت الصوديوم أدت إلى تناقص معدل تآكل الصلب الكربوني في جميع الحالات دون استثناء، وأن زيادة كمية المثبط لا تؤدي بالضرورة إلى نقص معدل التآكل؛ فعلى سبيل المثال معدل التآكل بإضافة 500ppm أعلى منه بإضافة 300ppm من المثبط (عند تركيز 4% للمحلول). بينت الدراسة أيضاً الكفاءة العالية لمثبط نتريت الصوديوم والتي لا تقل عن 90% في الوسط المتحرك، وتتعدى 97% في الوسط الراكد عند أي تركيز للمثبط والمحلول.**

الكلمات المفتاحية– **الصلب الكربوني، كلوريد الصوديوم، مثبطات التآكل، معدل التآكل، نتريت الصوديوم**

1. المقدمة

على الرغم من التطور الكبير الذي وصل إليه العالم في هذا اليوم إلا أن مشكلة التآكل كانت ولا زالت سبباً في خسائر كبيرة جداً. وبالرغم من تنوع الأضرار الناتجة عن التآكل إلا أننا نتفق بأن تأثيرها الاقتصادي سيئ جداً، وتمثل الخسائر الناتجة عن التآكل جزءا لا يستهان به، حيث قدرت التكلفة العالمية للتآكل في عام 2013 بنحو 2.5 تريليون دولار أمريكي، وهو ما يمثل 3- 4% من الناتج المحلي الإجمالي العالمي، فعلى سبيل المثال ما يعادل 20% من الحديد الذي ينتج في أمريكا يستعمل فقط للتعويض عن الصلب الذي أنتجوه سابقاً وأتلف بسبب ظواهر التآكل المختلفة [1]، بالإضافة إلى فقد الإنتاج وتكلفة أجور الصيانة والإصلاح تضاف الخسائر البشرية نتيجة الانفجارات أو التأثيرات البيئية الناتجة عن تسرب المواد السامة من الأنابيب المدفونة تحت الأرض وتأثيرها على النبات ومياه الشرب [2].

يعرف التآكل بأنه تلف المعدن نتيجة التفاعل الكيميائي أو الكهروكيميائي مع الوسط المحيط به، كما يُعرف ترموديناميكيًا بأنه عملية تلقائية طبيعية يتم فيها إعادة المعدن إلى حالته الطبيعية الثابتة التي كان عليها في الطبيعة قبل استخلاصه، وقد يُشار إلى التآكل على أنهُ العملية التي تتضمن تفكك وتحلل المعدن.[3,4].

وللتآكل أنواع متعددة وذلك حسب مظهره أو شكله ومن أهمها التآكل العام أو المنتظم والتآكل الجلفاني والتآكل ما بين الحبيبات والتآكل بالتعرية والتآكل الاجهادي والتآكل النقري والتآكل الشقي أو التجويفي. كما يصنف التآكل حسب الوسط إما جاف أو رطب [5].

ومعظم المواد عرضة للتآكل ومن بين هذه المواد الصلب الكربوني والذي يعد المادة الأكثر شيوعاً ويمثل حوالي 80 % من جميع المواد المعدنية ويستخدم في كثير من التطبيقات الصناعية حيث يدخل في صناعة السيارات والسفن، وسكك الحديد، وصناعة المعدات الحربية وفي تصنيع أوعية التفاعل وصهاريج التخزين في المنشآت البترولية [6،7].

على الرغم من أن الصلب الكربوني يمتلك متانة عالية إلا أنهُ يعد عرضة إلى عمليات تآكل مختلفة وبالتالي يؤدي إلى خسائر اقتصادية كبيرة، لذا فقد أعطي تآكله مزيدا من الاهتمام نظراً لأهميته وكثرة استخدامه [8].

ومن أهم أساليب مكافحة التآكل: اختيار المعدن المناسب للوسط المناسب، التصميم الجيد للمعدات، تعديل جهد الوسط باستعمال الحماية الكاثودية والانودية، عزل الوسط التآكلي عن السطح بواسطة الطلاء والدهانات، وأخيراً الاعتماد على معيقات التآكل (المثبطات) التي تعزل الوسط عن المعدن أوتعمل على إزالة مسببات التآكل[9].

