

دراسة آلية تآكل مسخنات هواء الاحتراق في مراجل توليد البخار في مصفاة بانياس

سندس غسان عمّار*

(تاريخ الإيداع 30 / 12 / 2013. قُبل للنشر في 19 / 5 / 2014)

□ ملخص □

يقدم البحث دراسة تحليلية شاملة لتحديد مشكلة التآكل التي تتعرض لها مسخنات هواء الاحتراق في مراجل توليد البخار في مصفاة بانياس ، وذلك من خلال إجراء دراسة تفصيلية لواقع عمل هذه المسخنات تتضمن دراسة : (نوع الوقود المستهلك في الحراقات ، درجات حرارة غازات العادم الفعلية ، وإجراء تحليل كيميائي لنواتج هذه الغازات) . كما يتضمن البحث إجراء تجارب عملية لفحص التآكل في مسخنات الهواء من خلال تحضير كويونات معدنية من نفس نوع معدن المسخنات تزرع مدة محددة في مجرى غازات العادم بالقرب من المسخن الأول الذي يدخل إليه الهواء أولاً ، وإعداد تقارير لذلك ، مع إجراء تحاليل كيميائية لترسبات سطح الكويون المدروس . تخلص الدراسة إلى أن المسخن الأول يتعرض لتآكل كبير حيث تنخفض درجة حرارته سطحه إلى ما دون نقطة الندى ، ولذلك تم اقتراح تصميم جديد لهذا المسخن من خلال تحديد سطوح التبادل الحراري بين هواء الاحتراق وغازات العادم بحيث تبقى درجة الحرارة أعلى من نقطة الندى مما يقلل من تآكل هذا المسخن بشكل كبير .

الكلمات المفتاحية : التآكل - مسخنات هواء الاحتراق - مراجل توليد البخار - كويون - درجة حرارة نقطة الندى

*عضو هيئة فنية - قسم المعدات والآليات - كلية الهندسة التقنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Study the mechanism of corrosion air heaters in the steam generating boilers in Banias Refinery

Sondos Ammar*

(Received 30 / 12 / 2013. Accepted 19 / 5 / 2014)

□ ABSTRACT □

The search comprehensive analytical study to determine the problem erosion experienced by air heaters combustion in boilers to generate steam in Banias refinery, through a detailed study of the reality of the work of these heaters include: study (type of spent fuel in the burner, temperature exhaust gases actual, and analysis chemical products of these gases).

It also includes research testing process to check corrosion in air heaters by preparing coupons metal of the same type metal heaters are grown for specific stream of exhaust gases near the heated first enters the air first, and prepare reports for it, with a chemical analysis of the sediment surface studied Coupon.

The study concludes that the heated first exposed to significant erosion where low surface temperature below the dew point, therefore been proposed a new design for this heated by determining surface heat exchange between combustion air and exhaust gases so that the temperature stays above the dew point, which reduces erosion this heated significantly.

Keywords: corrosion - combustion air heaters - boilers generate steam - coupon - dew point temperature

* Technical staff member - department equipment and machinery - Faculty of Engineering Technology- Tishreen University - Latakia - Syria

مقدمة :

إن الأضرار الاقتصادية الناتجة عن التآكل عديدة ومتنوعة وذات تكاليف اقتصادية عالية ، حيث تؤدي هذه الأضرار في كثير من الأحيان إلى توقف المصانع ومحطات إنتاج الطاقة عن العمل بشكل غير مبرمج ، وهذا يؤدي إلى نشوء كلفة اقتصادية إضافية غير متوقعة ، كما إن حصول التآكل يؤدي إلى ارتفاع كلفة الصيانة الدورية بسبب الحاجة ، في كثير من الأحيان ، إلى تبديل الجزء المعدني التالف بأخر جديد .

يُعدُّ التآكل أحد أهم المشكلات في صناعة النفط ، إذ إنها تطال لسبب أو لآخر كافة التجهيزات والمعدات المستخدمة في صناعة النفط . الأمر الذي يستدعي الكثير من الاهتمام والدراسة ، بسبب الخسارة المادية الكبيرة التي تترتب على هذه المشكلة . ومصفاة بانياس هي إحدى المنشآت النفطية ذات الأهمية الاقتصادية الكبيرة التي تعاني من مشكلة التآكل في أجزاء عديدة منها .

وبعد عدة جولات اطلاعية إلى شركة مصفاة بانياس ، والنقصي عن واقع عمل محطة توليد الطاقة الكهربائية بالبخار ، تبين أن الظروف التي تعمل عندها مسخنات هواء الاحتراق في دارة المراجل غير جيدة . مما يجعلها عرضة للتآكل والاهتراء . وأن المسخن الأول الذي يدخل إليه هواء الاحتراق أولاً هو الأكثر تعرضاً للتآكل . ولذلك يهتم بحثنا بإجراء دراسة تفصيلية عن الواقع العملي لمسخنات هواء الاحتراق في دارة مراجل توليد البخار ، واقتراح الحلول المناسبة لها ، حيث نزيد العمر التشغيلي للمسخن الأول . ومن ثم تخفيض فترات التوقف عن العمل ، الأمر الذي يؤدي إلى تخفيض الأموال المصروفة على الصيانة ، ومن ثم تحقيق الربحية الاقتصادية لمصفاة بانياس لما لهذه المنشأة من أهمية اقتصادية كبيرة .

أهمية البحث وأهدافه:

يمكن تلخيص أهمية البحث وأهدافه بالآتي :

• إجراء دراسة تحليلية شاملة لتحديد مشاكل التآكل التي تتعرض لها مسخنات هواء الاحتراق وتوصيفها .
 • العمل على اقتراح الحلول المناسبة لتقليل التآكل في مسخنات هواء الاحتراق ومن ثم تقليل الهدر من دون التأثير على مردود محطة توليد البخار للوصول إلى الربحية الاقتصادية بما يعود بالفائدة على مصفاة بانياس ومن ثم على مختلف محطات توليد الطاقة التي تعاني من المشاكل نفسها .

طرائق البحث ومواده :

يعتمد هذا البحث على إجراء الدراسة التجريبية والتحليلية لآلية تآكل مسخنات هواء الاحتراق في مراجل توليد البخار في مصفاة بانياس عن طريق :

