

الفصل الرابع

قياس درجة الحرارة

- ٤,١ مقدمة و تعريفات
- ٤,٢ طرق قياس درجة الحرارة
- ٤,٣ قياس درجة الحرارة عن طريق تمدد سائل في انبوب
- ٤,٤ قياس درجة الحرارة عن طريق تمدد ثنائي المعدن
- ٤,٥ قياس درجة الحرارة عن طريق قياس المقاومة الكهربائية
- ٤,٦ قياس درجة الحرارة باستخدام الازدواج الكهروحراري
- ٤,٧ توصيلات الازدواج الحراري على التسلسل و على التوازي
- ٤,٨ قياس درجة الحرارة عن طريق الاشعاع
- ٤,٩ قياس درجة الحرارة باستخدام الدوائر المتكاملة
- ٤,١٠ الاخطاء الشائعة عند قياس درجة الحرارة
- ٤,١٠,١ الخطأ في قياس درجة حرارة سطح لازدواج حراري نتيجة انتقال الحرارة بالتوصيل
- ٤,١٠,٢ خطأ قياس درجة الحرارة لمائع نتيجة انتقال الحرارة بالتوصيل و الحمل
- ٤,١٠,٣ الخطأ في قياس درجة الحرارة نتيجة انتقال الحرارة بالاشعاع
- ٤,١٠,٤ الخطأ في قياس درجة الحرارة نتيجة سرعة المائع العالية
- ٤,١١ السلوك الانتقالي العابر لدرجة حرارة المجس

قائمة الاشكال

- شكل ٤,١ طرق غمر الثيرمو متر لقياس درجة الحرارة [٢]
- شكل ٤,٢ فكرة عمل ثيرمو متر ثنائي المعدن لقياس درجة الحرارة
- شكل ٤,٣ بعضا من أشكال ثنائي المعدن المستخدمة في بعض تطبيقات قياس درجة الحرارة و التحكم فيها [٦-٧]
- شكل ٤,٤ تغيير نسبة المقاومة مع درجة الحرارة لمجس مقاومة حراري (RTD) [٢]
- شكل ٤,٥ قنطرة و يتستون و تحليلها
- شكل ٤,٦ توصيل مجس المقاومة الحراري ذي الفتلتين
- شكل ٤,٧ توصيل مجس المقاومة الحراري ذي الثلاث فتلات
- شكل ٤,٨ توصيل مجس المقاومة الحراري ذي الاربع فتلات
- شكل ٤,٩ تغيير المقاومة النسبية مع درجة الحرارة لانواع مختلفة من الثيرمستر [١٢]
- شكل ٤,١٠ دائرة كهربائية لقياس مقاومة الثيرمستر
- شكل ٤,١١ شكل مبسط لفكرة عمل الازدواج الكهروحراري (تأثير سيبك)
- شكل ٤,١٢ تأثير بلتير و تأثير تسمون
- شكل ٤,١٣ توضيح لقانون تداخل المواد للازدواجات الحرارية
- شكل ٤,١٤ توضيح لقانون درجة الحرارة البيئية للازدواجات الحرارية

شكل ٤,١٥ توصيل الازدواج الحراري بدرجة حرارة مرجعية (ماء و ثلج) الحالة أ- بدون استخدام اسلاك توصيل اضافية، الحالة ب- مع استخدام اسلاك توصيل اضافية

شكل (٤,١٦) توصيل الازدواج الحرارية على التوالي (التسلسل) لزيادة حساسية قراءة الفولت المتولد [١٢]

شكل (٤,١٧) توصيل الازدواج الحراري على التوازي لقياس متوسط درجة الحرارة لسطح أو اكثر [٢]

شكل (٤,١٨) تغير كمية الاشعاع الطيفي الصادر من جسم معتم عند كل طول موجة لدرجات حرارة مختلفة [٢]

شكل (٤,١٩) الطيف الضوئي [٢]

شكل ٤,٢٠ مقارنة الطاقة الاشعاعية الطيفية من جسم معتم و جسم رمادي و حقيقي [١٢]

شكل (٤,٢١) البايرومتر البصري [٢]

شكل (٤,٢٢) صورة لجهاز البايرومتر البصري [١٧]

شكل (٤,٢٣) البايرومتر الحراري [١٦]

شكل ٤,٢٤ الخطأ في قياس درجة الحرارة نتيجة فرض ان الجسم معتم و هو غير كذلك [١٢]

شكل (٤,٢٥أ) أحد انواع المجس الحراري باستخدام الاشعة تحت الحمراء [١٨]

شكل (٤,٢٥ب) العلاقة بين المسافة و قطر مساحة القياس لمجس قياس درجة الحرارة بالاشعاع [١٨]

شكل (٤,٢٦) بعضا من اشكال مجسات درجة الحرارة ذات الدوائر المتكاملة [١٩-٢١]

شكل (٤,٢٧) قياس درجة الحرارة لسطح بواسطة ازدواج حراري و الخطأ نتيجة التوصيل الحراري [١٢]

شكل (٤,٢٨) تقدير الخطأ نتيجة التوصيل الحراري لازدواج حراري عند قياس درجة حرارة السطح [١٢]

شكل (٤,٢٩) تقدير الخطأ في حالة استخدام الازدواج الحراري لقياس درجة حرارة سطح ذو حجم كبير [١٢]

شكل (٤,٣٠) قياس درجة حرارة مائع يجري داخل انبوب و الخطأ نتيجة انتقال الحرارة بالتوصيل في الازدواج الحراري ثم

بالحمل [٢]

شكل (٤,٣١) تحليل انتقال الحرارة خلال مجس حرارة بالتوصيل و الحمل كز عنة

شكل (٤,٣٢) قياس درجة حرارة مائع و سط حيز و تأثير انتقال الحرارة بالاشعاع

شكل (٤,٣٣) استخدام درع واقى للتقليل من تأثير الاشعاع على قياس درجة الحرارة

شكل ٤,٣٤ قياس درجة الحرارة لمائع ذو سرعة عالية

شكل ٤,٣٥ خطأ الاسترجاع كدالة في رقم ماخ [٢]

شكل ٤,٣٦ تعرض مجس حرارة عند درجة حرارة ابتدائية T_i الى بيئة عند درجة حرارة T_∞

شكل (٤,٣٧) تغير درجة الحرارة للمجس مع الزمن

قائمة الجداول

جدول ٤,١ بعضا من النقاط المرجعية في قياس درجة الحرارة [٢]

جدول ٤,٢ معامل التمدد و معامل المرونة لبعض المواد المستخدمة في صناعة ثنائي المعدن [١٢]

جدول ٤,٣ معامل المقاومة الحراري α لبعض المواد [٢]

جدول (٤,٤) خواص بعض المواد المستخدمة في الازدواج الحرارية [١٢]

جدول (٤,٥) الجهد الكهربائي المتولد من انواع مختلفة من الازدواج الحرارية (المرجعية: صفر عند درجة حرارة صفر

منوي) [١٢]

جدول (٤,٦) حدود الخطأ للزدواج الحرارية التجارية [١٢]

جدول (٤,٧) الثوابت في معادلة ايجاد الفولتية للزدواج الحرارية [١٢]

جدول (٤,٨) معامل الانبعاثية الإشعاعية ϵ لبعض المواد [١٦]

جدول ٤,٥ جدول تغير الجهد مع درجة الحرارة لازدواج حراري من نوع T

جدول ٤,٦ جدول تغير الجهد مع درجة الحرارة لازدواج حراري من نوع J

جدول ٤,٧ جدول تغير الجهد مع درجة الحرارة لازدواج حراري من نوع K

٤, ١ مقدمة و تعريفات

من أهم المتغيرات التي يُطلب قياسها و التحكم فيها هي درجة الحرارة، و يكاد لا يخلو تطبيق هندسي أو صناعي من قياس درجة الحرارة و التحكم فيها. كما أن درجة حرارة جسم الانسان مهمة جداً في تحديد الحالة الصحية للشخص. و يهتم الناس بدرجة حرارة الجو و يتم تسجيلها في محطات رصد الاحوال الجوية مع متغيرات أخرى لمعرفة حالة الطقس و تقلباته. كما أنه على وجه الخصوص فان المهندس الميكانيكي يهتم بمعرفة طرق قياس درجة الحرارة المختلفة و التحكم فيها سواء في العمليات الحرارية الميكانيكية مثل محطات إنتاج الطاقة الكهربائية أو محطات تحلية المياه أو في مصافي النفط و المصانع، و في تطبيقات إنتقال الحرارة و التبريد و التكيف و الطاقة التقليدية و البديلة و ترشيد استهلاك الطاقة.

يتناول هذا الفصل طرق قياس درجة الحرارة المختلفة بناء على التأثيرات التي تحدثها درجة الحرارة. فنتيجة تمدد المواد بالحرارة و انكماشها بالبرودة يتم استخدام ذلك في التيرموترات الزئبقية او غيرها. كما أن تمدد المعدن المختلف حسب نوع المعدن يمكن استخدامه في قياس و التحكم في درجة الحرارة بما يسمى ثنائي المعدن. و من المعروف ان المقاومة الكهربائية تتغير مع درجة الحرارة لذلك يمكن عن طريق قياس المقاومة الكهربائية لسلك معين معرفة درجة الحرارة. يمكن ايضا استخدام الظاهرة الكهروحرارية في قياس درجة الحرارة و تحدث هذه الظاهرة عند توصيل سلكين من معدنين مختلفين في وصلتين عند درجتى حرارة مختلفة فانه يتولد فولتية في الطرفين الحرين للسلكين تتناسب مع الفرق في درجتى الحرارة عند الوصلتين الاولى و الثانية. و من المعروف أيضا أن الاجسام تصدر إشعاع حراري يختلف حسب درجة حرارة الجسم و من قياس الاشعاع المنبعث من الجسم يمكن معرفة درجة حرارته دون أن يتم ملامسة الجسم المراد قياس درجة حرارته مع المجس. هذه و غيرها من الطرق التي سيتم تناولها في هذا الفصل لقياس درجة الحرارة، إضافة لمعرفة أهم الاخطاء الشائعة في قياس درجة الحرارة و محاولة تفاديها، و نختم بمعرفة السلوك الزمني العابر لمجس حراري عند و ضعه في بيئة لها درجة حرارة مختلفة عن القيمة الابتدائية لدرجة حرارة المجس.

تعريف درجة الحرارة

من مبادئ الديناميكا الحرارية يتم انتقال الحرارة من الجسم الأكثر سخونة إلى الجسم الأقل سخونة. عندما يكونان الجسمين عند نفس درجة الحرارة (الاتزان الحراري) فلن يكون هناك انتقال حرارة. إن درجة الحرارة هي خاصية تعطي انطباع عن مدى سخونة الجسم.

القانون الصفري للديناميكا الحرارية

هذا القانون هو تطبيق لما يعرف بالاتزان الحراري. يقول القانون انه إذا كان هناك اتزان حراري بين جسم أول و جسم ثاني، و كان هناك اتزان حراري بين الجسم الثاني و جسم ثالث فان الجسم الأول و الجسم الثالث في حالة اتزان حراري. أي بمعنى أن الجسمين الأول و الثالث لهما نفس درجة الحرارة.

في حياتنا العامة نعرف التدرج المئوي و التدرج الفهرنهايتي لدرجات الحرارة. ففي التدرج المئوي تم أخذ قيمة الصفر كقيمة لدرجة الحرارة عند تجمد الماء، و ١٠٠°م كدرجة حرارة غليان الماء عند الضغط الجوي عند مستوى سطح البحر. و بالمقابل فان تدرج الفهرنهايتي جعل ٣٢ كدرجة تجمد الماء و ٢١٢ درجة كدرجة غليان الماء.

و كذلك من المعروف أن درجة الحرارة المطلقة المئوية بالكلفن (Kelvin) هي درجة حرارة المئوية مضافا لها ٢٧٣,١٥ و الدرجة الحرارة المطلقة للتدرج الفهرنهايتي هي الرانكن (Rankine) و تساوي درجة الحرارة بالفهرنهايت مضافا إليها ٤٦٠ درجة.

أيضا من قوانين الديناميكا الحرارية و الدوائر المثالية هي دورة مكينة كارنوت (Carnot) [١] المثالية حيث إذا كان المحرك الحراري يعمل بين درجة حرارة عظمى T_H و درجة حرارة دنيا T_L فان الكفاءة المثالية هي:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (4.1)$$

حيث درجات الحرارة يجب ان تكون مطلقة. من المعروف ان الخواص الثيرموديناميكية مثل الانثالي و الحجم النوعي و الانتروبي يتم ايجاد قيمها بمعرفة خاصيتين و في الغالب تكون درجة الحرارة احداها [١].
تم الاتفاق عالميا على معايير قياسات الحرارة، و تم اعتماد نقاط قياسية معينة لدرجات الحرارة بالدرجات المئوية. هذا النقاط هي نقاط يمكن اعادتها مثل نقاط التجمد او الغليان او النقطة الثلاثية (هي النقطة التي تكون الاطوار الثلاثة صلب و سائل و غاز فيها موجودة و متزنة)
يوضح الجدول ٤,١ بعضاً من النقاط المرجعية و المتفق عليه عالميا لدرجات الحرارة [٢].

جدول ٤,١ بعضاً من النقاط المرجعية في قياس درجة الحرارة [٢]

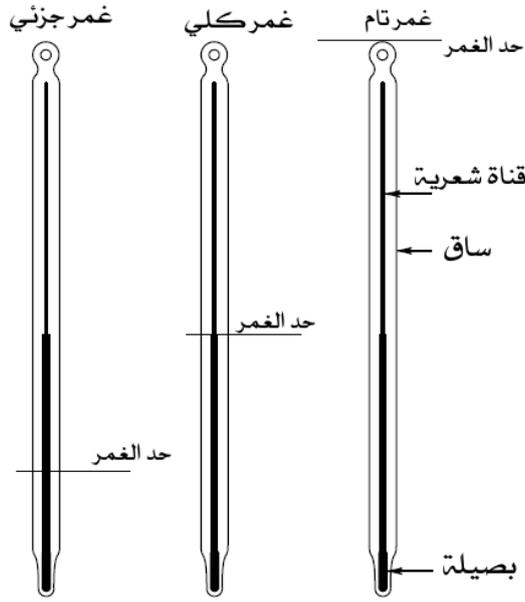
الحالة	درجة الحرارة (درجة كلفن)	درجة الحرارة (درجة مئوية)
النقطة الثلاثية للهيدروجين	١٣,٨٠٣٣	٢٥٩,٣٤٦٧-
ضغط بخار الهيدروجين	١٧	٢٥٩,١٥-
النقطة الثلاثية للاوكسجين	٥٤,٦٥٨٤	٢١٨,٧٩١٦-
النقطة الثلاثية لعنصر الارجون	٨٣,٨٠٥٨	١٨٩,٣٤٤٢-
النقطة الثلاثية للماء	٢٧٣,١٦	٠,٠١
اتزان سائل و صلب لمادة الغاليوم (Gallium)	٣٠٢,٩١٤٦	٢٩,٧٦٤٦
اتزان سائل و صلب لمادة القصدير	٥٠٥,٠٧٨	٢٣١,٩٢٨
اتزان سائل و صلب لمادة للزنك	٦٩٢,٦٧٧	٤١٩,٥٢٧
اتزان سائل و صلب لمادة للفضة	١٢٣٤,٩٣	٩٦١,٧٨
اتزان سائل و صلب لمادة للذهب	١٣٣٧,٣٣	١٠٦٤,١٨

٤,٢ طرق قياس درجة الحرارة

يمكن قياس درجة الحرارة بطرق غير مباشرة حيث يمكن قياس خاصية للمادة تتغير بتغير درجة الحرارة. فعلى سبيل المثال يمكن قياس درجة الحرارة عن طريق خاصية تمدد المواد، حيث من المعروف أن معظم المواد يزيد حجمها بزيادة درجة الحرارة، و تنكمش مع البرودة، و ذلك اعتماداً على معامل تمدد المادة.
كما أن بعض المواد تتغير مقاومتها الكهربائية مع درجة الحرارة، و لذلك يمكن قياس درجة الحرارة عن طريق قياس المقاومة الكهربائية. كما يمكن عند توصيل مادتين مع بعضهما البعض في و صلتين عند درجتي حرارة مختلفة فانه ينتج جهد كهربائي يتناسب مع الفرق في درجة الحرارة بين الوصلتين وهو ما يعرف بالازدواج الحراري. ايضا تبعث كل المواد اشعاع حراري يتناسب مع درجة الجسم. يمكن من خلال قياس الاشعاع المنبعث من الجسم معرفة درجة حرارة الجسم. يتغير لون بعض المواد مع درجة الحرارة و لذلك يمكن معرفة درجة حرارة بعض الاجسام عن طريق تغير لون المادة.

