مذكرة محاضرات في الإشعاع الحراري

(Lecture Notes in Radiation)

إعداد

دكتور/ أسامة محمد المرضي سليمان خيال

Dr. Osama Mohammed Elmardi Suleiman Khayal

قسم الهندسة الميكانيكية

كلية الهندسة والتقنية

جامعة وادي النيل

عطبرة – السودان

فبراير 2019م

إشعاع الجسم الأسود

(Radiation)

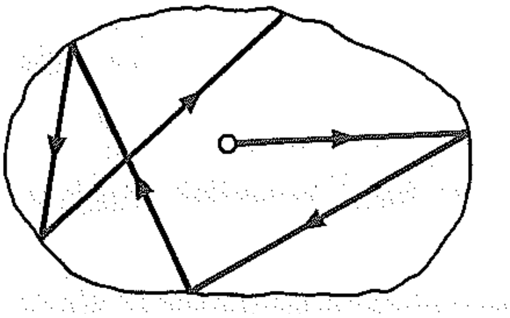
1/ إشعاع الجسم الأسود:- (Black Body Radiation)

الإشعاع الحراري يتكوَّن من موجات كهرومغناطيسية تنبعث نتيجة لإهتزاز جزيئات المادة. تكون الموجات شبيهة بموجات الضوء بحيث أنها تنتشر في خطوط مستقيمة عند سرعة الضوء و تتطلب وسيطاً للإنتشار. الإشعاع الذي يقع على جسم يمكن إمتصاصه بواسطة الجسم، إنعكاسه من الجسم، أو نقله خلال الجسم. تُسمي كسور الإشعاع الممتص والمنقول بقوة الإمتصاص (absorptivity) α، الإنعكاسية (reflectivity) ρ، والمنقولية (transmissivity) γ على الترتيب. بالتالي نحصل على، $\alpha+\rho+\gamma=1$

لمعظم المصمتات والسوائل التي تقابلنا في الهندسة يكون مقدار الإشعاع المنقول خلال المادة صغيراً بحيث يتم تجاهله، وبالتالي من الممكن كتابة المعادلة كالآتي،

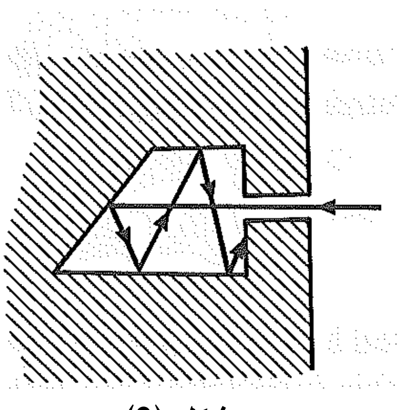
$$\alpha+\rho=1 \qquad (1)$$

الجسم المثالي الذي يمتص جميع الإشعاع الذي يقع عليه يسمَّي بالجسم الأسود (black body) لجسم أسود $\alpha = 1$، و $\rho = 0$. يجب ملاحظة أنَّ المصطلح أسود (black) في هذا النص لا يعني بالضرورة أسود إلي العين. السطح الذي يكون أسوداً للعين هو ذلك السطح الذي يمتص جميع الضوء المسقط عليه، لكن يمكن لسطح أن يمتصَّ جميع الإشعاع الحراري المسقط عليه بدون ضرورة إمتصاص جميع الضوء (.e.g الجليد هو تقريباً أسود بالنسبة للإشعاع الحراري، $\alpha = 0.985$). بالرغم من أنَّه لا يوجد عملياً جسم أسود تماماً فإنَّ العديد من الأسطح تقترب من هذا التعريف. كمثال، اعتبر جسماً صغيراً يقوم بإشعاع طاقة في فضاء واسع (large space) كما موضَّح في الشكل (1).



شكل (1)

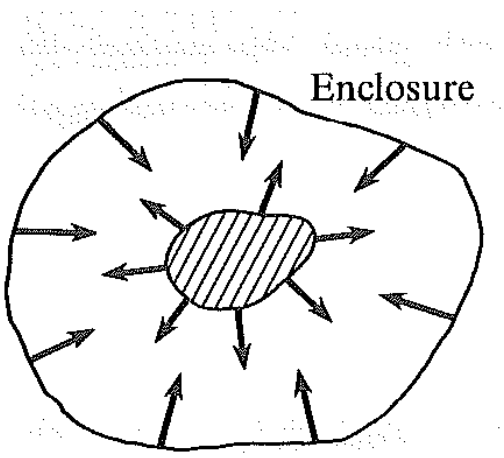
الطاقة التي تضرب السطح المحيط بالجسم يتم عكسها وإمتصاصها مرات عديدة بواسطة السطح، وكسر الطاقة المنعكس إلي الخلف والمتقاطع بالجسم يكون صغيراً جداً. عليه، عندما يُوضع جسماً في فضاءات واسعة فستعتبر هذه الفضاءات تقريباً سوداء في الإشعاع الحراري. كمثال أفضل لجسم أسود، إعتبر ثقباً صغيراً في سطح حائط أو جدار كما موضَّح في الشكل (2). يقود الثقب إلي غرفة صغيرة كما موضَّح. أشعة الإشعاع الحراري التي تدخل إلي الثقب يتم امتصاصها تباعاً بواسطة حوائط الغرفة بحيث ينبعث فقط مقدار يتم تجاهله من الإشعاع. بالتالي فإنَّ الثقب يعمل كجسم أسود.



شكل (2)

هذا هو التقريب الأقرب لجسم أسود والذي يمكن صياغته عملياً. يمكن عمل الأسطح الداخلية للغرفة من مادة ذات قوة إمتصاص عالية (e.g. lamp black).

الطاقة التي يتم إشعاعها من جسم لكل وحدة مساحة لكل وحدة زمن تُسمَّي بالقدرة الإنبعاثية (emissive power)، E. يمكن ملاحظة أنَّ الجسم الأسود بالإضافة إلي أنه الماص الأفضل المحتمل للإشعاع فهو أيضاً الباعث (emitter) الأفضل المحتمل. إعتبر حيزاً مغلقاً (enclosure) عند درجة حرارة منتظمة، وضع جسماً أسوداً في هذا الحيِّز المغلق كما موضَّح في الشكل (3). إذا كان الجسم عند نفس درجة حرارة الحيِّز المغلق يتبع ذلك أنَّ كلَّ الطاقة التي يشعها الجسم وتمتصها حوائط الحيِّز المغلق يجب أن تساوى بالضبط الطاقة التي يشعها الحيِّز المغلق ويمتصها الجسم. إذا لم يكن ذلك كذلك فإنَّ الجسم إما أن يكسب أو يفقد طاقة، وهذا ليس ممكناً في نظام معزول حسب قوانين الديناميكا الحرارية.



شكل (3)

إجعل القدرة الإنبعاثية للجسم الأسود تكون E_B. بالتالي فإنَّ المعدَّل الذي ترتطم أو تصطدم به الطاقة (impinge) على وحدة سطح من الجسم الأسود هو أيضاً E_B. الآن، إستبدل الجسم الأسود بأيِّ جسم آخر عند نفس درجة الحرارة وبنفس الشكل والمقاس. هذا الجسم يجب أن يستقبل بالضبط نفس مقدار الطاقة من الحيِّز المغلق مثلما إستقبله الجسم الأسود عندما كان في نفس الوضع في الحيِّز المغلق. على أيِّ حال، فإنَّ الجسم ليس أسوداً وبالتالي سيمتص فقط كسراً من الطاقة التي يستقبلها.

$$\text{i.e.} \quad \text{الطاقة الممتصة} = \alpha\ E_B$$

(حيث α هي قوة الإمتصاص للجسم).

الآن كما في السابق فإنَّ الطاقة الممتصَّة يجب أن تكون مساوية للطاقة المنبعثة، بالتالي إذا كان للجسم قدرة إنبعاثية E، نحصل على

$$E = \alpha\ E_B$$

$$\text{أو} \quad \alpha = \frac{E}{E_B} \qquad (2)$$

بما أنَّ $\alpha < 1$ بالتالي $E < E_B$؛ وعليه فإنَّ الجسم الأسود هو الباعث المحتمل الأفضل للإشعاع.