أ- مثبطات أو معيقات التآكل

يعرف المانع أو المثبط حسب الجمعية الأمريكية لمهندسي التآكل NACE بأنه "مادة تؤخر التآكل عند إضافتها إلى البيئة بتركيزات صغيرة [10]، وحسب تعريف الأيزو ISO هو: "مادة كيميائية تقلل من معدل التآكل عند وجودها في نظام التآكل بتركيز مناسب دون تغيير ملحوظ في تركيز أي عامل تآكل آخر" [11].

ب- تصنيف مثبطات التآكل

يمكن تصنيف المثبطات بناءً على معايير مختلفة مثل آلية التثبيط أو التطبيق أو الطبيعة الكيميائية حيث يساعد هذا التصنيف في فهم أفضل لعمل المثبطات واختيار المثبط المناسب لمشكلة تآكل معينة [12]، كما صنفها آخرون حسب وظيفتها الكيميائية، إلى : مثبطات غير عضوية ومثبطات عضوية أيونية ومثبطات عضوية كاتيونية [13]، ومع ذلك فإن التصنيف الأكثر شيوعا يعتمد على إعادة تجميع مثبطات التآكل في مخطط حسب وظيفة المثبط على النحو التالي: مثبطات تخميلية/ أنودية، مثبطات كاثودية، مثبطات عضوية ومثبطات ترسيبية ومثبطات متطايرة [14].

ويجب أن يتم الاختيار الصحيح للمثبطات من خلال مطابقة كيمياء المثبط المناسبة مع ظروف التآكل واختيار الخصائص الفيزيائية المناسبة لظروف التطبيق، كما يجب اختيار المثبطات بعد الأخذ في الاعتبار طبيعة ومجموعات المعادن الموجودة، وطبيعة المادة المسببة للتآكل والبيئة وظروف التشغيل من حيث التدفق ودرجة الحرارة وانتقال الحرارة. [15]

ومن الاعتبارات المهمة التي يجب أن تؤخذ في الحسبان عند اختيار المثبط والشركة الموردة له هي التكلفة والسمية والتوافر والصداقة البيئية بالإضافة إلى خدمة ما بعد البيع. كما تصنف المثبطات حسب طريقة التفاعل الجزئي الى مثبطات كاثودية ومثبطات أنودية وأخرى مختلطة، فالمثبطات الكاثودية تعمل على تقليل تفاعل الكاثود نفسه أو تترسب بشكل اختياري على مساحة الكاثود وتعمل على زيادة ممانعة السطح وتحد من الانتشار على تلك المساحة، أما المثبطات الأنودية وتسمى أيضا بالمثبطات السالبية فهي تسبب انحراف أنودياً كبيراً في جهد التآكل يعمل على دفع السطح المعدني إلى منطقة الخمولة طبقًا إلى مخطط الاستقطاب. وأما

استلمت الورقة بالكامل في 15 سبتمبر 2023 وروجعت في 17 أكتوبر 2023
وقبلت للنشر في 10 ديسمبر 2023
ونشرت ومتاحة على الشبكة العنكبوتية في 28 ديسمبر 2023.

المثبطات المختلطة فهي تعمل على خفض كثافة التيار للتفاعلين الكاثودي والأنودي [16]. ومن المثبطات النموذجية للمحاليل شبه المتعادلة حامضيًا هي أيونات الأحماض الضعيفة، ومن أهمها عمليًا الكرومات والنتريت، البنزوات، السيليكات، الفوسفات، والبورات [15].

ج- كفاءة مثبطات التآكل

كفاءة المعيقات تعتمد اعتماداً كبيراً على عدة عوامل، أهمها نوع مادة المعيقة أو المثبط وكميته(تركيزه) والظروف التشغيلية للوسط المحيط من درجة حرارة وسرعة ودرجة حامضية، وهذه العوامل تختلف من نظام إلى آخر ومن معدن إلى آخر [15] [17] [18].