٤,٣ قياس درجة الحرارة باستخدام تمدد السائل في أنبوب (الثيرموميتر)

في هذا النوع من أجهزة قياس درجة الحرارة يوضع سائل في أنبوب في اسفله بصيلة (او مخزن صغير). عند تعرض البصيلة إلى درجة حرارة أكبر من درجة الحرارة الابتدائية فان السائل في البصيلة يتمدد، انظر الشكل ٤,١. يمكن أن تصل درجة الشك في الثيرمومتر الى ٠,١ درجة مئوية و في بعض الأنواع التي تستخدم للمعايرة يمكن أن تصل إلى أقل من ذلك. و يستخدم عادة الزئبق او الكحول في الثيرمومترات. يختلف مدى غمر الثيرمومتر في السائل المراد قياس نوعه إلى غمر جزئي و غمر كلي و غمر عام كما هو موضح في الشكل ٤,١ [٢]

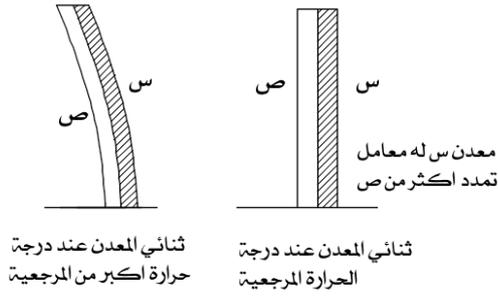


شكل ٤,١ طرق غمر الثيرمومتر لقياس درجة الحرارة [٢]

ففي الغمر الجزئي يتم وضع إشارة على تدريج الثيرمومتر توضح الحد الذي يجب غمر الثيرمومتر في السائل عند قياس درجة الحرارة. و في الغمر الكلي يتم غمر الثيرمومتر حتى مستوى سطح سائل الثيرمومتر اما في الغمر التام فان كل الثيرمومتر يتم غمره. ويقوم بعض المصنعين بإنتاج مجموعة متكاملة (Complete set) من الثيرمومترات المعيارية لقياس و معايرة درجة الحرارة يغطي كل ثرمومتر مدى معين من درجات الحرارة [٤,٣].

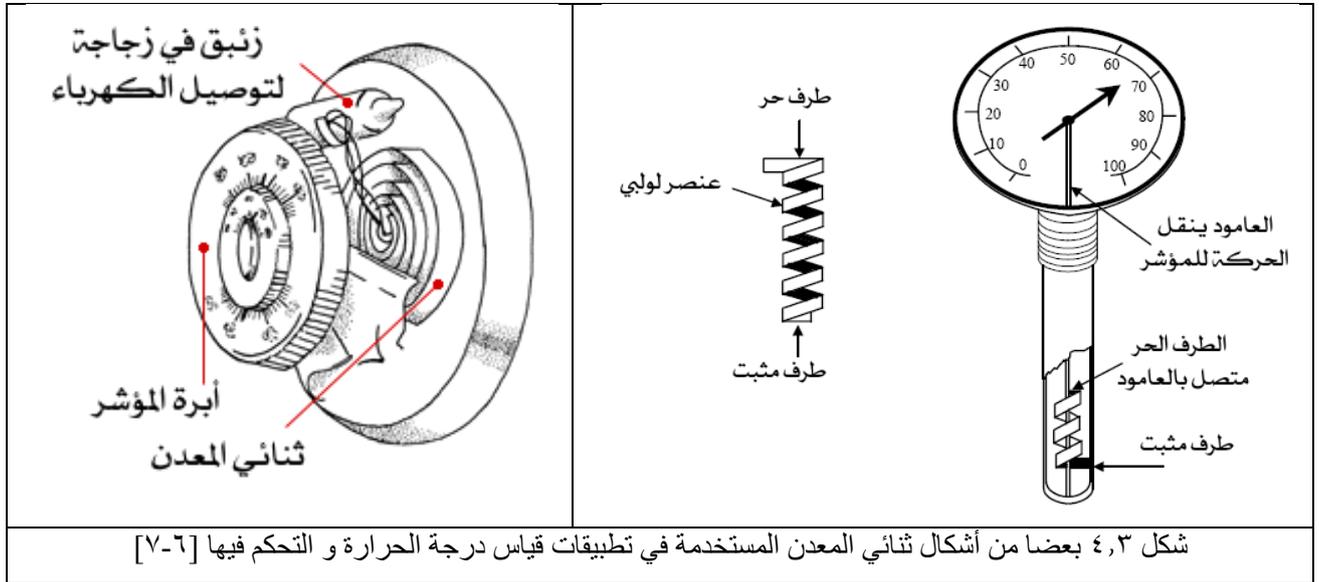
٤,٤ قياس درجة الحرارة عن طريق تمدد ثنائي المعدن

يستخدم ثنائي المعدن (Bimetallic) في قياس درجة الحرارة، عند لصق معدنين مختلفين لكل منهما معامل تمدد احدهما له تمدد اكثر عن الاكثر، عند درجة حرارة مرجعية T_r عندما يتعرض الثاني لدرجة حرارة مختلفة عند درجة الحرارة التي تم لصق المعدنين مع بعضهما فان الثنائي يأخذ شكلا مقوصا كما هو واضح في شكل ٤,٢



شكل ٤,٢ فكرة عمل ثنائي المعدن لقياس درجة الحرارة

يستخدم ثنائي المعدن كثيراً في التحكم في الأجهزة الحرارية مثل وحدات تكييف الهواء في المساكن و المكاتب [٥-٧]، حيث على سبيل المثال يمكن تشغيل أو إيقاف وحدة التبريد أو التكييف حسب درجة الحرارة. و تختلف أشكال و أنماط ثنائي المعدن المصنعة من شركات مختلفة [٨-١١]. يوضح الشكل ٤,٣ بعضاً من أشكال ثنائي المعدن.



شكل ٤,٣ بعضاً من أشكال ثنائي المعدن المستخدمة في تطبيقات قياس درجة الحرارة و التحكم فيها [٦-٧]

العلاقة الاتية تعطي نصف قطر الانحناء لثنائي معدن تم الصاقهما مع بعضهما عند درجة حرارة T_0 و يراد إيجاد نصف قطر الانحناء عندما تتغير درجة الحرارة الى T علما بان معامل التمدد للمعدنين هما α_1 و α_2 [١٢]

$$r = \frac{t\{3(1+m)^2 + (1+mn)[m^2 + 1/mn]\}}{6(\alpha_2 - \alpha_1)(T - T_0)(1+m)^2} \quad (4.2)$$

حيث

t سمك ثنائي المعدن

m نسبة سمك المعدن الاقل تمدا الى المعدن الاكثر تمدا

n نسبة معامل المرونة للمعدن الاقل تمدا الى المعدن الاكثر تمدا

α_1, α_2 معامل التمدد لثنائي المعدن ($\alpha_1 < \alpha_2$)

T درجة الحرارة

T_0 درجة الحرارة المرجعية

الجدول ٤,٢ ادناه يعطي قيم معامل التمدد و معامل المرونة لبعض المواد المستخدمة في صناعة ثنائي المعدن

جدول ٤,٢ معامل التمدد و معامل المرونة المستخدمة في صناعة ثنائي المعدن [١٢]

المعدن	معامل التمدد (α)	معامل المرونة [psi]	معامل المرونة GPa
Invar	1.7×10^{-6}	21.4×10^6	١٤٧
Yellow brass	2.02×10^{-5}	14.0×10^6	٩٦,٥
Iconel702	1.35×10^{-5}	26.0×10^6	١٧٩
Monel400	1.25×10^{-5}	31.5×10^6	٢١٧
Stainless steel 316	1.6×10^{-5}	28.0×10^6	١٩٣

٤,٥ قياس درجة الحرارة عن طريق قياس المقاومة الكهربائية

بطريقة غير مباشرة يمكن قياس درجة الحرارة عن طريق قياس المقاومة الكهربائية. يوجد بعض المواد التي تزداد مقاومتها الكهربائية عند تسخينها و على النقيض هناك مواد تقل مقاومتها الكهربائية مع درجة الحرارة. تعرف مقاومة سلك معدني بناء على طول السلك و مساحة المقطع و معامل المقاومة كالاتي:

$$R = \frac{\rho_e L}{A_c} \quad (4.3)$$

حيث

ρ_e هو معامل المقاومة و وحداته اوم.متر

L هو طول السلك

A_c مساحة المقطع

بالنسبة لما يسمى حاس المقاومة الحراري (Resistance Temperature Detector or RTD) فان المقاومة الكهربائية تزيد مع درجة الحرارة و يمكن التعبير عن ذلك رياضيا باستخدام المعادلة الاتية:

$$R = R_0[1 + \alpha(T - T_0) + \beta(T - T_0)^2 + \dots] \quad (4.4)$$

و اذا ما تم إهمال الحدود ذات الأس أكثر من واحد في درجة الحرارة فان المعادلة السابقة تكون خطية بين المقاومة الكهربائية و درجة الحرارة كالاتي:

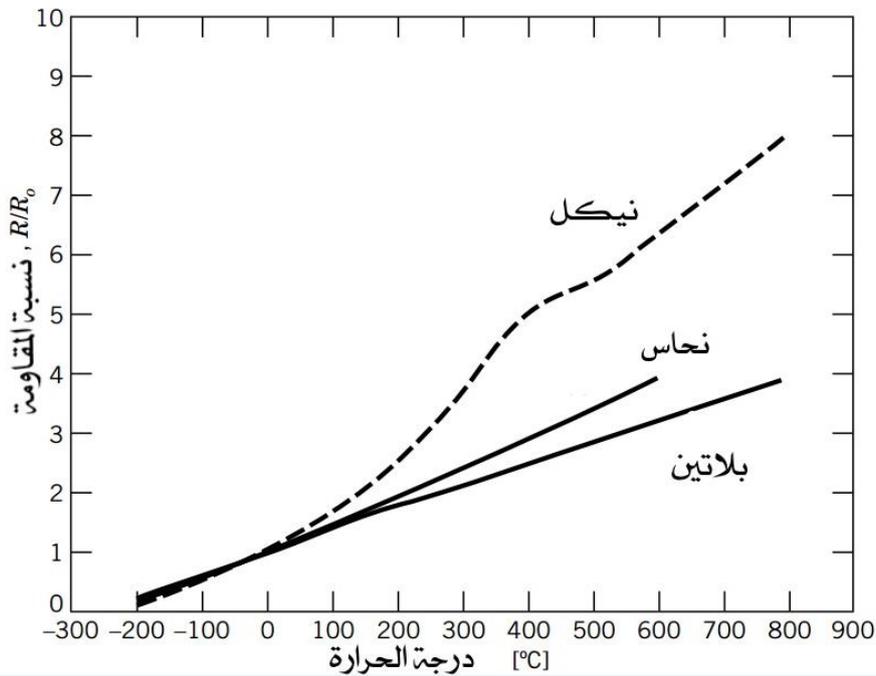
$$R = R_0[1 + \alpha(T - T_0)] \quad (4.5)$$

حيث تعرف α بانها معامل المقاومة الحراري للحاس (المجس)، و يبين الجدول ٤,٣ قيم هذا المعامل لبعض المواد المستخدمة في قياس درجة الحرارة. يوضح الشكل ٤,٤ تغيير المقاومة النسبية R/R_0 مع درجة الحرارة لثلاث معادن تستخدم في صناعة

مجس المقاومة الحرارية RTD و هي البلاتين و النحاس و النيكل و تعتبر الاكثر انتشارا . و يتضح من الشكل أن العلاقة بين درجة الحرارة و المقاومة للبلاتين خطية من -٢٠٠ درجة مئوية الى حوالي ٨٠٠ درجة مئوية.

جدول (٤,٣) معامل المقاومة الحراري α لبعض المواد [٢]

المادة	المعامل α [1/°C]
المنيوم (Al)	٠,٠٠٤٢٩
كربون (C)	-٠,٠٠٠٧
نحاس (Cu)	-٠,٠٠٤٣
ذهب (Au)	٠,٠٠٤
حديد (Fe)	٠,٠٠٦٥١
رصاص (Pb)	٠,٠٠٤٢
نيكل (Ni)	٠,٠٠٦٧
نيكروم	٠,٠٠٠١٧
بلاتين (Pt)	٠,٠٠٣٩٢٧
تنجستون (W)	٠,٠٠٤٨



شكل ٤,٤ تغير نسبة المقاومة مع درجة الحرارة ل حاس مقاومة حراري (RTD) [٢]

و من أشهر المعادن المستخدمة كحاس مقاومة حراري معدن البلاتين و كذلك معدن النحاس.

و تجدر الإشارة الى أن حساسية مجس المقاومة الحراري RTD مع تغير درجة الحرارة عالي اي أن تغير طفيف في مقاومة سلك المقاومة الحراري ينتج عنه تغير كبير في درجة الحرارة، و لذلك يجب اخذ الحيطة عند قياس المقاومة الكهربائية لمجس المقاومة الحراري أن تكون صحيحة و دقيقة.

و يمكن قياس مقاومة سلك RTD بدقة باستخدام قنطرة ويتستون (Wheatstone Bridge) كما هو موضح في شكل ٤,٥، حيث عندما تكون القنطرة في حالة الاتزان و لا يقرأ جهاز الجهد G أي فولت عن طريق تغير قيمة المقاومة المتغيرة R_3 و تصبح العلاقة بين المقاومات الاربعة:

$$R_{RTD} = \frac{R_2}{R_1} R_3 \quad (4.6)$$

و منها يمكن استنتاج مقاومة سلك المقاومة الحراري. و عند تساوي R_1 و R_2 فان مقاومة السلك الحراري تساوي المقاومة المتغيرة R_3

و يمكن الوصول الى هذه النتيجة عن طريق تحليل الدائرة الكهربائية لقنطرة ويتستون كالآتي:

بالرجوع الى الشكل ٤,٥، يمكن كتابة التيارات الكهربائية i_1 و i_2 و i_3 و i_4 باستخدام قانون اوم (Ohm Law)

$$i_1 = \frac{E_B - E_C}{R_2} , \quad i_2 = \frac{E_C - E_A}{R_1} \quad (4.7)$$

حيث E ترمز للفولتية. وبما ان $i_1 = i_2$

$$\frac{E_B - E_C}{E_C - E_A} = \frac{R_2}{R_1} \quad (4.8)$$

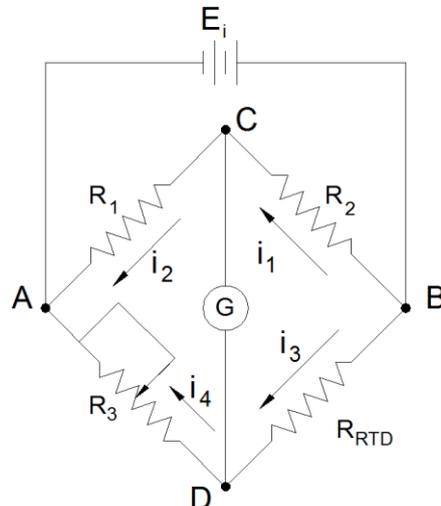
$$i_3 = \frac{E_B - E_D}{R_{RTD}} , \quad i_4 = \frac{E_D - E_A}{R_3} \quad (4.9)$$

و بما ان $i_3 = i_4$

$$\frac{E_B - E_D}{E_D - E_A} = \frac{R_{RTD}}{R_3} \quad (4.10)$$

و لكن القنطرة في حالة توازن اي أن قراءة الجلفانومتر بين C و D صفر. اي أن $E_C = E_D$ ولذلك من المعادلتين ٤,٨ و ٤,١٠ يُستنتج ان:

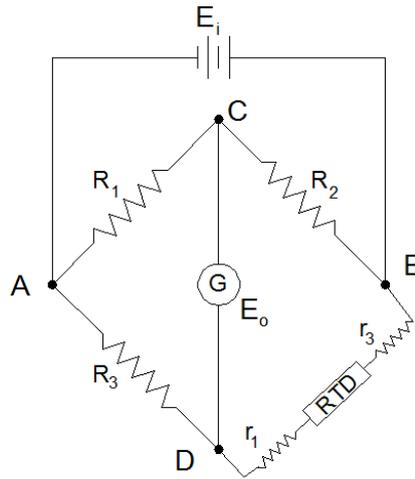
$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_{RTD}}{R_3} \quad (4.11)$$



شكل ٤,٥ قنطرة ويتستون وتحليلها

يتضح من المعادلة السابقة انه يمكن استخدام قنطرة ويتستون في حالة الاتزان لقياس المقاومة الكهربائية. ويتم الحصول على الاتزان بالتحكم في تغيير المقاومة R_3 لضمان أن قراءة الجلفانومتر صفراً. وتكتسب المعادلة ٤,١١ أهمية كبيرة لقياس مقاومة السلك الحراري عن طريق معرفة R_1, R_2 و R_3 .