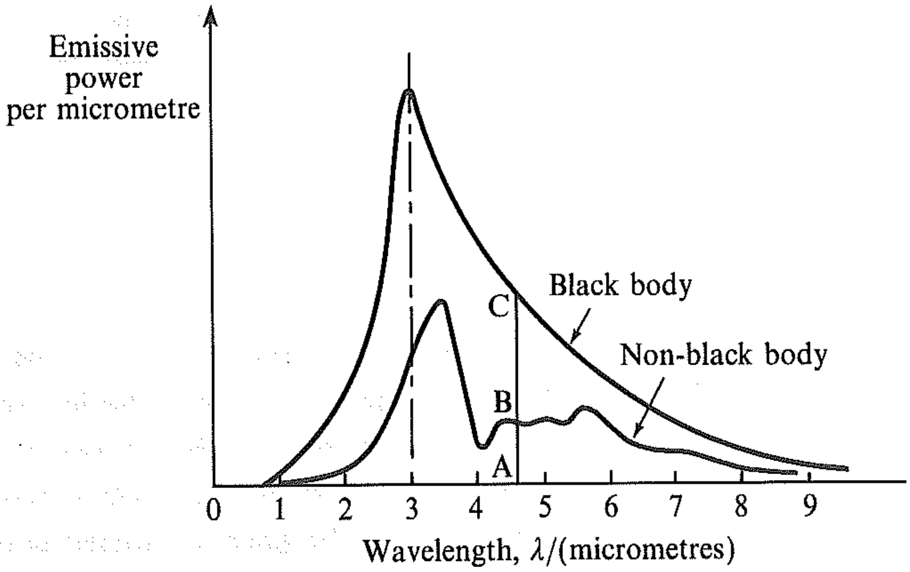
نسبة القدرة الإنبعاثية لجسم إلي القدرة الإنبعاثية لجسم أسود تُسميَّ بالإنبعاثية ε (emissivity).

من المعادلة (1) يمكن ملاحظة أنَّه عندما يكون جسمان عند نفس درجة الحرارة، بالتالي فإنَّ قوة الإمتصاص أو الإمتصاصية (absorptivity) α، تساوي الإنبعاثية ε. هذا يُعرف بقانون كيرتشوف الذي يمكن كتابته كالآتي:-

الإنبعاثية لجسم يشع طاقة عند درجة حرارة، T، تكون مساوية لإمتصاصية الجسم عندما يستقبل طاقة من مصدر عند درجة حرارة، T.

2/ الجسم الرمادي:- (The Grey Body)

في القسم (1)، تمَّ إفتراض أنَّ الطاقة المنبعثة بالإشعاع الحراري هي نفسها لجميع أطوال موجات الإشعاع. حقيقة ليست هذه هي القضية، ويوضِّح الشكل (4) القدرة الإنبعاثية لكل وحدة طول موجة يتم رسمها ضد طول موجة، λ بالمايكرومتر لجسم أسود عن أيِّ درجة حرارة.



شكل (4)

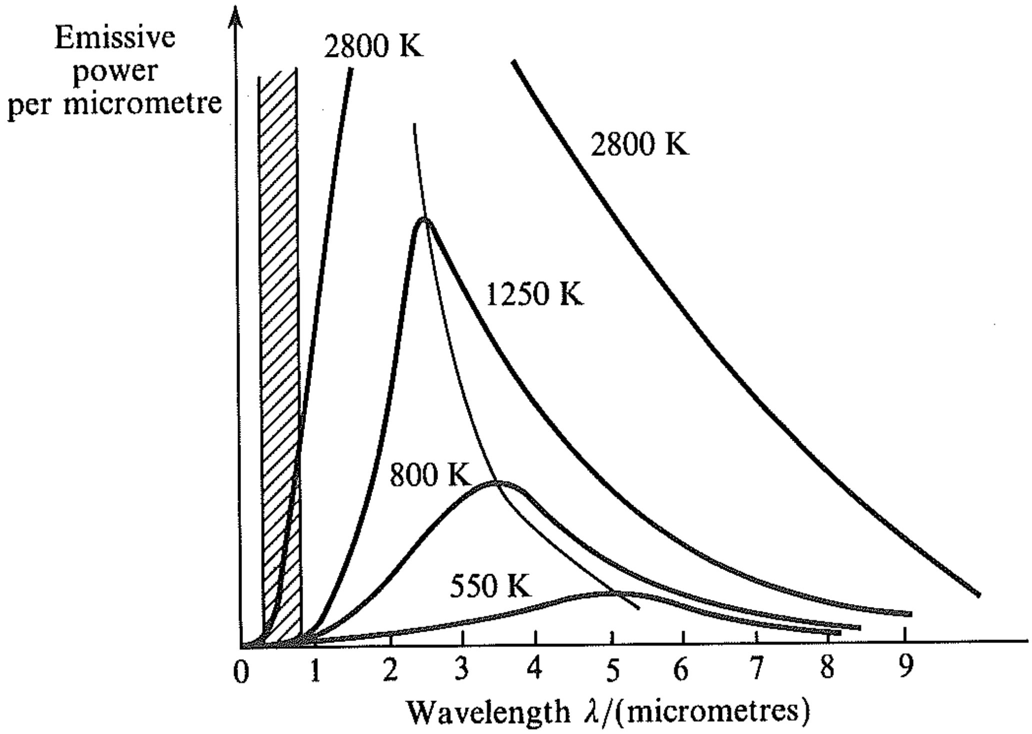
هنالك منحني مقابل عند نفس درجة الحرارة يتم توضيحه للجسم اللاأسود (non – Black Body). النسبة لإحداثي رأسي (ordinate) من كل منحني عند أيِّ طول موجة يعطي الإنبعاثية، وبالتالي الإمتصاصية عند طول الموجة تلك. كمثال، عند طول موجة مقداره 4.5 ميكروميتر، نحصل على،

$$\varepsilon_{\lambda} = \alpha_{\lambda} = \frac{AB}{AC}$$

المصطلحان (الاصطلاحان) ε_{λ} و α_{λ} يسميان بالإنبعاثية أحادية اللون والإمتصاصية أحادية اللون، على الترتيب. يمكن الملاحظة من الشكل (4) أنَّ الانبعاثية أحادية اللون تتفاوت مع طول الموجة. يكون التفاوت أكبر لبعض المواد عن ذلك للأخريات، وهنالك مواداً معينة تكون فيها الانبعاثية عملياً ثابتة على إمتداد حزمة الموجة (wave band) (e.g. slate). لتبسيط الحسابات، يتم إفتراض أنَّ الأسطح في الواقع العاملي غالباً ما تمتلك انبعاثية ثابتة عل كل أطوال الموجات ولكل درجات الحرارة. مثل هذا السطح المثالي يُسمَّي بالجسم الرمادي. بالتالي، لجسم رمادي، α

ε =عند جميع درجات الحرارة، حيث α وε هما الإمتصاصية الكلية والإنبعاثية الكلية على جميع أطوال الموجة.

هنالك حقيقة مختبرية (Experimental Fact) تقول أنَّ القدرة الإنبعاثية لجسم تزيد كلما زادت حرارة الجسم. هذه يتم توضيحها في الشكل (5) أدناه، الذي يتم فيه رسم القدرة المنبعثة لجسم أسود لكل وحدة طول موجة ضد طول الموجة بالميكروميتر لدرجات حرارة عديدة.



شكل (5)

يمكن ملاحظة أنَّ طول الموجة الذي يعطي قدرة إنبعاثية قصوى يصبح صغيراً كلما زادت درجة الحرارة، بالتالي فإن معظم الطاقة المنبعثة يتم إشعاعها على طول موجة أقصر كلما زادت درجة الحرارة. قيمة طول الموجة لقدرة إنبعاثية قصوى يتم إعطاؤها بقانون (Wien's)،

$$\lambda_{\max} = \frac{2900}{T} \qquad (3)$$

(حيث تكون λ_{max} بالميكروميتر و T بالـ K).

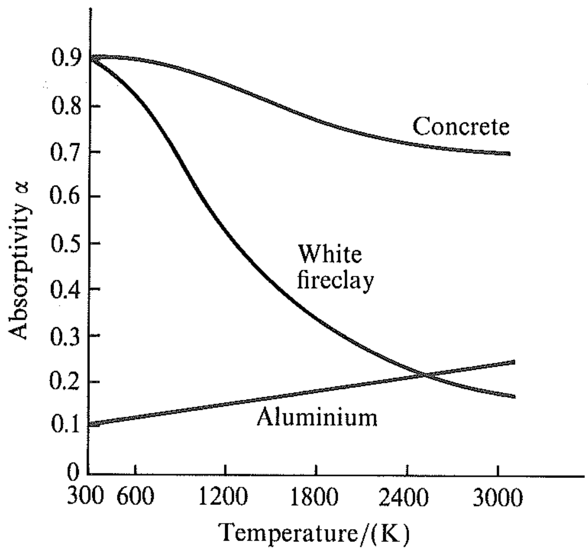
تكون حدود الطيف المرئي (visible spectrum) هي $\lambda = 0.4\mu m$ عند الأزرق Blue و $\lambda = 0.8\mu m$ عند الطرف الأحمر. للشمس درجة حرارة مقدارها 6000K تقريباً، بالتالي مستخدماً المعادلة (3)، يكون طول الموجة الأقصى للإشعاع هو ،

$$\lambda_{\max} = \frac{2900}{6000} = \underline{0.483}\,\mu m$$

عليه، يكون معظم الإشعاع الحراري من الشمس في حزمة الموجة المرئية (visible wave band). يتم توضيح حزمة الموجة للضوء مظلَّلة في الشكل (5). عند درجة حرارة مقدارها 800K يكون هنالك مقدار ضئيل جداً من الطاقة المنبعثة بالكاد في حدود الطرف الأحمر للطيف المرئي. سيظهر السطح عند 800K بلون أحمر داكن (dull red color). عند حوالي 1250K تكون معظم الطاقة المنبعثة في المدي المرئي ويكون السطح عندئذٍ أحمر ساخن (red – hot). تكون درجة حرارة فتيلة السلك الحراري (filament) للمبة إضاءة كهربية هي تقريباً 2800K، وحتي عند درجة الحرارة هذه يكون هنالك حوالي 10% من الطاقة المنبعثة في المنطقة المرئية، التي توضِّح عدم كفاءة هذا اللمبة كمصدر إضاءة.

