

## تأثير سرعة جريان الماء وتكون طبقة الأوكسيد على معدل تآكل أنابيب النحاس

محمد حسين جعفر العطية\* سر كيس هاكوب كيبكيان\*

استلام البحث 1، اذار، 2011  
قبول النشر 21، تشرين الاول، 2011

## الخلاصة :

تم وضع دالة رياضية لأحتساب معدل تآكل أنابيب النحاس في الماء بالأعتماد على أسس ومبادئ انتقال الكتلة ، أدخل خلالها تأثير السرعة في المنطقة المتاخمة لجدار الأنبوب والسرعة في مركز الجريان وتأثير تكون طبقة أوكسيد النحاس في عملية انتقال الكتلة عبرها من وإلى سطح الأنبوب ، وأ<sup>□</sup> جريت سلسلة من التجارب بأسلوب الجريان المستقيم داخل نموذج من أنبوب نحاسي بقطر 10 ملم شملت ست سرع بلغ اقصاها 7.33 م\ثا وبدرجة حرارة 20<sup>0</sup> م و 35<sup>0</sup> م وتوصلنا الى تطابق جيد بين قيم معدل التآكل المحسوبه والقيم العملية بلغت نحو 92% .

الكلمات المفتاحية : التآكل , تآكل انبوب النحاس , طبقة أوكسيد النحاس الواقية , سرعة الجريان , انتقال الكتلة .

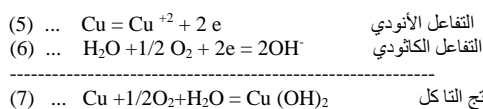
## المقدمة :

أنابيب النحاس في الماء المنزلي بسرعات مختلفة وأنصاج دالة رياضية تدخل خلالها تأثير تغير السرعة في المنطقة المتاخمة لجدار الأنبوب Boundary Layer velocity وسمكها كذلك تأثير وجود طبقة أوكسيد النحاس على السطح بوصفها مانع معتبر لانتشار الأوكسجين المذاب إذ لم تحظ هذه الاتجاهات بدائرة تسليط ضوء عريضة رغم التواصل في هكذا نوع من الدراسات والبحوث [2-7] . أن اختيار أنابيب النحاس مادة لهذه الدراسة يأتي بسبب قلة تفاعل الأوكسيدات المتكونة على سطحها كنواتج للتآكل مع الأملاح الطبيعية الموجودة في الماء وبالتالي عدم ترسيب طبقة ملحية Scale layer كالتالي تتكون في حالة الأنابيب المغلونة Galvanized steel pipe وبالتالي يتيح لنا النحاس دراسة طبيعة تأثير طبقة الأوكسيد المتكونة في عملية انتقال الكتلة من وإلى سطح الأنبوب فقط دون تأثير آخر .

**سرعة الجريان**: تعد سرعة الجريان من اهم العوامل المؤثرة في طبيعة التآكل ومعدله , إذ تؤثر باتجاهين الأول في زيادة فيض انتقال كتلة العناصر المذابة والحاكمة في التفاعل الكاثودي مثل الأوكسجين من مركز الجريان باتجاه سطح الأنبوب والثاني في تغيير آلية التآكل , فزيادة السرعة تؤدي الى تعرية السطح من طبقة الأوكسيد الواقية وهذا ما يجب تجنبه لكون تأثير وجود هذه الطبقة في عملية انتقال الكتلة خلالها ومن ثم معدل التآكل محل هذه الدراسة , ولغرض الاستدلال على دالة عامة تعرف نوع الجريان بدلالة سرعته يُستخدم عدد رينولد Re وفق الصيغة الآتية:

$$Re = \rho v d / \mu \quad (1) \dots$$

تُعرف عملية التآكل بأنها تفاعل السطح المعدني مع محيطه الذي قد يكون مائعا ساكنا Stagnant أو متحركا Dynamic وتمتد حدود الحركية بعد السكون للأسيماية Laminar flow ثم الانتقالية Transition flow ثم الاضطرابية Turbulent flow , لقد بدأت عدة محاولات للوقوف على دراسة تأثير هذا التغير في معدلات التآكل , أثمرت عن نتائج بينت تأثيرا " واضحا" لكل من سرعة الجريان ودرجة الحرارة وسرعة التفاعل الكاثودي في قيم معدلات التآكل , إلا أن علاقة وجود نواتج التآكل بوصفها طبقة على السطح تثبط عملية نفوذ عناصر التفاعل الأودي والكاثودي ومن ثم سرعة التآكل لم تلق عناية بحثية كافية , ولأجل تنفيذ هكذا دراسات , استخدمت تقنية لأغراض البحث بمدخلين , الأول : يعتمد على تنفيذ جريان بسرعة خطية Straight pipe flow خلال نموذج الفحص ومن ثم اعتماد الطرائق القياسية في أحتساب معدل التآكل من خلال قياس الوزن المفقود من النموذج خلال مدة زمنية تقابل زمن التجربة , والثاني : يعتمد على تنفيذ حركة دائرية مركزية لنموذج من مادة الأنبوب المراد تقييمها ويصنع هذا النموذج على شكل حلقة أو أسطوانة تثبت بطريقة تسهل عملية الدوران في المائع بسرعات مختلفة Rotating cylinder or disc electrode ويقاس الوزن المفقود من النموذج بعد أنتهاء زمن التجربة ومن خلاله ايضا" يُحتسب معدل التآكل . أن مقارنة أجريت بين نتائج تجارب استخدم خلالها المدخلين أعلاه رجحت أفضلية النتائج المستحصلة من الفحص بالجريان المستقيم (المدخل الأول) [1] . في هذه الدراسة تم استخدام أسس التجربة في المدخل الأول لوضع دالة تآكل



