

تقييم حالة جدران أفران التجفيف باستخدام طريقة التصوير الحراري

د. م محمد فتحي غنمه*

الملخص

تستخدم أفران التجفيف لتجفيف الورق المقوى المصنع من إعادة تدوير المخلفات الورقية، وهي تبنى من جدران ذات طبقتين من الفولاذ المقاوم للصدأ تحتجزان فيما بينهما طبقة من الصوف الزجاجي، لضمان العزل الكافي، مما يخفض إلى الحد الأدنى التبادل الحراري بين داخل الفرن والوسط المحيط، ويؤدي تشكل أية عيوب ضمن جدار الفرن (تآكل في طبقات الفولاذ المقاوم للصدأ أو عدم إحكام أبواب تنظيف الفرن وصيانتها أو ترقق بطانة الصوف الزجاجي العازلة، أو انخفاض كفاءة العزل لها)، إلى زيادة حجم التبادل الحراري بين داخل الفرن والوسط المحيط، مما سيؤدي إلى ضياعات حرارية كبيرة تنعكس على زيادة استهلاك الوقود اللازم لرفع درجة حرارة الفرن الداخلية إلى الدرجة المطلوبة من جهة، وعدم استقرار هذه الدرجة مما سيتطلب زمن تجفيف أعلى للقطع المشكلة من عجينة الورق المقوى ومن ثم انخفاض إنتاجية فرن التجفيف من جهة أخرى، وعليه يشكل تقييم حالة جدران الفرن أهمية كبيرة، بهدف ضمان قدرة هذه الجدران على تحقيق العزل المطلوب، ومن ثم تحقيق الإنتاجية المخططة لهذا الفرن، وضمن المستوى الاسمي لاستهلاك الوقود.

تقدم هذه الورقة إجرائية لتقييم حالة جدران أنابيب هذه الأفران، وذلك باستخدام طريقة التصوير الحراري نظراً لما تتمتع به هذه الطريقة من ميزات مقارنة بالطرائق الأخرى للاختبار اللاإتلافي، كقدرتها على إعطاء تقييم إجمالي للجسم، وبسرعة وفاعلية أكبر وبحدود منخفضة نسبياً من الكلفة

الكلمات المفتاحية: التصوير الحراري، الاختبارات اللاإتلافية، الأشعة تحت الحمراء، أفران التجفيف، التآكل.

* قسم هندسة التصميم الميكانيكي، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق - سورية.

Drying ovens walls evaluating using thermal imaging method

Dr. M. F. Ghanama*

Abstract

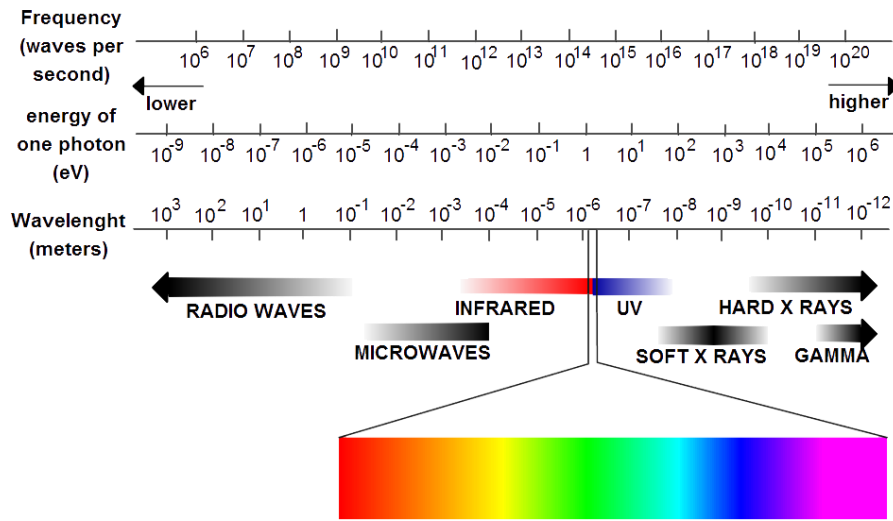
The drying ovens are used to dry the cardboard manufactured by recycling of waste paper, those oven are built from double jacket stainless steel walls with fiber glass shell, to ensure adequate insulation, thereby reducing to a minimum the heat exchange boundary between inside the oven and the surrounding medium, And lead pose any defects within the wall of the oven (corrosion in stainless steel or not to tighten the doors of cleaning and maintenance of the oven or thinning of the lining of glass wool insulation or low efficiency of its insulation) layers, to increase the size of the heat exchange between the interior of the oven and the surrounding medium, Which will lead to large thermal Ziaat reflected in the increase of fuel consumption to raise the internal oven temperature to the desired degree of hand, and the instability of this class which will require drying the highest cutting problem of cardboard and paste time and thus lower productivity drying oven on the other hand, it is an assessment of the case of the walls of the oven great importance, in order to ensure the ability of these walls to achieve the desired insulation, and thus achieve the planned production of the furnace, and within the nominal fuel consumption level.

This paper presents a procedure to evaluate the insulation efficiency of the drying oven walls using thermal imaging method, because of its advantages compared to other nondestructive evaluation methods such as: overall assessment of the body, and quickly and effectively the largest and up to relatively low cost

1- المقدمة:

الضوء المرئي سواء كانت قبل هذا المجال أو بعده، فلا يمكن للعين رؤية الأشعة فوق البنفسجية (UV) الموجودة عند إحدى نهايتي مجال الضوء المرئي في الطيف الكهرومغناطيسي، أو رؤية الأشعة تحت الحمراء (IR) الموجودة عند النهاية الأخرى له.