لجسم رمادي هنالك مجموعة من المنحنيات بالضبط مشابهة لتلك في الشكل (5)، يمكن رسمها، مع كل إحداثي رأسي هنالك كسراً ε من الإحداثي الرأسي المقابل للمنحنيات في الشكل (5). عملياً، بالرغم من أنه يمكن أخذ قيمة كلية مناسبة للامتصاصية لعدد كبير من الأسطح الصناعية على مدي واسع من أطوال الموجة، بالرغم من ذلك يكون هنالك تفاوتاً للامتصاصية الكلية مع درجة الحرارة. هذه يتم توضيحها في الشكل (6). عندما يكون مدى درجة الحرارة صغيراً فإنَّ التقريب الذي يقول أنَّ α=ε=constant، لجسم رمادي ما يزال مضبوطاً بكفاية لمعظم الحسابات.

المواد أو الأسطح التي تتفاوت فيها الانبعاثية كثيراً وبعدم إنتظام مع أطوال الموجة ودرجة الحرارة تُسمَّي بالباعثات المنتخبة (selective emitters).



شكل (6)

بعض قيم الانبعاثية الكلية على جميع أطوال الموجة لكن لدرجات حرارة مختلفة يتم توضيحها في الجدول (1). يلعب التشطيب السطحي النهائي (surface finish) دوراً أو جزءاً كبيراً في تحديد إنبعاثية المادة. عندما يكون السطح ناعماً جداً فإنَّه يقوم بعكس الإشعاع بتركيز (specularly)؛ وعندما يكون السطح خشناً كما في معظم الحالات العملية، فإنه يعكس الإشعاع بتشتيت (diffusely). السطوح الخشنة هي ممتصات أفضل وبالتالي باعثات أفضل (better emitters) للإشعاع من الأسطح الناعمة. للفولاذ الطري (mild steel)، تكون الإنبعاثية ε للخراطة الخشنة عند 15°C هي 0.87؛ وللفولاذ الطري تكون الانبعاثية ε للخراطة ذات التشطيب الجيد على مخرطة عند 15°C هي 0.39؛ ويمكن الملاحظة من الجدول (1) أنَّه عندما يتم تلميع الفولاذ جيِّداً فإنَّ الانبعاثية ε، يتم تخفيضها إلي 0.07.

جدول (1)

Surface	Emissivity 0–40 °C	120 °C	260 °C	540 °C
White paint	0.95	0.94	0.88	0.70
Black glossy paint	0.95	0.94	0.90	0.85
Lampblack	0.97	0.97	0.97	0.97
Building brick	0.93	0.93	0.79	0.74
Concrete	0.85	0.84	0.69	0.69
Polished steel	0.07	0.09	0.11	0.14

3/ قانون ستيفان – بولتزمان:- (The Stefan – Boltzmann Law)

لقد وُجِد مختبرياً بواسطة ستيفان وبُرهن نظرياً بواسطة بولتزمان أن القدرة الانبعاثية لجسم أسود تكون متناسبة طرداً مع الأس الرابع لدرجة حرارته المطلقة، وهذا يعرف بقانون ستيفان – بولتزمان،

$$E_B = \sigma T^4 \qquad (4)$$

(قيمة σ هي $5.67\times10^{-8} W/m^2 (K)^4$)

بالتالي يتم إعطاء الطاقة المنبعثة بجسم لا أسود بالمعادلة،

i.e. $$E_B = \varepsilon \sigma T^4 \qquad (5)$$

(حيث ε هي الانبعاثية للجسم).

إعتبر جسماً 1 بإنبعاثية ε_1 عند درجة حرارة T_1 يتم إحاطته تماماً بمحيط أسود عند درجة حرارة أقل T_2. الطاقة المغادرة للجسم 1 يتم إمتصاصها كلياً بالمحيط، ومن المعادلة (5)،

الطاقة المنبعثة $= \varepsilon_1 \sigma T_1^4$

الطاقة المنبعثة بالمحيط الأسود يتم إعطاؤها بالمعادلة (4)،

الآن فإن كسر هذه الطاقة الذي يُمتص بالجسم 1 يعتمد على امتصاصية الجسم 1. لجسم رمادي $\alpha = \varepsilon$ عند جميع درجات الحرارة وبالتالي،

$$\text{الطاقة الممتصة} = \varepsilon\ \sigma T_2^4 = \alpha\ \sigma T_2^4$$

بالتالي فإنَّ الطاقة المنتقلة من الجسم إلي محيط لكل m^2 من الجسم هي،

$$q = \varepsilon\,\sigma T_1^4 - \varepsilon\,\sigma T_2^4$$

$$\text{i.e.} \qquad q = \varepsilon\,\sigma\left(T_1^4 - T_2^4\right) \qquad (6)$$

إذا كانت الانبعاثية للجسم عند T_1 متفاوتة كثيراً عن الانبعاثية للجسم عند T_2 بالتالي فإنَّ التقريب لجسم رمادي يمكن الاَّ يكون مضبوطاً بكفاية. في تلك الحالة من التقريب الجيِّد أخذ الامتصاصية للجسم 1 عندما يستقبل إشعاعاً من مصدر عند T_2 كمساوٍ للانبعاثية للجسم 1 عندما تبعث إشعاعاً عند T_2.

بالتالي،

$$q = \varepsilon_{T_1}\ \sigma T_1^4 - \varepsilon_{T_2}\ \sigma T_2^4 \qquad (7)$$

بينما تعتمد الامتصاصية أساسياً على درجة حرارة مصدر الإشعاع، فإنها أيضاً تعتمد على درجة حرارة السطح نفسه. لمعظم المعادن هذا العامل يمكن أن يكون هاماً. ويتم توضيح أنَّ الامتصاصية لسطح معدن عند T_1 للإشعاع من مصدر عند T_2 هو تقريباً مساوٍ لانبعاثية السطح عندما يكون عند درجة حرارة T_3، التي تُعطي بـ،

$$T_3 = \sqrt{T_1 T_2} \qquad (8)$$

مثال (1):-

جسم عند درجة حرارة 1100°C في محيط أسود عند 550°C لديه إنبعاثية مقدارها 0.4 عند 1100°C وإنبعاثية مقدارها 0.7 عند 550°C. أحسب معدّل فقد الحرارة بالإشعاع لكل m^2:−

(a) عندما يُفترض أن يكون الجسم رمادياً بـ ε = 0.4.

(b) عندما لا يكون الجسم رمادياً.

إفترض أنَّ الامتصاصية تكون مستقلة عن درجة حرارة السطح.

الحل:

(a) مستخدماً المعادلة (6)،

$$q = \varepsilon\sigma\left(T_1^4 - T_2^4\right) = 0.4 \times \frac{5.67}{10^8}\left(13.73^4 - 8.23^4\right)$$

(حيث $T_1 = 1100+273=1373K$، و $T_2=550+273=823K$).

i.e. $q = \varepsilon\sigma\left(T_1^4 - T_2^4\right) = 0.4 \times 5.67\left(13.73^4 - 8.23^4\right) = 0.4 \times 5.67 \times 30960$

i.e. فقد الحرارة بالإشعاع لكل m^2 $= 70220N = \underline{\underline{70.22}}kN$

(b) عندما لا يكون الجسم رمادياً، بالتالي،

الامتصاصية عندما يكون المصدر 550°C = الانبعاثية عندما يكون المصدر550°C.

i.e. α = 0.7

الطاقة المنبعثة (Energy emitted) $= \varepsilon\sigma T_1^4 = 0.4 \times \frac{5.67}{10^8} \times 1373^4$

الطاقة الممتصة $= \alpha\sigma T_2^4 = 0.7 \times \frac{5.67}{10^8} \times 823^4$

i.e $q = 0.4 \times 5.67 \times 1373^4 - 0.7 \times 5.67 \times 8.23^4$

i.e. $= 80630 - 18210 = 62420W$

i.e. $\qquad$ فقد الحرارة بالإشعاع لكل m^2 $= \underline{62.42} kW$

يمكن ملاحظة أنَّ فرضية الجسم الرمادي للجزء (a) تزيد التقديرات (overestimate) بمقدار،

$$\left(\frac{70.22-62.42}{62.42}\right)\times 100\% = \underline{12.49}\%$$

مثال(2):-

أحسب معدَّل فقد الحرارة لكل m^2 بالإشعاع من جسم عند 1100°C في محيط أسود عند 40°C، عندما تكون الانبعاثية عند 40°C هي 0.9، و الانبعاثية عند1100°C هي كما في المثال (1):-

(a) عندما يكون الجسم رمادياً بـ ε = 0.4،

(b) عندما لا يكون الجسم رمادياً.