عند توصيل مجس المقاومة الحراري في قنطرة ويتستون يجب الانتباه الى الاسلاك او الفتلات المستخدمة في القياس حيث ان لكل سلك مقاومة و نظراً لان مجس المقاومة الحراري (RDT) حساس للتغير الطفيف في المقاومة فان قراءة درجة الحرارة قد لا تكون صحيحة. يُستخدم عادة اما مجس بفتلتين او بثلاث فتلات او مجس باربع فتلات كما هو موضح في الاشكال ٤,٦ و ٤,٧ و ٤,٨ لقياس المقاومة في قنطرة ويتستون



شكل ٤,٦ توصيل مجس المقاومة الحراري ذي الفتلتين

عند استخدام مجس بفتلتين و من توازن قنطرة ويتستون كما هو واضح من الشكل ٤,٦ ينتج

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_{RTD} + r_1 + r_3} \quad (4.12)$$

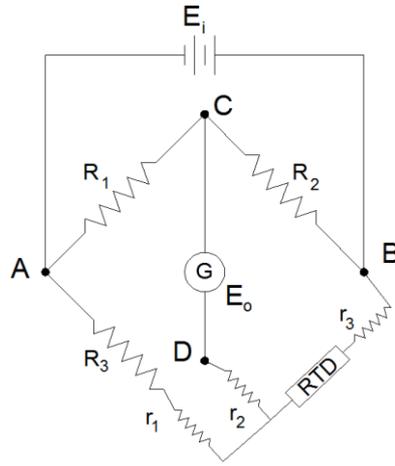
و يمكن حساب المقاومات r_1 و r_2 باستخدام المعادلة (٤,٣). يمكن تخفيض الخطأ نتيجة استخدام مجس المقاومة الحراري باستخدام المجس مع إما ثلاث فتلات او أربع فتلات. في حالة استخدام ثلاث فتلات كما هو موضح في الشكل ٤,٧ فان قياس المقاومة RTD يصبح

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_{RTD} + r_3}{R_3 + r_1} \quad (4.13)$$

و اذا ما تساوت المقاومتين R_1 و R_2 فان مقاومة مجس المقاومة الحراري تصبح

$$R_3 = R_{RTD} + r_3 - r_1 \quad (4.14)$$

اي ان مقاومة الفتلتين r_1 و r_2 يمكن الغاء تاثيرهما اذا تساوت قيمتهما. اما اذا اريد قراءة مقاومة سلك مجس المقاومة بدقة و صحة أفضل فانه يستخدم التوصيل باربع فتلات كما هو واضح من الشكل ٤,٨.



شكل ٤,٧ توصيل مجس المقاومة الحراري ذي الثلاث فتلات

<p>شكل ٤,٨ ب توصيل الاطراف r_1, r_3 و r_4</p>	<p>شكل ٤,٨ أ توصيل الاطراف r_1, r_2 و r_3</p>
<p>شكل ٤,٨ توصيل مجس المقاومة الحراري ذي الاربع فتلات</p>	

عند توصيل الفتلات الاربع كما في الشكل ٤,٨ أ ينتج

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3 + r_3}{R_{RTD} + r_1} \quad (4.15)$$

و منها

$$R_{RTD} = R_3 + r_3 - r_1 \quad (4.16)$$

و عند توصيل الفتلات كما في الشكل ٤,٨ ب

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R'_3 + r_1}{R_{RTD} + r_3} \quad (4.17)$$

و منها

$$R_{RTD} = R'_3 + r_1 - r_3 \quad (4.18)$$

اي ان مقاومة سلك المقاومة الحراري تصيح

$$R_{RTD} = \frac{R_3 + R'_3}{2} \quad (4.19)$$

مثال ٤,١

لنفترض لدينا مجس مقاومة حراري مصنوع من مادة مقاومتها عند درجة حرارة صفر مئوي تساوي ١٠٠ اوم و معامل المقاومة الحراري (α) يساوي ٠,٠٠٣٨٥ لكل درجة حرارة مئوي . اذا وضع هذا المجس في مكان و وجد ان مقاومته اصبحت ١٤١ اوم باستخدام قنطرة وتستون، احسب درجة حرارة المجس باستخدام معادلة مجس المقاومة الحراري

$$R = R_o[1 + \alpha(T - T_o)]$$

بالتعويض

$$141 = 100[1 + 0.00385T]$$

او

$$T = 106.49 \text{ } ^\circ\text{C}$$

مثال ٤,٢

اوجد نسبة الشك u_t في درجة الحرارة عند استخدام مجس مقاومة الحرارة RTD و قنطرة وتستون اذا علمت ان نسبة الشك في قياس كل مقاومة u_R على قنطرة و تستون هي ١% وان معامل المقاومة الحراري α يساوي ٠,٠٠٣٨٥ لكل درجة حرارة مئوي

الحل:

عند اتزان القنطرة:

$$R_{RTD} = \frac{R_2}{R_1} R_3 \quad (4.20)$$

$$u_{RTD} = \sqrt{\left(\frac{\partial R_{RTD}}{\partial R_1} u_{R1}\right)^2 + \left(\frac{\partial R_{RTD}}{\partial R_2} u_{R2}\right)^2 + \left(\frac{\partial R_{RTD}}{\partial R_3} u_{R3}\right)^2} \quad (4.21)$$

$$\frac{\partial R_{RTD}}{\partial R_1} = -\frac{R_2 R_3}{R_1^2}, \quad \frac{\partial R_{RTD}}{\partial R_2} = \frac{R_3}{R_1}, \quad \frac{\partial R_{RTD}}{\partial R_3} = \frac{R_2}{R_1} \quad (4.22)$$

على افتراض تساوي المقاومات عند التوازن، و ان درجة الشك متساوية لكل المقاومات بما فيها مقاومة سلك المقاومة الحراري

$$\frac{u_{RTD}}{R_{RTD}} = \sqrt{\left(-\frac{u_{R1}}{R_1}\right)^2 + \left(\frac{u_{R2}}{R_2}\right)^2 + \left(\frac{u_{R3}}{R_3}\right)^2} \quad (4.23)$$

$$\frac{u_{RTD}}{R_{RTD}} = \sqrt{3 \left(\frac{u_R}{R}\right)^2} = \sqrt{3} \frac{u_R}{R} \quad (4.24)$$

و من العلاقة

$$R_{RTD} = R_0[1 + \alpha(T - T_0)] \quad (4.25)$$

$$u_{RTD} = \frac{\partial R_{RTD}}{\partial T} u_T = R_0 \alpha u_T \quad (4.26)$$

$$u_T = \frac{u_{RTD}}{R_{RTD}} \frac{1}{\alpha} = \sqrt{3} \frac{u_R}{R} \frac{1}{\alpha} \quad (4.27)$$

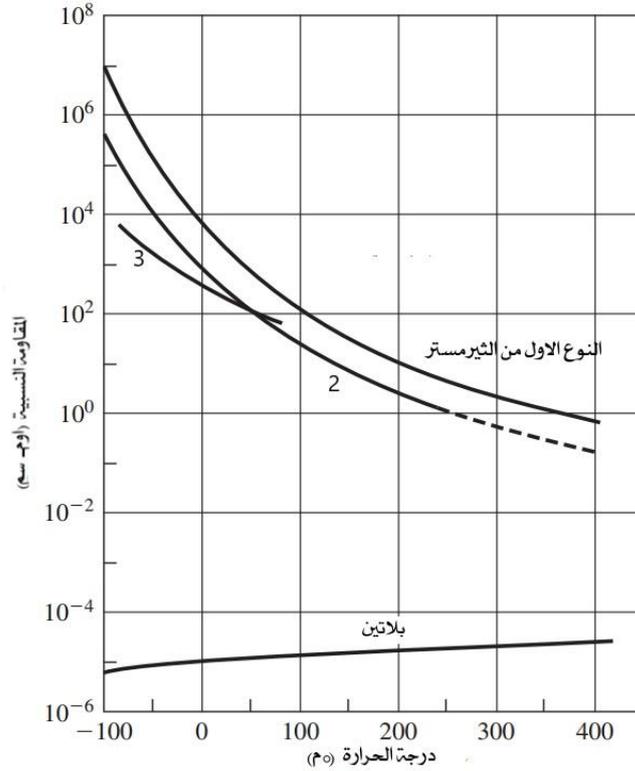
ومنها

$\frac{u_{RTD}}{R_{RTD}} [\%]$	$u_T [^{\circ}\text{C}]$
1%	4.5
0.5%	2.25
0.1%	0.45

و هذا يؤكد تأثير درجة الشك في قياس المقاومة الكهربائية الكبير على درجة الشك في قياس درجة الحرارة.

الثيرمستر

كما ذكر من قبل بعض المواد مثل أشباه الموصلات تقل مقاومتها الكهربائية مع درجة الحرارة، غير ان تغير المقاومة مع درجة الحرارة ليس خطيا مثل الثيرمستور (Thermistor)، و لذلك ايضا يمكن استخدام هذه المواد لقياس درجة الحرارة.



شكل ٩، ٤ تغيير المقاومة النسبية مع درجة الحرارة لأنواع مختلفة من الثيرمستور [١٢]

. المعادلة الاتية تعطي فكرة تغير المقاومة الكهربائية مع درجة الحرارة للثيرمستور [٢]

$$R = R_o e^{\beta(1/T - 1/T_o)} \quad (4.28)$$

حيث

R_o هي مقاومة الثيرمستور المرجعية عند درجة حرارة T_o

β هو معامل الثيرمستور و وحداته كلفن⁻¹

و تكون قيم β بين ٣٥٠٠ و ٣٦٠٠ كلفن⁻¹ [٢].

و يمكن قياس المعامل β اذا ما تم وضع الثيرمستور في دائرة كهربائية مثل التي يوضحها الشكل ٤,١٠. حيث يتم قياس الفولتية E_1 و المقاومة R_1 و منها يمكن حساب شدة التيار

$$i = \frac{E_1}{R_1} \quad (4.29)$$

و لكن شدة التيار اذا ما تم اعتبارنا ان المقاومتين R_T و R_1 موصلتين على التوالي مع فولتية E_o

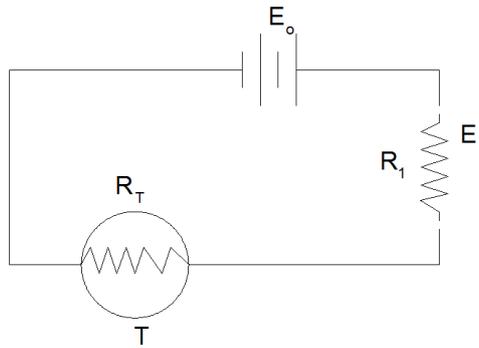
$$i = \frac{E_o}{R_1 + R_T} \quad (4.30)$$

و من المعادلتين السابقتين يمكن كتابة المقاومة الكهربائية للثيرمستور

$$R_T = R_1 \left(\frac{E_o}{E_1} - 1 \right) \quad (4.31)$$

و اذا ما تم قياس درجة الحرارة T و معرفة T_o و R_o فانه يمكن حساب β باستخدام

$$\ln \left(\frac{R_T}{R_o} \right) = \beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_o} \right) \quad (4.32)$$



شكل ٤,١٠ دائرة كهربائية لقياس مقاومة الثيرمستور [٢]

و هنا علاقة اخرى تربط درجة الحرارة مع المقاومة الكهربائية للثيرمستور هي علاقة Steinhart-Hart [١٣] و التي يمكن من خلالها كتابة درجة الحرارة كدالة في المقاومة

$$\frac{1}{T} = a + b \ln(R) + c (\ln(R))^3 \quad (4.33)$$

حيث a و b و c ثوابت، و يمكن من العلاقة السابقة ايجاد درجة الحرارة بالكلفن بمعلومية مقاومة الثيرمستور، اما اذا أُريد حساب المقاومة بمعلومية درجة الحرارة فيمكن استعمال العلاقة التالية [١٣]:

$$R = e \left[\left(-\frac{\phi}{2} + \left(\frac{\phi^2}{4} + \frac{\psi^3}{27} \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{\phi}{2} + \left(\frac{\phi^2}{4} + \frac{\psi^3}{27} \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad (4.34)$$

حيث

$$\phi = \frac{a-1/T}{c} \quad (4.34a)$$

$$\psi = \frac{b}{c} \quad (4.34b)$$

٤, ٦ قياس درجة الحرارة باستخدام الازدواج الحراري (السلك الكهروحراري)

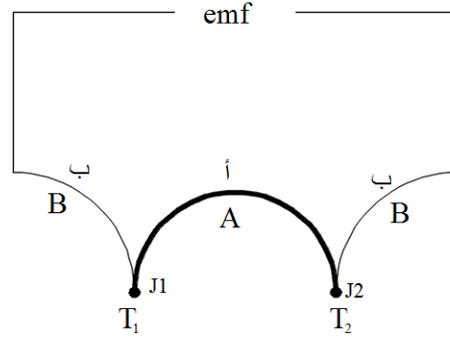
عند توصيل سلكين معدنيين من مادتين مختلفتين وترك احدى الوصلتين عند درجة حرارة T_1 و الوصلة الثانية عند T_2 فانه يتولد فولت يتناسب مع الفرق في درجة الحرارة بين الوصلتين كما هو موضح في شكل ٤, ١١ و يسمى هذا بتأثير سيبك (Seebeck). يستفاد من الفولت المتولد في معرفة درجة الحرارة لو تم تثبيت درجة حرارة احدى الوصلتين عند درجة حرارة مرجعية معينة

هناك ثلاث تأثيرات أساسية تحدث عند عمل ازدواج من سلكين مصنوعين من مادتين مختلفين و هي:

١-تأثير سيبك (Seebeck Effect)

٢-تأثير بلتيير (Peltier Effect)

٣-تأثير تسمون (Thomson effect)



شكل ٤, ١١ شكل مبسط لفكرة عمل الازدواج الكهروحراري (تأثير سيبك)

تأثير سيبك

ينتج عندما يتم الوصلتين الناتجتين من الازدواج احدهما عند درجة حرارة اكبر من الاخرى كما هو موضح في الشكل ٤, ١١. يتولد بين الطرفين الحرين فولت (emf) يتناسب مع الفرق في درجات الحرارة ($T_1 - T_2$) وكذلك خواص السلكين. و يمكن التعبير عن ذلك رياضيا كالآتي:

$$\alpha_{AB} = \frac{\partial(emf)}{\partial T} \quad (4.35)$$

حيث

α_{AB} هو معامل سيبك و يعتمد على الخواص للسلكين A و B
 emf هو الفولت المتولد نتيجة فرق درجات الحرارة
 T درجة الحرارة

تأثير بيلتير

عندما يمر تيار في ازدواج حراري مكون من سلكين مختلفين وو صلتين. حيث احدى الوصاتين عند درجة حرارة T_1 و الاخرى عند درجة حرارة T_2 فانه بسريان التيار في الازدواج الحراري فان الحرارة خارجة من الوصلة الساخنة و حرارة داخلية للوصلة الباردة كما هو موضح في شكل ٤,١٢ . و يمكن التعبير رياضيا عن ذلك كالآتي:

$$q = \phi I \quad (4.36)$$

حيث

ϕ هو معامل بيلتير و وحداته فولت

I هو شدة التيار

و يستخدم هذا التأثير في ما يسمى بالتأثير الكهروحراري (Thermoelectric cooling) [١٤].

تأثير ثمسون

عندما يمر التيار في الازدواج الحراري و كان هناك فرق على طول معدن الازدواج الحراري فان الحرارة المنتقلة في الموصل يمكن كتابتها كالآتي:

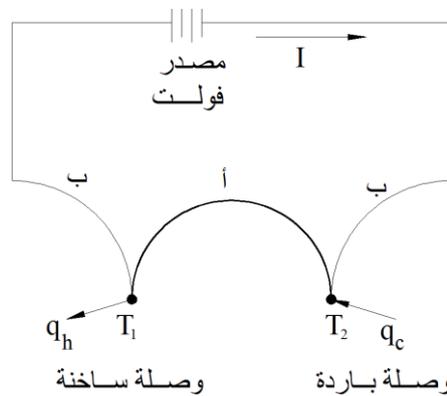
$$q_t = \tau I \frac{dT}{dx} \quad (4.37)$$

حيث

τ هو معامل ثمسون و وحداته فولت لكل درجة كلفن

الميل في درجة الحرارة على طول الموصل $\frac{dT}{dx}$

و قد وجد أن الثلاث معاملات (معامل سيبك و معامل بياتير و معامل ثمسون) مرتبطين مع بعضهما البعض [١٤]



شكل ٤,١٢ تأثير بيلتير و تأثير ثمسون

القوانين الأساسية للاستخدامات الأزواج الحرارية:

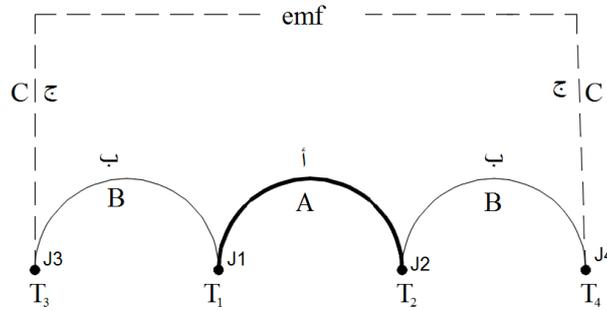
هناك ثلاث قوانين أساسية يجب الإحاطة بها عند استخدام الأزواج الحرارية لقياس درجة الحرارة و هي:

١- قانون تجانس المادة

ببساطة القانون يشترط أن يكون الأزواج الحرارية مصنوع من مادتين مختلفتين و ليس مادة واحدة. فحتى لو تم عمل وصلتين عند درجتين حراريتين مختلفتين من سلك مصنوع من مادة واحدة لن يتم توليد فولت أو جهد.

٢- قانون تداخل المواد

ينص هذا القانون على أساس انه اذا ما تم وضع مادة مصنوعة من مادة مختلفة عن المادتي المصنوع منهما الأزواج الحرارية و تم الحفاظ على درجة حرارة الوصلتين مع المادة الجديدة فان الفولت المتولد في الأزواج الحرارية لن يتأثر بوجود المادة الدخيلة.



