إعداد الأستاذ/ أسامة محمد المرضي سليمان

1/ إشعاع الجسم الأسود: (Black Body Radiation)

الإشعاع الحراري يتكون من موجات كهرومغناطيسية تنبعث نتيجة لإهتزاز جزيئات المادة. تكون الموجات شبيهة بموجات الضوء بحيث أنها تنتشر في خطوط مستقيمة عند سرعة الضوء ولا تتطلب وسطاً للإنتشار. الإشعاع الذي يقع على جسم يمكن إمتصاصه بواسطة الجسم، إنعكاسه من الجسم، أو نقله خلال الجسم. تسمى نسبة الإشعاع الممتص المنعكس والمنقول بقوة الإمتصاص α (absorptivity)، الإنعكاسية ρ (reflectivity) والمنقولية γ (Transmissivity) على الترتيب. بالتالي نحصل على،

$$\alpha+\rho+\gamma=1$$

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

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

الجسم المثالي الذي يمتص جميع الإشعاع الذي يقع عليه يسمى بالجسم الأسود (black body). لجسم أسود $\alpha=1$، و $\rho=0$. يجب ملاحظة أن المصطلح أسود (black) في هذا النص لا يعني بالضرورة أسود إلى العين. السطح الذي يكون أسوداً للعين هو ذلك السطح الذي يمتص جميع الضوء المسلط عليه، لكن يمكن لسطح أن يمتص جميع الإشعاع الحراري المسلط عليه بدون ضرورة إمتصاص جميع الضوء (مثل الجليد هو تقريباً أسود بالنسبة للإشعاع الحراري، $\alpha=0.985$).

بالرغم من أنه لا يوجد عملياً جسم أسود تماماً فإن العديد من الأسطح تقترب من هذا التعريف. كمثال، إعتبر جسماً صغيراً يقوم بإشعاع طاقة في فضاء واسع (large space) كما موضح في الشكل (1). الطاقة التي تضرب السطح المحيط بالجسم يتم عكسها وإمتصاصها مرات عديدة بواسطة السطح، وكسر الطاقة المنعكس إلى الخلف والمتصادم بالجسم تكون صغيراً جداً. عليه، عندما يوضع 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 موضح في الشكل (2). يقود الثقب إلى غرفة صغيرة كما موضح. أشعة الإشعاع الحراري التي تدخل إلى الثقب يتم إمتصاصها تباعاً بواسطة حوائط الغرفة بحيث ينبعث فقط مقدار يتم تجاهله من الإشعاع. بالتالي فإن الثقب يعمل لجسم أسود.

(2)

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

الطاقة التي يتم إشعاعها من جسم لكل وحدة مساحة لكل وحدة زمن تسمى بالقدرة الإنبعاثية (emissive power)، E. يمكن ملاحظة أن الجسم الأسود بالإضافة الى أنه الماص الأفضل المحتمل للإشعاع هو أيضاً الباعث (emitter) الأفضل المحتمل. إعتبر حيزاً مغلقاً (enclosure) عند درجة حرارة منتظمة، وضع جسماً أسوداً في هذا الحيز المغلق كما موضح في الشكل (3). إذا كان الجسم عند نفس درجة حرارة الحيز المغلق يتبع ذلك أن كل الطاقة التي يشعها الجسم ويمتصها حائط الحيز المغلق يجب أن تساوي بالضبط الطاقة التي يشعها الحيز المغلق ويمتصها الجسم. إذا لم يكن ذلك كذلك فإن الجسم إما أن يكسب أو يفقد طاقة، وهذا ليس ممكناً في نظام معزول حسب قوانين الديناميكا الحرارية. إجعل القدرة الإنبعاثية للجسم الأسود تكون E_B. بالتالي فإن المعدل الذي ترتطم أو تصطدم به الطاقة (impinge) على وحدة سطح من الجسم الأسود هو أيضاً E_B. الآن، إستبدل الجسم الأسود بأي جسم آخر عند نفس درجة الحرارة وبنفس الشكل والمقاس. هذا الجسم يجب أن يستقبل بالضبط نفس مقدار الطاقة من الحيز المغلق مثلما إستقبله الجسم الأسود عندما كان في نفس الموضع في الحيز المغلق. على أي حال، فإن هذا الجسم ليس أسوداً وبالتالي سيمتص فقط كسراً من الطاقة التي يستقبلها.

i.e. الطاقة الممتصة $= \alpha E_B$

(حيث α هي قوة الإمتصاص للجسم).

[17.14] BLACK BODY RADIATION 7

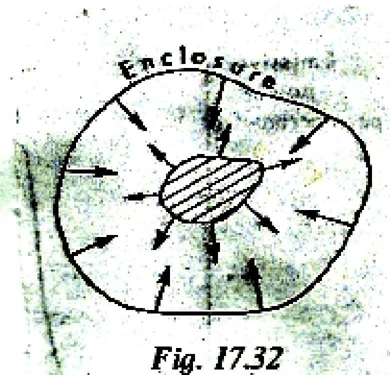


Fig. 17.32

شكل (3)

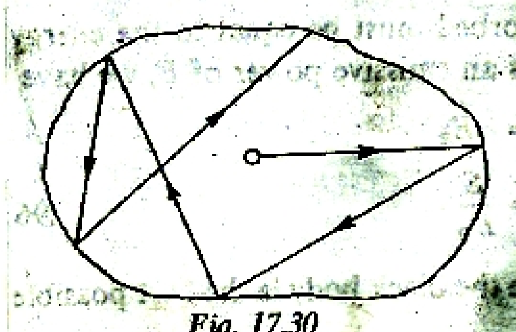


Fig. 17.30

شكل (1)

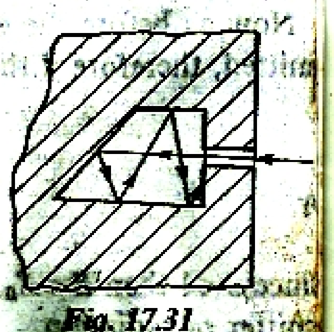


Fig. 17.31

شكل (2)

(3)

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

$$E = \alpha E_B$$

أو $\alpha = \frac{E}{E_B}$ ———————— (2)

بما أن $\alpha < 1$ بالتالي $E < E_B$ ، وعليه فإن الجسم الأسود هو الباعث المحتمل الأفضل للإشعاع .