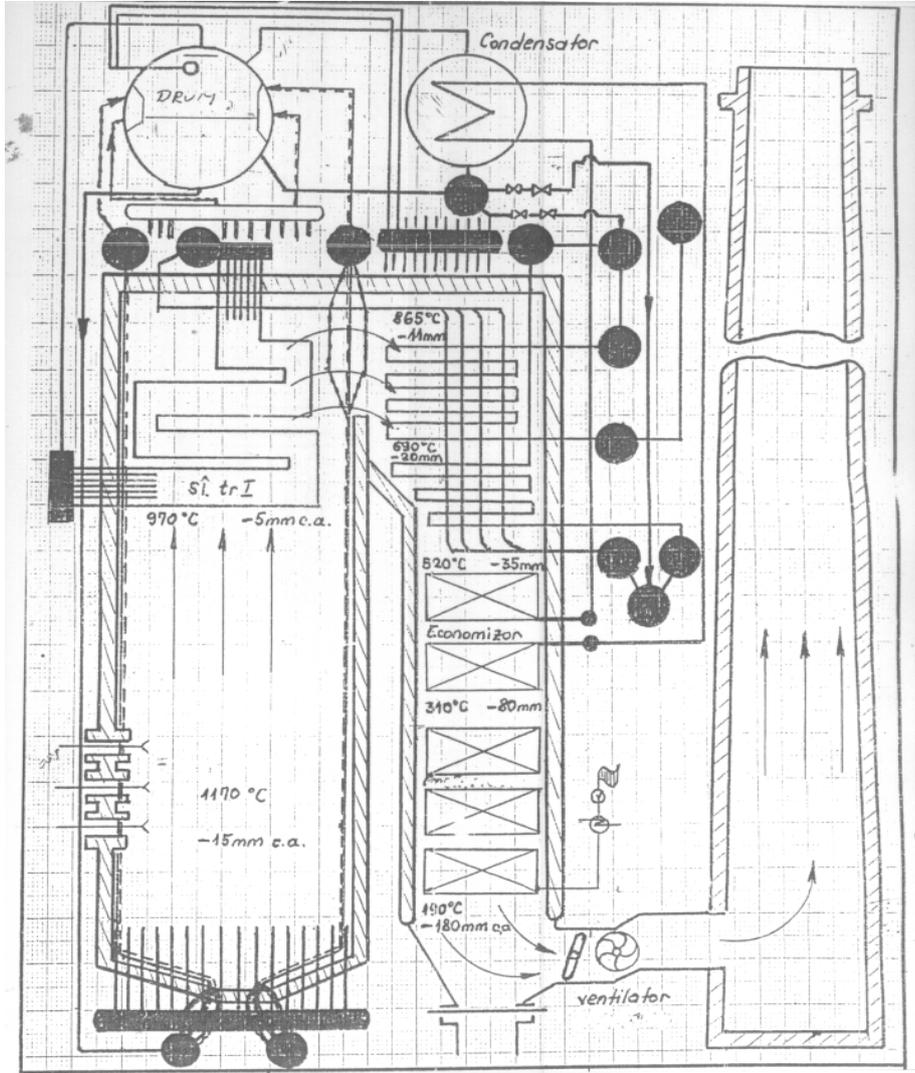
- دراسة تحليلية لظاهرة التآكل التي تعاني منها مسخنات الهواء في المراجل البخارية التي تستخدم الفيول وقوداً فيها
- إجراء التحليل الكيميائي للوقود المستخدم ولغازات العادم الناتجة عن احتراق هذا الوقود في المراجل المدروسة لمعرفة دورهما في عملية التآكل الحاصلة .
- دراسة توزيع درجات الحرارة الفعلية في دارة المرجل .

- تحضير كويونات معدنية من نفس معدن المسخنات وزرعها في مجرى غازات العادم بالقرب من المسخن الأول لفترة زمنية كافية، ودراسة تغير وزنها ، وعملية التآكل التي تعرضت لها .
- إجراء التحليل الكيميائي للمواد المترسبة على الكويونات وتحديد مكوناتها ، وإيضاح تأثيرها على تآكل هذه الكويونات .
- التصميم الحراري لمسخن الهواء الأول لتقادي تشكل نقطة الندى .

النتائج والمناقشة :

1- وصف عام لمراحل توليد البخار المستخدمة في مصفاة بانياس :

- يستخدم في مصفاة بانياس خمسة مراحل ، يتألف كل منها من حجرتين كما هو موضح في الشكل (1) . وتعمل هذه المراحل على إنتاج البخار المحمص الذي يستخدم في تدوير عنفات توليد الكهرباء والطاقة.



الشكل (1) : مخطط لمولد البخار في مصفاة بانياس .

حيث يعمل كل مرجل باستطاعة نظرية قدرها (120(t/h)، عند ضغط (100(bar)، ودرجة حرارة للبخار المحمص حوالي (500)c°. وتبلغ كمية الفيول النظرية المستهلكة في الحراقات حوالي 9(t/h). وتعتمد هذه المراجل في عملها على التسخين المسبق للهواء الداخل إلى الحراقات وذلك لتحسين مردود الاحتراق .

ولتقليل الضياعات في كمية الحرارة الناتجة عن الاحتراق والخارجة مع غازات العادم ، زودت هذه المراجل بمبادلات حرارية تعمل على استنزاف حرارة غازات العادم . حيث يستخدم قسم منها لتسخين ماء التغذية ، في الموفرات (economizer) ، ويبلغ عددها في كل مرجل موفران . ويستخدم القسم الآخر في تسخين هواء الاحتراق ، في مسخنات الهواء (Air Heater). وهذه المسخنات هي أنابيب يجري داخلها هواء الاحتراق المراد تسخينه عن طريق غازات العادم التي تتساب حول هذه الأنابيب باتجاه الوسط الخارجي . وتصنع أنابيب هذه المسخنات من معدن الفولاذ الكربوني (كربون ستيل) . ويدفع الهواء اللازم لعملية الاحتراق إلى الفرن بعد أن يتم إخضاعه لمرحلتين تسخين :

1. المرحلة الأولى : يتم تسخين الهواء الجوي في مسخن الهواء البخاري (Steam Air Heater) حيث يتم رفع درجة حرارته من درجة حرارة الوسط المحيط إلى حوالي (10c(20) ، وذلك عن طريق البخار ذي درجة الحرارة (280)c° والضغط (5) bar .

2. المرحلة الثانية : يتم تسخين الهواء الداخل إلى المرجل بعد مسخن الهواء البخاري في مسخنات هواء الاحتراق (Air Heater) عن طريق استنزاف حرارة غازات العادم بعد خروجها من الموفرات والمتوجهة إلى الوسط الخارجي عن طريق المدخنة .

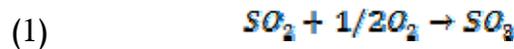
يؤدي استنزاف حرارة غازات العادم إلى تحسين مردود المرجل، إذ إنه مع استعمال أنواع الوقود الشائعة يتحسن مردود مرجل توليد البخار بمقدار (1%) عندما تنخفض درجة حرارة هذه الغازات بمقدار (22c(20). [1]

2- توصيف مشكلة التآكل التي تتعرض لها مسخنات هواء الاحتراق :

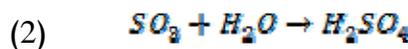
تتعلق قيمة الضياعات الحرارية مع غازات العادم، بالدرجة الأولى، بدرجة حرارة الغازات الخارجة من المرجل إلى الوسط الخارجي [2] (أي بدرجة حرارة الغازات على خرج مسخن الهواء الأنبوبي الأخير) وكذلك بدرجة الحرارة المرجعية (درجة حرارة الهواء على خرج مسخن الهواء البخاري) والتي يتم تحديدها وفقاً للمعطيات التصميمية للمرجل، وعادةً تكون قيمتها ثابتة، أي ينبغي أن يتم تسخين الهواء من درجة حرارة الوسط المحيط إلى درجة الحرارة المرجعية . وبما أن درجة حرارة الوسط الخارجي متغيرة خلال ساعات اليوم والسنة فإن كمية الحرارة التي تعطى إلى الهواء خلال مروره في مسخن الهواء البخاري تتغير بتغير درجة حرارة الوسط .