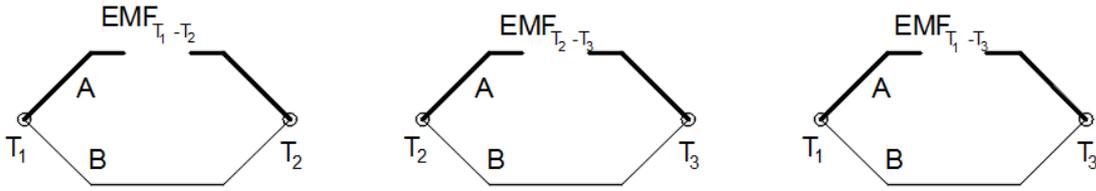
شكل ١٣, ٤ توضيح لقانون تداخل المواد للأزواج الحرارية

في الشكل ١٣, ٤ اذا ماتم المحافظة على درجة حرارتي الوصلتين J_4 و J_3 التي بين المادتين C و B، فان الفولت المتولد من هذه المجموعة هو نفسه الفولت المتولد من الأزواج الحرارية المصنوع من المادتين A، و B و لا تأثير يذكر من المادة C.

٣- قانون درجة الحرارة البينية

المقصود بدرجة الحرارة البينية هي درجة الحرارة بين درجتين حراريتين. ينص هذا القانون على أساس انه إذا ما تم قياس الفولت المتولد emf_{1-2} من أزواج حراري عندما تكون الوصلتين عند درجتين الحرارة T_1 و T_2 و تم قياس الفولت المتولد emf_{2-3} عندما تكون درجة حرارة الوصلتين T_2 و T_3 فان الفولت المفروض ان يتولد من الأزواج الحرارية عندما تكون الوصلتين بين T_1 و T_3 كالآتي

$$emf_{1-3} = emf_{1-2} + emf_{2-3} \quad (4.38)$$



$$EMF_{T_1-T_2} + EMF_{T_2-T_3} = EMF_{T_1-T_3}$$

شكل ٤,١٤ توضيح لقانون درجة الحرارة البيئية للازدواجات الحرارية

يبين الجدول (٤,٤) خواص بعض المواد المستخدمة في صناعة الازدواجات الحرارية. بينما يوضح الجدول (٤,٥) الجهد المتولد من الازدواجات الحرارية عند درجات حرارة مختلفة و لمزيد من الجداول للجهد المتولد من الازدواجات الحرارية يمكن الرجوع للملاحق. جدول (٤,٦) يرصد الخطأ المتوقع من الازدواجات الحرارية التجارية [١٢].

جدول (٤,٤) خواص بعض المواد المستخدمة في الازدواجات الحرارية [١٢]

المادة	الموصلية الحرارية W/(m.K)	الحرارة النوعية [kJ/kg.°C]	الكثافة [kg/m ³]	المقاومة الكهربائية [μΩ-cm]	معامل التمدد الحراري [°C ⁻¹ *10 ⁶]	نقطة الانصهار [°C]
الوميل	٢٩,٨	٠,٥٢	٨٦٠٠	٢٩	١٢	١٤٠٠
كونستانتان	٢١,٧	٠,٣٩	٨٩٠٠	٤٩	٠,١-	١٢٢٠
كروميل	١٩,٢	٠,٤٥	٨٧٠٠	٧٠	١٣	١٤٥٠
نحاس	٣٧٧	٠,٣٨٥	٨٩٠٠	١,٥٦	١٧	١٠٨٠
حديد	٦٨	٠,٤٥	٧٩٠٠	٨,٦	١٢	١٤٩٠

جدول (٤,٥) الجهد الكهربائي المتولد من انواع مختلفة من الازدواجات الحرارية (المرجعية: صفر عند درجة حرارة صفر مئوي) [١٢]

درجة الحرارة م°	نحاس- كونستانتان (T)	كروميل- كونستانتان (E)	حديد- كونستانتان (J)	كروميل- الوميل (K)	بلاتين- بلاتين- روديوم ١٠% (S)	نوكسل- نسيل (N)
١٥٠-	٤,٦٤٨-	٧,٢٧٩-	٦,٥٠٠-	٤,٩١٣-		١,٥٣٠-
١٠٠-	٣,٣٧٩-	٥,٢٣٧-	٤,٦٣٣-	٣,٥٥٤-		١,٢٢٢-
٥٠-	١,٨١٩-	٢,٧٨٧-	٢,٤٣١-	١,٨٨٩-	٠,٢٣٦-	٠,٦٩٨-
٢٥-	٠,٩٤٠-	١,٤٣٢-	١,٢٣٩-	٠,٩٦٧-	٠,١٢٧-	٠,٣٦٨-
٠	٠	٠	٠	٠	٠	٠
٢٥	٠,٩٩٢	١,٤٩٥	١,٢٧٧	١,٠	٠,١٤٣	٠,٤٠٢
٥٠	٢,٠٣٦	٣,٠٤٨	٢,٥٨٥	٢,٠٢٣	٠,٢٩٩	٠,٨٣٦
٧٥	٣,١٣٢	٤,٦٥٧	٣,٩١٨	٣,٠٥٩	٠,٤٦٧	١,٢٩٧
١٠٠	٤,٢٧٩	٦,٣١٩	٥,٢٦٩	٤,٠٩٦	٠,٦٤٦	١,٧٨٥
١٥٠	٦,٧٠٤	٩,٧٨٩	٨,٠١٠	٦,١٣٨	١,٠٢٩	٢,٨٢٦
٢٠٠	٩,٢٨٨	١٣,٤٢١	١٠,٧٧٩	٨,١٣٩	١,٤٤١	٣,٩٤٣

٦,٣٤٨	٢,٣٢٣	١٢,٢٠٩	١٦,٣٢٧	٢١,٠٣٦	١٤,٨٦٢	٣٠٠
٨,٩١٩	٣,٢٥٩	١٦,٣٩٧	٢١,٨٤٨	٢٨,٩٤٦	٢٠,٨٧٢	٤٠٠
١١,٦٠٣	٤,٢٣٣	٢٠,٦٤٤	٢٧,٣٩٣	٣٧,٠٠٥		٥٠٠
١٤,٣٧٠	٥,٢٣٩	٢٤,٩٠٦	٣٣,١٠٢	٤٥,٠٩٣		٦٠٠
٢٠,٠٩٤	٧,٣٤٥	٣٣,٢٧٥	٤٥,٤٩٤	٦١,٠١٧		٨٠٠
٢٦,٠٤٦	٩,٥٨٧	٤١,٢٧٦	٥٧,٩٥٣	٧٦,٣٧٣		١٠٠٠
٣٢,١٤٤	١١,٩٥٨	٤٨,٨٣٨	٦٩,٥٥٣			١٢٠٠
	١٥,٥٨٢					١٥٠٠
	١٨,٥٠٣					١٧٥٠

الوميل: ٩٤% نيكل، ٣% ماغنسيوم، ٢% المونيوم، ١% سيلكون
كروميل: ٩٠% نيكل، ١٠% كروميوم
كونستانتان: ٥٥% نحاس، ٤٥% نيكل
نوكسيل: ٨٤% نيكل، ١٤% كروميوم، ١,٥% سليكون
نسيل: ٩٥% نيكل، ٥% سيلكون، ١,٥% ماغنيسيوم

جدول (٤,٦) حدود الخطأ للزواجات الحرارية التجارية [١٢]

نوع الازدواج الحراري	الخطأ (النوعية القياسية)	الخطأ (نوعية خاصة)
E	١,٧ م° او ٠,٥% عند درجة حرارة اكثر من الصفر	١,٠ م° او ٠,٤%
J	٢,٢ م° او ٠,٧٥% عند درجة حرارة اكثر من الصفر	١,١ م° او ٠,٤%
K	٢,٢ م° او ٠,٧٥% عند درجة حرارة اكثر من الصفر	١,١ م° او ٠,٤%
N	٢,٢ م° او ٠,٧٥% عند درجة حرارة اكثر من الصفر	١,١ م° او ٠,٤%
R	١,٥ م° او ٠,٢٥%	٠,٦ م° او ٠,١%
S	١,٥ م° او ٠,٢٥%	٠,٦ م° او ٠,١%
T	١,٠ م° او ٠,٧٥% عند درجة حرارة اكثر من الصفر	٠,٥ م° او ٠,٤%

يمكن ايجاد الفولتية المتولدة من ازدواج حراري كدالة في درجة الحرارة اذا ما افترض ان درجة حرارة الوصلة المرجعية صفر. الجداول في ملاحق الكتاب تعطي الفولتية المتولدة من ازدواجات حرارة مختلفة علما بان درجة الحرارة المرجعية هي صفر. و يمكن فرض ان العلاقة بين الفولتية المتولدة و درجة الحرارة على شكل اسي مثل

$$E (mV) = \sum_{i=1}^N a_i T^i \quad (4.39)$$

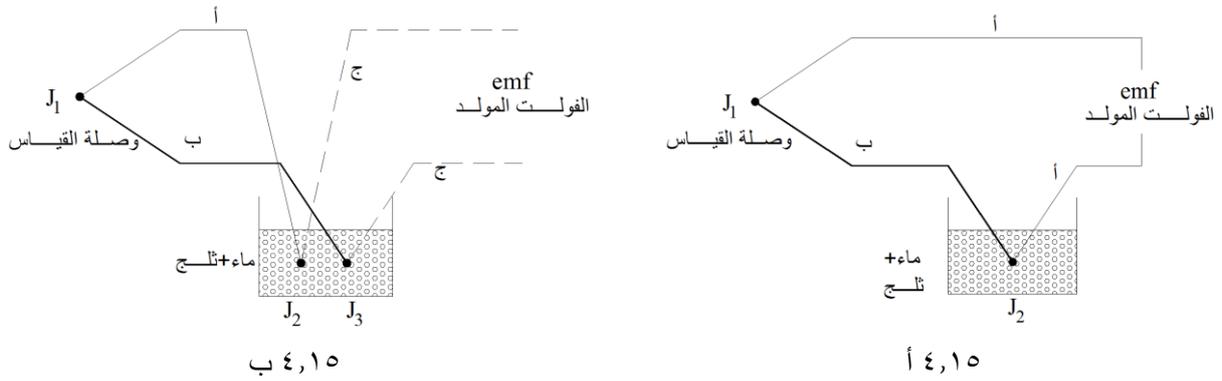
حيث E هي الفولتية المتولدة بالملي فولت ، و T هي درجة الحرارة بالمئوي، و a_i هي الثوابت. و يوضح جدول ٤,٧ الثوابت لبعض أنواع من الازدواجات الحرارية [١٢].

جدول (٤,٧) الثوابت في معادلة ايجاد الفولتية للازدواجات الحرارية [١٢]

ازدواج نوع T	ازدواج نوع S	ازدواج نوع R	ازدواج نوع K	ازدواج نوع J	ازدواج نوع E
نحاس (+)، كونستانتان (-)	بلاتين ١٠% روديوم (+)، بلاتين (-)	بلاتين ١٣% روديوم (+)، بلاتين (-)	كروميل (+)، الوميل (-)	حديد (+)، كونستانتان (-)	كروميل (+)، كونستانتان (-)

	١٠٠٠ م° الى ١٠٠٠ م° ١٠٠٠ م° ٠,٥± م°	٧٦٠ م° الى ٠ م° ٠,١± م°	١٣٧٠ م° الى ٠ م° ٠,٧± م°	١٠٠٠ م° الى ٠ م° ٠,٥± م°	١٧٥٠ م° الى ٠ م° ١,٠± م°	١٦٠,٠ م° الى ٤٠٠ م° ٠,٥± م°
a ₀	0.104967248	-0.048868252	0.226584602	0.263632917	0.927763167	0.100860910
a ₁	17189.45282	19873.14503	24152.10900	179075.491	169526.5150	25727.94369
a ₂	-282639.0850	-218614.5353	67233.4248	-48840341.37	-31568363.94	-767345.8295
a ₃	12695339.5	11569199.78	2210340.682	1.90002E+10	8990730663	78025595.81
a ₄	-44870304.6	-264917531.4	-860963914.9	-4.82704E+12	-1.63565E+12	-9247486589
a ₅	1.10866E+10	2018441314	4.83506E+10	7.62091E+14	1.88027E+14	6.97688E+11
a ₆	-1.71807E+11		-1.18452E+12	-7.20026E+16	-1.37241E+1	-2.66192E+13
a ₇	1.71842E+12		1.38690E+13	3.71496E+18	6.17501E+17	3.94078E+14
a ₈	-9.19278E+12		-6.33708E+13	-8.03104E+19	-1.56105E+19	
a ₉	2.06132E+13				1.69535E+20	

عند استخدام الازدواج الحراري يجب معرفة احد درجات حرارة الوصلتين. و في المعمل ممكن توفير ثلج و ماء عند درجة صفر مئوي. يوضح الشكل ١٥, ٤ استخدام درجة حرارة مرجعية مكونة من اناء به ثلج و ماء عند درجة حرارة صفر. في الحالة الاولى (شكل ١٥, أ) الازدواج الحراري بدون أسلاك توصيل و شكل ١٥, ب مع أسلاك توصيل.



شكل ١٥, ٤ توصيل الازدواج الحراري بدرجة حرارة مرجعية (ماء و ثلج) الحالة أ بدون استخدام أسلاك توصيل اضافية، الحالة ب مع استخدام أسلاك توصيل إضافية

مثال ٣, ٤

عند استخدام ازدواج حراري من نوع T لقياس درجة الحرارة و جد ان الفولت المتولد يساوي ٤,٣٧١ ملي فولت اذا كانت وصلة الازدواج الحراري المرجعية كانت عند درجة ٣٠ م°. اوجد درجة التي يقسيها الازدواج الحراري معطى ان الجهد بين درجة الحرارة المقاسة و ٣٠ م° هو

$$emf_{T-30} = 4.371$$

و بتطبيق مبدأ درجة الحرارة البينية

$$emf_{T-0} = emf_{T-30} + emf_{30-0}$$

من جدول الازدواج الحراري نوع T يمكن ايجاد

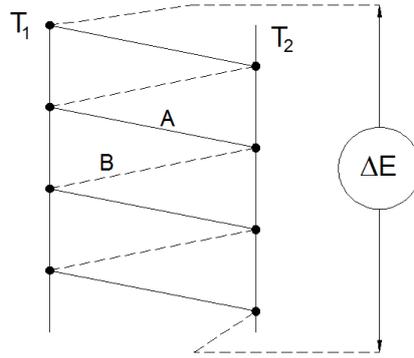
$$emf_{30-0} = 1.146$$

$$emf_{T-0} = 1.146 + 4.371 = 5.567$$

من جدول الازدواج الحراري نوع T في الملاحق نجد ان درجة الحرارة المقابلة لهذا الفولت هي ١٢٧ م° ، وهي درجة الحرارة التي يقيسها الازدواج الحراري.

الثيرموبايل (Thermopile)

في بعض التطبيقات يتم توصيل الازدواجات الحرارية لتكوين مايسمى بالثيرموبايل (Thermopile)، حيث يتم توصيل الازدواجات على التسلسل كما يوضح الشكل (٤،١٦) لزيادة الفولتية المتولدة من مجموعة من الازدواجات الحرارية موصلة على التسلسل (التوالي).



شكل (٤،١٦) توصيل الازدواجات الحرارية على التوالي (التسلسل) لزيادة حساسية قراءة الفولت المتولد [١٢]

لو فرضنا ان هناك جسمين أحدهما عند درجة حرارة T₁ و الآخر عند درجة حرارة T₂ و الهدف قياس الفرق بين درجتي الحرارة بصحة و دقة أفضل يتم توصيل الازدواجات الحرارية على التسلسل كما يوضح الشكل (٤،١٦)

يمكن حساب الجهد المتولد من الثيرموبايل على أساس أن الجهد المتولد هو مجموع الجهود من كل الازدواجات الحرارية الموصلة على التوالي

$$\Delta E_T = N \Delta E_S \quad (4.40)$$

حيث

ΔE_T هو فرق الجهد المتولد من الثيرموبايل

ΔE_S هو فرق الجهد لازدواج حراري واحد

N هو عدد الازدواجات الحرارية للثيرموبايل

و بتفاضل المعادلة السابقة بالنسبة ل فرق درجة الحرارة ΔT ينتج ان

$$\left(\frac{\Delta E_T}{\Delta T} \right) = N \left(\frac{\Delta E_S}{\Delta T} \right) \quad (4.41)$$

او في نطاق صغير جدا من التغير في الفولتية و درجة الحرارة

$$\frac{u_{E_T}}{u_{\Delta T}} = N \left(\frac{\Delta E_s}{\Delta T} \right) \quad (4.42)$$

و اذا ما فرضنا ان حساسية الازدواج الحراري $\frac{\Delta E_s}{\Delta T}$ هي ثابتة و يمكن ايجادها من جداول الازدواج الحراري عند درجة الحرارة المتوقعة او منتصف مدى درجة الحرارة فيمكن كتابة عدد الثيرموكابل المطلوبة اذا ما فرضنا درجة شك في قياس الفولتية u_{E_T} و درجة شك في قياس درجة الحرارة $u_{\Delta T}$

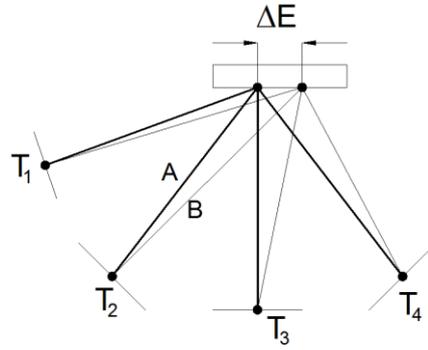
$$N = \frac{u_{E_T}}{\left(\frac{\Delta E_s}{\Delta T} \right) u_{\Delta T}} \quad (4.43)$$

و ينتج من المعادلة السابقة ان درجة الشك في قياس درجة الحرارة تتناسب عكسيا مع عدد الازدواج الحرارية الموصلة على التسلسل (N).