إفترض أنَّ الإمتصاصية تكون مستقلة عن درجة حرارة السطح.

الحل:

(a) كما في المثال (1)،

$$q = \varepsilon\,\sigma\left(T_1^4 - T_2^4\right) = 0.4\times 5.67\left(13.73^4 - 3.13^4\right)$$

i.e. $\qquad q = 0.4\times 5.67\times 35454 = \underline{80410} W$

i.e. $\qquad$ فقد الحرارة بالإشعاع لكل m^2 $= \underline{80.41} kW$

(b) كما في المثال (1)،

الطاقة المنبعثة $= 0.4\times 5.67\times 13.73^4 = \underline{80630} W/m^2$

الطاقة الممتصة $= 0.9\times 5.67\times 3.13^4 = \underline{489.6} W/m^2$

i.e. $\qquad q = (80630 - 490) = \underline{80140} W$

i.e. $\qquad$ مقدار الحرارة بالإشعاع لكل m^2 $= \underline{80.14} kW$

بالتالي فرضية الجسم الرمادي تزيد التقديرات بمقدار،

$$\left(\frac{80.41-80.14}{80.14}\right)\times 100\% = \underline{0.337}\%$$

يمكن الملاحظة من المثالين (1) و(2) أنَّ فرضية الجسم الرمادي تُعطي تقريب مضبوط جداً عندما تكون إحدى درجات الحرارة صغيرة مقارنة بالأخرى. تعطي هذه الفرضية أيضاً تقريباً مضبوطاً جداً عندما تكون كلا درجتي الحرارة صغيرتان.

4/ قانون لامبيرت والعامل الهندسي:-

(Lambert's Law and the Geometric Factor)

معظم الأسطح لا تبعث إشعاعاً بقوة في جميع الاتجاهات؛ يكون الجزء الأكبر من الطاقة المنبعثة في اتجاه متعامد مع السطح. قبل اعتبار تبادل الطاقة بين جسمين يستقبلان فقط جزء من الإشعاع المنبعث من بعضهما البعض، من الضروري إكتشاف كيف يتم توزيع الإشعاع في الاتجاهات المختلفة من السطحين. من أجل عمل هذا يجب تعريف شدة الإشعاع i، (intensity of radiation). معدَّل إنبعاث الطاقة من وحدة مساحة سطح خلال وحدة زاوية مصمتة على مستوي متعامد مع السطح يُسمي بشدة الإشعاع المتعامد (intensity of normal radiation) i_N. شدة الإشعاع في أيَّ إتجاه آخر عند أي زاوية ϕ مع المستوي المتعامد يتم ترميزه بـ i_ϕ. (ملحوظة: السطح الذي يقابل زاوية مصمتة عند نقطة تبعد r من جميع النقاط على السطح تكون مساوية لمساحة السطح مقسومة على r^2. مساحة سطح الكرة هي $4\pi r^2$ وبالتالي فإنَّ الزاوية المصمتة التي يقابلها سطح الكرة في منتصفه هي 4π).

يتم إعطاء التفاوت في شدة الإشعاع بقانون جيب التمام للامبرت (Lambert's Cosine Law)،

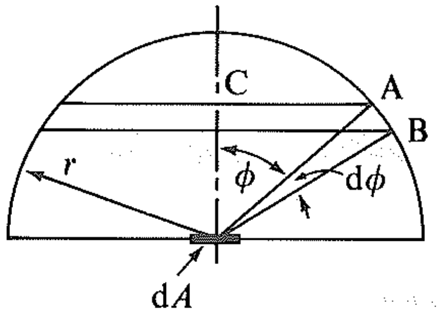
$$i_\phi = i_N \cos\phi \qquad (9)$$

الطاقة المنبعثة من سطح مساحته dA يتم بالتالي إعطاؤها بـ ،

$$\int i_\phi \, dw \, dA$$

(حيث dw هي زاوية مصمتة صغيرة).

اعتبر مساحة صغيرة dA، واعتبر الإشعاع من dA الذي يمر خلال عنصر صغير من مساحة سطح نصف كروي بـ dA عند مركزه، كما موضَّح في الشكل (7).



شكل (7)

يقابل العنصر (subtends) زاوية ϕ عند مركز نصف الكرة والزيادة الصغيرة في الزاوية على عرض العنصر هي بالتالي dϕ. عرض العنصر هو طول القوس (arc) للزاوية dϕ، ونصف القطر r (i.e. AB في الشكل (7)). بالتالي،

$$\text{AB ،عرض العنصر} = r\,d\phi$$

نصف قطر العنصر هو $CA = r\sin\phi$. بالتالي مساحة سطح العنصر يتم إعطاؤها بـ،

(المحيط × العرض) = مساحة السطح

$$= r\,d\phi \times 2\pi\, r \sin\phi$$

i.e. dA الزاوية المصمتة dw المقابلة عند $= \dfrac{2\pi r^2 \sin\phi \, d\phi}{r^2}$

i.e. $$dw = 2\pi \sin\phi \, d\phi$$

بالتالي فإن الطاقة الكلية المنبعثة من dA يتم إعطاؤها بـ ،

$$E\,dA = \int_0^{\pi/2} i_\phi dw\, dA = \int_0^{\pi/2} dA i_\phi 2\pi \sin\phi\, d\phi$$

بالتعويض من المعادلة (9)،

بالتالي، $$i_\phi = i_N \cos\phi$$

$$E\,dA = 2\pi dA i_N \int_0^{\pi/2} \cos\phi \sin\phi\, d\phi$$

أو $$E\,dA = 2\pi dA i_N \int_0^{\pi/2} \frac{\sin\phi}{2} d\phi = \pi i_N dA$$

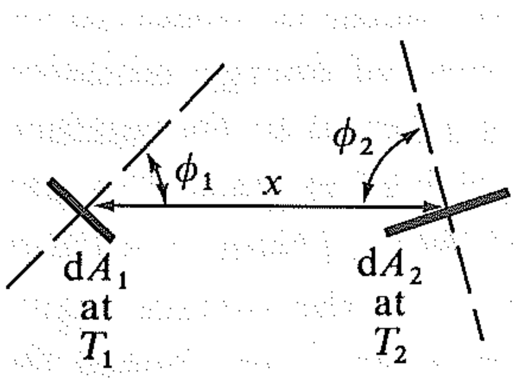
الآن من المعادلة (5)، $$E = \varepsilon\sigma T^4$$

بالتالي،

$$\varepsilon\sigma T^4\, dA = \pi i_N dA$$

i.e. $$i_N = \frac{\varepsilon \sigma T^4}{\pi} \qquad (10)$$

اعتبر جسمان أسودان صغيران بمساحة dA_1 وdA_2 عند درجات حرارة T_1 وT_2 وعلى بعد x من بعضهما البعض. تكون زوايا الميل للأسطح هي كما موضَّحة في الشكل (8) أدناه.



شكل (8)

هذه هي حالة لا يستقبل فيها الجسمان جميع الطاقة من بعضهما. إجعل السطح dA_2 يقابل زاوية مصمتة dw_1 عند مركز السطح dA_1 بالتالي نحصل على،

$$\text{الطاقة المبعوثة بواسطة } dA_1 \text{ والمُستقبلة بواسطة } dA_2 = i_{N_1} \cos\phi_1 dw_1 dA_1$$

من المعادلة (10)، $i_N = \sigma T^4/\pi$ لسطح أسود، عليه،

$$\text{الطاقة المستقبلة بواسطة } dA_2 = \frac{\cos\phi_1 dw_1 dA_1 \sigma T_1^4}{\pi}$$

أيضاً من تعريف الزاوية المصمتة،

$$dw_1 = \frac{dA_2 \cos\phi_2}{x^2}$$

بالتالي،

$$\text{الطاقة المستقبلة بـ } dA_2 = \frac{\cos\phi_1 \cos\phi_2 dA_1 dA_2 \sigma T_1^4}{\pi x^2}$$