ويعد نتريت الصوديوم ($NaNO_2$) من اشهر المثبطات الانودية حيث يمنع انحلال المعدن عند الانود، كما أن فعاليته تعتمد كثيراً على تركيز أيونات الوسط او المحلول [19] و يحتوي هذا المثبط على أيونات النتريت كعنصر نشط وفعال. يعتبر نتريت الصوديوم من المعيقات الكانسة للأكسجين وأفضلها حيث أن ناتج التفاعل الكاثودي هو نترات الصوديوم كما هو في المعادلة الكيميائية:

$$2N_aNO_2 + O_2 \rightarrow 2N_aNO_3$$

والتي بدورها تكون طبقة من أكسيد المعدن وخاصة في المعادن التي لها صفة الخمول. وأداء نتريت الصوديوم كمثبط في نظام مياه التبريد شبه المغلق يتأثر بشكل ملحوظ بأي تغيير في قيم الرقم الهيدروجيني للمحلول مما يسبب في حدوث تاكل موضعي اذا لم يتم التحكم فيه جيداً [20].

وفي ابحاث سابقة تم دراسة نتريت الصوديوم كمثبطًا للتآكل لتأخير معدل تآكل الصلب الطري في مياه البحر، والنسبة المئوية المثلى كانت 4% [21] [22].

وقد تم في عدة أبحاث سابقة دراسة تأثير كل من تركيز الوسط وسرعته ودرجة حرارته وحامضيته على معدل التآكل للفولاذ الكربوني ووجد أن أي تغيير في احد هذه العوامل يؤدي إلى تغيير معدل التآكل وبالتالي يؤثر في كفاءة المعيق، كما أن هذا التغير في معدل التآكل يرتبط بهذه العوامل متزامنة بالإضافة إلى نوع المعيق نفسه.[17- 22].

هذه الورقة تتضمن دراسة تحقيقية لتأثير عاملين هما تركيز الوسط التآكلي وسرعته على تآكل الصلب الكربوني في وجود تراكيز مختلفة من مثبط نتريت الصوديوم عند درجة حرارة ثابته (درجة حرارة الغرفة).

2. الجزء العملي

تضمن الجانب العملي استعمال تقنية الليزر لقطع وتجهيز عينات من الصلب الكربوني منخفض الكربون (AISI-1020) بالتركيب الكيميائي الموضح بالجدول 1 بكثافة $7.86g/cm^2$ على هيئة صفائح مسطحة بمقاس (41.3 cm×13.2cm × 2.74 cm) كل منها بها ثقب دائري قطره (5.96 cm) أي بمساحة سطحية كلية ($13.3383\ cm^2$).كما هو موضح بالشكل (1).

جدول (1) تركيب الصلب الكربوني المستخدم

العنصر	سيلكون	كربون	منجنيز	فوسفور	كبريت
النسبة الوزنية %	0.25	0.18-0.23	0.60-0.30	0.04	0.05

شكل (1) عينة من صفيحة من الفولاذ الكربوني

كما تم تجهيز محلول كلوريد الصوديوم بتراكيز (1%،2%،3%&4%) وباقي معدات الاختبار. في البداية تم تنظيف وسنفرة العينات وصقلها وتم غمرها على مراحل في محلول راكد من كلوريد الصوديوم وبالتراكيز المشار إليها لمدة 7 أيام وبدون إضافة أي كمية من مثبط نتريت الصوديوم. وتم قياس الفقد في وزن العينة مع تكرار نفس العمل السابق ولكن بإضافة تراكيز مختلفة من مثبط نتريت الصوديوم (300PPM،500PPM، 700PMM) وتم قياس الفقد في وزن العينة بعد انتهاء فترة التعريض عند كل تركيز من المحلول وعند كل تركيز من المثبط. وذلك للمقارنة بين سرعة التآكل بوجود وعدم وجود المثبط.

كما تم غمر العينة في محلول كلوريد الصوديوم وعند التراكيز المشار إليها ولكن عند سرعات مختلفة للمحلول (60 و100 دورة في الدقيقة) باستخدام جهاز محراك مغناطيسي نوع (Falk) وبدون وجود آي كمية للمثبط ولمدة 5 ساعات. وتم قياس الفقد في الوزن وذلك لحساب تأثير سرعة المحلول على معدل التآكل.