يشكل الضوء المرئي جزءاً صغيراً جداً من الطيف الكهرومغناطيسي، وهو يقع ضمن المجال من الأحمر وحتى البنفسجي [1] كما هو مبين في الشكل (1)، وهو ما يمكن للعين البشرية التحسس له وتمييزه، إلا أن العين غير قادرة على رؤية الأشكال الأخرى من الإشعاع خارج مجال



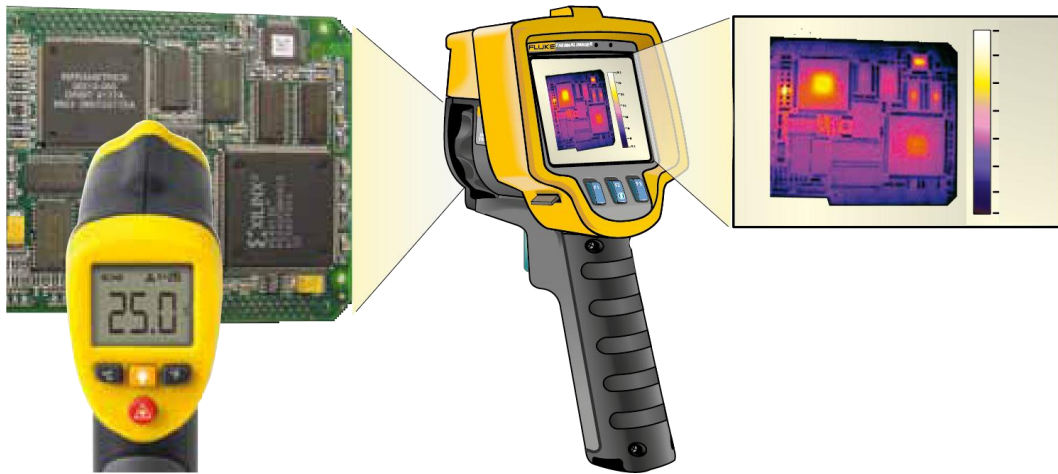
الشكل (1) الطيف الكهرومغناطيسي [2]

وطولها الموجي أقل. تملك الأشعة تحت الحمراء خواص الضوء المرئي من حيث: الانتشار والانعكاس والانكسار والتداخل والانعراج والاستقطاب ويعود اكتشافها الى العام 1800 عندما تمكّن العالم الألماني فريدريك ويليام هيرشل من تحليل الضوء الى ألوانه الأساسية من خلال موشور زجاجي، اذ لاحظ في أثناء قياس درجة حرارة مكونات الطيف الملون باستخدام مقياس حرارة، ازدياداً في درجة الحرارة في أثناء انتقال مقياس الحرارة من مجال اللون البنفسجي الى مجال اللون الأحمر، كما لاحظ ان درجة الحرارة تبلغ قيمة عظمى في الجزء المظلم الواقع خارج الطيف المرئي وقبل الضوء الأحمر، ممّا يؤكد أنّ هناك اشعاعات غير مرئية تقع قبل الطيف الأحمر.

إن الأجسام كلّها التي تزيد درجة حرارتها عن الصفر المطلق ($0 [K] = -273.15 \text{ } ^\circ\text{C}$) تشع أشعة كهرومغناطيسية، تتبعث منها طاقة تنتقل على شكل موجات كهرومغناطيسية ذات أطوال موجية من 0 إلى ∞ ، تنتقل بسرعة الضوء، يطلق عليها اسم الأشعة تحت الحمراء لوقوعها قبل اللون الأحمر من الضوء المرئي في الطيف الكهرومغناطيسي، فالحرارة التي نشعر بها من ضوء الشمس أو من النار أو من المشعات المختلفة جميعها هي أشعة تحت حمراء، وهي على الرغم من عدم قدرة أعيننا على رؤيتها، إلا أن الأعصاب الموجودة في جلدنا تتحسس لها على هيئة حرارة، فكلما كان الجسم أكثر دفئاً، كانت طاقة الأشعة تحت الحمراء المنبعثة منه أعلى

المراد دراسته، وهي ما يطلق عليه "الكاميرات الحرارية"، حيث تعطي هذه الكاميرات صورة للجسم المختبر تعكس تغيرات الأطوال الموجية لموجات الأشعة تحت الحمراء المنبعثة والمتغيرة بحسب توزع درجات حرارة الجسم المختبر، كما هو مبين بالشكل (2)، وهي تستخدم عدسات خاصة لمعايرة وتركيز الأشعة تحت الحمراء المنبعثة عن الأجسام المختبرة على حساس كشف خاص ثم يتم تحويل إشارة الاستجابة الكهربائية إلى عرض بصري على هيئة صورة رقمية بدرجات لونية مختلفة (أو بظلال رمادية أو خضراء) تتوافق مع مختلف مستويات درجة حرارة السطح الهدف، وبذلك نحصل على تقييم سريع للمناطق ذات الحرارة المرتفعة وبعد ذلك وبالإستفادة من برمجيات خاصة يمكن تحليل الصور الحرارية لتقييم حالة السطح بحسب شروط الاستئثار الموضوعه له [1]، [2] و[3].