وبما أن نواتج احتراق الفيول وغازات العادم تحتوي عناصر تؤثر من الناحية الكيميائية على المعادن وسطوح التسخين في المرجل التي تؤدي إلى تآكلها و هلاكها بسرعة فائقة فإنها تسبب أضراراً مادية جسيمة ناتجة عن تكاليف قطع الغيار والتوقفات المتكررة للمرجل [2].

من أهم العناصر المؤثرة الناتجة ثاني أكسيد الكبريت الذي يسبب ما يعرف باسم "التآكل الحمضي" ، وسمي بهذه التسمية لأن ثاني أكسيد الكبريت الموجود ضمن الغازات يتحول إلى ثالث أكسيد الكبريت وفق المعادلة (1): [3]



ثم يتجمع غاز ثالث أكسيد الكبريت (SO₃) ويتفاعل مع أبخرة الماء ليشكل أبخرة حمض الكبريت وفق المعادلة (2):



تتكاثف هذه الأبخرة على سطوح التسخين المتوضعة ضمن مجرى الغازات عند انخفاض درجة حرارة الغازات إلى درجة معينة أقل من درجة حرارة نقطة الندى . وتتراوح درجة حرارة تكاثف حمض الكبريت بين $(116-166)^\circ\text{C}$ أو أعلى بقليل ، ويعتمد ذلك على تركيز (SO_3) ، وكمية بخار الماء في غازات العادم . [4]

وقد تنخفض درجة الحرارة الدنيا لمعادن مسخنات الهواء بشكل غير مقبول عند مستويات مرتفعة للكبريت في الوقود ، أو عند تشغيل المراحل بأحمال منخفضة ، حيث يحدث التآكل الحمضي بسبب تشكل نقطة الندى. وتحدث ظاهرة التآكل عند نقطة الندى (Dew-point corrosion) بسبب ترسبات الرماد الكبريتية على سطوح الأنابيب، وانخفاض درجات حرارة المعادن داخل دارة المرجل إلى درجات حرارة أقل من درجة حرارة نقطة الندى. حيث تكون الهجمة على المعدن محصورة بالسطوح المغطاة بترسبات الرماد الكبريتية ، و هجمة التآكل هذه تنتج عادة في مناطق محددة للمعدن بينما تبقى المناطق الأخرى معزولة نسبياً . وترتبط قيمة درجة حرارة نقطة الندى (درجة حرارة الغازات التي تحدث عندها عملية تكاثف أبخرة حمض الكبريت) بعوامل عدة من أهمها نسبة الكبريت في الوقود، إذ إنه كلما ازدادت نسبة الكبريت في الوقود ارتفعت درجة حرارة نقطة الندى. ويعبر القانون (3) عن العلاقة بين درجة حرارة نقطة الندى لغازات العادم وبين النسبة المئوية للكبريت في الوقود كالآتي [3] :

$$(3) \quad T_{G2} = 19.57 \ln(S) + 132.97$$

T_{G2} : حيث : درجة حرارة نقطة ندى غازات العادم .
S : النسبة المئوية للكبريت في الوقود .

3- دراسة تفصيلية لواقع عمل مراحل توليد البخار في مصفاة بانياس :

لقد بينا سابقاً المواصفات التصميمية للمراحل المستخدمة في مصفاة بانياس، ولكن بعد عدة جولات اطلاعية إلى الشركة والتواصل مع المهندسين المختصين في قسم الطاقة والتفتيش الفني تم الحصول على البيانات والقيم الحقيقية المستخدمة في تلك المراحل حيث تعمل المراحل باستطاعة فعلية أقل من التصميمية وتقدر بحوالي $(60 - 80)t/h$. ووفقاً لذلك قمنا بإجراء دراسة تفصيلية للواقع العملي لهذه المراحل وقد تضمنت ما يأتي :

3-1 دراسة خواص الوقود المستخدم في الحراقات :

إن التركيب الكمي للفيول المستخدم في المراحل البخارية يؤثر على مردوده، حيث إنه حسب نسبة العناصر القابلة للاحتراق فيه تتشكل نسب وكميات مختلفة من الغازات في نواتج الاحتراق داخل الفرن وفي غازات العادم ضمن مجرى الغازات و كذلك تختلف كمية الهواء اللازمة للاحتراق من وقود إلى آخر . وبما أن نوع الوقود المستخدم يشكل عاملاً رئيساً في حدوث التآكل في المراحل وذلك بسبب احتوائه عنصر الكبريت وغيره من العناصر الكيميائية الأخرى مثل الفناديوم والصدويوم ، إلا أن تأثير عنصر الكبريت يكون شديداً ، وذلك بسبب تكون ثاني أكسيد الكبريت (SO_2) الذي يتحول جزء منه إلى ثالث أكسيد الكبريت (SO_3) الذي يتحول إلى حمض الكبريت بوجود الرطوبة وفق المعادلة (2).

أما عنصر الفناديوم الموجود في الفيول فيؤدي دوراً فعالاً في عطب الأنابيب بسبب تكون الرماد ASH الحاوي على مركبات هذ العنصر بحيث يحدث تآكل سريع يؤدي إلى تلف الأنابيب . بالإضافة إلى تكون أكسيد الفناديوم

$(\frac{1}{2}O_2)$ وهو أكسيد متطاير ، الذي يعمل كعنصر مساعد لتحويل ثاني أكسيد الكبريت إلى ثالث أكسيد الكبريت مسبباً تآكل الحديد على شكل كبريتات . [5]

الجدول(1) تحليل الفيول المستخدم في حراقات المراجل

الخصائص	الواحدة	النتيجة
الوزن النوعي بدرجة C(15.6°) أو F(60)	N/m ³	0.9813
الكثافة عند الدرجة C(15°)	---	0.9807
نسبة الكبريت	%	4.13
الاسفلتينيات (مواد لاتذوب في روح الفيول)	%	9.3
اللزوجة الكينماتيكية عند الدرجة C(100°)	Cst	38
نسبة الفناديوم	PPM	107

المصدر : سجلات قسم التفتيش الفني في مصفاة بانياس .

تبلغ كمية الوقود المستهلكة في حراقات مراجل توليد البخار في مصفاة بانياس t/h (4.6-5.4) وهو من نوع الفيول السائل الحاوي على نسبة عالية من الكبريت . وقد تم توصيفه وفق الجدول (1) . وبالاعتماد على القانون (3) يمكن تحديد درجة حرارة نقطة الندى لغازات العادم وفقاً لنسبة احتواء الوقود على الكبريت وفق الآتي :

$$T_{G2} = 19.57Ln(S) + 132.97$$

بالتعويض بقيمة نسبة الكبريت في الفيول نحصل على درجة حرارة نقطة الندى :

$$T_{G2} = 19.57Ln(4.13) + 132.97 = 160.709 \quad (c^{\circ})$$

3-2- دراسة توزيع درجات الحرارة الفعلية في دارة المراجل :