وأخيراً تم غمر عينة من الصلب الكربوني في المحلول عند نفس التراكيز وعند نفس السرعات ولكن بإضافة 500pmm من مثبط نتريت الصوديوم ولمدة 5 ساعات وتم قياس الفقد في وزن العينة وذلك لبيان تأثير تركيز وسرعة المحلول على كفاءة المثبط. انظر الاشكال المرفقة للجزء العملي

وفي جميع الأحوال السابقة يتم تنظيف عينات الوزن الفاقد بعد انتهاء زمن الغمر طبقاً لمواصفة الجمعية الأمريكية للمواد والاختبارات (ASTM-G-1) [23]، وخطوات اختبار الغمر تمت طبقا للمواصفة ASTM G-31) [24]

3. النتائج والمناقشة

تم حساب معدل التآكل في الصلب الكربوني بطريقة الفقد في الوزن والتي تعد الأكثر شيوعا ، حيث وزن العينة (ΔW) وعند تراكيز (1%-2%-3%-4%) لمحلول راكد من كلوريد الصوديوم والذي يحاكي بيئة ماء البحر وبإضافة كمية من مثبط نتريت الصوديوم وبتراكيز (300ppm، 500ppm، 700ppm) .كما تم دراسة تأثير تركيز الوسط وسرعاته (0 و) على معدل التآكل في عدم وجود أي مثبط وعند تركيز 500ppm من مثبط نتريت الصوديوم في ظروف ثابتة من درجة الحرارة الغرفة وباستخدام المعادلة :

$$Rc = \frac{87.6 \times \Delta W}{D\,A\,t} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

حيث :

Rc معدل التآكل (mm/yr)

ΔW الفقد في وزن العينة (mmg)

D كثافة العينة (g/cm^3).

A المساحة السطحية للعينة (cm^2).

t زمن غمر العينة في المحلول بالساعات.

كما تم حساب كفاءة المثبط باستخدام المعادلة:

$$\eta\% = \frac{Rc_o - Rc}{Rc_o} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

حيث :

η كفاءة المعيق.

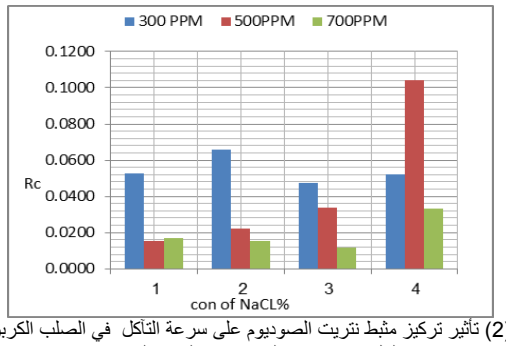
Rc سرعة التآكل في وجود المعيق.

Rc_o سرعة التآكل بدون وجود المعيق

والنتائج المتحصل عليها موضحة في الجداول والأشكال التالية:

جدول (2) تأثير تركيز مثبط نتريت الصوديوم على كل من الفقد في الوزن وسرعة التآكل في الصلب الكربوني في محلول ساكن متعدد التركيز من كلوريد الصوديوم

تركيز المثبط	0pmm	300pmm	500ppm	700ppm
تركيز المحلول	الفقد في الوزن (mg)			
%1	385.2	10.6	3.1	3.4
%2	1810.9	13.2	4.5	3.1
%3	2664.3	9.5	6.8	2.4
%4	2751.1	0.0522	20.9	6.7
تركيز المثبط	0pmm	300pmm	500ppm	700ppm
تركيز المحلول	سرعة التآكل (mm/yr)			
%1	1.9158	0.0527	0.0154	0.0169
%2	9.0067	0.0657	0.0224	0.0154
%3	13.2512	0.0472	0.0338	0.0119
%4	13.6829	0.0522	0.1039	0.0333