الأمر الذي دفع لاحقا إلى الاعتماد على هذا المبدأ لتقييم الحالة الحرارية للأجسام عبر قياس طاقة الأشعة تحت الحمراء المنبعثة منها. يمكن إجراء قياسات لبقعة مركزة من الأشعة تحت الحمراء باستخدام حساس اشعاع بسيط، حيث يقيس طاقة الأشعة تحت الحمراء المنبعثة في نقطة محددة من السطح ويحولها إلى قراءات لدرجة حرارة هذه النقطة. وبالتالي فإن هذا النوع من الحساسات أو المقاييس غير قادر على إعطاء توزع متكامل لدرجات حرارة سطح ما بشكل متزامن، وعليه فهو مناسب فقط لدى الحاجة لمعرفة درجة الحرارة في نقطة محددة فقط، وليس لدى الرغبة في تحري وجود مناطق تكون فيها درجات الحرارة تفوق شروط الاستئثار الموضوعه لها، مما دفع لتطوير أنماطاً أخرى من التجهيزات تسمح بإجراء مسح كامل للسطح أو الجسم



الشكل (2) مقاييس الحرارة بالأشعة تحت الحمراء مقابل الكاميرات الحرارية (مشتقة عن [17])

1. الانبعاث الحراري.
 2. طبيعة الغلاف الجوي في بيئة الاختبار (غاز أو بخار أو وجود جسيمات صلبة).
 3. درجة الحرارة المحيطة.
 4. سرعة الرياح.
 5. البعد عن الجسم المختبر.
- فالتصوير الحراري يتم باستخدام جهاز اشبه بأدوات التصوير التقليدية وهو يحدد النموذج الحراري في طيف طول الموجة تحت الحمراء دون اتصال مباشر مع الجسم المختبر كما هو موضح بالشكل (2). تعتمد دقة القياس في التصوير الحراري على معايير مختلفة مثل:

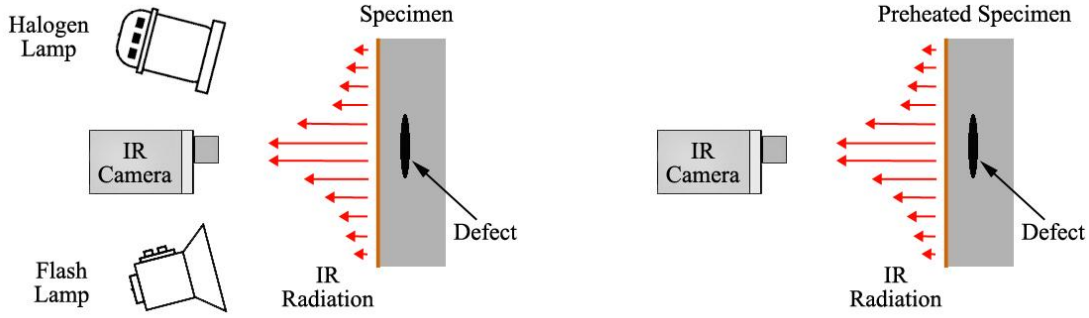
الحراري وبوسيلة قياس الحرارة الأخرى المستقلة المستخدمة.

يمتاز التصوير الحراري بقدرته على إعطاء نموذج حراري آني وإجمالي للجسم وبدقة وسرعة عاليتين وبكفاءة منخفضة نسبياً، دون الحاجة لاتصال بالأجسام المختبرة أو إيقافها عن العمل، كما أن الصورة الحرارية الناتجة عن الاختبار تشكل مستنداً مرجعياً للاختبار يمكن العودة إليه في أي وقت لاحق، إلا أن استخدام طريقة التصوير الحراري للسطوح اللامعة يتطلب ترتيبات خاصة، إضافة لانخفاض كفاءتها لدى اختبار الأجسام ذات السماكات المرتفعة، لضعف حساسية هذه السطوح للتغيرات الخواص الحرارية.

2- تقنيات التصوير الحراري بالأشعة تحت الحمراء:

تتفرع تقنيات التصوير الحراري بالأشعة تحت الحمراء استناداً إلى أسلوبين أساسيين كما هو مبين بالشكل (3)، التصوير الحراري الفاعل و التصوير الحراري المنفعل، حيث تقوم تقنية التصوير الحراري المنفعل على أساس أن للجسم المختبر درجة حرارة أعلى نسبياً من الوسط المحيط، مما يسمح للمختبر القيام بأعمال المسح الحراري دون الحاجة لمصدر طاقة لرفع درجة حرارة الجسم المختبر، في حين تكون درجة حرارة الجسم المختبر في تقنية التصوير الحراري الفاعل مقارنة لدرجة حرارة الوسط المحيط مما يتطلب وجود مصدر طاقة لإحداث تغير حراري على الجسم المختبر يمكن تمييزه باستخدام كاميرات التصوير الحراري [6,5].