نسبة القدرة الإنبعاثية لجسم إلى القدرة الإنبعاثية لجسم أسود تسمى بالإنبعاثية (ϵ . emissivity) . من المعادلة (1) نحصل ملاحظة أنه عندما يكون جسمان عند نفس درجة الحرارة ، بالتالي فإن قدرة الإمتصاص أو الإمتصاصية (absorpitivity) α ، تساوي الإنبعاثية ϵ . هذا يعرف بقانون كيرتشوف الذي نحصل 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) ، تم إفتراض أن الطاقة المنبعثة بالإشعاع الحراري هي نفسها لجميع أطوال موجات الإشعاع . حقيقة ليست هذه هي القضية ، ويوضح الشكل (4) القدرة الإنبعاثية لكل وحدة طول موجة يتم رسمها ضد طول موجة ، λ بالمايكرومتر لجسم أسود عند أي درجة حرارة .

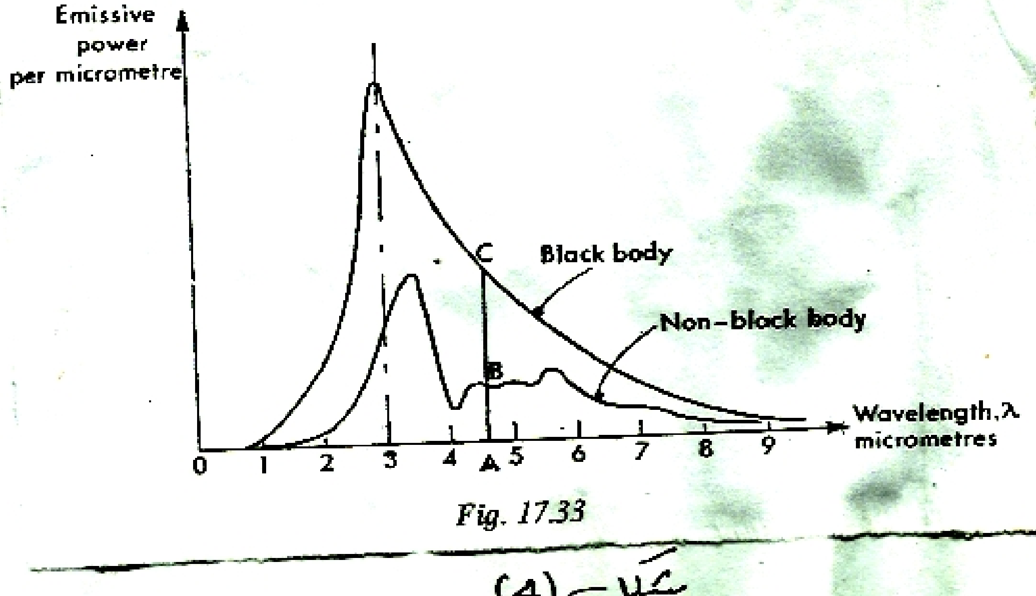


Fig. 17.33

شكل (4)

(4)

هناك منحنى مقابل عند نفس درجة الحرارة يتم توضيحه للجسم اللاأسود (non-Black Body)

النسبة لإحداثي أسي (ordinate) من كل منحنى عند أي طول موجة يعطي الإنبعاثية، وبالتالي الإمتصاصية عند طول الموجة تلك. كمثال، عند طول موجة مقداره 4.5 ميكرومتر، نحصل على

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

المصطلحان (الإصطلاحان) ϵ_λ و α_λ يسميان بالإنبعاثية أحادية اللون والإمتصاصية أحادية اللون، على الترتيب. تعلم الملاحظة من الشكل (4) أن الإنبعاثية أحادية اللون تتفاوت مع طول الموجة. يكون التفاوت أكبر لبعض المواد عن ذلك للأخريات، وهناك موادًا معينة تكون فيها الإنبعاثية عمليًا ثابتة على إمتداد حزمة الموجة (wave band) (e.g. slate). لتبسيط الحسابات، يتم إفتراض أن الأسطح في الواقع العملي غالبًا ما تمتلك إنبعاثية ثابتة على كل أطوال الموجات ولكل درجات الحرارة. مثل هذا السطح المثالي يُسمّى بالجسم الرمادي. بالتالي لجسم رمادي، $\alpha = \epsilon$ عند جميع درجات الحرارة، حيث α و ϵ هما الإمتصاصية الكلية والإنبعاثية الكلية على جميع أطوال الموجة.

هناك حقيقة مختبرية (Experimental fact) تقول أن القدرة الإنبعاثية لجسم تزيد كلما زادت درجة حرارة الجسم. هذه يتم توضيحها في الشكل (5) أدناه الذي يتم فيه رسم القدرة المنبعثة لجسم أسود لكل وحدة طول موجة ضد طول الموجة بالميكرومتر لدرجات حرارة عديدة.

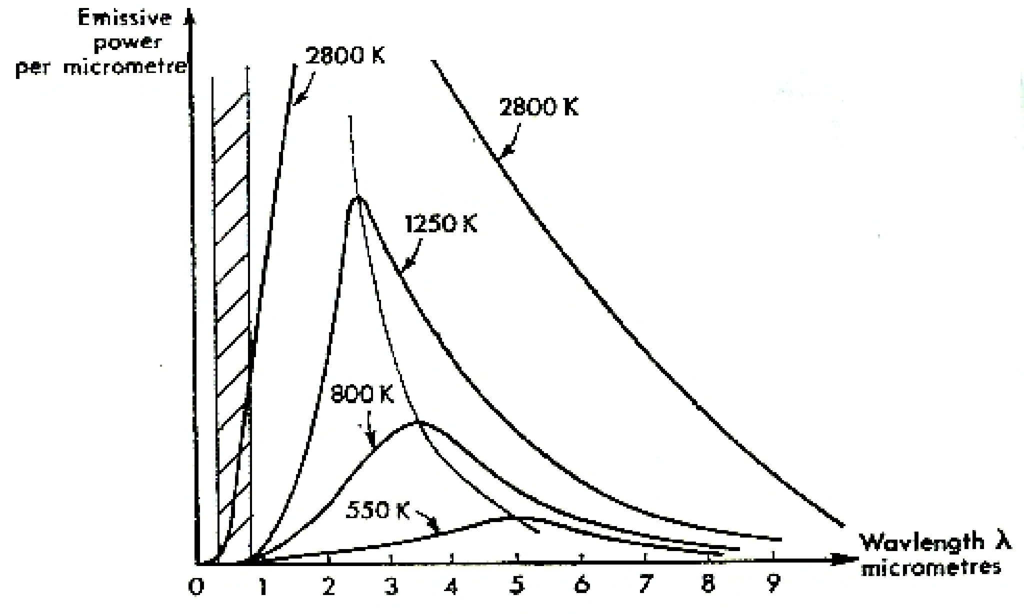


Fig. 17.34

شكل (5)