في بعض التطبيقات يمكن قياس متوسط درجة الحرارة لعدة أسطح كل منها له درجة حرارة مختلفة، و ذلك باستخدام مجموعة من الازدواج الحرارية موصلة على التوازي كما يوضح ذلك الشكل ٤,١٧. في هذا الشكل لدينا عدد اربع اسطح كل سطح له درجة حرارة مختلفة T_1, T_2, T_3, T_4 و يراد معرفة متوسط درجة الحرارة لهم جميعا، علما بان درجة الحرارة المرجعية ثابتة. لذلك فان الجهد المتولد بين طرفي الوصلتين سيكون متوسط الفولتية لكل الاسطح اي أن:

$$emf_{avg} = \frac{emf_1 + emf_2 + emf_3 + emf_4}{4} \quad (4.44)$$

و يمكن معرفة متوسط درجة حرارة الاسطح بقراءة درجة الحرارة المقابلة للفولتية emf_{avg}



شكل (٤,١٧) توصيل الازدواج الحراري على التوازي لقياس متوسط درجة الحرارة لسطح أو أكثر

٤,٨ قياس درجة الحرارة عن طريق الاشعاع

في كل ما تقدم من قياس درجة الحرارة كان لا بد من تلامس المجس مع الجسم المراد قياس درجة حرارته. لكن في هذا الجزء سنتطرق لقياس درجة الحرارة لجسم دون ملامسته، و ذلك عن طريق الاشعاع الناتج او المنبعث من الجسم. وهناك تطبيقات لهذه المستشعرات حيث تكون درجة حرارة الجسم عالية جدا او آلة دوارة او لا ينصح بالقرب من الجسم.

كل الاجسام عند درجات الحرارة المختلفة يصدر منه إشعاع يختلف حسب طول الموجة، و كلما زادت درجة حرارة الجسم زادت كمية الاشعاع المنبعث منه.

يُعرف الجسم المعتم او الاسود (Black body) بانه الجسم المثالي الذي يصدر اشعاع عند كل طول موجة تبعاً لقانون بلانك [١٥] (Planck Law)

$$E_{b,\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} \quad (4.45)$$

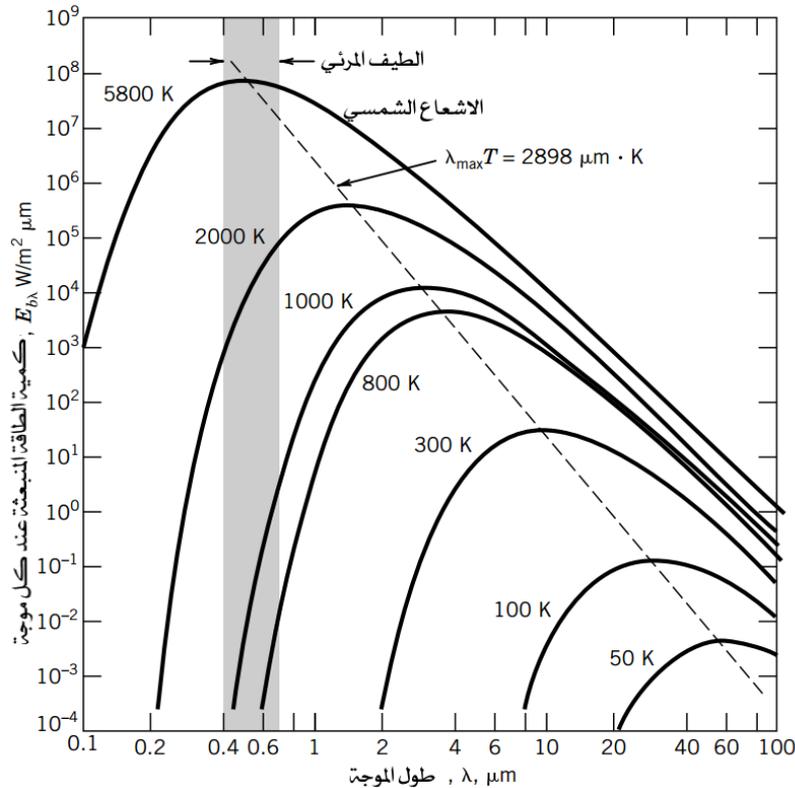
حيث $E_{b,\lambda}$ هو مقدار الاشعاع الطيفي الصادر من الجسم المعتم (الاسود) [وات/م² مايكرومتر] عند طول موجة معينة λ و C_1 و C_2 ثوابت.

$$C_1 = 3.742 \cdot 10^8 \text{ W}\mu\text{m}^4/\text{m}^2$$

$$C_2 = 1.439 \cdot 10^4 \mu\text{m}\cdot\text{K}$$

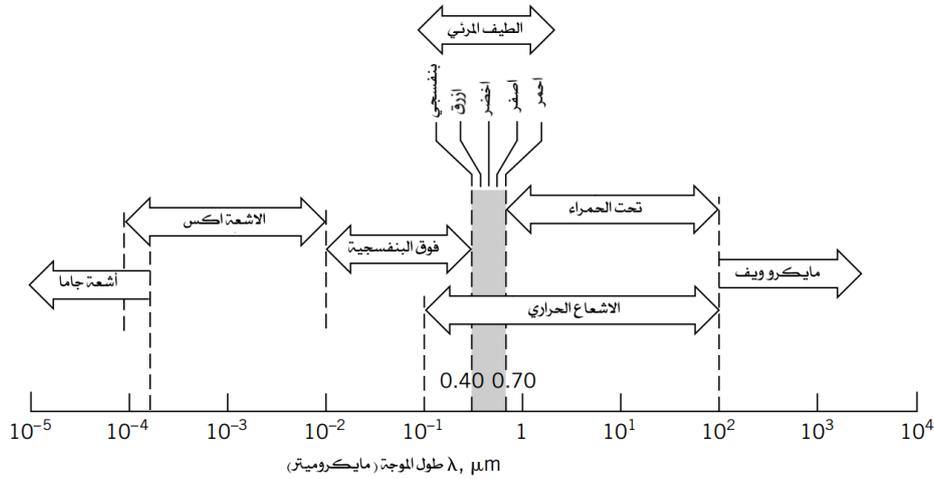
و تعطي المعادلة السابقة كمية الاشعاع الصادر من جسم معتم (اسود) عند اي درجة حرارة (بالكلفن) و طول موجة λ (بالميكرومتر). و يوضح الشكل (٤,١٨) تغير كمية الاشعاع الصادر من جسم معتم المعطى بالمعادلة السابقة عند درجات حرارة مختلفة عند كل طول موجة، كما يظهر الطيف المرئي (بين ٠,٤ و ٠,٧ مايكرومتر). كما يلاحظ في الشكل قانون Wien's displacement law [١٥]، و الذي يقرر انه كلما ارتفعت درجة حرارة الجسم المعتم صغر طول الموجة التي يكون الاشعاع الموجي عندها الحد الاعلى

$$(\lambda T)_{\max power} = 2897.8 \quad \mu\text{m}\cdot\text{K} \quad (4.46)$$



شكل (٤,١٨) تغير كمية الاشعاع الطيفي الصادر من جسم معتم عند كل طول موجة لدرجات حرارة مختلفة [٢]

و يلاحظ من الشكل السابق ان أعلى شدة اشعاع للشمس والتي تقدر درجة حرارتها حوالي ٦٠٠٠ كلفن تقع في الطيف المرئي. و الطيف المرئي كما يتضح من شكل (٤,١٩) يقع بين طولي موجة ٠,٤ و ٠,٧ مايكرومتر يبدأ من اللون الاحمر الى اللون البنفسجي.



شكل (٤,١٩) الطيف الضوئي [٢]

و تسمى الاشعة ذات طول موجة أكبر من ٠,٧ مايكرومتر الى حوالي ١٠٠ مايكرومتر بالاشعة تحت الحمراء و الاشعة ما دون طول موجة ٠,٤ مايكرومتر الى ٠,٠١ مايكرومتر بالاشعة فوق البنفسجية. أما نطاق الاشعاع الحراري فهو يتراوح بين طول موجة ٠,١ الى ١٠٠ مايكرومتر و هو يحوي الاشعة تحت الحمراء و الطيف المرئي و جزء من الاشعة فوق البنفسجية. و في نطاق الاشعة تحت الحمراء تقع اعلى معدلات اشعاع لدرجات حرارة من درجة حرارة الغرفة (حوالي 300°K كلفن) الى حوالي 4000°K كلفن.

عند سقوط الاشعاع على جسم فان الاشعاع منه ما يمتصه الجسم و منه ما يعكسه و منه ما يمر خلال الجسم و مجموع هذه الثلاثة اجزاء لأي جسم يساوي واحد، أي أن مجموع نسب هذه الاجزاء بواحد

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (4.47)$$

حيث

α معامل امتصاص الجسم للاشعاع

ρ معامل انعكاسية الجسم للاشعاع

τ معامل نفاذية الجسم للاشعاع

و الاجسام الصماء (Opaque surfaces) لا تسمح بنفاذ الاشعاع ($\tau=0$) و لذلك

$$\alpha + \rho = 1 \quad (4.48)$$

و هناك ايضا صفة للجسم تسمى الانبعاثية الاشعاعية و هي قدرة الجسم على انبعاث الاشعاع. اذا كان الجسم المعتم له انبعاثية تساوي واحد فان ابعائية الجسم مقارنة بالجسم المعتم تساوي كمية الاشعة المنبعثة عن طول موجة λ على ابعائية الجسم المعتم عند نفس طول الموجة

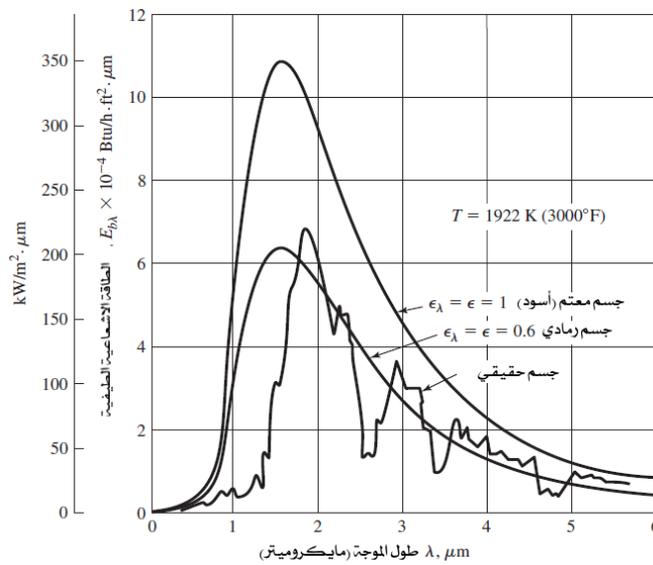
$$\epsilon_{\lambda} = \frac{E_{\lambda}}{E_{b,\lambda}} \quad (4.49)$$

و بالنسبة للجسم الرمادي الذي له انبعاثية واحدة لكل اطوال الموجات

$$\epsilon = \frac{E}{E_b} = \frac{E}{\sigma T^4} \quad (4.50)$$

حيث σ هي ثابت ستيفان-بولتزمان (Stefan-Boltzman constant) [1°]

و يساوي $5,67 \times 10^{-8}$ وات/(كلفن⁴ م²). الشكل ٤,٢٠ يبين مقدار الطاقة المنبعثة من جسم معتم (أسود) و جسم رمادي (Gray) له معامل انبعاثية ثابت مع أطوال الموجات



شكل ٤,٢٠ مقارنة الطاقة الاشعاعية الطيفية من جسم معتم و رمادي و حقيقي [١٢]

و عندما يكون الجسم الاصم في حالة توازن حراري فان معامل الانبعاثية يساوي معامل الامتصاص أي أن

$$\epsilon = \alpha \quad (4.51)$$

و يسمى هذا القانون بقانون كيرشوف Kirchhoff's law [١٥].

الجدول رقم (٤,٢٣) يبين بعض القيم لمعامل الانبعاثية لبعض المواد [١٦]

جدول (٤,٨) معامل الانبعاثية الاشعاعية ϵ لبعض المواد [١٦]

السطح	درجة الحرارة [°م]	معامل الانبعاثية الاشعاعية ϵ [-]
فضة مصقولة	٢٠٠	٠,٠٤-٠,٠١
المونيوم مصقول	٦٠٠-٢٠٠	٠,٠٦-٠,٠٤
سلك بلاتينيوم	١٣٧٠-٤٠	٠,١٩-٠,٠٤
المونيوم مؤكسد جدا	٥٤٠-٩٠	٠,٣٣-٠,٢

٠,٨٥-٠,٦١	٤٠	حديد مصدي
٠,٦٦	٤٠	صفائح حديد مدلفن
٠,٩١	٤٠	غطاء سقفي
٠,٩٢	٢٦٠-٤٠	جص بناء
٠,٩٣	٤٠	طوب احمر خشن
٠,٩٤	٤٠	طوب خرساني
٠,٩٤	٤٠	زجاج ناعم
٠,٩٦	٤٠	ماء بعمق < ٠,١ متر

البايرومترات (Pyrometers)

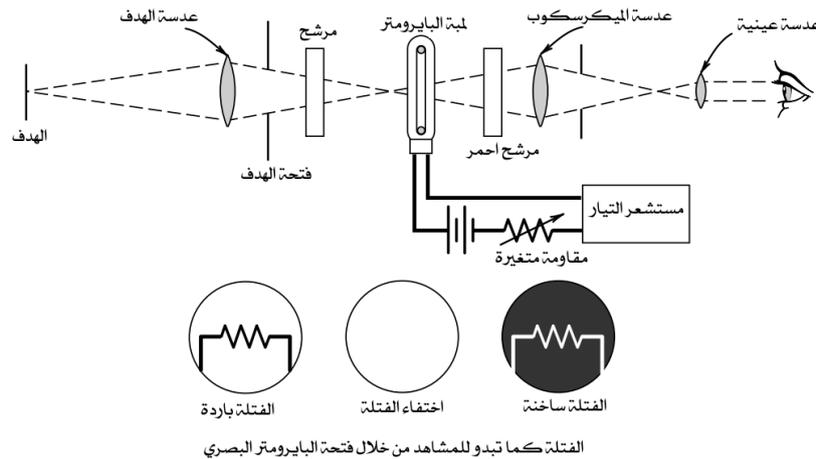
تعني كلمة (pyrometer) قياس درجة الحرارة العالية مثل ٥٠٠°C فاكثر بالاشعاع. و هناك أنواع من البايرومترات منها:

بايرومترات بصرية

بايرومترات حرارية

بايرومترات فولتية

فالبيرومترات البصرية يتم فيها قياس درجة الحرارة بصريا عن طريق مقارنة توهج فتلة يمكن التحكم في التيار المار بها مع توهج الجسم المراد قياس درجة حرارته. و يوضح الشكل (٤,٢١) فكرة البيرومتر البصري [٢] حيث يتم توجيه الجهاز على الجسم المراد قياس درجة حرارته و عن طريق مجموعة عدسات و مرشحات لتركيز الاشعاع في بؤرة الجهاز يتم التحكم في التيار لتغيير توهج الفتلة و كما يظهر في الشكل اذا كانت الفتلة باردة، أو اكثر سخونة من الجسم او لها نفس درجة حرارة الجسم حيث التغيير في شدة التيار يتناسب مع درجة حرارة الجسم.