### دوال أنتقال الكتلة ومتغيراتها :

• فيض أنتقال الكتلة للأوكسجين Oxygen mass transfer flux ,  $J_{O_2}$  دالة لمقدار تركيزه في مركز الجريان  $C_{O_2(b)}$  وتركيزه على السطح المعدني  $C_{O_2(s)}$  ومعامل الأنتقال الكتلي للأوكسجين  $K_{O_2}$  [3] :

$$(8) \dots J_{O_2}(\text{mole}/\text{m}^2\text{S}) = K_{O_2}(\text{m}/\text{S})$$

\*  $(C_{O_2(b)} - C_{O_2(s)}) (\text{mole}/\text{m}^3)$   
 • معامل الأنتقال الكتلي للأوكسجين المذاب Oxygen mass coefficient transfer والسرعة في منطقة الجريان المناخمة للسطح هما دالة عدد ستانتون لأنتقال الكتلة (St)

Stanton number for mass transfer

عدد ستانتون = معامل الأنتقال الكتلي للأوكسجين المذاب  $K_{O_2}(\text{m}/\text{S})$  \ سرعة الجريان عند طبقة الجريان المناخمة للسطح  $V_b(\text{m}/\text{S})$

• قيمة عدد ستانتون St توضح النسبة بين أنتقال كتلة الأوكسجين المذاب بالية الحمل الى أنتقالها بالحركية، كما أن عدد ستانتون ورينولد  $Re$  وشميت Sc ( لزوجة الماء \ الكثافة. معامل أنتشار الأوكسجين المذاب) هما دالة لعامل أنتقال الكتلة ( Mass transfer factor )  $j_d$  وأنتقال العلاقة بينهما لو غارتمية خطية وكما وضعها جلتن وكولبيرن [11] Chilton & Colburn :

$$(9) \dots j_d = (St)(C_{Bm}/C_T) Sc^{0.67} = 0.023 Re^{-0.2}$$

اذ أن  $(C_{Bm}/C_T)$  المعدل اللوغارتمي لتركيز المكون B والذي يمثل الأوكسجين المذاب في بحثنا هذا ، فعند محدودية أنتقال كتلة الأوكسجين باتجاه السطح سيكون معدل التآكل محدوداً " بهذا المقدار من كتلة الفيض المنتقلة Limiting Oxygen mass transfer flux ، وأن هذا الفيض من جزيئات الأوكسجين سوف يستهلك مباشرة على سطح الأنبوب في التفاعل الكاثودي بعدها تعكس هذه الكتلة أنتقالها بعيداً " عن السطح بوصفها ناتجاً " لهذا التفاعل Equimolecular counter diffusion ومن ثم سيصبح تركيز الأوكسجين على السطح  $C_{O_2(s)} = 0$  ، ففي هذه الحالة لم تعد حاجة لوجود المعدل اللوغارتمي بحسب شرط جلتن وكولبيرن [11] وبذلك تعاد كتابة الدالة كالآتي :

$$(10) \dots \text{Stanton Number} = 0.023 (\text{Reynolds Number})^{-0.2} (\text{Schmidt Number})^{-0.67}$$

اذ أن  $\rho$  كثافة الماء أو المائع ،  $v$  سرعة الجريان ،  $d$  قطر الأنبوب الداخلي ،  $\mu$  لزوجة الماء أو المائع [8].

### سمك الطبقة المناخمة للسطح Boundary layer thickness ( $\delta$ )

عند جريان الماء خلال أنبوب فإن سرعته عند سطحه تكون قريبة من السكون وتزداد كلما أبتعدنا باتجاه مركزه لغاية بلوغ سرعة الجريان الحر ، هذه المسافة يُطلق عليها طبقة الجريان المناخمة ويرمز لسمكها  $\delta$  ، ويتغير مع عدد رينولد وفق الدالة التالية [9]

$$(2) \dots \delta/d = 62Re^{-7/8}$$

اذ أن  $d$  قطر الأنبوب الداخلي ، ومن خلال تطبيق قانون فك Fick's Law للأنتشار فإن دالة معدل أنتشار الأوكسجين المذاب N من التركيز في منطقة مركز الجريان  $C_{O_2(b)}$  عبر سمك طبقة الجريان المناخمة  $\delta$  وصولاً الى سطح الأنبوب الذي يكون عنده التركيز  $C_{O_2(s)}$  تكون كالآتي [10] :