الآن، فإنَّ الطاقة المنبعثة بواسطة dA_1 هي $\sigma dA_1 T_1^4$. نسبة الطاقة المستقبلة بواسطة الجسم الثاني إلي الطاقة المنبعثة بالجسم الأوَّل تُسمَّي بالعامل الهندسي، F_{1-2}،

$$F_{1-2} = \frac{\cos\phi_1 \cos\phi_2 dA_1 dA_2 \sigma T_1^4}{\pi x^2 \sigma dA_1 T_1^4}$$

$$\therefore F_{1-2} = \frac{\cos\phi_1 \cos\phi_2 dA_2}{\pi x^2} \qquad (11)$$

بنفس الطريقة يمكن توضيح أنَّ العامل الهندسي للإشعاع من السطح 2 إلي السطح 1 يُعطي بـ،

$$F_{2-1} = \frac{\cos\phi_1 \cos\phi_2 dA_1}{\pi x^2}$$

صافي تبادل الطاقة بين الأسطح يُعطي بـ ،

$$dQ_{1-2} = \frac{\cos\phi_1 \cos\phi_2 dA_1 dA_2}{\pi x^2}\left(T_1^4 - T_2^4\right)$$

هذه يمكن كتابتها كالآتي،

$$dQ_{1-2} = F_{1-2} dA_1 \sigma\left(T_1^4 - T_2^4\right)$$

أو $$dQ_{1-2} = F_{2-1} dA_2 \sigma\left(T_1^4 - T_2^4\right)$$

العوامل الهندسية (Geometric Factors) F_{1-2} و F_{2-1} يمكن إيجادها بتكامل مزدوج من المعادلة (11) والمعادلة (12). هذا يمكن عمله تحليلاً أو بيانياً (Analytically or graphically). لمساحة أكبر مكوَّنة من مساحات سطح صغيرة dA_1 وdA_2، يمكن تعريف متوسط العوامل الهندسية بنفس الطريقة كما في عاليه،

i.e. $$Q_{1-2} = F_{1-2} A_1 \sigma\left(T_1^4 - T_2^4\right) \qquad (13)$$

$$Q_{1-2} = F_{2-1} A_2 \sigma\left(T_1^4 - T_2^4\right) \qquad (14)$$

من المعادلات (13) و(14) يمكن توضيح أنَّ:–

$$A_1 F_{1-2} = A_2 F_{2-1} \qquad (15)$$

هذا يعرف بالعلاقة المقلوبة (reciprocal relationship) أو نظرية التقالب (theorem of reciprocity).

عملياً يمكن أن يكون حساب F طويلاً وصعباً (شاقاً) باستثناء الأشكال البسيطة.

عندما يكون هنالك جسماً 1 محاطاً بأسطح أخرى، بالتالي،

$$F_{1-surface} = 1$$

إذا كانت للأسطح عناصر منفصلة، 2، 3، .etc، يتبع ذلك،

$$F_{1-surface} = F_{1-1} + F_{1-2} + F_{1-3} ...etc. = 1 \qquad (16)$$

العنصر F_{1-1} يكون ضرورياً في الحالات التي يمكن فيها للجسم 1 رؤية أجزاء منه .e.g جسم مقعَّر (concave body).

في الجدول (2) يتم إعطاء قيَّم للعامل الهندسي F_{1-2} لبعض الأشكال العامة.

جدول (2)

Configuration	Geometric factor, F_{1-2}
(a) Body 1 complete enclosed by body 2	1
(b) Parallel circular discs, radii r_1 and r_2, distance x apart on a common-axis	$\dfrac{(x^2 + r_1^2 + r_2^2) - \sqrt{\{(x_1^2 + r_1^2 + r_2^2)^2 - 4r_1^2 r_2^2\}}}{2r_1^2}$
(c) Small disc opposite a parallel circular plate of radius R at a perpendicular distance L	$\dfrac{R^2}{R^2 + L^2}$
(d) Small sphere opposite a circular plate of radius R at a perpendicular distance L	$\dfrac{1}{2}\left\{1 - \dfrac{L}{\sqrt{(L^2 + R^2)}}\right\}$
(e) Small sphere at the centre of the axis of a cylinder of radius R and length $2L$	$\dfrac{L}{\sqrt{(L^2 + R^2)}}$

مثال (3):-

تجويف نصف كروي (a hemispherical cavity) بنصف قطر 0.6m يتم تغطيته بلوح بثقب مقداره 0.2m مثقوب في منتصفه. يتم إعداد السطح الداخلي للوح عند 250°C بواسطة سخَّان مزروع في السطح (embedded in the surface). يمكن إفتراض أنَّ الأسطح تكون سوداء ونصف الكرة معزول جيِّداً. أحسب:-

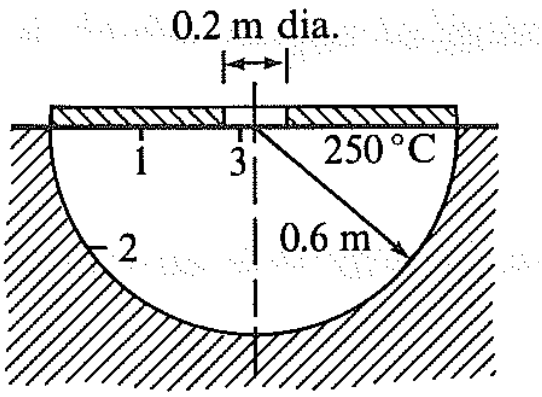
(a) درجة حرارة سطح نصف الكرة؛

(b) الحرارة المدخلة إلي السخَّان.

أذكر أيَّ افتراض يتم عمله.

الحل:-

بالرجوع للشكل (9) أدناه، إجعل السطح الداخلي للوح يكون 1، سطح نصف الكرة 2، وسطح الثقب المسقط 3، كما موضَّح.



شكل (9)

بالتالي، بما أنَّ السطح 1 يكون محاطاً تماماً، نحصل على،

$$F_{1-2}+F_{1-3}=1$$

(بما أنَّ السطح 1 لا يستطيع رؤية السطح 3) $F_{1-2}=1$

من المعادلة (15)،

$$F_{2-1}=\frac{A_1F_{1-2}}{A_2}=\frac{\pi\left(0.6^2-0.1^2\right)\times 1}{2\pi\times 0.6^2}=\frac{35}{72}$$

نفس الشيء،

$F_{3-2}=1$ و $A_2F_{2-3}=A_3F_{3-2}$

$$\therefore F_{2-3}=\frac{\pi\times 0.1^2\times 1}{2\pi\times 0.6^2}=\frac{1}{72}$$

بالتالي،

الطاقة المغادرة للسطح 2 $=A_2F_{2-3}\sigma T_2^4+A_2F_{2-1}\sigma T_2^4$

$$= A_2 \sigma T_2^4 \left(\frac{1}{72} + \frac{35}{72} \right) = A_2 \sigma T_2^4 \times 0.5$$

الطاقة الواقعة على السطح 2 يمكن أخذها كالطاقة المغادرة للسطح 1، بما أنَّ الطاقة الداخلة إلي الثقب من الخارج سيتم تجاهلها إذا كان المحيط كبيراً وعند درجة حرارة عادية.

i.e. الطاقة الواقعة على السطح 2 $= A_1 F_{1-2} \sigma T_1^4 = A_1 \sigma T_1^4$

بالتالي، للحالة المستقرة،

$$A_1 \sigma T_1^4 = A_2 \sigma T_2^4 \times 0.5$$

$$\text{i.e.} \quad T_2^4 = \frac{T_1^4 \times 2 \times \pi \left(0.6^2 - 0.1^2\right)}{2\pi \times 0.6^2} = T_1^4 \times \frac{35}{36}$$

$$T_2 = (250 + 273) \times \left(\frac{35}{36} \right)^{1/4} = \underline{519.3} K = \underline{246.3} °C$$

(b) الحرارة التي يتم إمدادها بالسخَّان،

$$= A_1 F_{1-2} \sigma \left(T_1^4 - T_2^4\right)$$

$$= \pi \times \left(0.6^2 - 0.1^2\right) \times \frac{5.67}{10^8} \times 523^4 \left(1 - \frac{35}{36}\right) = \underline{129.6} W$$

5/ التبادل الإشعاعي أو المشع بين الأجسام الرمادية:-

(Radiant Interchange Between Grey Bodies)

الإشعاعية (radiosity) (J) يتم تعريفها بالطاقة المشعَّة الكلية المغادرة لجسم لكل وحدة مساحة لكل وحدة زمن.

اللاإشعاعية (irradiation) (G) يتم تعريفها بالطاقة المشعَّة الكلية الواقعة على جسم لكل وحدة مساحة لكل وحدة زمن.

بالتالي، صافي إنتقال الحرارة من جسم،

$$Q=(J-G)A$$

(حيث A هي مساحة سطح الجسم).