يتضح من الملاحظة أن طول الموجة الذي يعطي قدرة إنبعاثية قصوى يصبح صغيراً كلما زادت درجة الحرارة، بالتالي فإن معظم الطاقة المنبعثة يتم إشعاعها على أطوال موجية أقصر كلما زادت درجة الحرارة. قيمة طول الموجة لقدرة إنبعاثية قصوى يتم إعطاؤها بتحليل (Wien's)،

$$\lambda_{max} = \frac{2900}{T} \quad \text{———} \quad (3)$$

(حيث تكون λ_{max} بالميكرومتر μm و T بال 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 6000 K تقريباً، بالتالي مستخدماً المعادلة (3)، تكون طول الموجة الأقصى للإشعاع هو

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

عليه تكون معظم الإشعاع الحراري من الشمس في حزمة الموجة المرئية (visible waveband).
يتم توضيح حزمة الموجة للضوء مظللة في الشكل (5). عند درجة حرارة مقدارها 800K تكون هنالك مقدار ضئيل جداً من الطاقة المنبعثة بالكاد في حدود الطرف الأحمر للطيف المرئي. سيظهر السطح عند 800K بلون أحمر داكن (dull red colour) عند حوالي 1250K تكون معظم الطاقة المنبعثة في المدى المرئي ويكون السطح عندئذٍ أحمر ساخن (red-hot). تكون درجة حرارة فتيلة السلك الحراري (filaments) للمبة إضاءة كهربية هي تقريباً 2800K، وحتى عند درجة الحرارة هذه تكون هنالك فقط حوالي 10% من الطاقة المنبعثة في المنطقة المرئية، التي توضح عدم كفاءة مثل هذه اللمبة كمصدر إضاءة.

للجسم رمادي هنالك مجموعة من المنحنيات بالضبط مشابهة لتلك في الشكل (5)، تكون بينها، مع كل إحداثي رأسي هنالك كسراً ϵ من الإحداثي الرأسي المقابل للمنحنيات في الشكل (5). عملياً، بالرغم من أنه يمكن أخذ قيمة كلية مناسبة للإشعاعية لعدد كبير من الأسطح الصناعية على مدى واسع من أطوال الموجة، بالرغم من ذلك يكون هنالك تفاوتاً للإشعاعية الكلية مع درجة الحرارة. هذه يتم توضيحها في الشكل (6). عندما يكون مدى درجة الحرارة صغيراً فإن التقريب الذي يقول أنه لجسم رمادي $\alpha = \epsilon = Constant$، مازال منضبطاً بكفاية لحل الحسابات.
المعادن أو الأسطح التي تتفاوت فيها الإنبعاثية كثيراً وبعدم إنتظام مع أطوال الموجة ودرجة الحرارة تسمى بالباعثات المنتقية (selective emitters).

بعض قيم الإنبعاثية الكلية على جميع أطوال الموجية لكل لدرجات حرارة مختلفة يتم توضيحها في الجدول (1). يلعب التشطيب السطحي الدقيق (surface finish) دوراً أو جزءاً كبيراً في تحديد إنبعاثية المادة. عندما يكون السطح ناعماً جداً فإنه يقوم بعكس الإشعاع بتركيز (specularly)؛ وعندما يكون السطح خشناً كما في معظم الحالات العملية، فإنه يعكس الإشعاع بتشتيت (difusely).

السطوح الخشنة هي ممتصات أفضل وبالتالي باعثات أفضل (better emitters) للإشعاع من الأسطح الناعمة. للفولاذ الطري (mild steel) تكون الإنبعاثية ϵ للمخرطة الخشنة عند $15^{\circ}C$ هي 0.87؛ وللفولاذ الطري تكون الإنبعاثية ϵ للمخرطة ذات التشطيب الجيد على مخرطة عند $15^{\circ}C$ هي 0.39؛ ويمكن الملاحظة من جدول (1) أنه عندما يتم تلميع الفولاذ جيداً فإن الإنبعاثية ϵ، يتم تخفيضها إلى 0.07.

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

لقد وُجد مختبرياً بواسطة ستيفان وبُرهن نظرياً بواسطة بولتزمان أن القدرة الإنبعاثية لجسم أسود تكون متناسبة طردياً مع الأس الرابع لدرجة حرارته المطلقة، وهذا يعرف بقانون ستيفان - بولتزمان،

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

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

بالتالي يتم إعطاء الطاقة المنبعثة بجسم لا أسود بالمعادلة،

$$E = \epsilon \sigma T^4 \qquad (5)$$

(حيث ϵ هي الإنبعاثية 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)،

$$\text{الطاقة المنبعثة} = \epsilon_1 \sigma T_1^4$$

الطاقة المنبعثة بالمحيط الأسود يتم إعطاؤها بالمعادلة (4)،

$$E_B = \sigma T_2^4$$

الآن فإن نسبة هذه الطاقة الذي تُمتص بالجسم 1 يعتمد على إمتصاصية الجسم 1. لجسم رمادي $\alpha = \epsilon$ عند جميع درجات الحرارة وبالتالي،

(7)

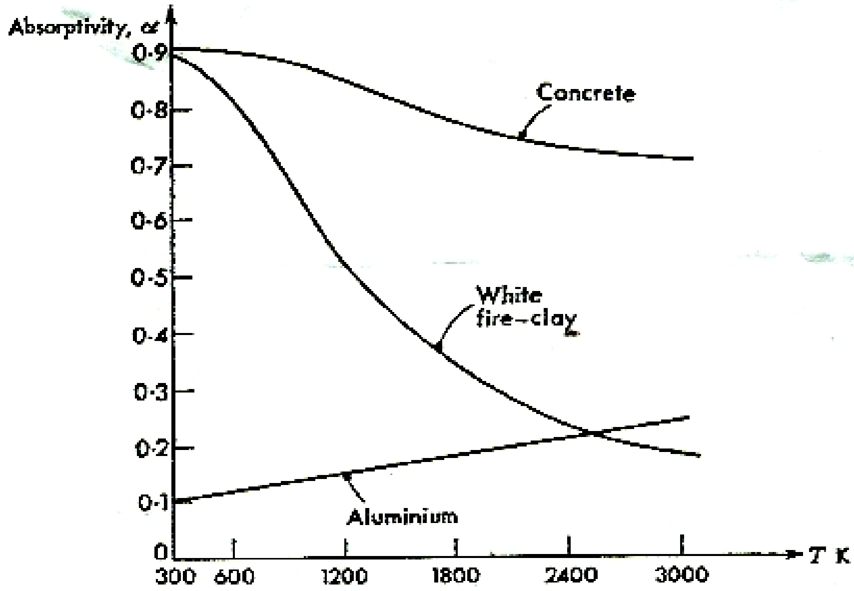


Fig. 17.35

شكل (6)