$$(3) \dots N = -D(C_{O_2(b)} - C_{O_2(s)}) / \delta$$

اذ أن D معامل الأنتشار ، ولذلك فإن منطقة الجريان المتاخمة لجدار الأنبوب أكثر أهمية من الجريان خارجها باعتبار أن سمكها محدد لأنتشار الأوكسجين المذاب عبرها وصولاً " لسطح الأنبوب حيث تجري عملية التآكل ، وهذا ما سيتم أخذه بنظر الاعتبار من خلال أحتساب سرعة الجريان عند حدود هذه الطبقة  $V_b$  بدلالة السرعة في مركز الجريان V من خلال العلاقة الآتية [9] :

$$(4) \dots V_b = 2V Re^{-0.125}$$

اذ أن V سرعة الجريان عند المركز و  $V_b$  سرعة الجريان عند الجدار.  
**تفاعلات عملية التآكل :** تتم عملية التآكل في الأنابيب الناقلة للماء بتفاعلين الأنودي وخلالها تتم عملية أكسدة ذرات المعدن وتحرير الألكترونات والتفاعل الثاني الكاثودي وخلالها تُستهلك الألكترونات المتحررة من التفاعل الأول لأختزال ذرات الأوكسجين المذاب في الماء وتكوين جذر الهيدروكسيل وبذلك لا تتم عملية التآكل إلا بوصول الأوكسجين المذاب الى سطح الأنبوب لغرض تكامل عملية التآكل ففي حالة تآكل النحاس يكون التفاعلين كالآتي :

المذاب باتجاه السطح محدودة بوصفها الخطوة الأبطأ عمليا" ، أي أن عملية التآكل هذه تدار بألية أنتقال الكتلة ، فإن معدل التآكل يمكن حسابه نظريا" بربط متغيرات هذه الألية وتيار التآكل المحدود

Limited current density  $i_l$  المكافئ لما يستهلكه التفاعل الكاثودي وكما يأتي [13] :

$$(14) \dots CR = A_{wt\ Cu} i_l / Z_{Cu} \rho_{Cu} F$$

$$(15) \dots i_l = Z_{O_2} F K_{O_2} C_{O_2(b)} / A_{wt\ O_2}$$

وبالتعويض عن قيمة تيار التآكل المحدود  $i_l$  المستحصل من المعادلة (15) في (14) نحصل على العلاقة الآتية:

$$(16) \dots CR = K_{O_2} C_{O_2(b)} (Z_{O_2} / Z_{Cu}) (A_{wt\ Cu} / A_{wt\ O_2}) / \rho_{Cu}$$

حيث أن  $A_{wt\ Cu}$  ،  $A_{wt\ O_2}$  الوزن الذري للنحاس والأوكسجين على التوالي ،  $\rho_{Cu}$  كثافة النحاس كغم / م<sup>3</sup> ،  $Z_{O_2}$  و  $Z_{Cu}$  عدد الألكترونات المشتركة في التفاعل الأنودي والكاثودي ،  $F$  عدد أفوكادرو ، وبعد التعويض عن قيمة معامل الأنتقال الكتلي للأوكسجين بالدالة رقم (12) فإن معادلة احتساب معدل التآكل من العلاقة (16) تصبح :

$$(17) \dots CR = 0.046 Re^{-0.325} Sc^{-0.67} V C_{O_2(b)} (Z_{O_2} / Z_{Cu}) (A_{wt\ Cu} / A_{wt\ O_2}) / \rho_{Cu}$$

التوالي وكثافة النحاس 8950 كغم / م<sup>3</sup> ستقرأ الدالة في المعادلة (17) كالآتي :

$$(18) \dots CR = 6.43 * 10^5 Re^{-0.325} Sc^{-0.67} V C_{O_2(b)}$$

**جدول (1) يبين تغير الخواص الفيزيائية للماء وذوبانية الأوكسجين بدلالة درجة الحرارة**

معامل انتشار الأوكسجين (م <sup>2</sup> /2م)	ذوبانية الأوكسجين (كغم / م <sup>3</sup> )	لزوجة الماء (كغم / م ثا)	كثافة الماء (كغم / م <sup>3</sup> )	درجة الحرارة (م <sup>0</sup> )
1.97*10 <sup>-9</sup>	8.8*10 <sup>-3</sup>	1.002*10 <sup>3</sup>	998	20
2.92*10 <sup>-9</sup>	6.6*10 <sup>-3</sup>	0.750*10 <sup>3</sup>	994	35
3.99*10 <sup>-9</sup>	5.7*10 <sup>-3</sup>	0.547*10 <sup>3</sup>	988	50
4.82*10 <sup>-9</sup>	5.0*10 <sup>-3</sup>	0.467*10 <sup>3</sup>	943	60