لجسم أسود، من المعادلة (4)،

$$J=\sigma T^{4}$$

لجسم رمادي، فإنَّ الإشعاعية (radiosity) يجب أن تتضمَّن كسر الطاقة الذي يتم إنعكاسه من السطح.

$$\text{i.e.} \qquad J=\varepsilon\sigma T^{4}+\rho G$$

أيضاً لجسم رمادي، $\varepsilon=\alpha=1-\rho$، متجاهلاً المنقولية (transmissivity) (أنظر المعادلة (1)).

$$J=\varepsilon\sigma T^{4}+(1-\varepsilon)G$$

$$\text{أو} \qquad G=\frac{J-\varepsilon\sigma T^{4}}{1-\varepsilon}$$

$$\text{i.e.} \qquad \frac{Q}{A}=J-G=J-\frac{\left(J-\varepsilon\sigma T^{4}\right)}{1-\varepsilon}$$

$$\text{أو} \qquad Q=\frac{\varepsilon A}{1-\varepsilon}=\left(\sigma T^{4}-J\right) \qquad (17)$$

لأيَّ جسمان 1 و2، يكون العامل الهندسي، F_{1-2} هو كسر من الإشعاع A_1J_1 الذي يتقاطع مع الجسم 2،

$$\text{i.e.} \qquad Q_{1-2}=A_1F_{1-2}J_1-A_2F_{2-1}J_2$$

مستخدماً المعادلة (15)،

$$Q_{1-2}=A_1F_{1-2}\left(J_1-J_2\right) \qquad (18)$$

يمكن استخدام تناظراً كهربائياً مؤسساً على قانون أوم. كمثال، من المعادلة (17)،

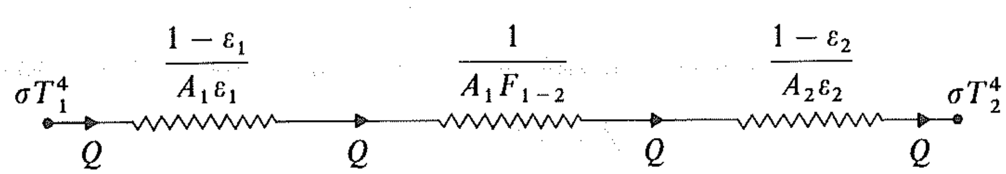
$$\text{المقاومة نتيجة لانبعاثية السطح} = \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon A} \qquad (19)$$

(حيث Q تكون مناظرة للتيار و $\left(\sigma T^4 - J\right)$ تكون مناظرة لفرق الجهد).

نفس الشيء من المعادلة (18)،

$$\text{المقاومة نتيجة الشكل الهندسي} = \frac{1}{A_1 F_{1-2}} \qquad (20)$$

خذ الحالة البسيطة للجسم 1 محاط كلياً بالجسم 2. الشكل (10) يوضِّح التناظر الكهربي،



شكل (10)

$$\text{المقاومة الكلية}\ , R_T = \frac{1-\varepsilon_1}{A_1\varepsilon_1} + \frac{1}{A_1F_{1-2}} + \frac{1-\varepsilon_2}{A_2\varepsilon_2}$$

أيضاً في هذه الحالة، $F_{1-2} = 1$

$$\therefore R_T = \frac{1}{A_1}\left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1 + 1 + \frac{A_1}{A_2}\left\{\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right\}\right) = \left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2}\left\{\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right\}\right)\frac{1}{A_1}$$

$$Q_{1-2} = \frac{Q\left(T_1^4 - T_2^4\right)}{R_T} = \frac{A_1\sigma\left(T_1^4 - T_2^4\right)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2}\left\{\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right\}} \qquad (21)$$

عندما تكون الأجسام قريبة جداً من بعضها البعض بالتالي $A_1 \approx A_2$ ،

i.e. $$Q_{1-2} = \frac{A_1\sigma\left(T_1^4 - T_2^4\right)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$$

التعبير الأخير لانتقال الحرارة ينطبق أيضاً إلي حالة سطحين كبيرين مستويين متوازيين حيث تكون مقاسات الأسطح كبيرة مقارنة ببعدهما من بعضهما البعض، .i.e تكون الطاقة المشعة الهاربة للمحيط (surroundings) صغيرة بحيث يتم تجاهلها.

مثال (4):-

يُرغب في خفض فقد الإشعاع بين سطحين متوازيين بوضع صاجة (sheet) من جسيم أو شريحة ألمونيوم (Aluminum foil) في منتصف المسافة بينهما. يتم إعداد درجتي الحرارة للسطحين عند 40°C و5°C، وتكون الإنبعاثية لكلا السطحين هي 0.85. تكون الإنبعاثية لشريحة الألمونيوم 0.05. أحسب الخفض المئوي في فقد الحرارة بالإشعاع مستخدماً شريحة الألمونيوم بإفتراض أنَّ درجات حرارة السطح هي نفسها في كلا الحالتين وأنَّ جميع الأسطح رمادية. تجاهل تأثيرات الطرف.

الحل:-

(a) بدون شريحة الألمونيوم:

لسطحين طويلين متوازيين لـ $1m^2$ من السطح،

$$R_T = 1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1 = 2/0.85 - 1$$

i.e. $R_T = 1.353$

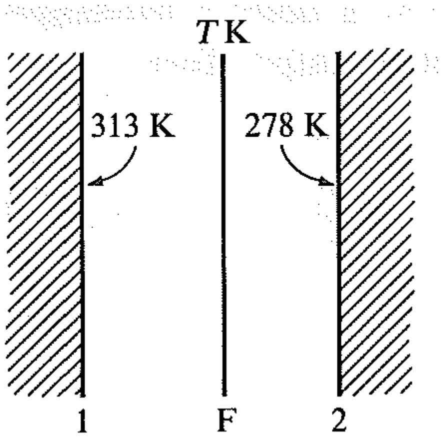
بالتالي من المعادلة (21)،

$$Q_{1-2} = \frac{Q\left(T_1^4 - T_2^4\right)}{R_T} = \frac{5.67 \times \left(3.13^4 - 2.78^4\right)}{1.353}$$

(حيث $T_1=40+273=313K=3.13\times10^2K$، $T_2=5+273=278K=2.78\times10^2K$)،

$$i.e. \quad Q_{1-2} = \underline{151.8}\, W/m^2$$

(b) بشريحة الألمونيوم (أنظر الشكل (11))،



شكل (11)

إجعل درجة حرارة الشريحة تكون TK. الآن من السطح 1 إلي الشريحة، من المعادلة (21)،

$$Q_{1-F} = \frac{\sigma\left(T_1^4 - T^4\right)}{R_{T_{1-F}}}$$

ومن الشريحة إلي السطح 2،

$$Q_{F-2} = \frac{\sigma\left(T^4 - T_2^4\right)}{R_{T_{F-2}}}$$

بما أنَّ كلا جانبي الشريحة يعمل بطريقة مشابهة، وبما أنَّ $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$، بالتالي، $R_{T_{1-F}} = R_{T_{F-2}}$.

بالتالي،

$$T^4 = \frac{T_1^4 - T_2^4}{2} = \frac{\left(3.13^4 - 2.78^4\right)\times 10^8}{2}$$

أو

$$\left(T_1^4 - T^4\right) = \left(T^4 - T_2^4\right)$$

$$\therefore T^4 = 77.82\times 10^8$$

أيضاً، $R_{T_{1-F}} = RT_{F-2} = 1/0.85 + 1/0.05 - 1 = \underline{20.176}$

من المعادلة (21)،

$$Q_{1-F} = \frac{\sigma\left(T_1^4 - T^4\right)}{R_T}$$

$$= \frac{5.67\times\left(3.13^4 - 77.82\right)}{20.176} = \underline{5.1} W/m^2$$

عليه،

$$\text{الخفض المئوي في فقد الحرارة} = \left(\frac{151.8-5.1}{151.8}\right)\times 100\% = \underline{96.5}\%$$

يمكن الملاحظة من هذا المثال أنَّ المادة ذات الانبعاثية المنخفضة تعمل كدرع إشعاعي كفوء جداً. هذه تستخدم كميزة في حالات كثيرة في الواقع العملي (e.g. الدروع الإشعاعية للمزدوجات الحرارية والثيرميترات) (radiation shields for thermocouples and thermometers).

لحالة جسم 1 صغير مقارنة مع جسم 2 بالتالي $\frac{A_1}{A_2} \to 0$

i.e. من المعادلة (21)،

$$Q_{1-2} = \varepsilon_1 A_1 \sigma\left(T_1^4 - T_2^4\right)$$

لاحظ أنَّ هذه المعادلة يتم تطبيقها حتى إذا كان الجسم 2 ليس أسوداً، السبب هو أنَّ مقداراً يمكن تجاهله من الطاقة منعكساً من الجسم 2 يتم تقاطعه بواسطة الجسم 1 لأنَّه صغير مقارنة بالجسم 2.