Table 17.2

Surface	0–40°C	120°C	260°C	540°C
White paints	0·95	0·94	0·88	0·70
Black glossy paints	0·95	0·94	0·90	0·85
Lamp black	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

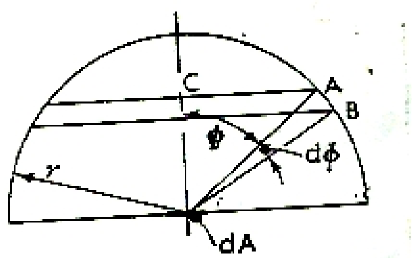


Fig. 17.36

شكل (7)

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

بالتالي فإن الطاقة المنتقلة من الجسم إلى محيطه لكل m^2 من الجسم هي

$$q = \epsilon \sigma T_1^4 - \epsilon \sigma T_2^4$$

i.e. $$q = \epsilon \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (6)$$

إذا كانت الإنبعاثية للجسم عند T_1 متفاوتة كثيراً عن الإنبعاثية للجسم عند T_2 بالتالي فإن التقريب لجسم رمادي تحليه الأيكون منضبطاً بكفاية. في تلك الحالة من التقريب الجيد أخذ الإمتصاصية للجسم 1 عندما يستقبل إشعاعاً من مصدر عند T_2 كمساوٍ للإنبعاثية للجسم 1 عندما تبعث إشعاعاً عند T_2.

بالتالي،
$$q = \epsilon_{T_1} \sigma T_1^4 - \epsilon_{T_2} \sigma T_2^4 \quad (7)$$

بينما تعتمد الإمتصاصية أساسياً على درجة حرارة مصدر (الإشعاع)، فإنها أيضاً تعتمد على درجة حرارة السطح نفسه. لمعظم المعادن هذا العامل تحليه أن يكون هاماً ويتم توضيح أثر الإمتصاصية لسطح معدن عند T_1 للإشعاع من مصدر عند T_2 هو تقريباً مساوٍ لإنبعاثية السطح عندما يكون عند درجة حرارة T_3، التي تعطى ب

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

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 معدل فقد الحرارة بالإشعاع لكل m^2:

(a) عندما نفترض أن يكون الجسم رمادياً ب $\epsilon = 0.4$.

(b) عندما لا يكون الجسم رمادياً.

إفترض أثر الإمتصاصية تكون مستقلة عن درجة حرارة السطح.

(a) مستخدماً المعادلة (6)،

$$q = \epsilon \sigma (T_1^4 - T_2^4) = 0.4 \times \frac{5.67}{10^8} \times (1373^4 - 823^4)$$

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

i.e. $$q = 0.4 \times 5.67 \times (13.73^4 - 8.23^4) = 0.4 \times 5.67 \times 30960$$

i.e. $$\text{فقد الحرارة بالإشعاع لكل } m^2 = 70220\,W = \underline{\underline{70.22\,kW}}$$

(b) عندما لا يكون الجسم رمادياً، بالتالي،

الإمتصاصية عندما يكون المصدر عند $550°C$ = الإنبعاثية عندما يكون الجسم عند $550°C$.

i.e. $\alpha = 0.7$

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

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

i.e. $q = 0.4 \times 5.67 \times 13.73^4 - 0.7 \times 5.67 \times 8.23^4$

$= 80630 - 18210 = 62420 \text{ W}$

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

يجب ملاحظة أن فرضية الجسم الرمادي للجزء (a) تزيد التقديرات بمقدار (overestimates)

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

مثال (2) :-

أحسب معدل فقد الحرارة لكل m^2 بالإشعاع من جسم عند $1100°C$ في محيط أسود عند $40°C$، عندما تكون الإنبعاثية عند $40°C$ هي 0.9، والإنبعاثية عند $1100°C$ هي كما في المثال (1) :-

(a) عندما يكون الجسم رمادياً بـ $\epsilon = 0.4$ ؛

(b) عندما لا يكون الجسم رمادياً.

إفترض أن الإمتصاصية تكون مستقلة عن درجة حرارة السطح.

(a) كما في المثال (1)،

$$q = \epsilon \sigma (T_1^4 - T_2^4) = 0.4 \times 5.67 \times (13.73^4 - 3.13^4)$$

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

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

(b) كما في المثال (1)،

الطاقة المنبعثة $= 0.4 \times 5.67 \times 13.73^4 = \underline{80\,630} \text{ W/m}^2$

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

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

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

بالتالي فرضية الجسم الرمادي تزيد التقديرات بمقدار

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

تحليل الملاحظة من المثالين (١) و(٢) أن فرضية الجسم الرمادي تعطي تقريب منضبط جداً عندما تكون إحدى درجات الحرارة صغيرة مقارنة بالأخرى. تعطي هذه الفرضية أيضاً تقريب منضبط جداً عندما تكون كلا درجتي الحرارة متقاربتان.

4/ قانون لامبيرت والعامل الهندسي :-

(Lambert's law and the geometric factor)

معظم الأسطح لا تبعث إشعاعاً بقوة في جميع الإتجاهات؛ يكون الجزء الأكبر من الطاقة المنبعثة في إتجاه متعامد مع السطح. قبل إعتبار تبادل الطاقة بين جسمين يستقبلان فقط جزء من الإشعاع المنبعث من بعضهما البعض، من الضروري إكتشاف كيف يتم توزيع الإشعاع في الإتجاهات المختلفة من السطحين.

من أجل عمل هذا يجب تعريف شدة الإشعاع i، (intensity of radiation). معدل إنبعاث الطاقة من وحدة مساحة سطح خلال وحدة زاوية مصمتة على مستوى متعامد مع السطح تسمى بشدة الإشعاع المتعامد (intensity of normal radiation) i_N. شدة الإشعاع في أي إتجاه آخر عند أي زاوية ϕ مع المستوى المتعامد يتم ترميزها ب i_ϕ. (ملاحظة : السطح الذي يقابل زاوية مصمتة عند نقطة (subtends) الزاوية المصمتة التي يقابلها السطح تبعد r من جميع النقاط على السطح تكون مساوية لمساحة السطح مقسومة على r^2. مساحة سطح الكرة هي $4\pi r^2$ وبالتالي فإن الزاوية المصمتة التي يقابلها سطح الكرة في منتصفه هي 4π).

يتم إعطاء التغاير في شدة الإشعاع بقانون جيب التمام للامبيرت (Lambert's Cosine law)

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

الطاقة المنبعثة من سطح مساحته dA يتم بالتالي إعطاؤها ب،

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

(حيث dw هي زاوية مصمتة صغيرة).