**الجانب التجريبي:** الشكل رقم (1) يبين مخططاً توضيحياً لمنظومة الفحص المختبري التي تعتمد مبدأ تدوير الماء خلال نماذج الفحص باستخدام مضخة سعة 35 لتراً دقيقة مرتبطه بخزان بلاستيكي سعة 40 لتر ، حيث يتم تحديد السرعة الخطية لجريان الماء خلال كل نموذج بعد احتسابها من العلاقة :

$$(19) \dots \text{(السرعة الخطية = معدل الجريان \ مساحة مقطع النموذج)}$$

ولأجل التعويض في العلاقة (9) عن قيمة سرعة الجريان في عدد ستانتون عند حدود المنطقة المتاخمة للسطح بدلالة قيمة معدلها في مركز الجريان نستدعي المعادلة رقم (4) :

$$(11) \dots K_{O_2} / 2V * Re^{-0.125} = 0.023 Re^{-0.2} Sc^{-0.67}$$

$$(12) \dots K_{O_2} = 0.046 Re^{-0.325} Sc^{-0.67} V$$

فعند اعتماد قيمة واحدة لدرجة حرارة الماء وقطر الأنبوب سيغير معامل الأنتقال الكتلي بدلالة سرعة الجريان وفق دالة التغير  $K_{O_2} \propto V^{0.675}$  .

**احتساب معدل التآكل (CR):** أن معدل التآكل لمعدن معين في وسط معين هو مقدار الوزن المفقود لوحدة المساحة السطحية منه لوحدة الزمن ويمكن احتسابه من خلال التجربة العملية وفق العلاقة الآتية والتي سيتم اعتمادها في احتساب معدل التآكل بالوحدات القياسية ( ملم / سنة ) بفرض أن التآكل متجانس لعموم سطح النموذج [12] :

$$(13) \dots CR = (\Delta W) / (\rho) * (t) * (A)$$

اذ أن  $\Delta W$  الوزن المفقود خلال زمن التجربة ،  $A$  المساحة السطحية للنموذج ،  $t$  زمن التجربة ،  $\rho$  كثافة المعدن فعند حالة التوازن بين التفاعل الأنودي والكاثودي وعندما تكون سرعة تدفق الأوكسجين

وعند التعويض عن قيم  $Z_{Cu}$  ،  $Z_{O_2}$  البالغة 2 إلكترون وقيم  $A_{wt\ Cu}$  ،  $A_{wt\ O_2}$  63.5 و 16 على

اذ أن  $CR$  و  $V$  و  $C_{O_2(b)}$  تؤخذ بالوحدات ملم \ سنة و م \ ثا و كغم \ م<sup>3</sup> على التوالي .

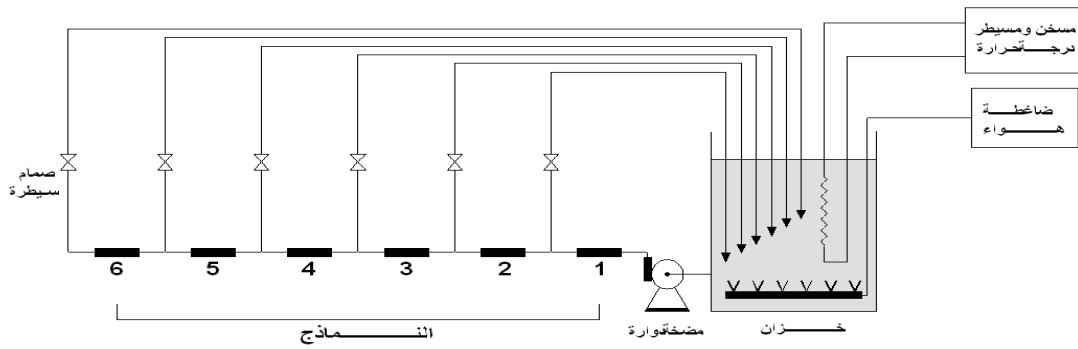
**تأثير درجة الحرارة في معدل التآكل:** لا توجد علاقة بسيطة بين درجة الحرارة وعملية التآكل بسبب تأثيرها في نوعية الماء بعدة اتجاهات مثل ذوبانية الأوكسجين المذاب واللزوجة ومعدل الأنتشار ومعدل الأوكسدة ، كل تلك العوامل وغيرها تؤثر في معدل التآكل وفي خواص طبقة نواتج التآكل المتكونة على السطح وذوبانيتها في الماء الجاري [14] ويمكن تتبع هذا التأثير من خلال معاينة الجدول رقم (1) الذي يبين تغير قيمة ذوبانية و معامل انتشار الأوكسجين المذاب ولزوجة وكثافة الماء بدلالة درجة الحرارة [15-16] .