عندما يكون هنالك أكثر من جسمان يقومان بتبادل الحرارة بالتالي يمكن رسم دائرة كهربائية باستخدام تعابير المقاومة المعطاة بالمعادلات (19) و(20). للحالة الموضحة في الشكل (12) يتبادل الجسم 1 الحرارة مع الجسم 2، يكون المحيط 3 عند درجة حرارة مختلفة. يتم توضيح الدائرة المكافئة في الشكل (13) بالمقاومات، فروق الجهود والتيارات كما موضَّح. بتطبيق قانون أوم على كل جزء من شبكة العمل، نحصل على ست معادلات،

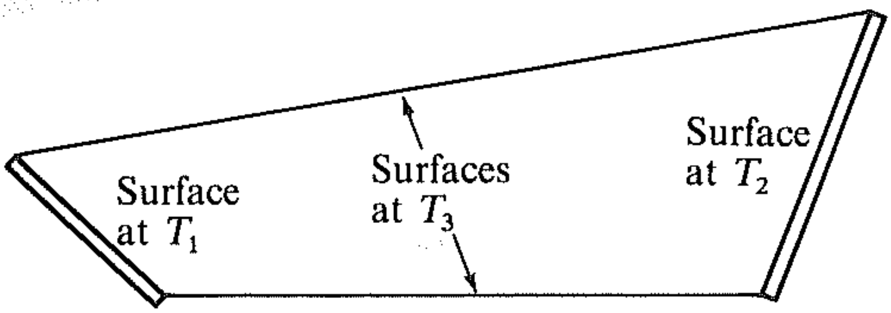
$$\text{i.e.}\quad \sigma T_1^4 - J_1 = I_1\frac{(1-\varepsilon_1)}{A_1\varepsilon_1}\text{؛ } J_2 - \sigma T_2^4 = I_2\frac{(1-\varepsilon_2)}{A_2\varepsilon_2}$$

$$J_3 - \sigma T_3^4 = I_3\frac{(1-\varepsilon_3)}{A_3\varepsilon_3}\text{؛ } J_1 - J_2 = \frac{I_5}{A_1F_{1-2}}$$

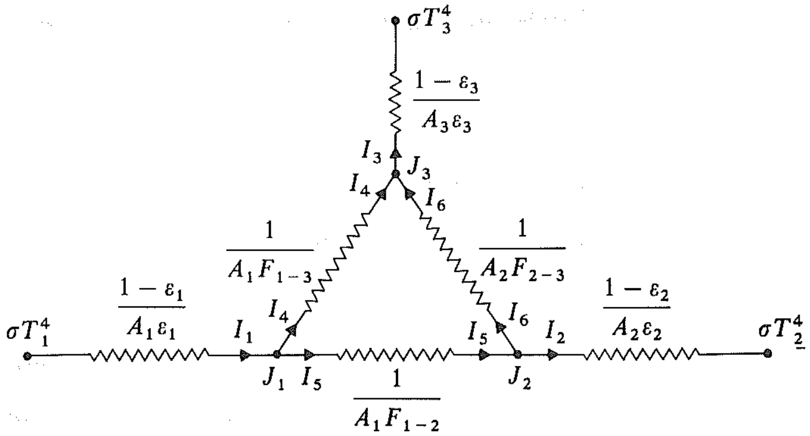
$$J_1 - J_3 = \frac{I_4}{A_1F_{1-3}}\text{؛ } J_2 - J_3 = \frac{I_6}{A_2F_{2-3}}$$

أيضاً من قانون كيرتشوف للدوائر الكهربية،

$$I_1 = I_4 + I_5 ، I_2 = I_5 - I_6 ، I_3 = I_4 + I_6$$



شكل (12)



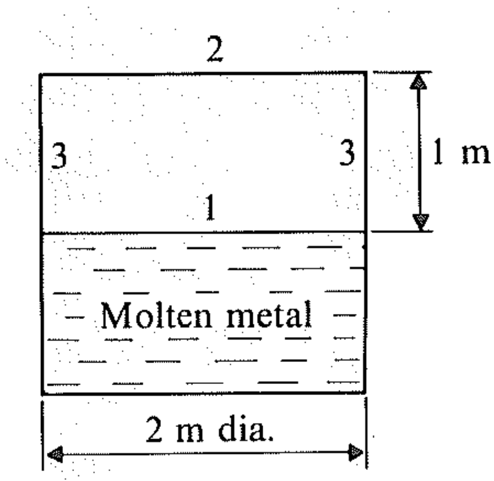
شكل (13)

مثال(5):-

وعاء أسطواني بقطر 2m يحوي مادة مصهورة (معدن مصهور) درجة حرارة سطحه 1327°C؛ يكون ارتفاع الوعاء فوق منسوب المعدن السائل هو 1m ويكون الوعاء في محيط واسع عند متوسط درجة حرارة مقدارها 27°C. يتم تبريد الجوانب الأسطوانية للوعاء فوق منسوب المعدن السائل بحيث تكون متوسط درجة الحرارة الداخلية للسطح هي 427°C.

أرسم شبكة عمل مقاومة الإشعاع لهذه المسألة وبالتالي أحسب معدَّل انتقال الحرارة من سطح المعدن السائل بالإشعاع. انبعاثية المعدن السائل = 0.3؛ انبعاثية السطح الداخلي للوعاء = 0.7.

الحل:



شكل (14)

يتم توضيح الوعاء في الشكل (14)؛ يكون المعدن المصهور (المذاب) هو السطح 1، والجانب العلوي المفتوح للوعاء هو السطح 2 عند درجة حرارة المحيط، وجوانب الوعاء هي السطح 3. تكون الدائرة المكافئة كما موضَّح في الشكل (13).

من الجدول ((2(b)،

$$F_{1-2} = \left(1+\tfrac{1}{2}\right) - \sqrt{\left\{\left(1+\tfrac{1}{2}\right)^2 - 1\right\}} = \underline{0.382}$$

من المعادلة (16)،

$$F_{1-2} + F_{1-3} = 1$$

$$\therefore F_{1-3} = 1 - 0.382 = \underline{0.618}$$

من بعد، من تماثل الأسطح ، $F_{2-3} = 0.618$

أيضاً،

(بما أن المحيط أسود) $\frac{1-\varepsilon_2}{A_2\varepsilon_2} = 0$ ؛ $\frac{1-\varepsilon_1}{A_1\varepsilon_1} = \frac{0.7}{\pi \times 0.3} = 0.743$

$$\frac{1-\varepsilon_3}{A_3\varepsilon_3} = \frac{0.3}{\pi \times 2 \times 1 \times 0.7} = \underline{0.068}$$

$$\frac{1}{A_1 F_{1-2}} = \frac{1}{\pi \times 0.382} = 0.833$$

$$\frac{1}{A_2 F_{2-3}} = \frac{1}{A_1 F_{1-3}} \frac{1}{\pi \times 0.618} = 0.515$$

بالتالي،

$$\sigma T_1^4 - J_1 = 0.743 I_1 \ , \ \ J_2 - \sigma T_2^4 = 0$$

$$J_3 - \sigma T_3^4 = 0.068 I_3 \ , \quad J_1 - J_2 = 0.833 I_5$$

$$J_1 - J_3 = 0.515 I_4 \ , \quad J_2 - J_3 = 0.515 I_6$$

بتوحيد المعدلات عاليه لتجنب J_1، J_2 و J_3 نحصل على،

$$0.743 I_1 + 0.068 I_3 + 0.515 I_4 = \sigma\left(T_1^4 - T_3^4\right) = 5.67\left(16^4 - 7^4\right) = \underline{0.358 \times 10^6}$$

$$0.743 I_1 + 0.833 I_5 = \sigma\left(T_1^4 - T_2^4\right) = 5.67\left(16^4 - 3^4\right) = \underline{0.371 \times 10^6}$$

$$0.515 I_6 + 0.068 I_3 = \sigma\left(T_2^4 - T_3^4\right) = 5.67\left(3^4 - 7^4\right) = \underline{-0.0132 \times 10^6}$$

أيضاً،

$$I_1 = I_4 + I_5 \text{،} \ I_2 = I_5 - I_6 \text{،} \ I_3 = I_4 + I_6$$

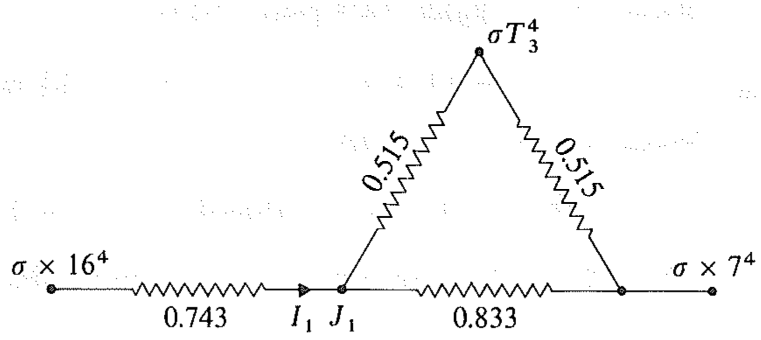
بتفادي I_1، I_2، I_3، I_4، I_5 و I_6 يمكننا حساب I_1،

i.e. $\qquad I_1 = \underline{0.336 \times 10^6}$

$\therefore$ الحرارة المفقودة بالإشعاع من المعدن المذاب $= 0.336 \times 10^6 W$

$$= \underline{336} kW$$

إذا تمَّ في المثال عاليه عزل الوعاء جيِّداً بدلاً عن تبريده بالتالي فإن الدائرة المكافئة ستكون كما موضَّح في الشكل (15) أدناه.