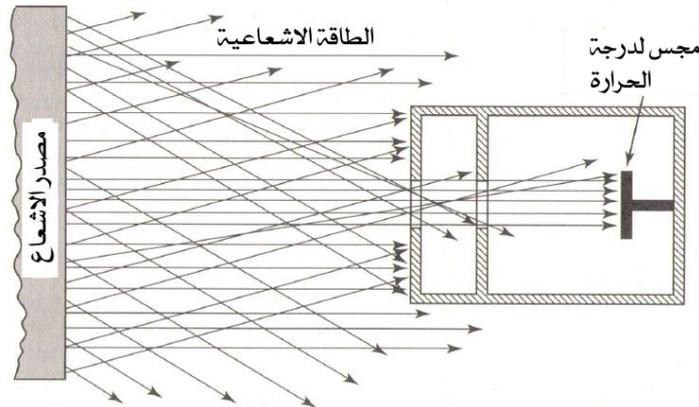


شكل (٤,٢١) البايرومتر البصري [٢]



شكل (٤,٢٢) صورة لجهاز البايرومتر البصري [١٧]

اما البيرومترات الحرارية فمبنية على اساس قياس ارتفاع درجة حرارة المجس او المستقبل (جهاز الاستشعار). و يمكن ان يكون المستقبل اي مجس لقياس درجة الحرارة مثل ثيرموبايل (Thermopile) او ثيرمستر (Thermistor) او مجس مقاومة حراري (RTD). الشكل ٤,٢٣ يوضح فكرة البايرومتر الحراري



شكل (٤,٢٣) البايرومتر الحراري [١٦]

يلزم التنويه على تأثير صحة الانبعاثية على قياس درجة حرارة الجسم باستخدام البايرومتر. فعندما يفترض أن القياس يتم لجسم معتم و افتراض أن معامل الانبعاثية بواحد تصبح الطاقة المنبعثة من الجسم هي:

$$E = \sigma T_a^4 \quad (4.52)$$

اي ان درجة الحرارة

$$T_a = \left(\frac{E}{\sigma}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (4.53)$$

و اذا كان الجسم رمادي فان الطاقة المنبعثة تساوي

$$E = \varepsilon \sigma T^4 \quad (4.54)$$

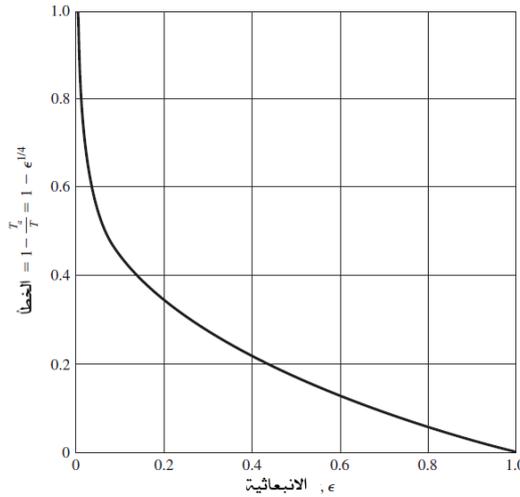
و درجة الحرارة

$$T = \left(\frac{E}{\varepsilon\sigma}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (4.55)$$

و يكن كتابة الخطأ

$$Error = \frac{T-T_a}{T} = 1 - \frac{T_a}{T} = 1 - \varepsilon^{\frac{1}{4}} \quad (4.56)$$

و يوضح الشكل ٤,٢٤ تغير هذا الخطأ مع قيمة معامل الانبعاثية [١٢]. و يتضح ان الخطأ يزيد كلما افترض ان الجسم معتم و هو غير ذلك



شكل ٤,٢٤ الخطأ في قياس درجة الحرارة نتيجة فرض ان الجسم معتم و هو غير كذلك [١٢]

في البيرومترات الفولتي تستخدم شبة الموصلات (Smiconductor) من انواع مختلفة حيث يتولد تغيير في التيار او الفولت او المقاومة نتيجة زيادة درجة حرارة المجس

ايضا هناك نوع من البايرومترات ذي اللونين لقياس درجة الحرارة حيث يتم مقارنة كمية الاشعاع عند طولي موجة باستخدام المعادلة رقم ٤,٤٤ و منها يتم تحديد درجة، و بهذه الطريقة يكون الخطأ في قيمة معامل الانبعاثية قليل التاثير على نتيجة و قياس درجة الحرارة

$$\frac{\varepsilon(\lambda_1)E_{\lambda_1}}{\varepsilon(\lambda_2)E_{\lambda_2}} = \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^5 \frac{(e^{C_2/\lambda_2 T} - 1)}{e^{C_2/\lambda_1 T} - 1} \quad (4.57)$$

على فرض انه يمكن قياس الطاقة المنبعثة عند كل موجة، و على فرض ان معامل الانبعاثية لا يتغير خلال فرق في الموجتين λ_1 و الموجة λ_2 لذلك يمكن حساب درجة الحرارة من المعادلة السابقة.

هناك نوع من البيرومترات الخاص بقياس درجات الحرارة في نطاق الاشعة تحت الحمراء و يسمى ثيرموتر الاشعة تحت الحمراء Infra-red thermometer. كما ذكرنا سابق ففي هذا النطاق يكون طول الموجة محصور بين ٠,٧ و حوالي ١٠٠ مايكرومتر.

على سبيل المثال يظهر الشكل (٤,٢٥) احد أنواع هذا النوع من البايرومترات حيث يستخدم الثيرموبايل كمجس و أقصى مسافة بين المجس و الجسم حوالي ٢ متر و هناك علاقة بين المسافة و قطر الدائرة التي يتم القياس فيها كما هو موضح بالشكل ٤,٢٥ ب، يحتوي هذا المجس على شعاع ليزر لمساعدة المستخدم في تحديد الهدف المراد قياس درجة حرارته

<p>The single dot laser system indicates the approximate center of the measurement area.</p>	
<p>شكل (٤,٢٥) العلاقة بين المسافة و قطر مساحة القياس [١٨]</p>	<p>شكل (٤,٢٥) احد انواع المجس الحراري باستخدام الاشعة تحت الحمراء [١٨]</p>

تتمتع بعض البايرومترات للأشعة تحت الحمراء بإمكانية تعديل قيمة معامل الانبعاثية الإشعاعية ϵ للجسم المشع للمادة المراد قياس درجة حرارته، و البعض لا يوفر هذه الخاصية. و يمكن حساب مقدار الشك في قيمة درجة الحرارة المقاسة بناء على درجة الشك في مقدار معامل الانبعاثية الإشعاعية بناء على نوع البايرومتر اما كلي (قياس الطاقة الكلية عند كل الطيف) او قياس الطاقة عند طول موجة معينة. في حالة البيرومتر الكلي من المفترض ان يقيس الجهاز كل الطاقة المنبعثة عند كل الطيف أي:

$$\dot{q}'' = \epsilon \sigma T^4 \quad (4.58)$$

أو

$$\epsilon = \frac{\dot{q}''}{\sigma T^4} \quad (4.59)$$

و يمكن بالتفاضل ايجاد درجة الشك في درجة الحرارة بناء على درجة الشك في معامل الانبعاثية الإشعاعية كالآتي:

$$\frac{u_T}{T} = -\frac{\left(\frac{1}{4}\right)u_\epsilon}{\epsilon} \quad (4.60)$$

و في حالة قياس طاقة الإشعاع لطول موجة معينة λ فان الطاقة المقاسة هي:

$$\dot{q}''_\lambda = \frac{\epsilon C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} \quad (4.61)$$

و بعد التفاضل و الترتيب يمكن استنتاج درجة الشك في درجة الحرارة بناء على درجة الشك في معامل الانبعاثية كالاتي على

$$\text{فرض ان } e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 = e^{\frac{C_2}{\lambda T}}$$

$$\frac{u_T}{T} = - \left(\frac{\lambda T}{C_2} \right) \frac{u_\epsilon}{\epsilon} \quad (4.62)$$

مثال ٤، ٤

احسب مقدار درجة الشك في قياس درجة الحرارة باستخدام بايرومتر كلي او بايرومتر عند طول موجة مقدارها ١ ميكرومتر، اذا كان مقدار الشك في معامل الانبعاثية الاشعاعية ٥% للدرجات الحرارة ٣٠٠، ٦٠٠، ٩٠٠، و ١٢٠٠ كلفن.

درجة الشك في قياس درجة الحرارة بناء على درجة الشك في معامل الانبعاثية الاشعاعية للنوعين المذكورين من البايرومترات معطى بالمعادلتين (٤،٥٩) و (٤،٦١)

و يلخص الجدول الاتي نتائج الرياضية

درجة الحرارة (كلفن)	درجة الشك في درجة الحرارة لبايرومتر كلي	درجة الشك في درجة الحرارة لبايرومتر عند طول موجة ١ مايكرومتر
٣٠٠	$u_T = -0.0125T$	$u_T = -3.475T^2$
٦٠٠	٣,٧٥-	٠,٣١٣-
٩٠٠	٧,٥-	١,٢٥-
١٢٠٠	١١,٢٥-	٢,٨٢-
	١٥-	٥,٠-

و يتضح من الجدول السابق ان درجة الشك في درجة الحرارة عند استخدام بايرومتر عند طول موجة واحدة افضل من بايرومتر كلي، و ذلك لطول الموجة و درجات الحرارة المعطاة.

٤، ٩ قياس درجة الحرارة باستخدام الدوائر المتكاملة او المدمجة

(IC=Integrated Circuit temperature sensors)

مع التطور الذي حصل في تصنيع أشباه الموصلات (Semiconductors) و استخداماتها المتعددة مثل الداويد (Diode) و الترانزيسترو (Transistor) و خاصية هذه المواد مع تغير درجة الحرارة، فانه أمكن إنتاج مجسات لقياس درجة الحرارة صغيرة الحجم مبني على خواص أشباه الموصلات. فمن المعلوم انه كلما زادت درجة الحرارة الداويد زادت شدة التيار. كما انه توجد دوائر مدمجة لقياس ايضا الرطوبة النسبية. و من أهم إيجابيات الدوائر المدمجة مايلي:

-صغر الحجم

-امكانية ان يكون قياس درجة الحرارة ناتج كتغير في شدة التيار او فرق الجهد

-امكانية ان يكون الناتج المتغير نتيجة درجة الحرارة اما أن يكون تناظري (Analog) أو رقمي (Digital)

-التغير في مخرج المجس خطي

و لكن يؤخذ على هذه المجسات:

-محدودية نطاق درجة الحرارة (حوالي من -٥٥ الى ١٥٠ م°)

-محدودية الاشكال للاستعمالات المختلفة

-يحتاج الى مصدر طاقة (فرق جهد)

و تستخدم هذه المجسات في الواح الكمبيوتر لقياس و التحكم في درجة الحرارة، و في وسائل الاتصالات مثل الجوال المحمول، كم يمكن استخدامها كدرجة حرارة مرجعية للازدواج الحراري [١٩-٢١]. الجدول (٤,٩) يبين بعض انواع مجسات الدوائر المدمجة التجارية، و الشكل (٤,٢٦) يبين بعض أنواعها

جدول (٤,٩) بعض أنواع مجسات الدوائر المدمجة (IC: Integrated Circuit temperature sensor) [١٩-٢١]

الشركة المصنعة	الرقم المرجعي	نوع المخرج من المجس	نطاق درجة الحرارة	صحة القياس	فرق الجهد المدخل
Analog Devices	AD590	تناظري	٥٠- الى ١٥٠ م°	±٠,٥ م°	٣٠-٤ فولت
Analog Devices	ADT7310	رقمي	٥٠- الى ١٥٠ م°	±٠,٥ م°	٥,٥-٢,٧ فولت
Microchip	MCP9700	تناظري	٤٠- الى ١٥٠ م°	١ م°	٥,٥-٢,٣ فولت
Microchip	TC72	رقمي	٥٥- الى ١٢٥ م°	٠,٥ م°	٥,٥-٢,٧ فولت
Texas Instrument	LM35	تناظري	٥٥- الى ١٥٥ م°	±٠,٥ م°	٣٠-٤ فولت
Texas Instrument	TMP101	رقمي	١٢٥ الى ٥٥-	±١ م°	٥,٥-٢,٧ فولت



شكل (٤,٢٦) بعضاً من أشكال مجسات درجة الحرارة ذات الدوائر المتكاملة [١٩-٢١]

٤,١٠ الاخطاء الشائعة عند قياس درجة الحرارة

٤,١٠,١ الخطأ في قياس درجة الحرارة لازدواج حراري نتيجة الحرارة بالتوصيل

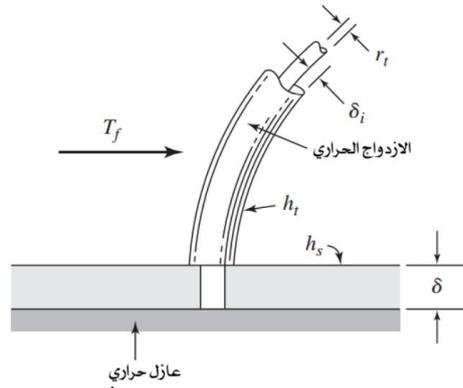
عند الرغبة في قياس درجة حرارة سطح باستخدام الازدواج الحراري كما هو موضح بالشكل (٤,٢٧) و على فرض ان سمك السطح δ و معامل توصيل الحرارة k ، و ان درجة حرارة السطح T_p و درجة حرارة المائع فوق السطح T_f و معامل انتقال الحرارة بين السطح و المائع h_s كما ان الازدواج الحراري مكون من سلكين نصف قطر احد السلكين r_t و معامل التوصيل الحراري للسلكين هما k_A و k_B و سماكة العازل حول سلك الازدواج الحراري δ_i . عندما تكون درجة حرارة السطح اكثر من درجة حرارة المائع فان الحرارة تنتقل عبر الازدواج الحراري الى المائع و العكس صحيح. درست هذه الحالة بواسطة [١٢] و يعطى الفرق بين درجة الحرارة الفعلية للسطح T_p و المقاسة T_i كما هو موضح في الشكل (٤,٢٨)

حيث

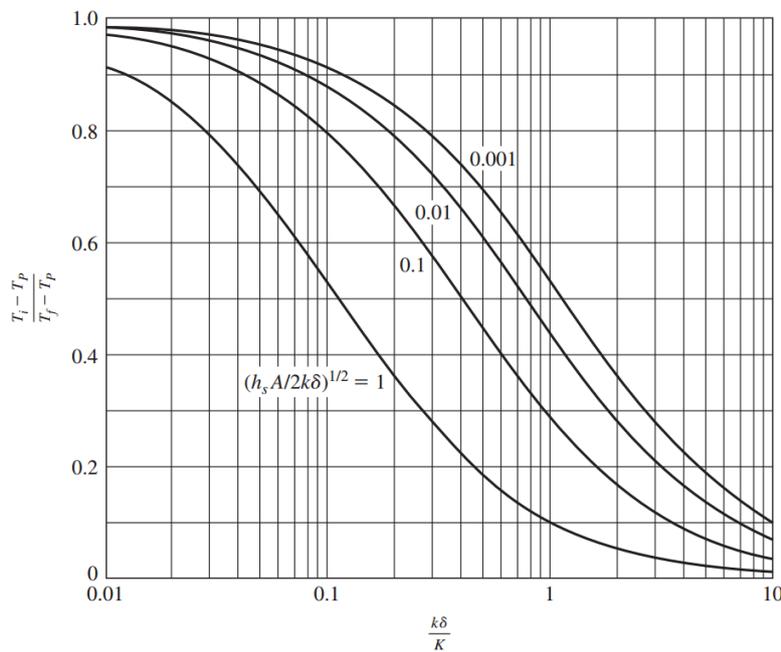
δ	سمك السطح المراد قياس درجة حرارته
δ_i	سمك العازل فوق الازدواج الحراري
r_t	نصف قطر الازدواج الحراري
k	معامل التوصيل الحراري للسطح
A	مساحة المقطع للازدواج الحراري $A = 2\pi r_t^2$
k_A	معامل التوصيل الحراري لمادة الازدواج الحراري الاول
k_B	معامل التوصيل الحراري لمادة الازدواج الحراري الثاني
h_s	معامل انتقال الحرارة بالحمل بين السطح و المائع
h_t	معامل انتقال الحرارة بالحمل بين الازدواج الحراري و المائع
T_p	درجة الحرارة الفعلية للسطح
T_f	درجة حرارة المائع
T_i	درجة حرارة السطح المقاسة بالازدواج الحراري

$$K = \frac{A(k_A^{1/2} + k_B^{1/2})\left(\frac{1}{h_t} + \frac{\delta_i}{k_i}\right)}{(2r_t)^{1/2}} \quad (4.63)$$

و عند حساب المتغير في المحور السيني و هو $k\delta/K$ و حساب المتغير $(h_s A / 2k\delta)^{1/2}$ يمكن الحصول على فرق درجات الحرارة بين القيمة المقاسة T_i و القيمة الحقيقية لدرجة حرارة السطح T_p باستخدام الشكل (٤,٢٨)



شكل (٤,٢٧) قياس درجة الحرارة لسطح بواسطة ازدواج حراري و الخطأ نتيجة التوصيل الحراري خلال الازدواج الحراري [١٢]



شكل (٤,٢٨) تقدير الخطأ نتيجة التوصيل الحراري لازدواج حراري عند قياس درجة حرارة السطح [١٢]

و في حالة ما اذا كانت مادة السطح الصلب كبيرة انظر الشكل (٤,٢٩) فان الحسابات ستكون مختلفة كما في المرجع [٢٢] مع التعريفات الاتية:

معامل انتقال الحرارة بالحمل بين الازدواج الحراري و المائع	h
نصف قطر الازدواج الحراري الفعال	r
طول جزء الازدواج الحراري	L
نصف قطر سلك الازدواج الحراري	r_w
نصف قطر العازل الحراري للازدواج الحراري	r_i
معامل التوصيل الحراري للعزل الحراري	k_i
رقم بايو (Biot) $Bi = h_s r / k$	Bi

و ينبغي التنويه على ان طول الازدواج الحراري يجب ان يكون كاف مع الفرضية أن قيمة $\tanh(\text{value})$ حول الواحد. و قد قام [١٢] بتقريب معادلة في رقم بايو (Biot). ففي هذه الحالة يتم حساب التغير في درجة الحرارة باستخدام

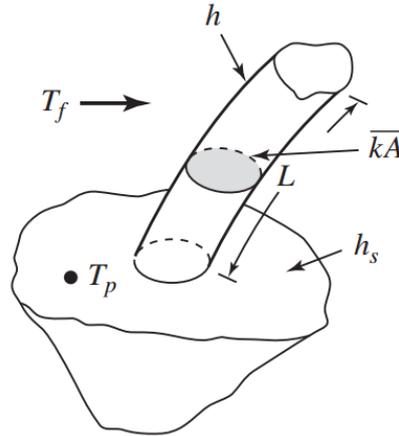
$$\frac{T_p - T_i}{T_p - T_f} = \frac{X - Bi}{X + F(Bi)} \quad (4.64)$$

حيث

$$Bi = \frac{h_s r}{k} \quad (4.65)$$

و T_i هي درجة الحرارة المقاسة بالازدواج الحراري، و r هو نصف قطر الازدواج الحراري، و المعادلة $F(Bi)$ بالتقريب من المرجع [١٢]:

$$F(Bi) = 1.27 + 1.08Bi - 0.5(Bi)^2 \quad \text{for } Bi < 1.0 \quad (4.66)$$



شكل (٤,٢٩) تقدير الخطأ في حالة استخدام الازدواج الحراري لقياس درجة حرارة سطح ذو حجم كبير [١٢]

و يمكن حساب المتغير X باستخدام

$$X = \frac{\sqrt{kA/R}}{\pi r k} \tanh(L/\sqrt{kA R}) \quad (4.67)$$

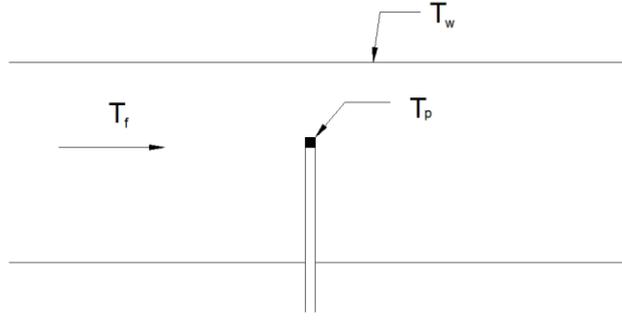
و kA هو حاصل ضرب الموصلية الحرارية في مساحة المقطع، و يتم حساب R من المعادلة الآتية:

$$R = \frac{1}{2\pi r_i h} + \frac{\ln(r_i/r_w)}{2\pi k_i} \quad (4.68)$$

و يمكن التقليل من خطأ التوصيل الحراري بجعل سلك الازدواج الحراري موازي للسطح كما ينبغي وضع عازل كهربائي بين الازدواج الحراري و السطح اذا كان السطح مصنوع من معدن.