لا تعتمد الانبعاثية النصف كروية لسطح ما على درجة حرارته فقط، فهي تعبر عن كفاءة هذا السطح لانبعاث الطاقة مقارنة مع سطح باعث مثالي (جسم أسود -black body، ذو معامل انبعاث يساوي الواحد) يحمل درجة الحرارة نفسها، إن معظم الأسطح غير المعدنية مثل الطلاء والخشب والبلاستيك تكون قيمة الانبعاثية لها عالية، بالمقابل تكون السطوح المصقولة أو سطوح المواد المعدنية ذات كفاءة أقل في انبعاث الطاقة بفضل إلكتروناتها السطحية مما يزيد من صعوبة قياس درجة حرارتها أو اقتفاء التوزيع الحراري لها، ويمكن أن تمنحها غلفتها بطبقات أوكسيدية أو بأي مواد أخرى، قيم انبعاثية أعلى بكثير، إلا أن ذلك غير ممكن في الكثير من الحالات، وعليه فإن عملية اختبارها تكون غير ممكنة، لذا فإن معظم التجهيزات المتاحة تسمح بإدخال معاملات تصحيح للانبعاثية في الحالات التي تكون قيمتها صغيرة نسبياً (أقل من 0.5)، ويكون من المفيد حيث يمكن ذلك عند اختبار الأسطح المعدنية اللامعة أن يتم تغطيتها بمواد ذات انبعاثية عالية نسبياً، مثل المصصقات الورقية، أو الطلاء أو أشربة كهربائية، كما يمكن استخدام الطلاء الأسود القابل للذوبان في الماء، مما يسمح بإزالته بعد إجراء الاختبار، وفي كل الأحوال فإن الأسلوب الأكثر وثوقية لتحديد الانبعاثية يقتضي تنفيذ قياس ولو لنقطة أو لعينة واحدة على الأقل باستخدام وسيلة أخرى مستقلة لقياس الحرارة مثل المزدوجة الحرارية وفي الوقت نفسه الذي يتم فيه قياس الانبعاث الحراري بالأشعة تحت الحمراء (التصوير الحراري)، بحيث يتم ضبط الانبعاثية بما يضمن تطابق درجتَي الحرارة المقاستين بالتصوير



Active Thermography Technique

تقنية التصوير الحراري الفاعل

Passive Thermography Technique

تقنية التصوير الحراري المنفعل

الشكل (3) تقنيات التصوير الحراري.

تجفيف عجينة الورق للحصول على الشكل النهائي المطلوب.

إن نجاح عملية التجفيف يتوقف على تعريض القطع المشكلة من عجينة الورق المقوى لتيارات من الهواء الساخن بدرجة محددة وزمن محدد، وهو ما يتم ضبطه عن طريق سرعة السير المتحرك وكذلك التحكم بعملية الاحتراق والتي تزود الحجر الداخلية لفرن التجفيف بالهواء الساخن عبر ثلاث توربينات موزعة على امتداد الفرن لتحقيق التجانس في درجة حرارة هذا الهواء.

3- أفران التجفيف

يبين الشكل (4) فرن التجفيف موضوع الدراسة والمستخدم في إحدى المنشآت الصناعية في ريف دمشق، بهدف تجفيف الورق المقوى المصنع من إعادة تدوير المخلفات الورقية، وهو عبارة عن حجرة كبيرة تحتوي على سيور ناقلة تحمل قطع الورق المقوى المصنعة من عجينة الورق، والتي يتم تشكيلها بأشكال وأحجام مختلفة، حيث تسمح حركة تلك السيور الناقلة بتعرض قطع الورق المقوى المحملة عليها لتيارات من الهواء الساخن مما يساعد على



الشكل (4) الشكل العام لفرن التجفيف.

وبالتالي تحقيق الإنتاجية المخططة لهذا الفرن، وضمن المستوى الإسمي لاستهلاك الوقود.

4- الاختبارات المنفذة:

بما أن الأفران تمتلك جدراناً ذات درجات حرارة مرتفعة نسبياً عن الوسط المحيط لذا يسهل استخدام طريقة التصوير الحراري المنفعل (Passive Infrared Thermography)، والتي تسمح بإجراء المسح للجسم المختبر بشكل مباشر دون الحاجة لمصدر تحريض خارجي لرفع درجة حرارة الجسم المختبر بالمقارنة مع الوسط المحيط (شكل 4).

ونظراً لاتساع مساحة جدران الفرن ولضمان تحري مختلف العيوب التي قد تتضمنها تلك الجدران، فقد تم تقسيم كل من جداري الفرن الجانبيين إلى عدد من القطاعات الشبه مربعة بلغ 274 (أربعة أقسام على الارتفاع × ثلاثة وأربعون قسماً على الامتداد)، كما تم تثبيت قطع صغيرة من "الاميانت" العازل عند زوايا هذه القطاعات مما سيجعل درجة حرارة هذه النقاط أقل من مجاورتها الأمر الذي سيسمح بتعقبها على الصور الحرارية لتلك القطاعات كما هو موضح بالشكل (5).

يصنع جدار الفرن من طبقتين من الفولاذ المقاوم للصدأ Stainless Steel 304 تحتجزان فيما بينهما طبقة من الصوف الزجاجي، وذلك كي يضمن هذا الجدار العزل الكافي، مما يخفض إلى الحد الأدنى التبادل الحراري بين داخل الفرن والوسط المحيط، من أجل تخفيض كمية الحرارة المتسربة عبر هذا الجدار، الأمر الذي سينعكس على زيادة مردود عملية الاحتراق اللازمة لرفع درجة الهواء داخل الفرن للدرجة المطلوبة.