ثلاثة أضعاف طول النموذج الذي يصل 5-6 سم ، إذ لا يُسمح للماء بالتسرب على السطح الخارجي ، كما تم استخدام دافعة صغيرة للهواء رُبطت بموزع وضع داخل الخزان يتم تشغيلها قبل بدء التجربة بنحو الساعة لغرض تهوية الماء وتشبيعه بالأوكسجين والوصول به الى النسبة المعادلة لدرجة حرارة الفحم . ووضعت منظومة للسيطرة على درجة الحرارة مؤلفة من مسخن بقدرة 100 واط مع مسيطر للمحافظة على درجة الحرارة يعمل خلال مدة التجربة ذاتياً عند الحاجة إذ أن التجارب كافة نفذت في شهر كانون الثاني في جو مفتوح ، وللمحافظة على مواصفة الماء ضمن حدود متوسط العسرة بحيث لا تزيد عن 200 لغم/لتر  $CaCO_3$  (as) ، يستبدل 75% من الماء في الخزان بمعدل مرة واحدة كل ثمانية ساعات تشغيل لأحتمال تأثير تراكم تركيز نواتج التآكل في الماء في دقة النتائج المستحصلة.

إذ يتم قياس قيم معدل الجريان للماء خلال جميع النماذج من خلال قياس زمن ملء حاوية بحجم 5 لتر ، وبعد تثبيت السرعة الخطية يتم احتساب قيمة عدد رينولد مقابل كل سرعة جريان لكل نموذج في مجموعتي التجارب عند درجة حرارة 20 و 35<sup>0</sup> م حيث وضعت نتائج الاحتساب في الجدول رقم (2) ، وبعد إجراء متطلبات تنظيف النماذج وقياس أبعادها لأحتمال المساحة السطحية ، ووزن كل نموذج قبل التجربة ليقارن بوزنه بعد التجربة مستخدمين ميزاناً الكترونياً حساسية قياسه 0.1mg ( 100ميكروغرام ) ولأزالة نواتج التآكل يتطلب تنظيف النماذج كيميائياً بمحلول حامض الهيدروكلوريك (sp.gr1.19) وفق حدود المواصفة القياسية ASTM G-1 [17] وأيجاد مقدار الوزن المفقود جراء التآكل ، ثم احتساب معدل التآكل وفق العلاقة (13) ، ولأجل توخي الدقة في النتائج ، يتم ادخال كل نموذج داخل أنبوب بلاستيكي قطره الداخلي مكافئ لقطر النموذج الخارجي وطوله بنحو

### جدول (2) عدد رينولد مقابل سرعة الجريان عند درجة حرارة 20 و 35<sup>0</sup> م.

مجموعة التجارب عند درجة 20 <sup>0</sup> م : القطر الداخلي للنماذج 10 ملم ، كثافة الماء 998 كغم/ م <sup>3</sup> ، اللزوجة 1.002*10 <sup>3</sup> كغم/ م ثا .						
7.336	6.3	4.192	2.93	1.572	0.524	سرعة الجريان الخطية م/ثا
73067	62748	41752	28884	15657	5219	عدد رينولد
مجموعة التجارب عند درجة 35 <sup>0</sup> م : القطر الداخلي للنماذج 10 ملم ، كثافة الماء 994 كغم/ م <sup>3</sup> ، اللزوجة 0.750*10 <sup>3</sup> كغم/ م ثا .						
7.336	6.3	4.192	2.93	1.572	0.524	سرعة الجريان الخطية م/ثا
97226	83496	55557	38434	20834		عدد رينولد



شكل (1) يبين مخطط توضيحي لمنظومة الفحص

المعامل العملي لأنتقال كتلة الأوكسجين العام  $K_{O2\text{overall}}$  والذي يمثل مجموع معاملي أنتقال الكتلة خلال منطقة الجريان المتاخمة للسطح  $K_{O2}$  وطبقة الأوكسيد وكما يأتي:

$$C_{O2} \text{ (b)} = 1.3984 * 10^{-7} K_{O2\text{overall}} \text{ CR} \dots (20)$$

إذ أن وحدات معدل التآكل CR تكون ملم \ سنة ومعامل الأنتقال الكتلي للأوكسجين المذاب  $K_{O2\text{overall}}$  م \ ثا وتركيز الأوكسجين المذاب  $C_{O2}$  بوحدهات كغم \ م<sup>3</sup> ، الجدول رقم (3) يبين

معدل التآكل عند درجة حرارة 20<sup>0</sup> م : تم إجراء تجربة ست سرعة خطية موضحة قيمها في الجدول رقم (2) في ستة

نماذج من أنبوب نحاسي بقطر داخلي 10 ملم وزمن تجربة أجمالي مقداره 374 ساعة للنماذج الثلاثة الأولى أما الثلاث نماذج الأخرى فتمت تجربتها بزمن مقداره 264 ساعة ، وبتطبيق دالة احتساب معدل التآكل رقم (13) فإن معدل التآكل تمتد قيمته بين 0.1747 و 1.0270 ملم \ سنة مقابل سرعة جريان 0.524 لغاية 7.33 م \ ثا ، وبالأعتماد على هذه القيم والعلاقة رقم (16) أمكن احتساب