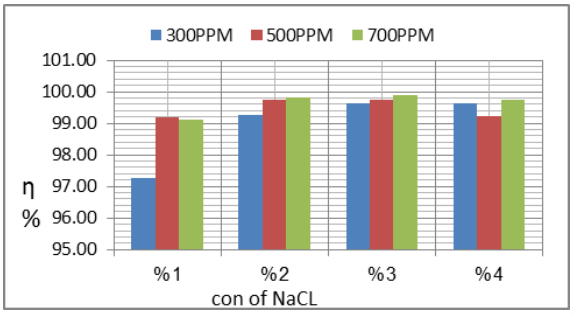


شكل (2) تأثير تركيز مثبط نتريت الصوديوم على سرعة التآكل في الصلب الكربوني في محلول ساكن متعدد التركيز من كلوريد الصوديوم

من الجدول (2) والشكل (2) نلاحظ تناقص في معدل تآكل الصلب الكربوني في الوسط الراكد بزيادة تراكيز المثبط عند كل التراكيز الثلاث الأولى ، اما عند تركيز 4% فلوحظ زيادة في معدل التاكل بزيادة تركيز المثبط خاصة عند تركيز 500 جزء في المليون، وهذا بدوره ينعكس على نتائج الكفاءة للمثبط كما هو ظاهر بالشكل (3) والجدول (3) ادناه. وهذا يحتاج الي مزيد الدراسة.

جدول (3) تأثير تركيز محلول كلوريد الصوديوم على كفاءة مثبط نتريت الصوديوم

تركيز المثبط	300ppm	500ppm	700ppm
تركيز المحلول	كفاءة المثبط (η%)		
%1	97.25	99.20	99.12
%2	99.27	99.75	99.83
%3	99.64	99.74	99.91
%4	99.62	99.24	99.76

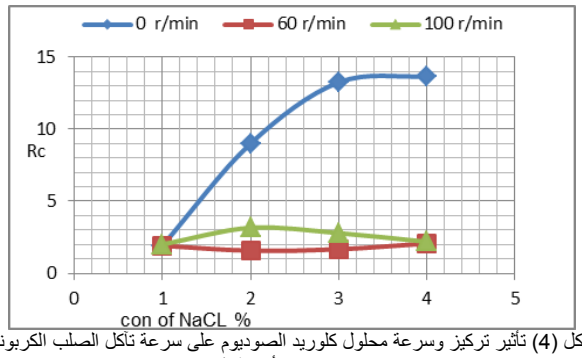


شكل 3 تأثير تركيز محلول كلوريد الصوديوم الساكن على كفاءة مثبط نتريت الصوديوم عند تراكيز مختلفة للمثبط

الجدول (4) والشكل (4) يوضحان الزيادة الكبيرة لمعدل التآكل في الصلب الكربوني في محلول راكد من كلوريد الصوديوم بتراكيز مختلفة وبدون إضافة المثبط بالمقارنة مع زيادة سرعة المحلول (60 و100 دورة في الدقيقة)، والسبب يؤول إلى ركود المحلول الملحي ويؤدي إلى زيادة في نشاط عملية التآكل الكهروكيميائية. وأيضا يلاحظ بداية التناقص في معدل التآكل للوضع الساكن بداية من تركيز 3.5% وهذا يفسر بتكون بلورات ملحية من كلوريد الصوديوم والتي تمنع النشاط الكهروكيميائي، وهذه النتيجة متوافقة مع مشاهدات سابقة [25]

جدول (4) تأثير تركيز وسرعة محلول كلوريد الصوديوم على كل من الفقد في الوزن وسرعة تآكل الفولاذ الكربوني بدون مثبط