إعتبر مساحة صغيرة dA، وإعتبر الإشعاع من dA الذي يمر خلال عنصر صغير من مساحة سطح نصف كروي ب dA عند مركزه، كما موضح في الشكل (7).

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

عرض العنصر، $AB = r\,d\phi$

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

$$\text{مساحة السطح} = (\text{المحيط} \times \text{العرض})$$
$$= r\,d\phi \times 2\pi r\sin\phi$$

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

(solid angle, $d\omega$, subtended at dA)

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

بالتالي فإن الطاقة الكلية المنبعثة من dA يتم إعطاؤها ب

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

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

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

بالتالي ، $e\sigma T^4\, dA = \pi\, i_N\, dA$

$$\text{i.e. } i_N = \frac{e\sigma T^4}{\pi} \quad \text{———} \quad (10)$$

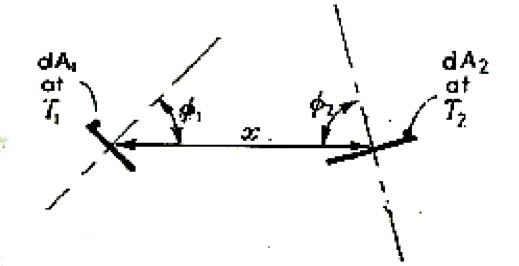


Fig. 17.37

شكل (8)

إعتبر جسمان أسودان صغيران بمساحة dA_1 و dA_2 عند درجات حرارة T_1 و T_2 وعلى بعد x من بعضهما البعض . تكون زوايا الميل للأسطح هي كما موضحة في الشكل (8) . هذه هي حالة لإستقبال فقط الجسمان جميع الطاقة من بعضهما . إجعل السطح dA_2 يقابل زاوية مصمتة $d\omega_1$ عند مركز السطح dA_1 . بالتالي نحصل على ،

الطاقة المبعوثة بواسطة dA_1 والمستقبلة بواسطة dA_2 $= i_{N_1} \cos\phi_1\, d\omega_1\, dA_1$

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

$$\text{الطاقة المستقبلة بواسطة } dA_2 = \frac{\cos\phi_1\, d\omega_1\, dA_1\, \sigma T_1^4}{\pi}$$

أيضاً من تعريف الزاوية المصمتة،

$$d\omega_1 = \frac{dA_2 \cos\phi_2}{x^2}$$

بالتالي،

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

الآن، بما أن الطاقة المنبعثة بواسطة dA_1 هي $\sigma dA_1 T_1^4$. نسبة الطاقة المستقبلة بواسطة الجسم الثاني إلى الطاقة المنبعثة بالجسم الأول تسمى 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 أن العامل الهندسي للإشعاع من السطح 2 إلى السطح 1 يُعطى ب

$$F_{2-1} = \frac{\cos\phi_1 \cos\phi_2 \, dA_1}{\pi x^2} \qquad (12)$$

صافي تبادل الطاقة بين الأسطح يُعطى ب،

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

ومنه يمكن كتابتها كالآتي،

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

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

المعامل الهندسية (Geometric factors) F_{1-2} و F_{2-1} يمكن إيجادها بتكامل مزدوج من المعادلة (11) والمعادلة (12). هذا يمكن عمله تحليلياً أو بيانياً (Analytically or graphically). للمساحة الكبيرة المكونة من مساحات سطح صغيرة dA_1 و dA_2، يمكن تعريف متوسط المعامل الهندسية بنفس الطريقة كما في عاليه،

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

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

من المعادلات (13) و(14) يمكن توضيح أن :-

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

هذا يعرف بالعلاقة المتبادلة (reciprocal relationship) أو نظرية التعاكس (theorem of reciprocity).

عملياً يكون من الصعب حساب F طويلاً وصعباً (شاقاً) باستثناء الأشكال البسيطة.

عندما يكون هناك جسم 1 محاطاً بأسطح أخرى، بالتالي،

$$F_{1-surfaces} = 1$$

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

$$F_{1-surfaces} = F_{1-1} + F_{1-2} + F_{1-3} + \cdots etc = 1 \quad (16)$$

المعامل F_{1-1} يكون ضرورياً في الحالات التي فيها الجسم 1 يرى أجزاء منه e.g. جسم مقعر (Concave body). لا يكون

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

Configuration	Geometric factor, F_{1-2}
(a) Body 1 completely enclosed by body 2	1
(b) Parallel circular discs, radii r_1 and r_2, distance x apart on a common axis	$\dfrac{(x^2+r_1^2+r_2^2)-\sqrt{((x_1^2+r_1^2+r_2^2)^2-4r_1^2r_2^2)}}{2r_1^2}$
(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 تم تغطيته بلوح بثقب مقداره 0.2m مثقوب في منتصفه. يتم إمداد السطح الداخلي للوح عند 250°C بواسطة سخان مزروع في السطح (embedded in the surface).

بافتراض أن الأسطح تكون سوداء ونصف الكرة معزول جيداً.

أحسب :- (a) درجة حرارة سطح نصف الكرة؛

(b) الحرارة المدخلة إلى السخان.

أذكر أي افتراض يتم عمله.

بالرجوع للشكل (9)، اجعل السطح الداخلي للوح يكون 1 ، سطح نصف الكرة 2 ، وسطح الثقب المستقطع 3 ، كما موضح -

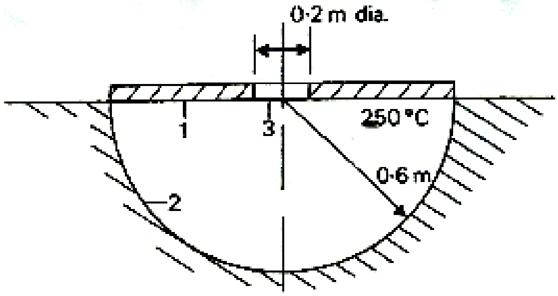


Fig. 17.38

شكل (9)

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

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

$$F_{1-2} = 1 \quad \text{(بما أن السطح لا يستطيع رؤية السطح 3)}$$

من المعادلة (15)،

$$F_{2-1} = \frac{A_1 F_{1-2}}{A_2} = \frac{\pi(0.6^2 - 0.1^2)\times 1}{2\pi \times 0.6^2} = \frac{35}{72}$$

نفس الشيء،

$$F_{3-2} = 1 \quad \text{و} \quad A_2 F_{2-3} = A_3 F_{3-2}$$

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

بالتالي،

$$\text{الطاقة المغادرة للسطح 2} = A_2 F_{2-3} \sigma T_2^4 + A_2 F_{2-1} \sigma T_2^4$$