بما أن مراجل مصفاة بانياس لا تعمل باستطاعتها القصوى ، فإن درجات الحرارة الفعلية تختلف عن درجات الحرارة التصميمية (عند الاستطاعة القصوى) والموضحة في الشكل (1). حيث تخرج غازات العادم من حجرة الاحتراق لتدخل إلى المحمصات بدرجة حرارة فعلية C(932) . ويتم التحميص على ثلاث مراحل تخرج بعدها بدرجة حرارة C(490) . ثم يتم استنزاف حرارة غازات العادم عبر الموفرات ، تخرج بعدها الغازات بدرجة حرارة C(274) لتدخل إلى مسخنات هواء الاحتراق وتخرج منها غازات العادم بدرجة حرارة C(154) إلى الوسط الخارجي عبر المدخنة . بحيث ترتفع درجة حرارة هواء الاحتراق من الدرجة C(120) بعد المسخن البخاري إلى حوالي الدرجة C(207) بعد مسخنات هواء الاحتراق . ونبين فيما يأتي درجات الحرارة التي تمر فيها غازات الاحتراق بدءاً من حجرة الاحتراق حتى خروجها من مسخنات هواء الاحتراق وذلك وفق الجدول (2) :

الجدول (2) درجات حرارة غازات العادم الفعلية في مراحل توليد البخار

توقيت القياس (سا)	درجة الحرارة بعد حجرة الاحتراق C°	درجة الحرارة المحمص C° / 1/	درجة الحرارة بعد المحمص C° / 2/	درجة الحرارة بعد المحمص C° / 3/	درجة الحرارة بعد الموقرات (C°)	درجة الحرارة بعد المسخنات (C°)
7	932	819	662	490	274	154
9	940	842	672	488	272	152
11	938	839	677	491	274	154
16	940	841	674	496	278	158
19	936	832	677	493	276	156
24	930	797	652	491	275	155

المصدر: من إعداد الباحث بالاعتماد على سجلات القياس الدورية في شعبة تشغيل المراجل في مصفاة بانياس .

3-3 التحليل الكيميائي لغازات العادم :

قمنا بإجراء تحليل كيميائي لغازات العادم وذلك لما لها من تأثير كبير على حدوث التآكل في مسخنات هواء الاحتراق، وقد تبين أنها تحتوي نسباً من أكاسيد الكبريت ، و أكاسيد النتروجين ، وأن وسط هذه الغازات حامضي (PH < 7) . كما هو موضح في الجدول (3) الذي يتضمن نتائج التحليل الكيميائي لغازات العادم ودرجة حرارتها بعد المسخنات :

إن استنزاف حرارة غازات العادم عند عبورها أجزاء المرجل المختلفة قد يسرع تفاعل الكبريت و النتروجين مع بخار الماء لتشكل بخار حمض الكبريت وبخار حمض النتروجين، وهذا الوسط الحمضي المتشكل في منطقة المسخنات يسبب خطورة على معادن تلك المسخنات بحيث يجعلها عرضة للتآكل وخاصة عندما تنخفض درجة الحرارة إلى ما دون نقطة الندى لحمض الكبريت بحيث يتكاثف الحمض مشكلاً قطرات من حمض الكبريت على تلك المعادن لتشكل بوراً للتآكل . حيث تغطي بترسبات ناتجة عن التآكل يكون يصعب التعرف عليها بالعين المجردة .

الجدول (3) التحليل الكيميائي لغازات العادم في مراحل توليد البخار

بعض القراءات في أيام عمل مختلفة	البخار المولد (h/t)	القبول المستهلك (h/t)	نسبة الكبريت (%)	CO2 (%)	درجة حموضة الرماد (PH)	الهواء الزائد (%)	CXHXMG/M ³	نسبة الأوكسجين (%)	CO (MG/M ³)	NOX (MG/M ³)	SO2 (MG/M ³)	SOX (MG/M ³)	درجة حرارة الغاز بعد المسخنات (C°)
2009/12/28	68	5.4	3.71	14.6	2.4	24.52	16	4.57	99	111	2402	2450	151
2009/12/31	77	5.2	3.71	15.8	2.4	32.93	15	3.67	44	86	1564	1595	150
2010/1/6	65	4.8	3.71	15.3	2.5	28.77	10	4.07	40	82	1361	1388	151
2010/1/8	61	4.6	3.71	15.9	2.9	33.33	15	3.63	38	115	1364	1391	150
2010/1/11	62	4.5	3.71	15.9	2.9	34.23	17	3.82	37	104	1047	1207	152

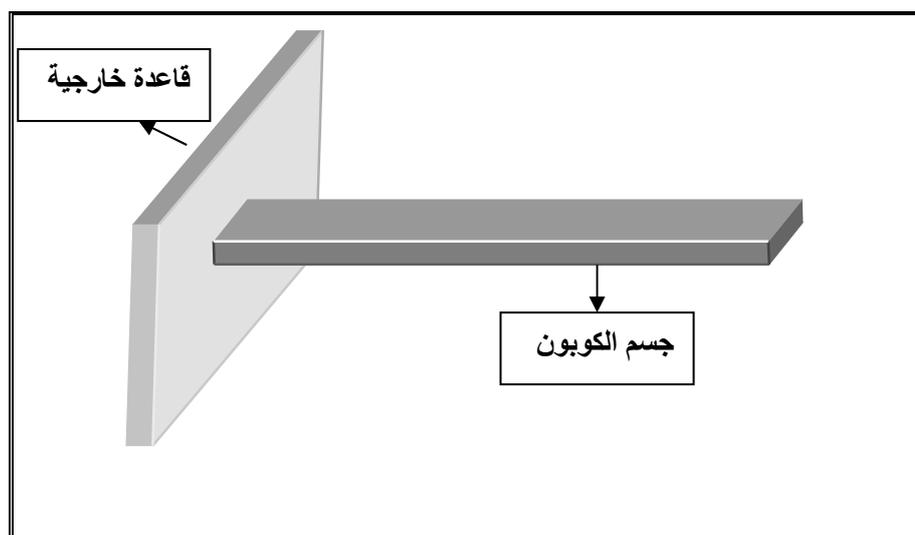
المصدر : الجدول من إعداد الباحثة .

4- الدراسة العملية لفحص التآكل في مسخنات هواء الاحتراق :

لكي تتم دراسة التآكل في مسخنات هواء الاحتراق وفحصه ، قمنا باستخدام كويونات معدنية تزرع في مجرى غازات العادم بين المسخن الأخير بالنسبة لخروج غازات العادم وبين مروحة سحب الغازات ، بحيث تتعرض للظروف نفسها التي تتعرض لها مسخنات الهواء . وتصنع هذه الكويونات من نفس نوع معدن مسخنات الهواء الفولاذ الكربوني (كربون ستيل) S235J2G3 بطول 300 مم وعرض 30 مم وسماكة (2-3) مم ويتراوح وزن الكويون بين (300-270) . حيث يترك الكويون المزروع لمدة ثلاثين يوماً ثم يخرج من المرجل ، لتتم إعادة وزنه ودراسة الترسبات المتوقعة عليه لتحديد دورها في عملية التآكل التي تعرض لها .

1-4 تحضير الكويون :

- يتألف الكويون المعد لمراقبة التآكل الحاصل في مسخنات الهواء من جزأين هما :
 - قاعدة خارجية تلتصق بجدار قناة خروج غازات العادم من الخارج ، وتفصلها عن الجدار حلقة إحكام (جلبة) لمنع تسرب الهواء الجوي إلى داخل القناة لأن الضغط داخلها أقل من الضغط الجوي .
 - جسم الكويون، الذي يدخل إلى القناة ، يوضع في مجرى غازات العادم الخارجة من المرجل عن طريق المدخنة . وتتم الدراسة التحليلية لهذا الجزء كونه يتعرض لنفس ظروف عمل مسخنات الهواء .
- ويوضح الشكل (3) رسماً توضيحياً لشكل الكويون المزروع في قناة المرجل ولأقسامه .