إن تشكل أية عيوب ضمن جدار الفرن (تآكل في طبقات الفولاذ المقاوم للصدأ أو عدم إحكام أبواب تنظيف وصيانة الفرن أو ترقق بطانة الصوف الزجاجي العازلة أو انخفاض كفاءة العزل لها) سيؤدي إلى زيادة حجم التبادل الحراري بين داخل الفرن والوسط المحيط، مما سيؤدي إلى ضياعات حرارية كبيرة ستعكس على زيادة استهلاك الوقود اللازم لرفع درجة حرارة الفرن الداخلية إلى الدرجة المطلوبة من جهة، وعدم استقرار هذه الدرجة مما سيتطلب زمن تجفيف أعلى للقطع المشكلة من عجينة الورق المقوى وبالتالي انخفاض إنتاجية فرن التجفيف من جهة أخرى، وعليه يشكل تقييم حالة جدران الفرن أهمية كبيرة، بهدف ضمان قدرة هذه الجدران على تحقيق العزل المطلوب،

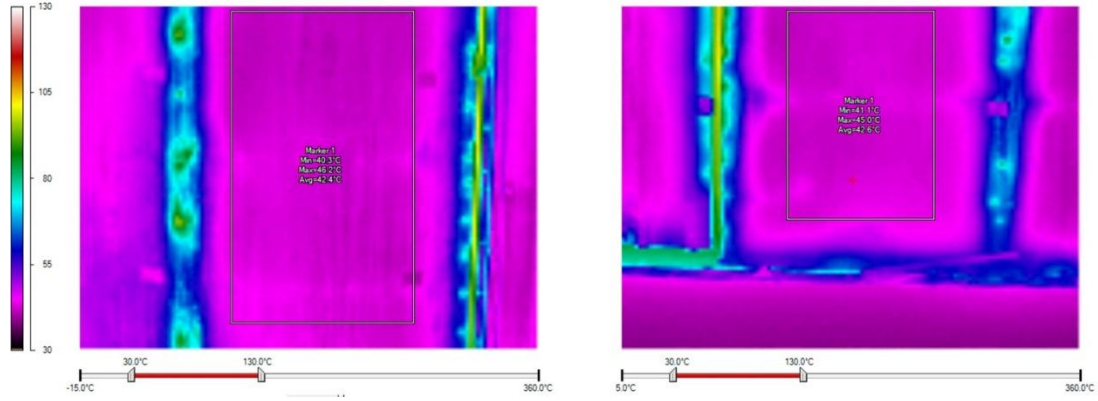


الشكل (5) جزء من جدار الفرن يبين نقاط شبكة تقسيم جدار الفرن

7- النتائج:

عند عدم وجود تسريب حراري تعادل تقريباً $T_i \approx 42^\circ\text{C} \div 46^\circ\text{C}$ وهو ما تم قراءته على مساحات كبيرة من الصور الحرارية كما هو مبين بالشكل (6)، كما تظهر الصور الحرارية، من جهة أخرى، حالات مختلفة من العيوب التي تتضمنها جدران الفرن كان أهمها التآكل في طبقة الفولاذ المقاوم للصدأ الخارجية، وتشوه طبقة العزل الحراري وبالتالي انخفاض كفاءتها على العزل.

بهدف إعطاء توزيع متجانس على مختلف الصور الحرارية، تم ضبط مجال التدرج اللوني لمختلف الصور على 100°C وذلك بما يوافق المجال $[30^\circ\text{C}, 130^\circ\text{C}]$ مما يعطي تجانس في المكافئ اللوني لجميع درجات الحرارة في مختلف الصور الحرارية لجسم الفرن، وبذلك أظهرت الصور الحرارية المختلفة أن درجة الحرارة التي يتوجب أن يكون عليها جسم الفرن في الحالة الافتراضية



الشكل (6) درجة حرارة جدران الفرن في المناطق غير الحاوية على عيوب

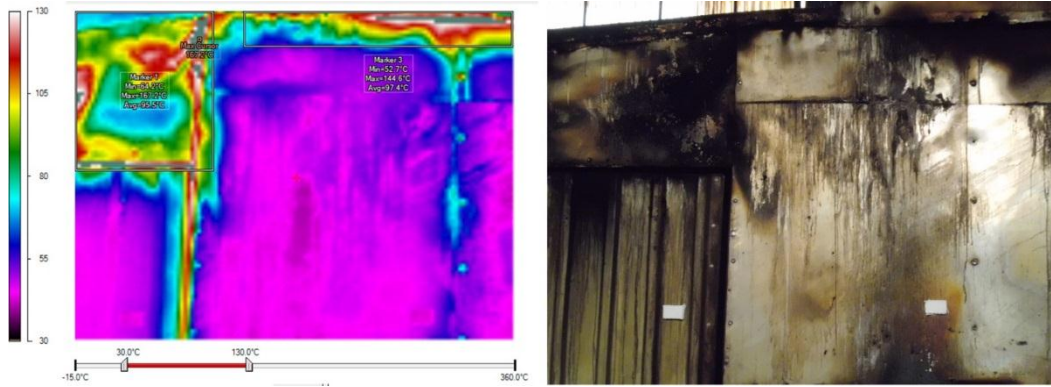
وجود منطقة أخرى *Marker 3* ذات مساحة أقل نسبياً من المنطقة *Marker 1* إلا أنها لا تقل أهميتها حيث تحتوي على مناطق تصل درجة الحرارة فيها إلى 144.6°C ، كما ويتجاوز وسطي درجة الحرارة فيها عتبة 97.4°C ، وإذا نظرنا إلى القطاع *Location 25* بشكل متكامل فإننا نلاحظ -وفقاً للشكل (8) الذي يبين النسب المئوية لدرجات حرارة النقاط المختلفة من هذا القطاع- أن ما يزيد عن 47% من مساحة هذا القطاع درجة حرارتها تفوق القيمة الوسطية T_i وتكاد تصل درجة الحرارة الوسطية لهذا الجزء إلى 110°C .