شكل (15)

هذه حالة أبسط بكثير؛ يمكن حساب المقاومة المكافئة للدائرة مباشرة بما أنَّه ليس هنالك سريان تيار إلي الخارج أو إلي الداخل عند T_3،

$$\text{i.e.}\quad \text{المقاومة المكافئة} = 0.743 + \frac{1}{\frac{1}{0.515\times 2} + \frac{1}{0.833}}$$

$$= 0.743 + 0.461 = \underline{1.204}$$

$$\therefore I_1 = \frac{5.67\left(16^4 - 3^4\right)}{1.204} = \underline{0.308\times 10^6}\, W$$

i.e. فقد الحرارة بالإشعاع من السطح المعدني $= \underline{308}\, kW$

في هذه الحالة فإنَّ درجة الحرارة للسطح 3 سوف لن تكون 427°C كما في سابقه.

يتم إعطاء التيار المنساب من 1 إلي 3 بـ ،

$$308 \times \frac{0.461}{2\times 0.515} = \underline{137.9}\, kW$$

$$\therefore \sigma\left(T_3^4 - T_2^4\right) = 137.9\times 10^3 \times 0.515 = 0.0710\times 10^6$$

$$\text{ie.}\quad \frac{T_3^4}{10^8} = 3^4 + \frac{0.0710\times 10^6}{5.67}$$

$$\therefore T_3 = \underline{1059.5 K} = \underline{786.5}\, °C$$

6/ معامل انتقال الحرارة للإشعاع:-

(Heat Transfer Coefficients for Radiation)

معامل انتقال الحرارة للإشعاع h_r يتم تعريفه بالتناظر مع معامل انتقال الحرارة بالحمل،h.

من المعادلة (13)،

$$Q_{1-2} = F_{1-2} A_1 \sigma \left(T_1^4 - T_2^4\right)$$

$$= F_{1-2} A_1 \sigma \left(T_1^2 + T_2^2\right)\left(T_1^2 - T_2^2\right)$$

$$\text{i.e.} \quad Q_{1-2} = F_{1-2} A_1 \sigma \left(T_1^2 + T_2^2\right)\left(T_1 + T_2\right)\left(T_1 - T_2\right)$$

لانتقال الحرارة بالحمل، نحصل من المعادلة،

$$Q = h A \left(t_w - t\right)$$

بالتالي، بمقارنة المعادلتان، يمكننا كتابة،

$$h_r = F_{1-2} \sigma \left(T_1^2 + T_2^2\right)\left(T_1 + T_2\right) \qquad (22)$$

عليه ، $Q = h_r A_1 \left(t_1 - t_2\right)$ (23)

يجب ملاحظة أنَّه ولانتقال حرارة بالحمل من سطح بمساحة سطح A، يتم استخدام مساحة السطح الكلية في الحساب، كما في المعادلة $Q = hA\left(t_w - t\right)$. في انتقال الحرارة بالإشعاع من نفس الجسم يجب استخدام مساحة السطح الظرفي (area of surface envelope).

مثال (6):-

أسطوانة ذات أضلاع أو عصبات (ribbed cylinder) بقطر خارجي 0.6m تكون عند درجة حرارة سطح مقدارها 260°C في محيط واسع (large surroundings) عند 20°C. أحسب معامل انتقال الحرارة بالإشعاع، وفقد الحرارة الكلي نتيجة للإشعاع والحمل. قطر الأسطوانة 0.9m

ويتم تصنيعها من الحديد الزهر بانبعاثية مقدارها 0.8. مساحة السطح للأسطوانة ذات العصبات هي $5m^2$، ومعامل انتقال الحرارة بالحمل يمكن أخذه مساوٍ لـ $8.8W/m^2K$. تجاهل تأثيرات الطرف.

الحل:-

بما أنَّ الأسطوانة صغيرة مقارنة بالمحيط، بالتالي $F_{1\text{-}2} = 1$

من بعد من المعادلة (22)،

$$h = \varepsilon_1 F_{1-2}\sigma\left(T_1^2 - T_2^2\right)\left(T_1 + T_2\right)$$

i.e. $$h_r = 0.8\times\frac{5.67}{10^8}\left(533^2 + 273^2\right)\left(533 + 273\right)$$

(T_1=260+273=533K ،T_2=20+273=293K)،

i.e. $$h_r = 0.8\times\frac{5.67}{10^4}\times 37\times 826 = \underline{13.87}\,W/m^2K$$

بالتالي من المعادلة (23)،

$$\text{فقد الحرارة بالإشعاع} = h_r\, A_1\left(t_1 - t_2\right)$$

$$= 13.87 \div \pi\times 0.6\times 0.9\times\left(260-20\right) = 5650W$$

i.e. $$\text{فقد الحرارة بالإشعاع} = \underline{5.65}\,kW$$

من المعادلة، $Q = h\,A\left(t_w - t\right)$ ،

$$\text{فقد الحرارة بالحمل} = h\,A\left(t_w - t\right) = 8.8\times 5\times\left(260-20\right)$$

i.e. $$\text{فقد الحرارة بالحمل} = 10560W = \underline{10.56}\,kW$$

بالتالي،

$$\text{فقد الحرارة الكلي} = 5.65 + 10.56 = \underline{16.21}\,kW$$

7/ إشعاع الغاز:- (Gas Radiation)

في المسائل التي تمَّ تناولها في المقاطع السابقة فقد تمَّ تجاهل تأثير نقل الإشعاع خلال جو غازي؛ سيتم إمتصاص بعض الإشعاع بواسطة الجو، لكن هذا صغير جداً بحيث يمكن تجاهله. على أيَّ حال، فإن الإشعاع من الغازات يكون ذو أهمية في الأفران والتطبيقات المشابهة. هنالك فرق هام جداً بين الإشعاع خلال المصمتات والإشعاع من الغازات، هذا الفرق يتمثَّل في أنَّ الغازات لديها منقولية عالية (high transmissivity) وبالتالي يكون للإشعاع تأثير سطحي فقط. أيضاً تعتبر الغازات باعثات إنتخابية (selective emitters) فهي فقط تبعث وتمتص الإشعاع في حزم موجية ضيقَّة (narrow wavebands)؛ يتم استخدام هذه الحقيقة في محللات الغازات تحت الحمراء (infra-red gas analyzers). عموماً، فإنَّ الغازات ذات الجزيئات المتماثلة (symmetrical molecules) (e.g. أكسجين ونيتروجين) لا تبعث ولا تمتص الإشعاع بصورة واضحة، بينما تقوم الغازات ذات الجزيئات اللامتماثلة (asymmetrical molecules) (e.g. ثاني أكسيد الكربون، أول أكسيد الكربون، وبخار الماء)، بالإنبعاث والإمتصاص بقوة في أطوال موجة معينة. اللهبات في إجراءات الإحتراق يمكن التفكير في أنها غازات ساخنة يحدث فيها تفاعل كيميائي. على أيَّ حال، يجب معاملة الإشعاع بأسلوب مختلف عن إشعاع الغاز بما أنَّ معظم الإشعاع (bulk of radiation) يكون ناشئاً من جسيمات مصمتة معلَّقة في اللهبة.

نبـذة عن المـؤلـف:

أسـامة محمـد المرضـي سـليمان وُلِـدَ بمدينـة عطبـرة بالسـودان فـي العام 1966م. حاز على دبلوم هندسة ميكانيكية من كلية الهندسة الميكانيكية – عطبرة في العام 1990م. تحصَّل أيضاً على درجة البكـالوريوس فـي الهندسـة الميكانيكيـة مـن جامعـة السـودان للعلـوم والتكنولوجيا – الخرطوم في العام 1998م ، كما حاز على درجة الماجستير في تخصص ميكانيكا المواد من جامعة وادي النيل – عطبرة في العام 2003م ودرجة الدكتوراه من جامعة وادي النيل في العام 2017م. قام بالتدريس فـي العديد من الجامعات داخل السودان، بالإضـافة لتأليفه لأكثر من ثلاثين كتاباً باللغة العربيـة ولعشرة كتب باللغة الإنجليزية بالإضافة لخمسين ورقة علمية منشورة في دور نشر ومجلات عالمية إلى جانب إشرافه على أكثر من ثلاثمائة بحث تخرج لكل من طلاب الماجستير، الدبلوم العالي، البكالوريوس، والدبلوم العام. يشغِل الآن وظيفة أستاذ مساعد بقسم الميكانيكا بكلية الهندسة والتقنية – جامعـة وادي النيـل. بالإضـافة لعملـه كاستشـاري لـبعض الـورش الهندسـية بالمنطقـة الصـناعية عطبـرة. هذا بجانـب عملـه كمـدير فنـي لمجموعـة ورش الكمـالي الهندسـية لخراطـة أعمـدة المرافق واسطوانات السيارات والخراطة العامة وكبس خراطيش الهيدروليك.