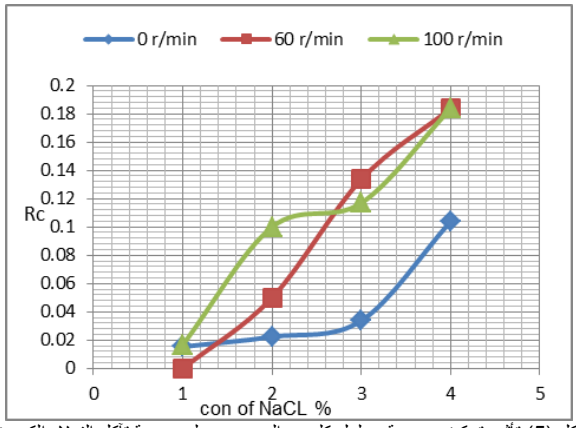
سرعة الوسط rpm	0	60	100
تركيز المحلول	الفقد في الوزن (mg)		
%1	385.2	11.5	12
%2	1810.9	9.4	18.9
%3	2664.3	10	16.7
%4	2751.1	12.4	13.1
سرعة الوسط rpm	0	60	100
تركيز المحلول	سرعة التآكل (mm/year)		
%1	1.9158	1.921	2.0054
%2	9.007	1.571	3.158
%3	13.2512	1.6711	2.791
%4	13.683	2.0722	2.1892



شكل (4) تأثير تركيز وسرعة محلول كلوريد الصوديوم على سرعة تآكل الصلب الكربوني بدون استخدام أي مثبط .

جدول (5) تأثير تركيز وسرعة محلول كلوريد الصوديوم على كل من الفقد في الوزن وسرعة تآكل الفولاذ الكربوني باستخدام 500PPM نتريت الصوديوم

سرعة الوسط rpm	0	60	100
تركيز المحلول	الفقد في الوزن (mg)		
%1	3.1	0	0.1
%2	4.5	0.3	0.6
%3	6.8	0.8	0.7
%4	20.9	1.1	1.1
سرعة الوسط rpm	0	60	100
تركيز المحلول	سرعة التآكل (mm/year)		
%1	0.01542	0	0.0167
%2	0.02238	0.0501	0.100
%3	0.0338	0.1337	0.11698
%4	0.104	0.1838	0.1838

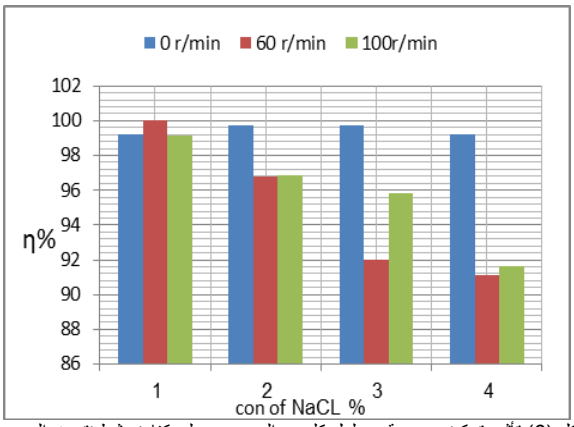


شكل (5) تأثير تركيز وسرعة محلول كلوريد الصوديوم على سرعة تآكل الفولاذ الكربوني باستخدام 500PPM نتريت الصوديوم

من الجدول (5) والشكل (5) نلاحظ أنه بإضافة 500ppm من نتريت الصوديوم فإن سرعة التآكل في الوسط الساكن تزداد بزيادة تركيز الوسط التآكلي مما يدل على قلة كفاءة المثبط عند هذا التركيز. كما يلاحظ التذبذب في معدل التآكل عند سرعات 60 و100 دورة في الدقيقة، الامر الذي ينبيء بعدم فاعلية المثبط عند هذا التركيز، وأيضا ربما للحركة الدورانية للمحراك المغناطيسي تاثير، وهذا يحتاج مزيد دراسة.

جدول (6) تأثير تركيز وسرعة محلول كلوريد الصوديوم على كفاءة مثبط نتريت الصوديوم بتركيز 500PPM

سرعة الوسط (rpm)	0	60	100
تركيز المحلول	كفاءة المعيق (η %)		
%1	99.2	100	99.2
%2	99.75	96.8	96.83
%3	99.74	92	95.8
%4	99.24	91.1	91.60



شكل (6) تأثير تركيز وسرعة محلول كلوريد الصوديوم على كفاءة مثبط نتريت الصوديوم

من الجدول (6) والشكل (6) نلاحظ أن كفاءة معيق نتريت الصوديوم تكون أكبر في حالة المحلول الساكن منه في المحلول المتحرك وعند كل تراكيز المحلول الملحي ، أما في الأوساط المتحركة فإن كفاءة المثبط تتذبذب حسب سرعة الوسط، فتكون جيدة هو ملاحظ عند تركيز 1% وتتناقص بازدياد تركيز المحلول الملحي، خاصة عند تركيزي 3% و 4%، الامر الذي يبين ان كمية المثبط غير كافية وان حركة السائل غير منتظمة.