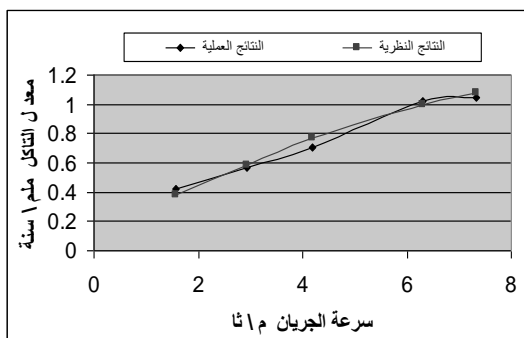
مجملة النتائج العملية المتحققة والمحسوبة من العلاقة (20).  
جدول (3) النتائج المتحققة من التجربة عند 20 م<sup>0</sup> إذ تظهر قيم معدل التآكل ومعامل الانتقال الكتلي العام أزاء سرعة الجريان.

ت	سرعة جريان الماء (م \ ثا)	مقدار الفقدان الكلي في وزن النموذج (غم)	المساحة السطحية للنموذج (سم <sup>2</sup> )	زمن التجربة (ساعة)	معدل التآكل من التجربة العملية عند 20 م <sup>0</sup> (ملم\سنة)	تركيز الأوكسجين المذاب (كغم\م <sup>3</sup> )	معامل الانتقال الكتلي العام K <sub>O2</sub> overall (م\ثا)
1	0.524	0.1140	17.08	374	0.1747	8.8*10 <sup>-3</sup>	1.420*10 <sup>-6</sup>
2	1.572	0.2317	18.21	374	0.3330	8.8*10 <sup>-3</sup>	2.705*10 <sup>-6</sup>
3	2.930	0.3782	19.15	374	0.5169	8.8*10 <sup>-3</sup>	4.200*10 <sup>-6</sup>
4	4.129	0.3680	18.84	264	0.7240	8.8*10 <sup>-3</sup>	5.883*10 <sup>-6</sup>
5	6.300	0.4618	18.31	264	0.9351	8.8*10 <sup>-3</sup>	7.598*10 <sup>-6</sup>
6	7.336	0.4859	17.54	264	1.0270	8.8*10 <sup>-3</sup>	8.345*10 <sup>-6</sup>

معدل التآكل عند درجة 35 م<sup>0</sup>: لاجل قياس معدل التآكل بدرجة حرارة أخرى تحقيقاً للدالة في العلاقة (18) و(22)، تمت تجربة خمس سرعة جريان 1.572, 2.930, 4.129, 6.300, 7.336 م\ثا عند درجة حرارة 35 م<sup>0</sup> وزمن فحص أجمالي 120 ساعة وقد أحتسب معدل التآكل النظري من العلاقة (22) والعملية من خلال تطبيق المعادلة (13) ووضعت النتائج في الجدول رقم (5) بدلالة سرعة الجريان، و تمت الإشارة خلاله تفصيلاً الى نسبة التقارب بين القيمتين لنحو 92%، كما أن الشكل رقم (2) يعكس هذا التوافق بدالة بيانية واضحة.

جدول (5) قيم معدل التآكل المستحصلة من التجربة عند درجة حرارة 35 م<sup>0</sup> والمحسوبة نظرياً من تطبيق العلاقة (21)

ت	مقدار الفقدان في وزن النموذج (غم)	المساحة السطحية للنموذج (سم <sup>2</sup> )	معدل التآكل من التجربة العملية عند 35 م <sup>0</sup> (ملم\سنة)	معدل التآكل من الأحتساب النظري من العلاقة (22) (ملم\سنة)	سرعة الجريان (م\ثا)	نسبة التقارب بين القيم النظرية والعملية (%)
1	0.0933	18.12	0.417	0.385	1.572	91.66
2	0.1239	17.75	0.570	0.583	2.930	97.71
3	0.1619	18.68	0.707	0.748	4.192	94.20
4	0.2282	19.22	0.969	0.985	6.300	98.37
5	0.2174	16.82	1.050	1.091	7.336	96.09



المعدل الحسابي للنسبة  $K_{O2} / K_{O2\ overall}$ : ويتم تحديده بعد أحتساب معامل انتقال كتلة الأوكسجين المذاب خلال طبقة الجريان المتاخمة للسطح من خلال تطبيق العلاقة (12)، الجدول رقم (4) يبين نتائج أحتساب قيم  $K_{O2}$  الذي تم بالأعتماد على محتوى الجدولين (1 و2) من المعطيات الخاصة بظروف التجربة، إذ أن المعدل الحسابي للنسبة  $K_{O2} / K_{O2\ overall}$  يكون 16.52 وبنسبة حيود مئوية لا تتجاوز  $\pm 10\%$ ، ولذلك يمكن إعادة كتابة العلاقة رقم (20) لتصبح كالآتي:  
 $CR = 8.464 * 10^5 C_{O2(b)} K_{O2}$ ... (21)