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

الطاقة الساقطة على السطح 2 تساوي أخذها كالطاقة المغادرة للسطح 1، بما أن الطاقة الداخلة إلى الثقب من الخارج سيتم تجاهلها إذا كان المحيط كبيراً وعند درجة حرارة عادية،

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

بالتالي، للحالة المستقرة،

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

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

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

ب/ الحرارة التي تم إمدادها بالسخان،

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

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

5/ التبادل الإشعاعي أو المشع بين الأجسام الرمادية :-

(Radiant interchange between Grey bodies)

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

اللاإشعاعية (irradiation) (G) يتم تعريفها بالطاقة المشعة 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، فإن الإشعاعية (radiosity) يجب أن تتضمن لسم الطاقة الذي يتم إنعكاسه من السطح.

i.e. $J = \epsilon \sigma T^4 + \rho G$

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

$$J = \epsilon \sigma T^4 + (1 - \epsilon) G$$

أو $G = \dfrac{J - \epsilon \sigma T^4}{1 - \epsilon}$

i.e. $\dfrac{Q}{A} = J - G = J - \dfrac{(J - \epsilon \sigma T^4)}{1 - \epsilon}$

أو $Q = \dfrac{\epsilon A}{1 - \epsilon} (\sigma T^4 - J)$ ———————— (17)

لأي جسمان 1 و 2 ، يكون العامل الهندسي، F_{1-2} هو كسر من الإشعاع $A_1 J_1$ الذي يتقاطع مع الجسم 2،

i.e. $Q_{1-2} = A_1 F_{1-2} J_1 - A_2 F_{2-1} J_2$

مستخدماً المعادلة (15)،

$$Q_{1-2} = A_1 F_{1-2} (J_1 - J_2) \quad \text{———————— (18)}$$

يمكن باستخدام تناظراً كهربياً مؤسساً على قانون أوم. كمثال، من المعادلة (17)،

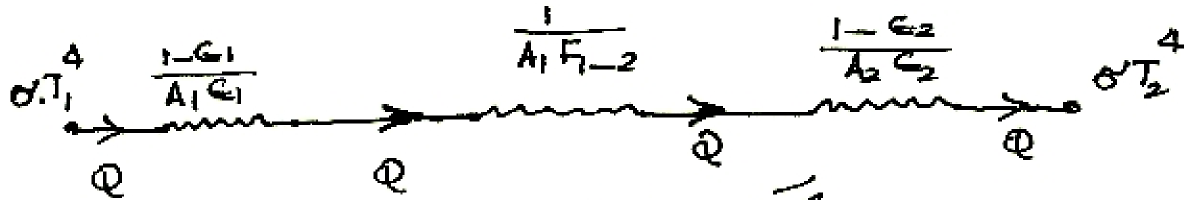
$$\frac{1-\epsilon}{\epsilon A} = \text{المقاومة نتيجة لإنبعاثية السطح} \quad \text{——— (19)}$$

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

نفس الشيء، من المعادلة (18)،

$$\frac{1}{A_1 F_{1-2}} = \text{المقاومة نتيجة للشكل الهندسي} \quad \text{——— (20)}$$

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



شكل (10)

$$\text{المقاومة الكلية}, \; R_T = \frac{1-\epsilon_1}{A_1\epsilon_1} + \frac{1}{A_1F_{1-2}} + \frac{1-\epsilon_2}{A_2\epsilon_2}$$

أيضاً في هذه الحالة، $F_{1-2} = 1$

$$\therefore R_T = \frac{1}{A_1}\left(\frac{1}{\epsilon_1} - 1 + 1 + \frac{A_1}{A_2}\left\{\frac{1}{\epsilon_2} - 1\right\}\right) = \left(\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{A_1}{A_2}\left\{\frac{1}{\epsilon_2} - 1\right\}\right)\frac{1}{A_1}$$

$$Q_{1-2} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{R_T} = \frac{A_1\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{A_1}{A_2}\left\{\frac{1}{\epsilon_2} - 1\right\}} \quad \text{——— (21)}$$

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

$$\text{i.e. } Q_{1-2} = \frac{A_1\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}$$

التعبير الأخير لإنتقال الحرارة ينطبق أيضاً إلى حالة سطحين كبيرين مستويين متوازيين حيث تكون مساحات الأسطح كبيرة مقارنة ببعدهما من بعضهما البعض، i.e. تكون الطاقة المسكة الراجعة للمحيط (surroundings) صغيرة بحيث يتم تجاهلها.

مثال (4) :-

يُرغب في خفض فقد الإشعاع بين سطحين متوازيين بوضع صفيحة (sheet) من جسيم الألمنيوم (أو شريحة) (Aluminium foil) في منتصف المسافة بينهما.

يتم اعداد درجتي الحرارة للسطحين عند $40^\circ C$ و $5^\circ C$، وتكون الإنبعاثية لكلا السطحين هي 0.85. تكون الإنبعاثية لشريحة الألمنيوم هي 0.05.

أحسب الخفض المئوي في فقد الحرارة بالإشعاع مستخدماً شريحة الألمنيوم بإفتراض أن درجات حرارة السطح هي نفسها في كلا الحالتين وأن جميع الأسطح رمادية. تجاهل تأثيرات الطرف.

(a) بدون شريحة الألمنيوم.

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

$$R_T = 1/\epsilon_1 + 1/\epsilon_2 - 1 = 2/0.85 - 1$$

i.e. $R_T = 1.353$

بالتالي من المعادلة (21)،

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

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

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

(b) بشريحة الألمنيوم (أنظر الشكل (11)).

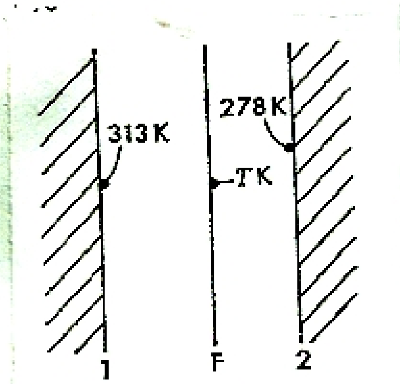


Fig. 17.40

شكل (11)

لنجعل درجة حرارة الشريحة تكون $T\,K$. الآن من السطح 1 إلى الشريحة، من المعادلة (21)،

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

ومن الشريحة إلى السطح 2،

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

بما أن كلا جانبي الشريحة يعمل بطريقة متشابهة، وبما أن $\epsilon_1 = \epsilon_2$، بالتالي $R_{T_{1-F}} = R_{T_{F-2}}$ بالتالي،

$$(T_1^4 - T^4) = (T^4 - T_2^4) \quad \text{أو} \quad T^4 = \frac{T_1^4 + T_2^4}{2} = \frac{(3.13^4 + 2.78^4)\times10^8}{2}$$

$$T^4 = 77.82\times10^8$$

أيضاً، $R_{T_1-F} = R_{T_{F-2}} = 1/0.85 + 1/0.05 - 1 = \underline{20.176}$

من المعادلة (21)،

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

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

عليه،

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

يمكن الملاحظة من هذا المثال أن المادة ذات الإنبعاثية المنخفضة تعمل كدرع إشعاعي لفقد جيداً. هذه تستخدم طبيعة في حالات كثيرة في الواقع العملي (e.g. الدرع الإشعاعية للمزدوجات الحرارية والثيرموميترات).