4. الاستنتاجات والتوصيات

1- في الوسط الراكد كفاءة مثبط نتريت الصوديوم لا تعتمد على كميته فقط وإنما تعتمد إلى حد كبير على تركيز الوسط الأكال.
2- في حالة عدم وجود أي مثبط وفي الأوساط الساكنة يزداد معدل تآكل الصلب الكربوني بزيادة تركيز الوسط
3- في حالة عدم وجود مثبط يكون معدل التآكل للصلب الكربوني أكبر في الأوساط الساكنة منه في الأوساط المتحركة .
4- نتريت الصوديوم يكون فعالاً وأكثر كفاءة في الوسط الساكن منه في الوسط المتحرك .
5- حيث ان طريقة الوزن الفاقد مع شيوعها وبساطتها الا ان لديها عدة عيوب : اهمها إنها يمكن ان تعطي نتائج مضللة اذا لم يتم اتباع المواصفة في تنظيف العينة، لدا نوصي بتدعيم النتائج التي توصلنا اليها وذلك باستخدام طرائق اخرى اكثر دقة كالطرائق الكهربية.
6- نوصي بدراسة تاثر المتغيرات الاخري كدرجة الحرارة ودرجة الخامضية على تآكل الصلب الكربوني في محلول يحاكي بيئة ماء البجر وبيان تأثير هذه المتغيرات على كفاءة مثبط نتريت الصوديوم في الوسط الملحي
7- بسبب وجود تدبدب في كفاءة المثبط وتأثيره في معدلات التآكل عند السرعات الدورانية 60 و 100 دورة في الدقيقة نوصي بدراسة مقارنة مع الحركة التدويرية للسائل (Recirculated media) كما هو متبع في منظومات التبريد، وايضا نوصي في دراسات مستقبلية بان تكون فترة الغمر الساكن متكافئة مع فترة الغمر بالتحريك مع زيادة تركيز المثبط.

المراجع

1- Williams, J. R. (1997, June), Results Of A Simple Corrosion Experiment In A Freshman Materials Course Paper presented at 1997 Annual Conference, Milwaukee, Wisconsin. 10.18260/1-2—6766.

2- M.H. Wood, A.L.V. Arellano, L. Van Wijk, Corrosion - related accidents in petroleum refineries lessons learned from accidents in EU and OECD countries, 2013.

3- M.G. Fontana, “Corrosion science and engineering“, 3rd Edition, Tata McGraw-Hill, ISBN: 978-0070607446, 2005.

4- E. McCafferty, “Introduction to corrosion science“, 1st Edition, Springer, ISBN 978-1-4419-0454-6, e-ISBN 978-1-4419-0455-3, 2010.

5- Fontana, M.G., “Corrosion Engineering” 3rd ed., Singapore: McGraw-Hill, (1987).

6- Mridha, S., Metallic materials. In: Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. Elsevier 2016.

7- Islam, T.; Rashed, H.M.M.A. Classification and Application of Plain Carbon Steels. In Reference Module in Materials Science and Materials Engineering; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2019.

8- Dwivedi D, Lepkova K, Becker T. 2017 Carbon steel corrosion: A review of key surface properties and characterization methods. RSC Adv. 7, 4580–4610. (doi:10.1039/c6ra25094g).

9- Akpan I A and Offiong N A O 2013 Inhibition of mild steel corrosion in hydrochloric acid solution by ciprofloxacin drug. Int. J. Corros. 1–5.

10- NACE-Glossary of Corrosion Terms,Mat.Prot., 4 (1965) 79.

11- Corrosion Metals and Alloys – Terms and Definitions, ISO, (1986), 8044.