جدول (4) نتائج أحتساب النسبة بين معامل انتقال كتلة الأوكسجين المذاب المحسوبة نظرياً والقيم المستحصلة من التجربة العملية عند درجة 20 م<sup>0</sup> بوجود طبقة الأوكسيد

ت	سرعة الجريان (م\ثا)	K <sub>O2</sub> overall (م\ثا)	K <sub>O2</sub> (م\ثا)	K <sub>O2</sub> / K <sub>O2</sub> overall	المعدل الحسابي لقيم K <sub>O2</sub> overall $\pm 10\%$
1	0.524	1.420*10 <sup>-6</sup>	2.283 * 10 <sup>-5</sup>	16.07	16.07
2	1.572	2.705*10 <sup>-6</sup>	4.793 * 10 <sup>-5</sup>	17.77	17.77
3	2.930	4.200*10 <sup>-6</sup>	7.321 * 10 <sup>-5</sup>	17.43	17.43
4	4.129	5.883*10 <sup>-6</sup>	9.153 * 10 <sup>-5</sup>	15.55	15.55
5	6.300	7.598*10 <sup>-6</sup>	1.223 * 10 <sup>-4</sup>	16.09	16.09
6	7.336	8.345*10 <sup>-6</sup>	1.355 * 10 <sup>-4</sup>	16.23	16.23

وعند أستدعاء المعادلة (12) للتعويض عن قيمة  $K_{O2}$  بما يساويه نحصل على دالة عاملة مصححة للدالة (21) مأخوذ خلالها بالحسبان تأثير تغيير كل من سرعة الجريان ودرجة الحرارة وتركيز الأوكسجين المذاب ووجود طبقة الأوكسيد ومشروطة بحالة الجريان الأضطرابي والطبيعة العامة لعملية التآكل General corrosion، هذه الدالة ستقرأ كالآتي:

$$CR = 3.893 * 10^4 Re^{-0.325} Sc^{-0.67} V C_{O2(b)} \dots (22)$$

وقد تم التحقق من جميع النتائج العملية في مدى موافقتها لهذه العلاقة سواء "المستحصلة عند درجة 20<sup>0</sup> م أو 35<sup>0</sup> م وتبين هناك حيود مقداره أقل من 10%± بين طرفيها.

ثالثاً: لأحتساب معدل التآكل تستخدم العلاقة رقم (12) لأيجاد معامل أنتقال كتلة الأوكسجين  $K_{O_2}$  ومن ثم تسقيط قيمته على الدالة في الشكل (3) لتحديد معدل التآكل عند درجة الحرارة العاملة أو تطبيق العلاقة (22) , هذه النمذجة بينت تأثير السرعة في المنطقة المتاخمة لجدار الأنبوب Boundary layer velocity والسرعة في مركز الجريان ودرجة الحرارة وتأثير تكون طبقة أوكسيد النحاس الواقية في معدل التآكل من خلال توظيف معادلة جلتن وكولبيرن Chilton & Colburn الخاصة بأنتقال الكتلة لهذا الغرض .

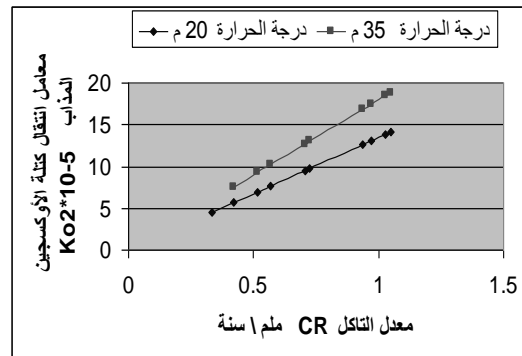
#### المصادر:

- 1 – Nestic S.,G. Solvi and Enerhaug J.,1995, "Comparison of the Rotating Cylinder and Pipe Flow Tests for Flow Sensitive CO<sub>2</sub> Corrosion",Corr.,51,773-786.
- 2 – Nestic S.,Bienkowski J.,Bremhorst K.andYang S.,2000,"Testing for Erosion-Corrosion Under Disturbed Flow Conditions Using a Rotating Cylinder with a Stepped Surface",Corr.,56,1005-1014.
- 3–Keating A.and Nestic S.,2000, "Numerical Prediction of Erosion-Corrosion in Bends"Corr.,57,621-633.
- 4 – Yang K.S.,Hwang J.Y.,Bremhorst K.and Nestic S.,2002,"Turbulent Flow Around A rotating Stepped Cylinder", Phys. Fluids, 14:1544-1547.
- 5 – Yang K.S.,Hwang J.Y.,Bremhorst K.and Nestic S.,2003,"Numerical Investigation of Turbulent Flow Around A rotating Stepped Cylinder for Corrosion Study",Can .J. Chem. Eng.,81,26-36.
- 6–Nestic S., 2006, "Using Computational Fluid Dynamics in Combating Erosion-Corrosion", Chem.Eng. Sci.,61,4086 – 4097.
- 7 – Jingjun L., Yuzhen L.and Xiaoyu L.,2005,"Application of Numerical Simulation to Flow-Induced

شكل (2) يبين سرعة الجريان بدلالة كل من قيم معدل التآكل العملي والنظري عند درجة حرارة 35<sup>0</sup> م حيث يلاحظ مدى التقارب بينهما .