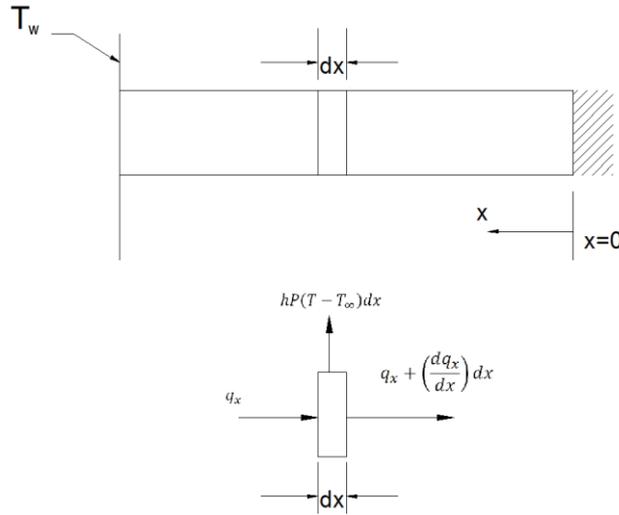
٤,١٠,٢ خطأ قياس درجة الحرارة نتيجة إنتقال الحرارة بالتوصيل في مجس

اذا كان التطبيق لقياس درجة حرارة لمائع يجري في أنبوب مثل الحالة التي يوضحها الشكل (٤,٣٠)، فإنه يجب أخذ الحيطة في التقليل من التأثير السلبي لانتقال الحرارة بالحمل و التوصيل بين مجس درجة الحرارة و المائع. اذا ما فترض أن مساحة مقطع مجس قياس درجة الحرارة ثابت و أن الحرارة يمكن أن تنتقل من أو الى المائع من المجس و من ثم الى توصيلاته الى الخارج. تنتقل الحرارة من المجس و توصيلاته الى جدار الانبوب.



شكل (٤,٣٠) قياس درجة حرارة مائع يجري داخل انبوب و الخطأ نتيجة انتقال الحرارة بالتوصيل في الازدواج الحراري ثم بالحمل [٢]

يمكن اعتبار مجس درجة الحرارة كز عنفة مثبتة على جدار و تنتقل الحرارة بالتوصيل في أطراف المجس ثم الى أو من المائع. و باعتبار أن المجس عبارة عن عامود ثابتة المقطع يمكن تحليله كز عنفة [١٥] انظر الشكل (٤,٣١)



شكل (٤,٣١) تحليل انتقال الحرارة خلال مجس حرارة بالتوصيل و الحمل كز عنفة

عند عمل اتزان حراري لقطعة صغيرة من المجس بسمك dx كما يظهر في الشكل ينتج:

$$Aq_x - \left(q_x + \left(\frac{dq_x}{dx} \right) dx \right) A - hP(T - T_{\infty}) = 0 \quad (4.69)$$

حيث A هي مساحة مقطع الز عنفة (في هذه الحالة الازدواج الحراري)، و P هو محيط الازدواج الحراري و يساوي πD اذا افترضنا ان قطر الازدواج الحراري هو D. إنتقال الحراري بالتوصيل في الازدواج الحراري من قانون فكس Fick's law [١٥]

$$q_x = -k \left(\frac{dT}{dx} \right) \quad (4.70)$$

و تعريف المتغير m كالآتي:

$$m^2 = \left(\frac{hP}{kA} \right) \quad (4.71)$$

و درجة الحرارة θ

$$\theta = T - T_{\infty} \quad (4.72)$$

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} + m^2\theta = 0 \quad (4.73)$$

و على فرض ان لا انتقال للحرارة عند الطرف الحر للزعنفة فانه يمكن كتابة الشرط الاول للمعادلة التفاضلية السابقة

$$\frac{d\theta}{dx}(x=0) = 0 \quad (4.74)$$

و ان درجة حرارة الازدواج الحراري عن تلامسه مع السطح هي نفس درجة حرارة السطح. اي ان الشرط الثاني للمعادلة التفاضلية

$$\theta(x=L) = T_w - T_\infty = \theta_w \quad (4.75)$$

يمكن حل المعادلة التفاضلية مع شرطي الحدود السابقين كالآتي:

$$\frac{\theta}{\theta_w} = \left(\frac{\cosh(mx)}{\cosh(mL)} \right) \quad (4.76)$$

المعادلة السابقة هي حل المعادلة التفاضلية و بواسطتها يمكن معرفة درجة حرارة في أي نقطة على طول الازدواج الحراري. و عند الطرف الحر (عند نقطة المجس المعرض للمائع (x=0) فانه يمكن ايجاد درجة حرارة المجس T_p

$$\frac{T_p - T_\infty}{T_w - T_\infty} = \frac{\theta_p}{\theta_w} = \frac{1}{\cosh(mL)} \quad (4.77)$$

و يعتبر المقدار $T_p - T_\infty$ هو الخطأ في قياس درجة حرارة المائع حيث ان المفروض ان دجة حرارة المائع تكون T_∞ بينما المجس يقيس T_p و لذلك يجب تقليل هذا الفرق قدر المستطاع حتى تكون قياس الازدواج الحراري أقرب لدرجة حرارة المائع.

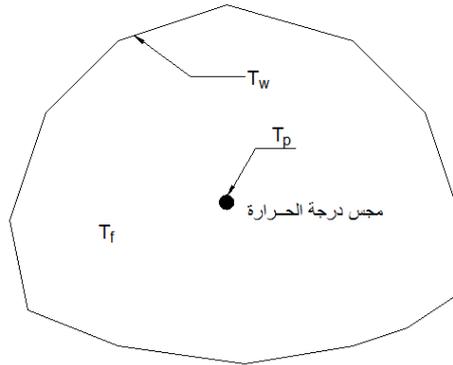
و لتقليل الخطأ نتيجة التوصيل الحراري خلال الازدواج الحراري في هذه الحالة، فان المعادلة ٤,٧٥ تقترح ان يتم تكبير المقدار $\cosh(mL)$ و ذلك بعمل الآتي اذ امكن :

- تقليل قطر الازدواج الحراري حيث ان ذلك سيؤدي الى زيادة المقدار $P/A=4/D$ الذي يتناسب بدوره مع m و الذي سيؤدي الى زيادة المقام في المعادلة ٤,٧٥ مما سيقفل الفرق $T_p - T_\infty$
- زيادة المسافة L و هي الطول بين جدار الانبوب و المجس
- عزل الجدار حراريا مما يجعل درجته قريبة من T_w او $\theta_w \rightarrow 0$

٤,١٠,٣ الخطأ في قياس درجة الحرارة نتيجة إنتقال الحرارة بالاشعاع

في هذه الحالة لتتصور أن لدينا حيز مغلق (Enclosure) و اردنا قياس درجة حرارة الغاز (او المائع) على سبيل المثال كما هو موضح في الشكل (٤,٣٢). لنفترض ان المجس له مساحة سطحية A_s ، و معامل انبعاثية اشعاعية ϵ و ان درجة حرارة المائع T_f و معامل انتقال الحرارة بالحمل بين المجس و المائع المحيط هو h ، كما ان جدار الحيز الذي يحيط تماما من كل الجوانب

بالمجس عند درجة حرارة T_w . يتعرض المجس الى نوعين من انتقال الحرارة ليحافظ على اتزانه و هما الحرارة المنتقلة من او الى المجس بواسطة الحمل و الاشعاع المتبادل بين المجس و جدار الحيز المحيط.



شكل (٤,٣٢) قياس درجة حرارة مائع و سط حيز و تأثير إنتقال الحرارة بالاشعاع

و عند الاتزان يمكن كتابة

$$hA_s(T_f - T_p) = F_G F_\epsilon \sigma (T_p^4 - T_w^4) \quad (4.78)$$

حيث F_G عامل الشكل الهندسي (Shape factor) و هو يعتمد على شكل المجس و الاجسام المحيطة (جدار الحيز) التي يراها، و F_ϵ هو معامل يعتمد على الخواص الاشعاعية للمجس و الاجسام المحيطة التي يراها. وفي حالة فرض أن المجس صغير و أنه لا يرى الا جدار الحيز (معامل الشكل الهندسي = 1) و أن جدار الحيز يمكن فرضه على أساس انه جدار معتم أو أسود (الانبعاثية = 1) في هذه الحالة يمكن كتابة المعادلة السابقة كالآتي:

$$h(T_f - T_p) = \epsilon \sigma (T_p^4 - T_w^4) \quad (4.79)$$

و اذا كانت متغيرات الحالة كمعامل إنبعاث الاشعاعي للمجس و درجات الحرارة T_f و T_w و معامل إنتقال الحرارة بالحمل بين المجس و المائع معروفة فانه يمكن حل المعادلة السابقة و ايجاد درجة حرارة المجس T_p . و مع أن المعادلة السابقة في مجهول واحد و هو T_p و لكن المعادلة غير خطية (Non linear) لذلك يمكن حلها باستخدام المحاولة و الخطأ (Trial & Error) او طريقة نيوتن رافسون (Newton's & Raphson) [٢٣]. او يمكن الاستفادة من برنامج Excel عن طريق استخدام Excel- Goal and Seek [٢٣].

وفكرة طريقة نيوتن رافسون (Newton's & Raphson) هي كتابة معادلة لدالة تساوي صفر في طرفها الايمن ثمن البدء بقيمة للمجهول ثم تعديلها مراراً الى أن يصبح طرف معادلة الدالة يساوي صفر. ففي المعادلة السابقة يتم كتابة دالة تساوي صفر في T_p كالآتي:

$$f(T_p) = \epsilon \sigma (T_p^4 - T_w^4) - h(T_f - T_p) \quad (4.80)$$

و تقاضلها الاول بالنسبة لـ T_p

$$f' = 4\epsilon \sigma T_p^3 + h \quad (4.81)$$

$$T_{p,n} = T_{p,o} - f/f' \quad (4.82)$$

حيث $T_{p,n}$ هي درجة حرارة المجس الجديدة و $T_{p,o}$ هي درجة حرارة المجس القديمة. و يمكن التقليل من خطأ انتقال الحرارة بالإشعاع باستخدام حجاب او درع واق كما هو موضح في الشكل (٤,٣٣)، حيث سنفترض ان هذا الدرع محيط تماما بالمجس و يتبادل الحرارة بالإشعاع مع جدار الحيز و مع المائع بالحمل. كما يمكن اعتبار ان الدرع محيط تماما بالمجس. في هذه الحالة يمكن عمل اتزان لانتقال الحرارة للدرع الوقي و ايجاد درجة حرارته عند الاتزان و من ثم عمل اتزان حراري للمجس و تبادل الطاقة مع الدرع و المائع لايجاد درجة حرارة المجس. اي ان

الاتزان الحراري للدرع الوقي

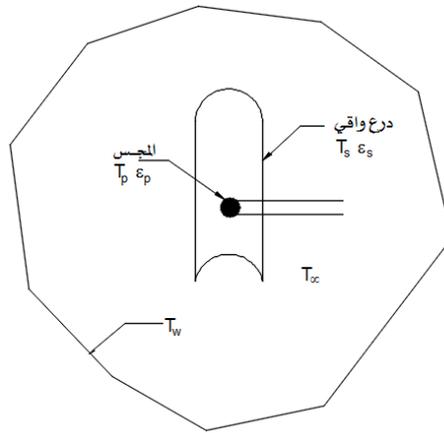
$$h(T_f - T_s) = \sigma \epsilon_s (T_s^4 - T_w^4) \quad (4.83)$$

حيث ϵ_s هي الانبعاثية الاشعاعية للدرع و درجة حرارته T_s .

الاتزان الحراري للمجس

$$h(T_f - T_p) = \sigma \epsilon_p (T_p^4 - T_s^4) \quad (4.84)$$

و يمكن حل المعادلة الاولى لاتزان الدرع لايجاد T_s و من ثم حل معادلة اتزان المجس لايجاد T_p .



شكل ٤,٣٣ استخدام درع واقى للتقليل من تأثير الإشعاع على قياس درجة الحرارة

مثال ٤,٥

افترض ان لدينا غاز عند درجة حرارة 300°C في حيز درجة حرارة جدرانه 500°C و يمكن اعتبار جدرانه معتمة. افترض ايضا ان معامل الانبعاثية للمجس الموجود داخل الحيز تساوي $0,75$ ، وان معامل انتقال الحرارة بين مجس الحرارة و الغاز 70 وات لكل متر مربع درجة حرارة. اعد حل السؤال مرة اخرى بفرضية وجود درع واق له انبعاثية اشعاعية تساوي $0,1$ باستخدام المعادلة رقم (٤,٨١) و المعادلة رقم (٤,٨٢) و استخدام Excel Goal and seek يمكن ايجاد درجة حرارة المجس

الحالة	ϵ_p	ϵ_s	T_p	T_s	error ($T_p - T_f$)
بدون درع واق	$0,75$	--	$468,9$	-	$168,9$
مع درع واق	$0,75$	$0,1$	$302,2$	$335,9$	$2,2$

و لتوضيح ذلك يمكن حل الحالة الاولى (بدون درع واق) باستخدام طريقة نيوتن و رافسون. لنفترض ان الدالة التي نريد ان يكون جانبها الايمن صفرا هي

$$f(T_p) = \epsilon \sigma (T_p^4 - T_w^4) - h(T_f - T_p)$$

بالتعويض بقيم المتغيرات و حساب قيمة f و قيمة f' و البدء بقيمة متوسطة لدرجة حرارة المجس بين درجة حرارة المائع و درجة حرارة الجدار المحيط (اي $T_p = 450^\circ\text{C}$) ينتج الجدول الاتي:

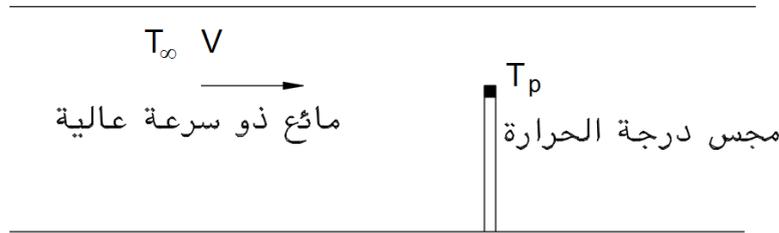
T_p [C]	T_p [K]	f	f'	f/f'
450	723	-2580.48	134.3	-19.2
469.2	742.2	50.13	139.6	0.36
468.9	741.9	0.018	139.5	0.00

هذا بالنسبة للحالة الاولى بدون درع، و لكن يمكن تكرار هذه العملية للحالة الثانية مرتين: مرة لاجاد درجة حرارة الدرع الواقى و مرة لاجاد درجة حرارة المجس.