12- Zaki, A. Corrosion Control by Inhibition. In Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2006; pp. 352–381.

13- Jones, L. W., Corrosion and Water Technology for Petroleum Producers, Tulsa, Okla Oil and Gas Consultants International, 1988.

14- Hackerman, N., and Snaveley, E. S., Inhibitors, in Brasunas, A. de S. (ed.), Corrosion Basics, Houston, Tex., NACE International, 1984, pp. 127–146.

15- RobergeP.R.,“Handbook of Corrosion Engg.”, MC Graw –Hill, 2000, Chapter 10.

16- Montemor M F 2014 Functional and smart coatings for corrosion protection: A review of recent advances Surf. Coat. Tech. 258 17–37.

17- Verma, C.; Ebenso, E.E.; Quraishi, M. Corrosion inhibitors for ferrous and non-ferrous metals and alloys in ionic sodium chloride solutions: A review. J. Mol. Liq. 2017, 248, 927–942.

18- Migahed, M.A. (2020). Environmental Factors Affecting Corrosion Inhibition in Oil and Gas Industry. Egyptian Petroleum Research Institute.

19- Abohalguma, T. (2004). Effect of pH on the performance of Sodium Nitrite corrosion inhibitor. Presented at the EUROCORR 2004, European Corrosion Conference on Long Term Prediction and Modeling of Corrosion, Nice, France, September 12–16.

20- Beecher J., Dinkel C. and Corwin S. (1959) Corrosion Inhibition with Sodium Nitrite, Journal American Water Works Association, Vol. 51, No. 9 1175-1180.

21- Corrosion Protection Of Mild Steel In Sea Water Using Chemical Inhibitor IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018.

22- Aramide Fatai Olufemi (2009), "Corrosion Inhibitors of AISI/SAE Steel in a Marine Environment", Leonardo journal of sciences 15, , P.47-52.

23- ASTM G 1-03. (2003). “Standard Practice for Preparing, Cleaning and Evaluating Corrosion Test Specimens.” West Conshohocken, PA.

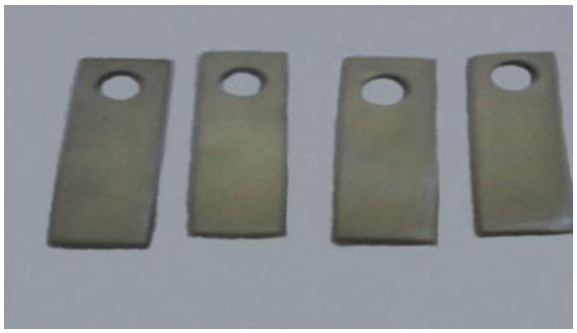
24- NACE, “ASTM G31-12a: (2012) Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals”.

25- BORGMANN, C. W. (1937) Initial Corrosion Rate of Mild Steel: Influence of the Cation: Industrial and Engineering Chemistry, v. 29, no. 7, p. 314-321.

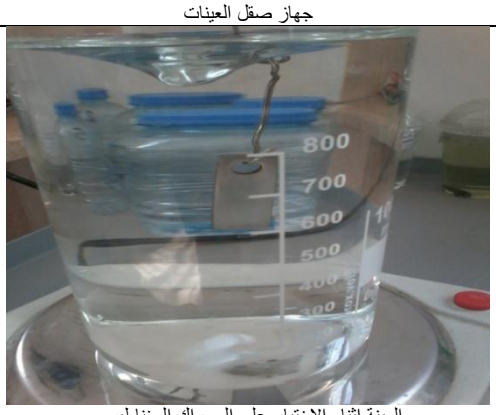
الصفيحة بعد عملية القص بالليزر

العينات بعد القطع و قبل التنظيف والسنفرة

جهاز صقل العينات



عينات الصلب الكربوني بعد التنظيف والسنفرة



العينة اثناء الاختبار على المحراك المغناطيسي

العينات اثناء الاختبار في الوضع الساكن

الميزان الحساس المستخدم في وزن العينات

المحراك المغناطيسي المستخدم في تحريك السائل