الشكل (2) رسم توضيحي يمثل الكويون المستخدم في مراجل مصفاة باتيناس .

المصدر : الشكل من إعداد الباحثة .

2-4 التحليل الطيفي لمعدن الكويون :

قبل البدء بالتجارب وقبل زرع الكويون في قناة المرجل ، تم إجراء تحليل طيفي لمعدن الكويون باستخدام جهاز التحليل الطيفي في مخبر جامعة تشرين لمعرفة تركيبه المعدني والتأكد من مطابقته لمعدن مسخنات الهواء المدروسة . وقد تبين أن تركيبه المعدني مؤلف من الحديد بشكل أساسي الحاوي الكربون مع مجموعة من العناصر الخلائطية ذات نسب ضئيلة جداً . ويبين الجدول (4) التركيب المعدني لمعدن الكويون بشكل مفصل :

الجدول (4) التركيب الكيميائي لمعدن الكوبون .

<u>Fe</u> 99.1	<u>C</u> 0.243	<u>Si</u> 0.03	<u>Mn</u> 0.333	<u>P</u> 0.036	<u>S</u> 0.041	<u>Cr</u> 0.036
<u>Mo</u> <0.005	<u>Ni</u> 0.015	<u>Al</u> 0.008	<u>Co</u> <0.005	<u>Cu</u> 0.043	<u>Nb</u> <0.002	<u>Ti</u> <0.002
<u>V</u> 0.0029	<u>W</u> <0.010	<u>Pb</u> <0.05	<u>Sn</u> 0.0379	<u>B</u> 0.004	<u>Ca</u> 0.0002	<u>Zr</u> 0.0023
<u>As</u> 0.0203						

المصدر : الجدول من إعداد الباحثة بالاعتماد على نتائج التحليل الطيفي في مخابر جامعة تشرين .

3-4 تجهيز الكوبون قبل وضعه في حيز التجربة :

قبل وضع (زرع) الكوبون في كل تجربة نقوم بتنظيفه بشكل جيد بورق صنفرة (برداخ) لإزالة الأوساخ والأكاسيد عن سطحه. وبعد ذلك يتم تنظيفه بقطعة قماش مبللة بالكحول الإيثيلي . وبعد الانتهاء من التنظيف نقوم بوزن الكوبون بميزان الكتروني رقمي ذي دقة (0.01g) وذلك لمقارنته لاحقاً مع وزنه بعد التجربة . ونوضح فيما يأتي بيانات لحالة الكوبونات المستعملة بعد الانتهاء من التجارب :

4-4 نتائج تجارب وضع الكوبونات في مجرى غازات عادم المرجل :

أولاً- بيانات مراقبة تآكل الكوبونات الموضوعة في مجرى غازات عادم المرجل الثاني :

بعد تنظيف الكوبون ووزنه على الميزان حيث كان وزنه (283g) . وضع الكوبون بتاريخ 2009/7/21 في مجرى غازات العادم بالقرب من المسخن الأول بالنسبة لدخول هواء الاحتراق . حيث استمرت التجربة مدة ثلاثين يوماً (فترة التعرض) ، تم بعدها سحب كوبون مراقبة التآكل من المرجل بتاريخ 2009/8/21 .

المشاهدات والملاحظات:



بعد التنظيف

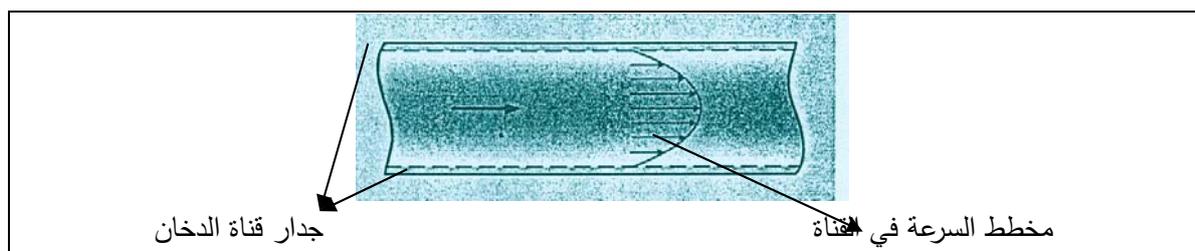
قبل التنظيف

الشكل (3) صورة توضيحية للكوبون المستعمل .

يبين الشكل (3) الكوبون لحظة إخرجه من المدخنة ، حيث نلاحظ وجود طبقة سوداء اللون من هباب الفحم تغطي كامل سطح الكوبون ، يوجد تحتها طبقة بيضاء اللون سميكة وهشة . ولوحظ وجود تآكل عام تحتها يمتد على بعد 5/ سم من قاعدة الكوبون (من جهة جدار قناة المرجل). ، وسبب التآكل على هذا البعد عن قاعدة الكوبون هو سرعة غازات العادم حيث تكون منخفضة بالقرب من جدار المدخنة ، كما هو موضح في الشكل (4) الذي يتضمن

مخطط سرعة غازات العادم في قناة المرجل . بحيث تكون إمكانية تكاثف بخار حمض الكبريت المتشكل أكبر ، مما يؤدي إلى تآكل شديد .

وبعدها تم تنظيف الكوبون وإزالة الرواسب المتكونة على سطحه وجمعت هذه الرواسب في وعاء زجاجي محكم الإغلاق لإجراء تحليل كيميائي ومعرفة تركيبها الكيميائي . بعد ذلك تم وزن الكوبون بالميزان الإلكتروني . وقد لوحظ وجود نقصان في وزن الكوبون بعد انتهاء مدة الزرع .



الشكل (4) مخطط يوضح سرعة غازات العادم في قناة الدخان

وقد كررنا التجربة على المرجل المدروس نفسه بهدف الحصول على نتائج أكثر دقة وموثوقية ، فبعد أن تم سحب الكوبون الأول قمنا بزرع كوبون ثاني مكانه بتاريخ 2009/8/21 ، بعد أن تم تنظيفه ووزنه حيث كان وزنه (277g) ، وقمنا بسحب الكوبون من المرجل بتاريخ 2009/9/21 . وعند سحبه قمنا بزرع كوبون ثالث مكانه ، حيث كان وزنه (281g) . وتم سحبه بتاريخ 2009/10/21 . وفي التجريبتين كليهما كانت نفس الملاحظات والمشاهدات نفسها هي التي لوحظت على الكوبون الأول . كما لوحظ بقاء نفس نسبة النقص في وزن الكوبون وبالنسبة نفسها تقريباً . وقد رتبنا نتائج التجارب في الجدول (5) :

الجدول (5) الفقد في وزن الكوبون خلال 30 يوماً

رقم الكوبون	نوع المعدن	مكان توضع الكوبون	مدة التعرض (يوم)	الوزن قبل التجربة (g)	الوزن بعد التجربة (g)	الوزن المفقود (g)
1	S235J2G3	المرجل الثاني	30	283	268	15
2	S235J2G3	المرجل الثاني	30	277	264	13
3	S235J2G3	المرجل الثاني	30	281	269	14

المصدر : الجدول من إعداد الباحثة .