لا يختلف الوضع كثيراً عند النظر إلى القطاع *Location 65* من الجدار الأمامي والموضح بالشكل (9)، حيث يظهر فيه أن درجة الحرارة تصل إلى

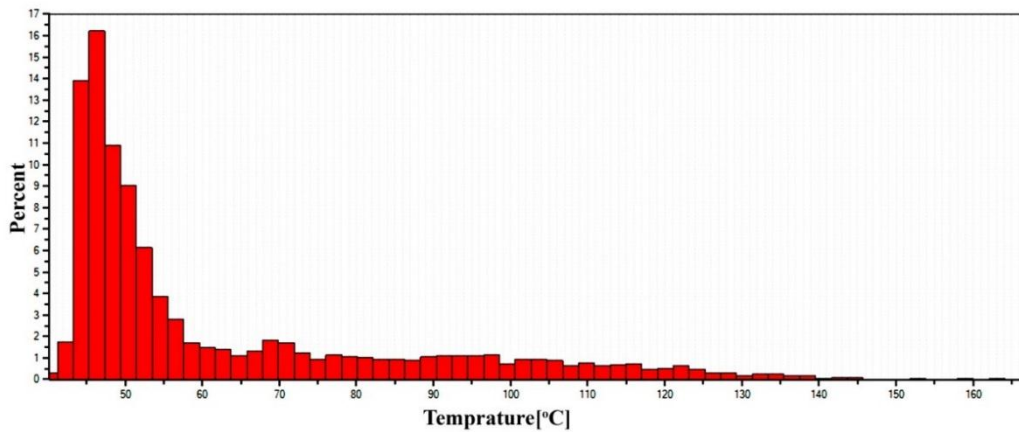
تبين العديد من المناطق وجود تآكل محدود في بعض النقاط، إلا أن هذا التآكل يمتد على مساحات كبيرة نسبياً في بعض المواضع، فعلى سبيل المثال يبين الشكل (7) الصور الحرارية والضوئية للقطاع *Location 25* من الجدار الأمامي وفيه يظهر أن درجة الحرارة تصل في بعض النقاط إلى 167.2°C ويحتوي هذا القطاع على المنطقة *Marker 1* والتي يتجاوز وسطي درجة الحرارة فيها 95.5°C أي ما يزيد عن ضعف القيمة الوسطية $T_i \approx 42^\circ\text{C} \div 46^\circ\text{C}$ ويمكن أن يفسر ذلك بوجود تآكل في الطبقة الخارجية من الفولاذ المقاوم للصدأ إضافة إلى تسرب كميات كبيرة من بخار الماء الناتج عن التجفيف إلى بطانة الصوف الزجاجي الداخلية، الأمر الذي أدى خفض كفاءة عزل هذه البطانة في تلك المنطقة، ويلاحظ

حيث يبين الشكل 11 بعض المواقع والذي تظهر انحرافاً كبيراً لدرجة الحرارة عن القيمة الوسطية الاسمية، كما يظهر الجدول (1) قيم درجات الحرارة العظمى في كل من هذه المواقع وكذلك وسطي درجة الحرارة فيها ونسبة المساحة التي تتجاوز فيها درجة الحرارة القيمة الوسطية الاسمية T_i حيث يلاحظ في تلك المواقع وجود تشوهات كبيرة في جدران الفرن مما أدى إلى انخفاض كفاءة العزل بشكل أدى إلى رفع درجة الحرارة إلى قيم تخطت عتبة $225\text{ }^{\circ}\text{C}$

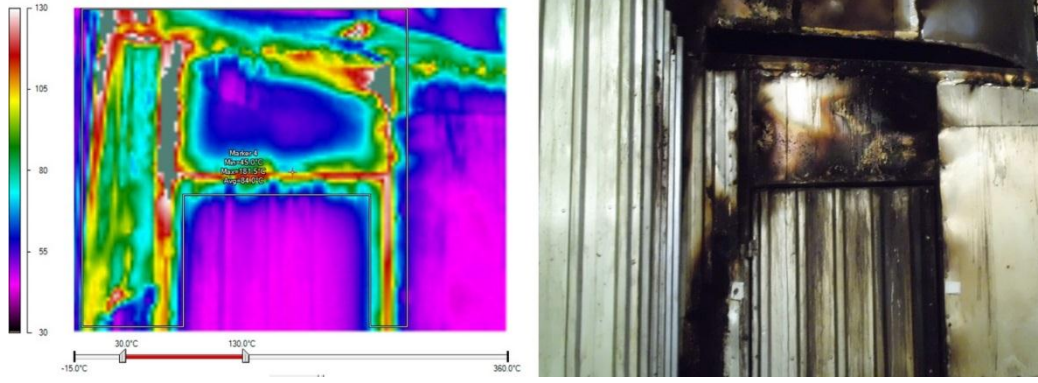
$181.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ويحتوي هذا القطاع على منطقة واسعة $Marker\ 4$ يتجاوز وسطي درجة الحرارة فيها $84.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ أي ما يقارب ضعف درجة الحرارة الوسطية T_i ، ونلاحظ في هذا القطاع وفقاً للشكل (10) أن ما يقارب الـ 70% من مساحة هذا القطاع درجة حرارتها تفوق القيمة الوسطية T_i وتكاد تصل درجة الحرارة الوسطية لهذا الجزء إلى $118\text{ }^{\circ}\text{C}$. كما يلاحظ مواقع أخرى لا تختلف فيها الحالة كثيراً عن كلا القطاعين $Location\ 25$ و $Location\ 65$ ،