معدل التآكل بدلالة معامل أنتقال الكتلة : أصبح من الممكن الان الوقوف على قيمة معدل التآكل بدلالة درجة الحرارة

ومعامل أنتقال كتلة الأوكسجين المذاب في الماء  $K_{O_2}$  من خلال تطبيق العلاقة (12) ومن ثم العلاقة رقم (22) أو تحديدها من الشكل (3) , وبذلك يكون كل من سرعة الجريان ودرجة الحرارة وتأثير طبقة الأوكسيد في السطح دوال لمعدل التآكل من خلالها تتم مراقبة وأحتواء عملية التآكل .



شكل (3) معدل التآكل بدلالة معامل انتقال كتلة الأوكسجين المذاب ودرجة الحرارة.

#### الاستنتاجات :

أولاً: تكون طبقة الأوكسيد يؤثر في تقليل قيم معامل الأنتقال الكتلي للأوكسجين  $K_{O_2}$  بمقدار 16.52±10% مرة ومن ثم معدل التآكل , إذ تم اعتماد هذه النتيجة في تصحيح العلاقة المشتقة رقم (20) لتساعد على أحتساب معدل التآكل بوجود طبقة الأوكسيد , وقد بين الجدول (5) والشكل (2) بيانياً مدى التوافق بين النتائج العملية وتلك المحسوبة من الدالة المصححة رقم (22) بعامل التصحيح الذي بينا تفاصيل أستنتاجه في الجدول رقم (4) .

ثانياً: عند قيم واحدة لدرجة الحرارة وتركيز الأوكسجين المذاب في الماء فإن سرعة الجريان ستكون المتغير الوحيد أمام معدل التآكل في العلاقة المستنتجة للدالة (22) وتصبح علاقة التغير بينهما :

$$CR \propto V^{0.675}$$

ولذلك فمعرفة معدل التآكل في حدود سرعة معينة تساعدنا على احتسابها في سرعة جريان ثانية وفق العلاقة الآتية:

$$(CR_1/CR_2) = (V_1/V_2)^{0.675}$$

- New York, 3<sup>rd</sup> ed., 8.
- 13-Shreir L. L., 1979, "Corrosion", Butterworth-Heinemann, London, 2, 2<sup>nd</sup> ed., 2-8.
- 14-McNeill L.S. and Edwards M., 2002, "Phosphate Inhibitor Use at U.S. Utilities", J. Am. Water Work Assoc., 93(7), 57.
- 15-Reid R. C. and Sherwood T.K., 1977, "The Properties of Gases and Liquids", McGraw-Hill, New York, 3<sup>rd</sup> ed., 578.
- 16-Weast R.C., 1969, "Handbook of Chemistry and Physics", 50<sup>th</sup> ed., f-36.
- 17-ASTM International, 2003, "Preparing, Cleaning and Evaluating Corrosion Test Specimens", Standard G-1.
- Corrosion in Flowing Seawater Systems", Anti-Corr. Meth. Mat., 52, 276-279.
- 8-Coker A.K, Ludwig E.E., 2007, "Ludwig's Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants" , 1, G.P.P. Elsevier, USA, 143.
- 9-Coulson J. and Richardson J., 1984, "Chemical Engineering", Pergamon textbook, London, 1, 3<sup>rd</sup> ed., 321.
- 10-Venkanna B.K., 2010, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", PHI Learning Pvt. Ltd., New delhi, 439.
- 11-Coulson J., Richardson J., Backhurst J.R. and Harker J.H., 1999, "Chemical Engineering: Fluid flow, Heat transfer, and Mass transfer", 6<sup>th</sup> ed., Elsevier Butterworth-Heinemann, London, 648.
- 12-Fontana M.G. and Greene N.D., 1986, "Corrosion Engineering", McGraw-Hill,

## Water flow velocity and oxide film formation effect on copper pipe corrosion

*Mohammed Hussein J. Al -Atia* \*      *Sarkes H.S. Kipikian* \*

\*Directorate of materials research-Ministry of science and technology

### Abstract:

An overall mathematical model for copper pipe corrosion in flowing water was derived based on mass transfer fundamentals where we introduced the effects of boundary layer velocity, bulk flow velocity and the surface oxide protective film on the corrosion rate. A set of experiments were conducted in a straight 10mm diameter copper pipe, flow of water include six velocities of maximum value 7.33m/sec at 20<sup>0</sup>C and 35<sup>0</sup>C. The good agreement between the calculated and experimental corrosion rate values were achieved , the agreement reached 92% .