(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)،

$$Q_{1-2} = \epsilon_1 A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4)$$

لاحظ أن هذه المعادلة يتم تطبيقها حتى إذا كان الجسم 2 ليس أسوداً، السبب هو أنه مقداراً كبير تجاهله من الطاقة منعكساً من الجسم 2 يتم تجاهله بواسطة الجسم 1 لأنه صغير مقارنة مع الجسم 2.

عندما يكون هنالك أكثر من جسمان يقومان بتبادل الحرارة بالتالي يمكن رسم دائرة كهربية 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، فروع الجهود والتيارات كما موضح. بتطبيق قانون أوم على كل جزء من شبكة العمل، نحصل على ست معادلات،

i.e. $\sigma T_1^4 - J_1 = I_1 \frac{(1-\epsilon_1)}{A_1 \epsilon_1}$ ؛ $J_2 - \sigma T_2^4 = I_2 \frac{(1-\epsilon_2)}{\epsilon_2 A_2}$

$J_3 - \sigma T_3^4 = I_3 \frac{(1-\epsilon_3)}{\epsilon_3 A_3}$ ؛ $J_1 - J_2 = \frac{I_5}{A_1 F_{1-2}}$

$J_1 - J_3 = \frac{I_4}{A_1 F_{1-3}}$ ؛ $J_2 - J_3 = \frac{I_6}{A_2 F_{2-3}}$

أيضاً من قانون كيرتشوف للدوائر الكهربية،

$I_1 = I_4 + I_5$ ؛ $I_2 = I_5 - I_6$ ؛ و $I_3 = I_4 + I_6$

(19)

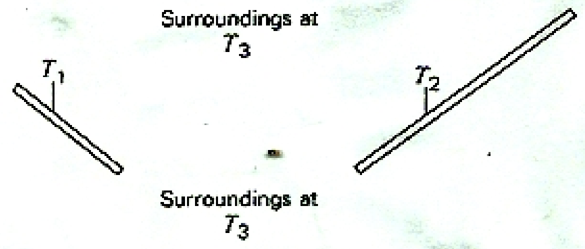


Fig. 17.41

شكل (12)

[17.18] RADIANT INTERCHANGE BETWEEN GREY BODIES

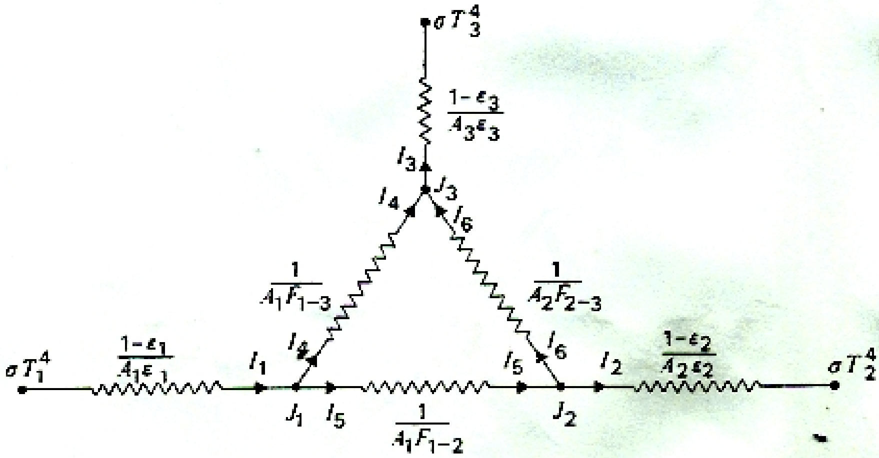


Fig. 17.42

شكل (13)

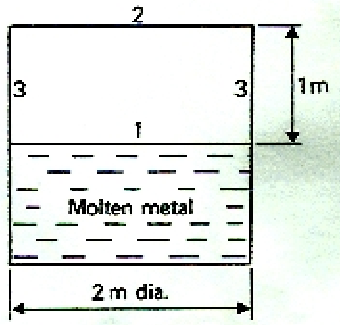


Fig. 17.43

شكل (14)

سؤال (٥) :-

وعاء أسطواني قطره 2m يحوي مادة منصهرة (حديد منصهر) درجة حرارة سطحه 1327°C ؛ يكون ارتفاع الوعاء فوق منسوب الحديد السائل هو 1m ويكون الوعاء في محيط واسع عند متوسط درجة حرارة مقدارها 27°C . يتم تبريد الجوانب الأسطوانية للوعاء فوق منسوب الحديد السائل بحيث يكون متوسط درجة الحرارة الداخلية للسطح هي 427°C .

أرسم شبكة تمثل مقاومة الإشعاع لهذه المسألة وبالتالي أحسب معدل انتقال الحرارة من سطح الحديد السائل بالإشعاع. إنبعاثية الحديد السائل = 0.3 ؛ إنبعاثية السطح الداخلي للوعاء = 0.7 .

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

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

$$\therefore F_{1-3} = 1 - 0.382 = 0.\underline{618}$$

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

أيضاً ، $\dfrac{1-\epsilon_1}{A_1\epsilon_1} = \dfrac{0.7}{\pi \times 0.3} = 0.743$ ؛ $\dfrac{1-\epsilon_2}{A_2\epsilon_2} = 0$ (بجانب المحيط أسود)

$$\frac{1-\epsilon_3}{A_3\epsilon_3} = \frac{0.3}{\pi \times 2 \times 1 \times 0.7} = \underline{0.068}$$

$$\frac{1}{A_1 F_{1-2}} = \frac{1}{\pi \times 0.382} = 0.833 \text{ ؛ } \frac{1}{A_2 F_{2-3}} = \frac{1}{A_1 F_{1-3}} = \frac{1}{\pi \times 0.618} = 0.515$$

بالتالي ،

$$\sigma T_1^4 - J_1 = 0.743 I_1 \text{ ، } J_2 - \sigma T_2^4 = 0$$

$$J_3 - \sigma T_3^4 = 0.068 I_3 \text{ ، } J_1 - J_2 = 0.833 I_5$$

$$J_1 - J_3 = 0.515 I_4 \text{ ، } J_2 - J_3 = 0.515 I_6$$

بتحويل المعادلات عاليه لتجنب J_1 ، J_2 و J_3 نحصل على ،

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

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

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

أيضاً ،

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

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

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

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

$= \underline{336\ kW}$

إذا تم في المثال عالية عزل الوعاء جيداً بدلاً عن تبريده بالتالي فإن الدائرة المكافئة ستكون كما موضح في الشكل (15) . هذه حالة أبسط بكثير ؛ يمكن حساب المقاومة المكافئة للدائرة مباشرة بما أنه ليس هنالك سريان تيار إلى الخارج أو إلى الداخل عند J_3 ،

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

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

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

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

في هذه الحالة فإن درجة الحرارة للسطح 3 سوف لن تكون $427\ ^\circ C$ كما في سابقه.