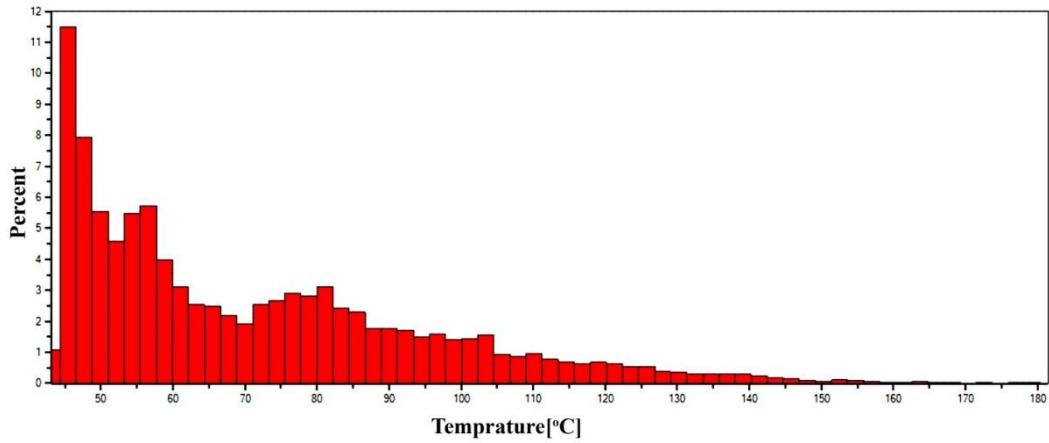
الشكل (7) الصورة الحرارية والضوئية للقطاع $Location\ 25$.



الشكل (8) النسب المئوية لدرجات حرارة النقاط المختلفة للقطاع $Location\ 25$.



الشكل (9) الصورة الحرارية والضوئية للقطاع Location 65 .

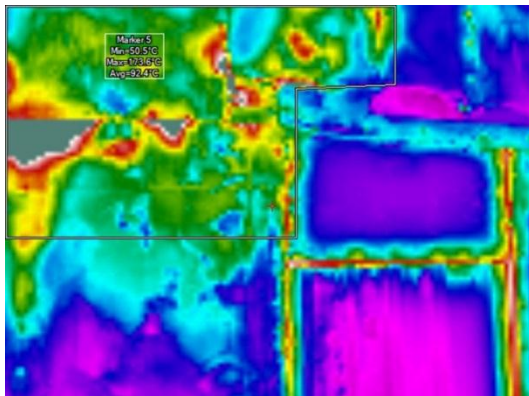


الشكل (10) النسب المئوية لدرجات حرارة النقاط المختلفة للقطاع Location 65 .

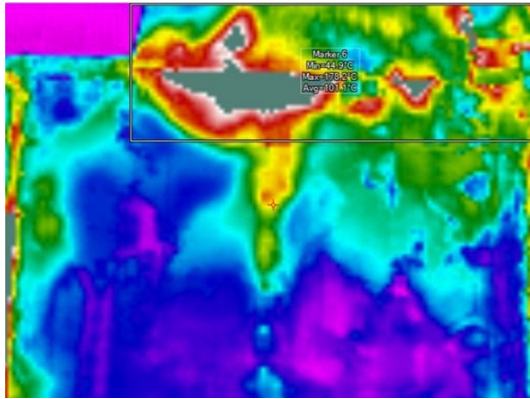
الجدول (1) القيم المميزة لبعض القطاعات التي ذات العيوب.

$T_i < [\%]$	Critical Zone		$T_{Max} [^{\circ}C]$	Face	Location
	$T_{av} [^{\circ}C]$	ID			
47%	95.5	Marker 1	167.2	A	Location 025
	144.6	Marker 3			
70%	84.0	Marker 4	181.5	A	Location 065
70%	93.3	Marker 5	173.6	A	Location 108
82%	101.1	Marker 6	178.2	A	Location 112
100%	108.8	Marker 7	199.9	B	Location 017
100%	121.5	Marker 8	225.4	B	Location 057
100%	102.1	Marker 9	176.1	B	Location 093