٤,١٠,٤ الخطأ في قياس درجة الحرارة نتيجة سرعة المائع العالية

في حالة تعرض مجس قياس درجة الحرارة لغاز له سرعة عالية فانه نتيجة اصطدام الغاز بالمجس و توقف سرعته (stagnation) نتيجة احتكاكه بالمجس فان الطاقة الديناميكية للغاز تتحول الى حرارة. الشكل ٤,٣٤ يبين هذه الحالة حيث افترض ان الغاز في مقدمة الجريان ياتي بسرعة مقدارها V و درجة حرارة T_∞ ثم يصطدم بالمجس فتصبح درجة حرارة الغاز T_t نقطة سکون المائع) و ذلك على فرض ان الغاز غازا مثاليا. و من القانون الاول للديناميكا الحرارية في حالة الاستقرار بين نقطة دخول المائع ∞ و نقطة توقفه نتيجة الاصطدام يمكن كتابة

$$h_\infty + \frac{1}{2} V^2 = h_t \quad (4.85)$$



شكل ٤,٣٤ قياس درجة الحرارة لمائع ذو سرعة عالية

و لو فرضنا لحالة المثالية لسكون الغاز بالرمز t ، وأن درجة حرارة الغاز عند المدخل T_∞ فانه يمكن كتابة المعادلة السابقة

$$\frac{1}{2} V^2 = C_p (T_t - T_\infty) \quad (4.86)$$

و لذلك فان درجة حرارة المفترضة للغاز لو جلبناه لحالة السكون

$$T_t = T_\infty + \frac{1}{2} \frac{V^2}{C_p} \quad (4.87)$$

غير انه يتم تعريف معامل الاسترجاع (Recovery factor) [٢] كما يلي:

$$r = \frac{T_p - T_\infty}{\frac{1}{2} \frac{V^2}{C_p}} \quad (4.88)$$

حيث أن المعامل r يؤخذ كالاتي [٢]

$$r = 0.68 \pm 0.07 \quad (P = 95\%)$$

$$r = 0.86 \pm 0.09 \quad (P = 95\%)$$

$$r = 0.75$$

لسلك متعامد مع اتجاه سريان المائع
لسلك موازي لاتجاه سريان المائع
لازدواج حراري على شكل كورة

(4.89)

و يكتب الخطأ نتيجة سرعة الغاز العالية كالآتي:

$$e_u = T_p - T_\infty = r \frac{1}{2} \frac{V^2}{C_p} \quad (4.90)$$

و من المتوقع ان هذا الخطأ يزيد مع ازدياد سرعة الغاز أو ارتفاع سرعة المائع (الغاز) او رقم ماخ (Mach) كما يوضحه الشكل ٤,٣٥. و يعرف رقم ماخ بأنه نسبة سرعة المائع الى سرعة الصوت أي ان

$$M = \frac{V}{a} \quad (4.91)$$

حيث V هي سرعة المائع، و a هي سرعة الصوت و يمكن حسابها للغاز المثالي باستخدام

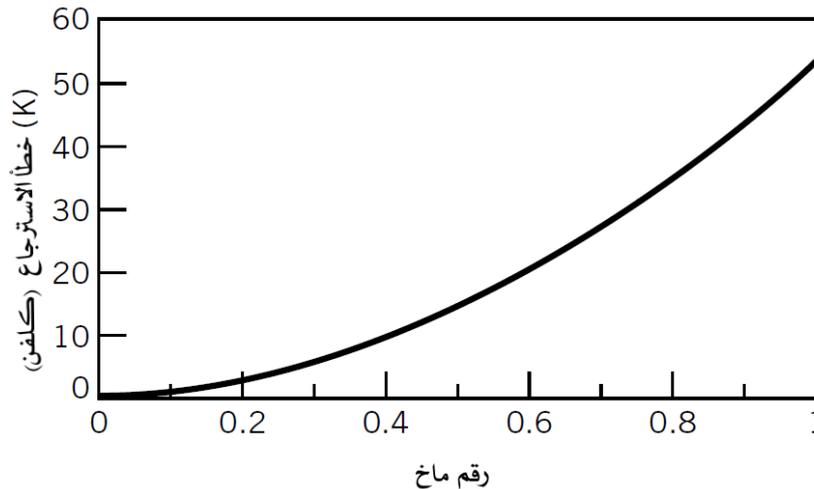
$$a = \sqrt{kRT} \quad (4.91)$$

حيث

k هو نسبة السعة الحرارية عند ثبات الضغط على السعة الحرارية عند ثبات الحجم (C_p/C_v)

R هو ثابت الغاز بوحدات جول/جرام.كلفن (و للهواء يساوي 287 J/kg.K)

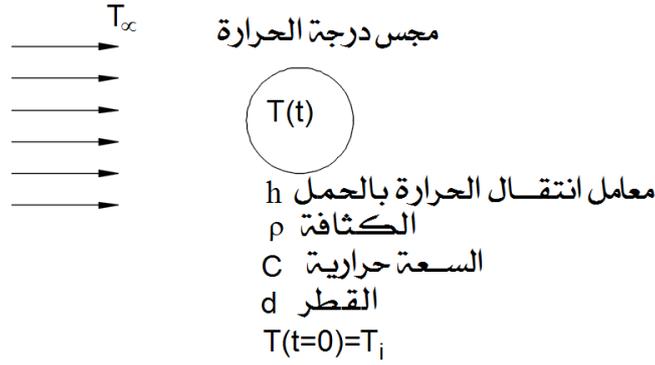
T هي درجة الحرارة بالكلفن.



شكل ٤,٣٥ خطأ الاسترجاع كدالة في رقم ماخ [٢]

٤,١١ السلوك الانتقالي (العابر) لدرجة حرارة المجس

عند وضع مجس لقياس درجة الحرارة مائع على سبيل المثال عند درجة حرارة T_∞ و على فرض ان المجس كان في البداية عند درجة حرارة اولية T_i ، انظر الشكل (٤,٣٦) يأخذ المجس وقت (الوقت الانتقالي Transient time) حتى يصل الى الدرجة الفعلية للمائع. لنتصور ان المجس مصنوع من مادة كثافتها ρ و السعة الحرارية C و ان المجس على شكل كرة قطرها d و ان معامل انتقال الحرارة بين المجس و المائع h .



شكل ٤,٣٦ تعرض مجلس عند درجة حرارة ابتدائية T_i الى بيئة عند درجة حرارة T_∞

بتطبيق قانون حفظ الطاقة (القانون الاول للثيرمودينمك) ينتج:

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} \quad (4.93)$$

$$\rho CV \left(\frac{dT}{dt} \right) = hA_s(T_\infty - T) \quad (4.94)$$

مع الشرط الابتدائي

$$T(t = 0) = T_i \quad (4.95)$$

بتعريف $\theta = T - T_i$ يمكن كتابة المعادلة السابقة كالآتي:

$$\rho CV \left(\frac{d\theta}{dt} \right) - hA_s\theta + hA_s\theta_\infty = 0 \quad (4.96)$$

و بتعريف ثابت الزمن τ

$$\tau = \frac{\rho CV}{hA_s} \quad (4.97)$$

$$\frac{d\theta}{dt} - \left(\frac{1}{\tau} \right) \theta = - \left(\frac{1}{\tau} \right) \theta_\infty \quad (4.98)$$

مع الشرط الابتدائي

$$\theta(t = 0) = T_\infty - T_i = \theta_\infty \quad (4.99)$$

و يمكن حل هذه المعادلة من الدرجة الاولى على أساس أن الحل يكون مجموع الحل المتجانس (Homogenous solution) إضافة للحل الخاص (Particular solution)

$$\theta = \theta_\infty(1 - e^{-t/\tau}) \quad (4.100)$$

و تحقق هذه المعادلة الشرط الابتدائي و هو عند الزمن صفر فان $\theta = 0$ اي ان درجة حرارة المجلس تساوي T_i و بعد فترة طويلة تصبح درجة حرارة المجلس T_∞ . و بعد مضي ثابت الزمن واحد (اي $t=\tau$) يصل الفرق في درجة حرارة بين درجة حرارة المجلس و المائع ٣٧% من الفرق بين درجة الحرارة الابتدائية و درجة حرارة المائع، و كلما زاد الزمن يقل هذا الفرق ليصبح صفرا اي عند زمن ما لانهاية تصبح درجة حرارة المجلس هي نفس درجة حرارة المائع.

مثال ٤,٦

مجس لقياس درجة الحرارة تم حساب ثابت الزمن τ ، و وجد انه يساوي ١٠ ثواني. درجة الحرارة الابتدائية للمجس هي 30°C . وضع المجس في بيئة درجة حرارتها 100°C و يتم التبادل الحراري بين المجس و البيئة حولية بالحمل. أحسب الغير الزمني في درجة حرارة المجس مع الزمن و ارسم تغير درجة حرارة المجس مع الزمن حتى ٥٠ ثانية.

الحل:

من معلومات المثال

$$T_i=30^\circ \text{C}, T_\infty=100^\circ \text{C}, \tau=10 \text{ s}$$

أو

$$\theta=T-T_i, \theta_\infty=T_\infty-T_i=100-30=70^\circ \text{C}$$

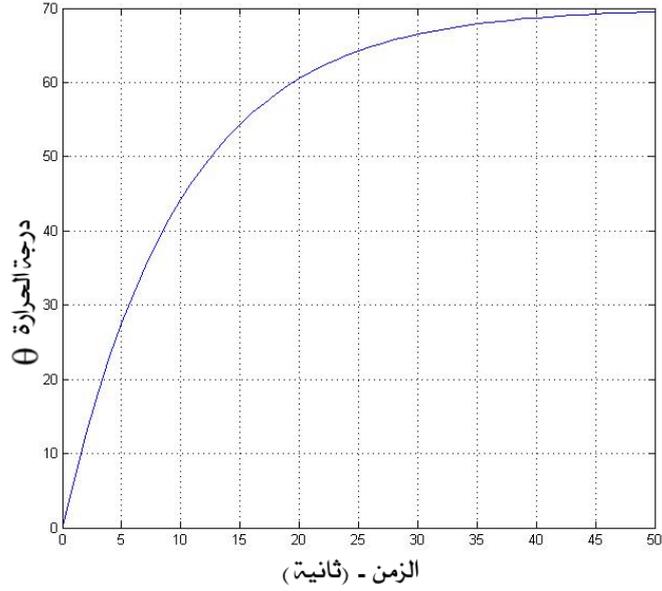
و بالتعويض في المعادلة ٤,١٠٠

$$\theta = 70(1 - e^{-t/10})$$

يبين الجدول الاتي قيم θ او T للمجس باستخدام المعادلة السابقة.

الزمن t (ثانية)	$\theta=T-T_i$	$T [^\circ \text{C}]$	الزمن (مضاعفات ثابت الزمن)	θ/θ_∞
٠	٠	٣٠	٠	٠
٥	٢٧,٥٤	٥٧,٥٤	$t=0.5\tau$	٠,٣٩
١٠	٤٤,٢٥	٧٤,٢٥	$t=\tau$	٠,٦٣
٢٠	٦٠,٥	٩٠,٥	$t=2\tau$	٠,٨٦
٣٠	٦٦,٥١	٩٦,٥١	$t=3\tau$	٠,٩٥
٤٠	٦٨,٧٢	٩٨,٧٢	$t=4\tau$	٠,٩٨
٥٠	٦٩,٩٩	٩٩,٩٩	$t=5\tau$	٠,٩٩

و يتضح من الجدول السابق أنه بعد مرور زمن مقداره واحد ثابت الزمن ($t=\tau$) فان درجة حرارة المجس تكون وصلت الى ٦٣% من قيمة درجة حرارة البيئة المحيطة، و بعد مضي ثلاثة أضعاف ثابت الزمن (اي $t=3\tau$) تكون درجة حرارة المجس قد وصلت الى ٩٥% من قيمة درجة حرارة البيئة المحيطة. و لذلك كلما كان مقدار ثابت الزمن (τ) صغير كلما كان الزمن الى أن يصل المجس لدرجة حرارة البيئة المحيطة صغير. كما تم رسم التغير في درجة حرارة المجس مع الزمن في الشكل (٤,٣٧).



شكل (٤,٣٧) تغير درجة الحرارة المجس مع الزمن

قائمة الرموز و معانيها

الرمز	المعنى
A	مساحة [م ^٢]
a,b,c	ثوابت في معادلة Steinhart للثيرمستر
a	سرعة الصوت [م/ث]
Bi	رقم بايو Biot [-]
C	السعة الحرارية [جول/(كجم. كلفن)]
E	الفولت [فولت]
E _{b,λ}	الطاقة الاشعاعية الصادرة من جسم معتم [وات/م ^٢ . مايكرومتر]
i أو I	شدة التيار [امبير]
k	معامل التوصيلية الحرارية [وات/(م. كلفن)]
h	معامل انتقال الحرارة بالحمل [وات/م ^٢ . كلفن]
M	رقم ماخ Mach [-]
m	نسبة سمك المعدن الاقل تمددا الى المعدن الاكثر تمددا
n	نسبة معامل المرونة للمعدن الاقل تمددا الى المعدن الاكثر تمددا
L	الطول [م]
q''	فيض الطاقة [وات/م ^٢]
T	درجة الحرارة [°م او كلفن]
R	المقاومة الكهربائية [اوم]
R _o	المقاومة الكهربائية المرجعية [اوم]
r	مقاومة الفتلات [اوم]، معامل الاسترجاع [-]
u	درجة الشك
V	الحجم [م ^٣]

الرمز	المعنى
α	معامل المقاومة الحرارية RTD [١/درجة مئوية]، معامل الامتصاص الاشعاعي [-]
α_1, α_2	معامل التمدد لثنائي المعدن ($\alpha_1 < \alpha_2$)
α_{AB}	معامل تأثير سيبك [فولت/م°]
β	معامل التيرمستر [كلفن ^{-١}]
δ	السلك [م]
ε	معامل الانعكاسية [-]
λ	طول الموجة [مايكرومتر]
θ	فرق درجة الحرارة [م°]
ρ	معامل الانعكاسية الاشعاعية [-]
σ	ثابت ستيفان و بولتزمان [٥,٦٧*١٠ ^{-٨} وات/كلفن ^٤]
τ	ثابت الزمن [ث]
φ	متغير في علاقة Steinhart للتيرمستر
ψ	متغير في علاقة Steinhart للتيرمستر

- 1-Thermodyanmics: An Engineering Approach, Cengel Y. A. and M. A. Boles, 7th edition, McGraw Hill, 2008.
- 2-Figliola, R. S., and D. F. Beasley, Theory and Design for Mechanical Measurements, 5th Edition, Wiely & sons, 2011.
- 3-[http://www.stanhope-seta.co.uk/3144/Precision-Liquid-in-Glass-Thermometers-\(set-of-6\)](http://www.stanhope-seta.co.uk/3144/Precision-Liquid-in-Glass-Thermometers-(set-of-6))
- 4-<http://www.thermcoproducts.com/lig-thermometers.html>
- 5-Eskin, S. G, and J. R. Fritze, Thermostatic bimetals, ASME Trans., 62 (5): 433-442, 1940.
- 6-<http://www.instrumentasi.info/2014/10/temperature-measurement-alat-ukur-suhu-bimetal-thermometer.html>
- 7-<http://www.hometips.com/how-it-works/how-thermostat-works.html>
- 8-Thermostatic bimetals designer's guide, Engineering materials solutions, http://www.emsclad.com/fileadmin/Data/Divisions/EMS/Download/Thermostatic_Bimetal_Systems.pdf
- 9-<http://senasys.com/>
- 10-http://www.wika.ro/products_en_co.WIKA?subnav=2
- 11- <http://www.kanthal.com/en/products/download-documentation/materials-in-wire-and-strip-form/thermostatic-bimetal/>
- 12-Holman, J. P, Experimental methods for engineers, 8th edition, McGraw Hill, 2012.
- 13- John S. Steinhart, Stanley R. Hart, Calibration curves for thermistors, Deep-Sea Research and Oceanographic Abstracts, Volume 15, Issue 4, August 1968, Pages 497-503
- 14-Threlkeld, James.L, Thermal Environmental Engineering, Prentice-Hall, 2nd edition, 1970.
- 15-Incropera, F. P., D. P. Dewitt, T. L. Berhman, and A. S. Lavine, Fundamentals of heat and mass transfer, 6th edition, John Wiley & Sons, 2007.
- 16-Beckwith, T. G., R.D. Maragoni, and J. H. Lienhard V, Mechaincal Measurements, 6th edition, Pearson International Edition, 2009.
- 17-<http://www.spectrodyne.com/DFP2000/>
- 18-<http://www.fluke.com/fluke/inen/products/thermometers>
- 19-<http://www.microchip.com/wwwproducts/en/en022289>
- 20-<http://www.ti.com/product/TMP101>
- 21- <http://www.analog.com/en/products/analog-to-digital-converters/integrated-special-purpose-converters/digital-temperature-sensors.html>
- 22- Hennecke, D.K, and E.M Sparrow Local heat sink on a convectively cooled surface-application to temperature measurement error, International Journal of Heat and Mass transfer, 13, pp. 287-304, (1970).
- 23 Chapra, S. C and R. P. Canale, Numerical Methods for Engineers, 6th edition, McGraw Hill, 2010.

ملخص الامثلة

			الرقم
		حساب درجة الحرارة لمجس RTD عندما تتغير مقاومته	٤,١
		حساب درجة الشك في درجة الحرارة باستخدام مجس RTD	٤,٢
		حساب درجة الحرارة لمجس ازدواج حراري	٤,٣
		مقدار درجة الشك في قياس درجة الحرارة باستخدام بايرومتر كلي او بايرومتر	٤,٤
		الخطأ نتيجة انتقال الحرارة بالاشعاع	٤,٥
		تغير درجة حرارة المجس مع الزمن	٤,٦