يتم إعطاء التيار المنساب من 1 إلى 3 ب

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

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

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

$$\therefore T_3 = \underline{1059.5\ K} = \underline{786.5\ ^\circ C}$$

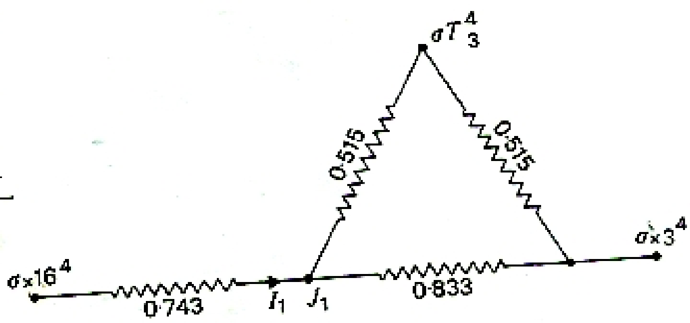


Fig. 17.44

6/ معامل إنتقال الحرارة للإشعاع :-
(Heat transfer coefficient for radiation)

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

من المعادلة (13)،

$$Q_{1-2} = F_{1-2} A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4)$$
$$= F_{1-2} A_1 \sigma (T_1^2 + T_2^4)(T_1^2 - T_2^2)$$
$$\text{i.e. } Q_{1-2} = F_{1-2} A_1 \sigma (T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)(T_1 - T_2)$$

لإنتقال الحرارة بالحمل، نحصل من المعادلة،

$$Q = h A (t_w - t)$$

بالتالي، بمقارنة المعادلتين، يمكننا كتابة،

$$h_r = F_{1-2} \sigma (T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2) \quad \text{———} \quad (22)$$

عليه، $$Q = h_r A_1 (t_1 - t_2) \quad \text{———} \quad (23)$$

يجب ملاحظة أنه لإنتقال حرارة بالحمل من سطح بمساحة سطح A، يتم استخدام مساحة السطح الكلية في الحساب، كما في المعادلة $Q = h A (t_w - t)$. في إنتقال الحرارة بالإشعاع من نفس الجسم يجب استخدام مساحة السطح الظرفي (area of the surface envelope).

مثال 6 :-

أسطوانة ذات أضلاع أو عصبيات (ribbed cylinder) بقطر خارجي 0.6m تعمل عند درجة حرارة سطح مقدارها 260°C في محيط واسع (large surroundings) عند 20°C. أحسب معامل إنتقال الحرارة بالإشعاع، وفقد الحرارة الكلي نتيجة للإشعاع والحمل. قطر الأسطوانة 0.9m ويتم تصنيعها من الحديد الزهر بإنبعاثية مقدارها 0.8. مساحة السطح للأسطوانة ذات العصبيات هي $5m^2$، ومعامل إنتقال الحرارة بالحمل يمكن أخذه مساوٍ لـ $8.8\ W/m^2K$. تجاهل تأثيرات الطرف.

بما أن الأسطوانة صغيرة مقارنة مع المحيط، بالتالي $F_{1-2} = 1$:

من نجد من المعادلة (22)،

$$h = \epsilon_1 F_{1-2} \sigma (T_1^2 - T_2^2)(T_1 + T_2)$$
$$\text{i.e. } h_r = 0.8 \times \frac{5.67}{10^8} \times (533^2 + 293^2)(533 + 293)$$

(حيث $T_1 = 260 + 273 = 533K$، و $T_2 = 20 + 273 = 293K$)، 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) ،

فقد الحرارة بالإشعاع $= h_r A_1 (t_1 - t_2)$

$= 13.87 \times \pi \times 0.6 \times 0.9 \times (260-20)$

$= \underline{5650\ W}$

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

من المعادلة $Q = hA(t_w - t)$ ،

فقد الحرارة بالحمل $= hA(t_w - t) = 8.8 \times 5 \times (260-20)$

i.e. " " " $= 10560\ W = \underline{10.56}\ kW$

بالتالي ،

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

7/ إشعاع الغاز :- (Gas radiation)

في المسائل التي تم تناولها في المقاطع السابقة فقد تم تجاهل تأثير نقل الإشعاع خلال جو غازي ؛ سيتم امتصاص بعض الإشعاع بواسطة الجو ، لكن هذا صغير جداً بحيث يمكن تجاهله . على أي حال ، غالبية الإشعاع من الغازات يكون لها أهمية في الأفران والتطبيقات المشابهة . هنالك فرق هام جداً بين الإشعاع خلال المصمتات والإشعاع من الغازات ، هذا الفرق يتمثل في أن الغازات لديها منقولية عالية (high transmissivity) وبالتالي يكون للإشعاع تأثير سطحي فقط.

أيضاً تعتبر الغازات باعثات إنتخابية (selective emitters) وهي فقط تبعث وتمتص الإشعاع في حزم موجية ضيقة (narrow wavebands) ؛ يتم استخدام هذه الحقيقة في محللات الغاز تحت الحمراء (infra-red gas analysers).

عموماً ، غالبية الغازات ذات الجزيئات المتماثلة (symmetrical molecules) (e.g. الأكسجين والنايتروجين) 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 موجية معينة.

اللهبيات في إجراءات الإحتراق عليها التعقيد في أنها غازات ساخنة يحدث فيها تفاعل كيميائي. على أي حال، يجب معاملة الإشعاع بأسلوب مختلف عن إشعاع الغاز.

بما أن معظم الإشعاع (bulk of radiation) يكون ناشئاً من جسيمات صغيرة معلقة في الأتربة . فموضوع انتقال إشعاع الأتربة معقد جداً بحيث تقدم هنا مناقشة بإيجاز .