ثانياً - بيانات مراقبة تآكل الكوبونات الموضوعة في مجرى غازات عادم المرجل الرابع :

قمنا بإجراء تجارب أخرى لزرع كوبونات مماثلة في مرجل آخر (المرجل الرابع) للتحقق من صحة التجارب السابقة والتأكد من أن هذه النتائج ليست عرضية وتخص مرجل بعينه . إذ قمنا بزرع الكوبون (4) بتاريخ 2010/1/2 بعد تنظيفه ووزنه بالميزان حيث كان وزنه (278g) . وذلك في مجرى غازات العادم بالقرب من المسخن الأول . و تم سحبه من المرجل بتاريخ 2010/2/2 .

المشاهدات والملاحظات:

بعد التنظيف

قبل التنظيف

الشكل (5) صورة توضيحية للكوبون المستعمل .

يبين الشكل (5) الكوبون لحظة إخرجه من المدخنة ، حيث نلاحظ أيضاً تغطية الكوبون بطبقة سوداء وتحتها طبقة بيضاء سميكة وهشة . ووجود تآكل عام تحت الطبقتين يمتد على بعد 5/ سم من عنق الكوبون ، . وبعد تنظيف سطح الكوبون من الرواسب ووزنه . لوحظ وجود نقصان في وزن الكوبون . وقد كررنا التجربة على نفس المرجل لزيادة دقة النتائج. فبعد أن تم سحب الكوبون رقم (4) قمنا بزرع كوبون آخر مكانه بتاريخ 2010/2/2، حيث كان وزنه بعد التنظيف (280g) ، وقمنا بسحبه من المرجل بتاريخ 2010/3/2، ثم زرنا كوبوناً آخر مكانه ، وزنه بعد التنظيف (277g) ، وتم سحبه من المرجل بتاريخ 2010/4/2. وفي كلتا التجريبتين كانت نفس الملاحظات والمشاهدات التي لوحظت على الكوبون (4) . كما لوحظ بقاء وجود النقص في وزن الكوبون المستعمل وبنفس النسبة تقريباً . وقد رتبنت نتائج هذه التجارب في الجدول (6) ..

الجدول (6) الفقد في وزن الكوبون خلال 30 يوماً

رقم الكوبون	نوع المعدن	مكان توضع الكوبون	مدة التعرض (يوم)	الوزن قبل التجربة (g)	الوزن بعد التجربة (g)	الوزن المفقود (g)
4	S235J2G3	المرجل الرابع	30	278	266	12
5	S235J2G3	المرجل الرابع	30	280	265	15
6	S235J2G3	المرجل الرابع	30	277	263	14

المصدر : الجدول من إعداد الباحثة .

وهكذا نلاحظ أن نتائج التجارب التي أجريت على المرجل الرابع متطابقة تقريباً مع نتائج المرجل الثاني مما يدل على أن آلية تآكل مسخنات هواء الاحتراق في المرجلين متماثلة .

4-5 تحليل الترسيبات على سطح الكوبون المستعمل :

لقد قمنا بإجراء تحاليل كيميائية للمادة المترسبة على سطح الكوبون والمؤلفة من طبقة بيضاء وأخرى سوداء (هباب الفحم) . وذلك في مخبر المعهد العالي للبحوث البحرية .

يبين الجدول (7) بعض المركبات الكيميائية الناتجة عن تحليل المواد المترسبة على سطح الكوبون المستعمل . والتي لها النسب الكبرى في هذه العينة .

الجدول (7) : نسب المركبات الكيميائية في عينة الاختبار .

النسبة (%)	اسم المركب الكيميائي
0.04	sulfur
1.13	1,2-Benzenedicarboxylic acid, bis(2-methylpropyl) ester
2.65	Hexadecanoic acid, ethyl ester
6.36	Cyclic octaatomic sulfur
1.85	Octadecanoic acid, ethyl ester
26.47	1,2-Benzenedicarboxylic acid, mono(2-ethylhexyl) ester
26.39	1,2-Benzenedicarboxylic acid, diis octyl ester
5.37	1,2-Benzenedicarboxylic acid, diis octyl ester
0.60	Trichloroacetic acid, hexadecyl ester
0.15	Erucic acid

المصدر : الجدول من إعداد الباحثة بالاعتماد على نتائج التحليل الكيميائي عينة الاختبار .

حيث تبين أن معظم المواد في هذا الجدول هي مركبات حمضية هيدروكربونية معقدة ومواد عضوية كبريتية تؤكد دور الكبريت كعامل أساسي في حدوث التآكل الذي يصيب معدن مسخنات هواء الاحتراق . ويتبين لنا مما سبق أن الشروط التي تعمل عندها مراجل توليد البخار في مصفاة بانياس ، وخاصة عدم استخدام الاستطاعة الكلية لهذه المراجل ، تولد ظروفاً غير نظامية في العمل . ونتيجة لذلك تنخفض درجة حرارة غازات العادم إلى ما دون نقطة الندى عند المسخن الأول (1) الذي يدخل إليه الهواء أولاً ، وهذا ما يعرضه لتآكل أكبر بكثير من المسخنين الآخرين بحيث يبذل باستمرار . لذلك كان لابد من التفكير بتصميم جديد لهذا المسخن . كأحد الحلول المقترحة لتقليل التآكل ، من أجل بقاء درجة حرارة غازات العادم مرتفعة نوعاً ما ، مما يقلل تكاثف بخار حمض الكبريت .

5- التصميم الحراري لمسخن الهواء الأول لتفادي تشكل نقطة الندى:

يتبين مما سبق أن درجة حرارة غازات العادم الفعلية المأخوذة من جداول قياس درجات الحرارة لغازات العادم في مراجل مصفاة بانياس تنخفض من الدرجة $274C^{\circ}$ قبل مسخنات هواء الاحتراق إلى الدرجة $154C^{\circ}$ بعد هذه المسخنات . أما هواء الاحتراق فترتفع درجة حرارته ضمن مسخنات هواء الاحتراق من الدرجة $120C^{\circ}$ إلى الدرجة $207C^{\circ}$.