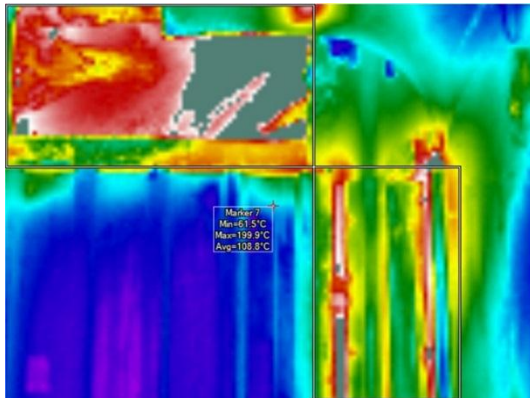
Location 108 Face A



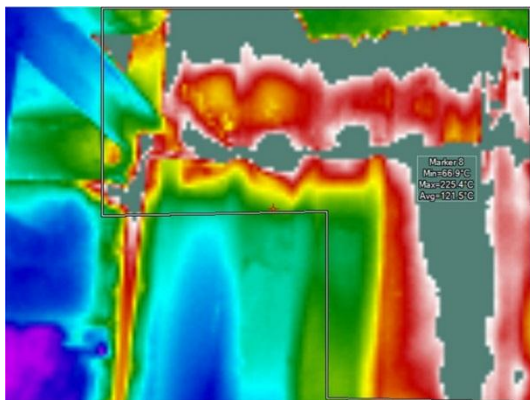
Location 112



Location 017 Face B

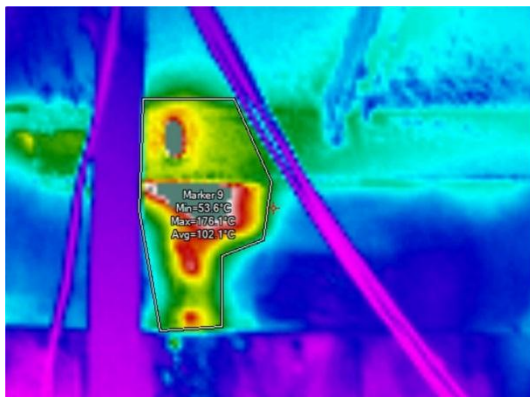


Location 057 Face B



الشكل (11) الصور الحرارية والضوئية لبعض القطاعات التي ذات العيوب.

Location 093 Face B



تابع الشكل (11) الصور الحرارية والضوئية لبعض القطاعات التي ذات العيوب.

8- المناقشة والتوصيات

لذا ينصح أثناء تصنيع هذه الأفران أو أثناء عمليات الصيانة لها بالالتزام بمجموعة من التدابير أهمها:

1. ضرورة التركيز على تجنب استخدام الربط بالبراغي كون البراغي تسمح بوجود فراغات صغيرة تسمح بنفاذ الرطوبة والتركيز على استخدام البراشيم والتي تحكم الإغلاق بشكل كامل عند ثقب الربط.
2. استخدام الربط التراكبي بدلا من الربط التناكبي لتجنب الفراغات بين نهايات الألواح المشكلة لجدران الفرن.
3. المحافظة على نظافة الأسطح الخارجية لجدران الفرن لتلافي ترسب الأكاسيد التي يمكن أن تزيد في التأثير الأكال لهذه الأسطح.

مكنت طريقة التصوير الحراري من مسح فرن التجفيف من تحقيق مجموعة من الفوائد التي يتعذر تحقيقها باستخدام طرائق الاختبار اللاإتلافية الأخرى أهمها:

1. مسح فرن التجفيف بشكل كامل وبالتالي تقدير الحالة الفنية لجميع جدرانه على امتداد مساحتها.
 2. إنجاز عملية المسح دون إيقاف الفرن عن العمل وبالتالي دون حدوث انقطاعات في عملية الإنتاج.
 3. تقييم حالة الفرن دون الحاجة لأخذ عينات أو لاستخدام مواد إضافية يمكن أن تؤثر سلباً على جدران الفرن.
- وبنتيجة ذلك تم تحديد مواضع التسريب الحراري والتي شملت على:

1. تآكل في مناطق مختلفة من جدران الفرن، كانت بمعظمها بالقرب من أطراف الألواح التي تم تصنيع الجدران منها أو الحدود الهندسية المختلفة لهذه الجدران الأمر الذي يعكس أخطاء في عمليات الربط المستخدمة أثناء تجميع أجزاء الفرن.
2. تم استخدام براغي في بعض المواضع لتثبيت الجدران الخارجية كانت بمعظمها نقاط ضعف أدت لإضعاف تلك الجدران الحاوية عليها حيث سمحت بتسريب الرطوبة عبرها مما سهل عملية التآكل بالقرب منها، إضافة لضعف الإحكام حولها لجهة العزل الحراري مما جعلها أيضا نقاط تسريب حراري.
3. وجود مواضع تآكل على جدران الفرن أدى إلى تسريب نسب كبيرة من الرطوبة إلى البطانة العازلة مما خفض من كفاءتها الأمر الذي أدى بالنهاية إلى تسريب كميات كبيرة من الحرارة في تلك المواضع.

REFERENCES المراجع

- [1] C.A. Balaras, A.A. Argiriou, “Infrared thermography for building diagnostics”, *Energy and Buildings*, 2002, volume 34, pp. 171-183.
- [2] [http://www.ndt-ed.org/ Education Resources/CommunityCollege/Radiography/Physics/nature.htm](http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Radiography/Physics/nature.htm)
- [3] “Compact thermal imaging cameras for Research & Development and Science”, FLIR.
- [4] W. Hararah , “Infrared Rayon”, *Arabic encyclopedia*, 2012, volume 2, pp. 571
- [5] S. A. Grammatikos, E. Z. Kordatos, N.-M. Barkoula, T. E. Matikas and A. S. Paipetis, “Innovative non-destructive evaluation and damage characterisation of composite aerostructures using thermography”, *Plastics, Rubber and Composites*, 2011, Volume 40, Issue 6/7
- [6] X. Maldague: ‘Applications of infrared thermography in non-destructive evaluation’, in ‘Trends in optical nondestructive testing’, (ed. P. K. Rastogi and D. Inaudi); 2000, pp. 591–609. Amsterdam, Elsevier Science.
- [7] “Introduction to thermography principle”, 2009, American Technical Publishers, Inc., Fluke Corporation, and the Snell Group

Received	2016/07/11	إيداع البحث
Accepted for Publ.	2016/12/01	قبول البحث للنشر