ومن الاعتماد على العلاقات الآتية يمكن التوصل إلى تصميم جديد للمسخن الأول . إذ تعطى كمية الحرارة

$$(4) \quad Q = KA\Delta t_m \quad \text{المفقودة مع غازات العادم بالعلاقة الآتية :}$$

حيث : k : عامل التوصيل الحراري . $[W/m^2K]$

A : المساحة السطحية لمسخن الهواء (سطح التبادل الحراري) $[m^2]$

Δt_m : فرق درجات الحرارة الوسطي : [K]

حيث يعطى فرق درجات الحرارة الوسطي وفق القانونين الآتيين :

$$(5) \quad \Delta t_m = \frac{\Delta t_{\max} - \Delta t_{\min}}{\ln\left(\frac{\Delta t_{\max}}{\Delta t_{\min}}\right)} \quad \text{فرق درجات الحرارة الوسطي اللوغاريتمي :}$$

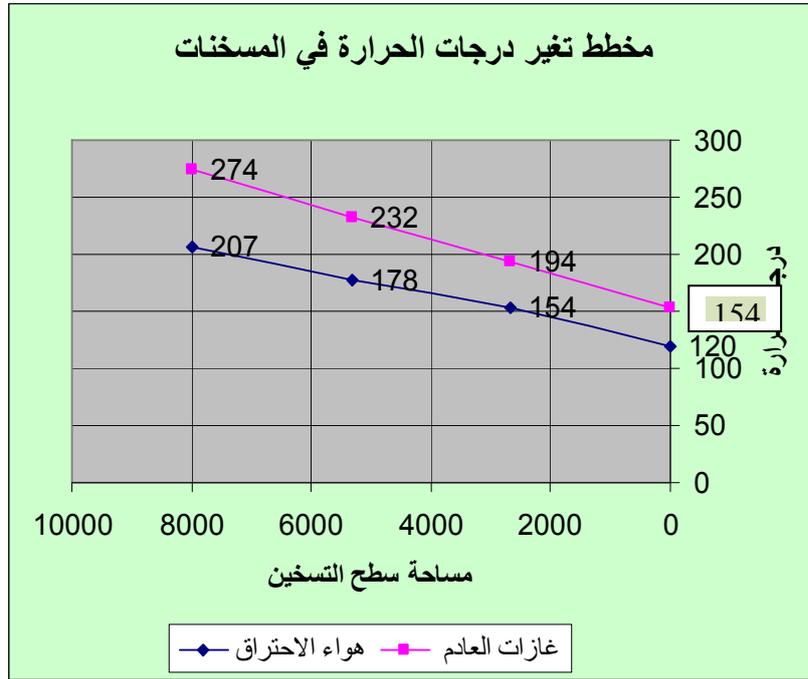
$$\text{فرق درجات الحرارة الوسطي الحسابي : } \Delta t_m = (\Delta t_{\max} + \Delta t_{\min}) / 2 \quad (6)$$

ويستخدم فرق درجات الحرارة الوسطي الحسابي $\Delta t_{\max} / \Delta t_{\min} < 1.7$ عندما يكون [6].

وبما أننا لا نملك توزيع درجات حرارة غازات العادم ومن ثم هواء الاحتراق قبل كل مسخن وبعده وإنما نملك فقط درجة الحرارة قبل المسخن الثالث وبعده المسخن الأول لذلك كان لابد من رسم مخطط تغيير درجات الحرارة على كامل المسخنات الثلاثة لكل من غازات العادم وهواء الاحتراق .

وبما أن جريان هواء الاحتراق وغازات العادم يتم بشكل متعاكس فمخطط تغيير درجات الحرارة للمسخن الأول

(1) يوضحه الشكل (6) :



الشكل (6) مخطط تغير درجات الحرارة في مسخنات هواء الاحتراق .

المصدر : الشكل من إعداد الباحث .

يمكن بناء على المخطط البياني الموضح في الشكل (6) تحديد توزيع درجات الحرارة في كل من غازات العادم

وهواء الاحتراق ضمن مسخنات هواء الاحتراق (قبل كل مسخن وبعده) وفق الجدول (8)

الجدول (8) توزيع درجات الحرارة كل من غازات العادم وهواء الاحتراق ضمن مسخنات الهواء

رقم المسخن	درجة حرارة غازات العادم (C°)		درجة حرارة هواء الاحتراق (C°)	
	قبل	بعد	قبل	بعد
3	274	232	178	207
2	232	194	154	178
1	194	154	120	154

المصدر : الجدول من إعداد الباحث .

ومما سبق يمكن تحديد فرق درجات الحرارة في المسخن الأول كما يأتي :

$$\left. \begin{aligned} \Delta t_{\max} &= 194 - 154 = 40c^{\circ} \\ \Delta t_{\min} &= 154 - 120 = 34c^{\circ} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{\Delta t_{\max}}{\Delta t_{\min}} = \frac{40}{34} = 1.17$$

وبما أن $(1.17 < 1.7)$ لذلك سنستخدم في دراستنا قانون فرق درجات الحرارة الحسابي الوسطي [7].
يتم تغيير تصميم المسخن (1) بتغيير سطوح التبادل الحراري فيه . بحيث ترفع درجة حرارة غازات العادم الخارجة من المسخن لتصبح أعلى بقليل من نقطة الندى المحسوبة سابقاً (C°) $t_{G2} = 160.709$. أي تساوي $t_{Gexit} = 161 (C^{\circ})$ على الأقل .

وانطلاقاً من العلاقة (4) نبدأ دراستنا على المسخن (1) :

تُعطى كمية الحرارة قبل تعديل تصميم المسخن (1) بالعلاقة : $Q_1 = KA_1 \Delta t_{m1}$.

وتُعطى كمية الحرارة بعد تعديل تصميم المسخن (1) بالعلاقة : $Q_2 = KA_2 \Delta t_{m2}$.

باعتبار أن عامل التوصيل الحراري (K) هو مقدار ثابت (لم تتغير طبيعة المادة) . أي : $K = const$

$$\frac{Q_1}{A_1 \cdot \Delta T_{m1}} = \frac{Q_2}{A_2 \cdot \Delta T_{m2}} \Leftarrow$$

$$\Delta t_{m1} = (\Delta t_{\max} + \Delta t_{\min}) / 2 = [(t_{Gent} - t_{Aexit}) + (t_{Gexit} - t_{Aent})] / 2 \quad \text{حيث :}$$

$$\Delta t_{m1} = [(194 - 154) + (154 - 120)] / 2 = 37c^{\circ}$$

$$\Delta t_{m2} = [(t_{Gent} - t_{Aexit}) + (t_{Gexit} - t_{Aent})] / 2 = [(194 - 154) + (161 - 120)] / 2 = 40.5c^{\circ}$$

ومن جهة أخرى تُعطى كمية الحرارة Q بالعلاقة الآتية : $Q = V_{Gas} \cdot C_{Pg} \cdot \Delta T$ [6]

V_{Gas} : حيث = التدفق الحجمي لغازات العادم (kg/s)

C_{Pg} = السعة الحرارية النوعية لغازات العادم (J/kgK) .

ΔT = فرق درجات حرارة غازات العادم (K) .

كمية الحرارة قبل تعديل تصميم المسخن (1) : $Q_1 = V_{Gas} \cdot C_{Pg} \cdot \Delta T_1$

وكمية الحرارة بعد تعديل تصميم المسخن (1) : $Q_2 = V_{Gas} \cdot C_{Pg} \cdot \Delta T_2$

$$\frac{V_{Gas} \cdot C_{pg} \cdot \Delta T_1}{A_1 \cdot \Delta T_{m1}} = \frac{V_{Gas} \cdot C_{Pg} \cdot \Delta T_2}{A_2 \cdot \Delta T_{m2}}$$

وبالتعويض نجد :

$$\frac{\Delta T_1}{A_1 \cdot \Delta T_{m1}} = \frac{\Delta T_2}{A_2 \cdot \Delta T_{m2}}$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta T_1 &= 194 - 154 = 40 \\ \Delta T_2 &= 194 - 161 = 33 \end{aligned} \right\} \Rightarrow A_2 = 0.75A_1$$

وبما أن مسخن هواء الاحتراق يتألف من أربع حزم من الأنابيب وكل حزمة مؤلفة من مجموعتين من الأنابيب .وهذه الأنابيب متساوية بالقطر (50) مم ولها نفس الطول (6390) مم . ويبلغ عدد هذه الأنابيب لكل حزمة (651 أنبوب) ، وبذلك يكون عددها في المسخن ككل هو (2604) أنبوب .

تحسب المساحة السطحية للمسخن (سطح التبادل الحراري) قبل تعديل التصميم وفق الآتي :

$$A_1 = \text{المساحة السطحية للمسخن} = \text{المساحة السطحية للحزمة الواحدة} \times 4$$

$$A_2 = \text{المساحة السطحية للحزمة الواحدة} = \text{المساحة السطحية للأنبوب الواحد} \times \text{عدد الأنابيب}$$

$$\text{المساحة السطحية للأنبوب الواحد} = \text{محيط القاعدة} \times \text{الارتفاع (طول الأنبوب)} = \pi d \times 6390$$

وبذلك تكون المساحة السطحية للمسخن قبل التعديل كما يأتي :

$$A_1 = A_2 \times 4 = \pi \times 50 \times 6390 \times 651 \times 4$$

ويتم تعديل تصميم المسخن أي تغيير سطح التبادل الحراري فيه وذلك إما بتغيير قطر أنابيب المسخن . وإما بتخفيض عدد الأنابيب .

• في حال تغيير قطر الأنابيب تعطى (A_2) كما يأتي :

$$A_2 = \pi d_2 \times 6390 \times 651 \times 4$$

وبالتعويض في العلاقة $A_2 = 0.75A_1$ نجد $d_2 = 0.75 \times 50 = 37.5 \text{ mm}$

• في حال تغيير عدد الأنابيب في المسخن تعطى (A_2) كما يأتي :

$$A_2 = \pi \times 50 \times 6390 \times \chi \times 4$$

حيث χ : عدد أنابيب الحزمة الواحدة بعد تعديل تصميم المسخن .

$$\text{وبالتعويض في العلاقة } A_2 = 0.75A_1 \text{ نجد : } \chi = 0.75 \times 651 = 489$$

يتبين مما سبق أنه عند تخفيض قطر أنابيب مسخن هواء الاحتراق إلى القطر (37.5) مم ، أو تخفيض عدد الأنابيب في كل حزمة من المسخن إلى (489) أنبوب ، سيؤدي إلى رفع درجة حرارة غازات العادم الخارجة من المسخن إلى أعلى من درجة حرارة نقطة الندى ، ومن ثم تقليل التآكل بشكل كبير .

وبالنتيجة : إن التصميم الحراري الجديد لمسخن الهواء الأول ، يؤدي إلى تقليل التآكل الحاصل فيه بشكل كبير ، وذلك نتيجة لرفع درجة حرارة غازات العادم إلى أعلى من درجة حرارة نقطة الندى . الأمر الذي يؤدي إلى زيادة عمر المسخن ، ومن ثم تقليل فترات التوقف عن العمل من أجل الصيانة ، ومن أجل تبديل هذا المسخن . وهذا بدوره يحقق الوفرة في المصاريف التي تبذل على عمليات الصيانة . بالإضافة إلى ذلك ، فإن التصميم الحراري للمسخن بتخفيض عدد أنابيبه أو بتخفيض أقطار هذه الأنابيب ، سيؤدي إلى تخفيض وزن هذا المسخن وبالتالي تخفيض سعره الذي يحسب على أساس وزن المسخن . وهذا كله يعود بالفائدة الاقتصادية على مصفاة بانياس ويحقق الربحية الاقتصادية لهذه المنشأة .

الاستنتاجات والتوصيات :

الاستنتاجات :

1. من خلال دراسة واقع عمل المراجل في مصفاة بانياس ، تبين أن هذه المراجل تعمل باستطاعة فعلية أقل من التصميمية ، مما يجعل مسخنات هواء الاحتراق تعمل في ظروف غير مثالية . إذ تنخفض درجة حرارة غازات العادم إلى ما دون نقطة الندى ، وهذا يسبب تعرضها للتآكل و الاهتراء .
2. لقد أثبت التحليل الكيميائي للفيول المستخدم في الحراقات ، وجود الكبريت فيه بنسبة كبيرة وهو ما يشكل عاملاً أساسياً في حدوث التآكل الذي تتعرض له مسخنات هواء الاحتراق .
3. من إجراء التحليل الكيميائي لنواتج غازات العادم تبين أن وسط هذه الغازات حمضي حيث ($PH < 7$) ، وهذا يزيد خطر التآكل الذي تتعرض له مسخنات هواء الاحتراق .
4. أظهرت نتائج تجارب زرع كوبونات فحص التآكل ، وإجراء التحاليل الكيميائية للترسبات الموجودة على سطح هذه الكوبونات ، وجود الكبريت كعنصر يدخل في تركيب بعض المركبات الكيميائية الناتجة عن التحليل وهذا يشكل عاملاً أساسياً في حدوث التآكل .
5. لقد تبين من إجراء التصميم الحراري لمسخن الهواء الأول أن تغيير سطح التبادل الحراري للمسخن بتخفيض أقطار أنابيبه إلى (37.5) مم ، أو بتخفيض عدد أنابيب كل حزمة فيه إلى (489) أنبوب ، يؤدي إلى إبقاء درجة حرارة غازات العادم أعلى من درجة حرارة نقطة الندى ، ومن ثم تخفيض حدوث التآكل.

التوصيات :

1. أن تعمل مراجل توليد البخار بالاستطاعة التصميمية للمرجل ، بحيث توفر ظروفاً مثالية لعمل مسخنات هواء الاحتراق (العمل عند درجات حرارة لغازات العادم أعلى من نقطة الندى) .
2. تحسين نوع الوقود المستخدم في الحراقات ، وذلك باستخدام وقود يحتوي نسبة قليلة من الكبريت. أو إضافة محسنات احتراق للوقود لتقليل تشكل SO_3 ومن ثم تقليل تشكل H_2SO_4 المسبب للتآكل .
3. إجراء دراسات وأبحاث للعمل على تغيير نوع المادة التي تصنع منها معادن مسخنات هواء الاحتراق ، لتكون أكثر مقاومة للتآكل من المعدن المستخدم حالياً .

المراجع :

1. نحاس، د. أحمد. مولدات البخار – منشورات جامعة حلب ، 1983 . (130) .
2. Резников, М. И., Липов, Ю. М. Паровые котлы тепловых электростанций чебник для студентов вузов .-М: Энергоиздат 1981. 240с .
3. علي، د. يونس. دراسة تأثير درجة الحرارة وتركيب الفيول على أداء محطات التوليد الكهروحرارية- ليبيا، 2008 . (7،8) .
4. Huisbregts, W.M.M ,Leferink, R."Ant-corrosion Methods and Materials", Vol 51,3 (2004) . P(173-188) .
5. WWW.arab-eng.org/vb/register.php .
6. حمود ، د. بسام . الطاقة وسلامة البيئة – دمشق ، 2000 . (40-43) .
7. JOHN.H.Lienhard; A Heat Transfer Text book ; theerd Edution-Phlogiston Press – 2008 . 726 .