المحاضرة ٨

انتقال الحرارة بالإشعاع

م٠ مرح تامر

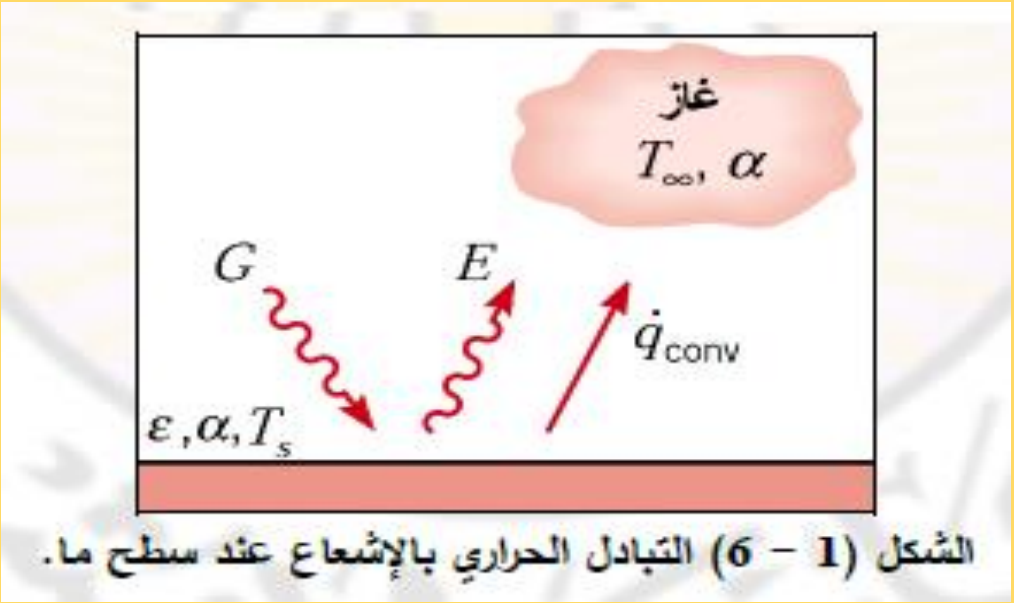
1 – 2 – 3 – الإشعاع *Radiation*:

الإشعاع الحراري هو الطاقة المنبعثة من جسم ما ذي درجة حرارة محددة. سنركز في دراستنا على الإشعاع الصادر عن السطوح الصلبة، كما يمكن أن يصدر الإشعاع عن السوائل والغازات.

تنتقل طاقة الإشعاع بواسطة الأمواج الكهرطيسية، في حين يحتاج انتقال الحرارة بالتوصيل والحمل إلى وجود وسط مادي، فإن انتقال الحرارة بالإشعاع لا يحتاج إلى مثل هذا الوسط لينتقل، بل على العكس تماماً تزداد فاعلية انتقال الحرارة بالإشعاع عندما يحدث في الفراغ.

تصدر الأجسام التي درجة حرارتها أعلى من الصفر المطلق أمواجاً كهرطيسية بطول يتراوح بين $0.8-40\,\text{mm}$ تشبه التدفقات الطاقية لموجات الضوء، مسببةً تغيراً في المحتوى الطاقي للجسم، ونسمي هذا التدفق الطاقي بالإشعاع الحراري.

ينشأ الإشعاع المنبعث عن السطح من الطاقة الحرارية للمادة، ويسمى معدل الطاقة المنبعثة من واحدة المساحة $\left[\text{W/m}^2\right]$ بشدة الإصدار للسطح E.



الشكل (1 – 6) التبادل الحراري بالإشعاع عند سطح ما.

تمتلك استطاعة الإصدار قيمة أعظمية لا تتجاوزها، ويتم تحديد هذه القيمة من خلال قانون ستيفن – بولتسمان Stefan - Boltzmann:

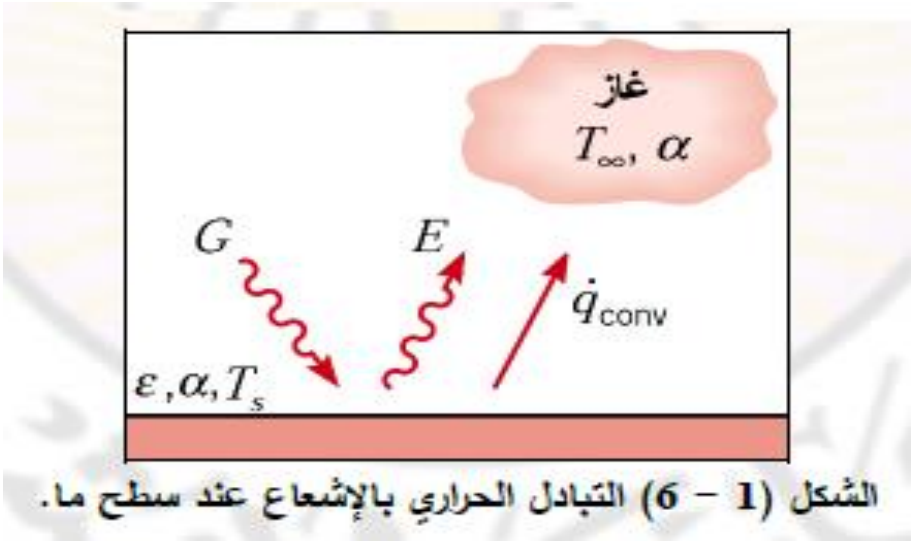
$$E_b = \sigma T_s^4 \qquad (4-1)$$

T_s: درجة الحرارة المطلقة للسطح. $[\text{K}]$

σ : ثابت ستيفان – بولتسمان.

$$\sigma = 5.67\times10^{-8}\left[\text{W/m}^2.\text{K}^4\right]$$

ونسمي مثل هذا السطح بالمشع المثالي أو الجسم الأسود.



الشكل (1 – 6) التبادل الحراري بالإشعاع عند سطح ما.

إن شدة التدفق الحراري الصادر عن السطح الحقيقي تكون أقل مما هي عليه في حالة الجسم الأسود عند درجة الحرارة نفسها، وتعطى بالعلاقة:

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4$$

ε : خاصية إشعاعية للسطح، وتسمى الإصدارية Emissivity.

الجسم الأسود: هو الجسم الكامل من حيث امتصاص الأشعة وإصدارها ولا يمكن لأي سطح يصدر طاقة أكثر من الجسم الأسود.

تتراوح قيم الإصدارية بين $0 < \varepsilon < 1$ ، وتمثل الإصدارية مقياساً لمدى فاعلية السطح في إصدار الطاقة بالنسبة للسطح الأسود. تتأثر الإصدارية بشكل كبير بمادة السطح وخشونته.

يمكن أن يرد الإشعاع إلى السطح من محيطه، وقد ينشأ الإشعاع الوارد من مصدر معين مثل الشمس، أو من سطح آخر مقابل للسطح المعرض للإشعاع. بغض النظر عن مصدر هذا الإشعاع الوارد، فإننا نسمي معدل التدفق الإشعاعي الكلي الساقط على واحدة المساحة من السطح بالأشعة الواردة G Irradiation.

يمكن أن يمتص السطح جزءاً من الأشعة الواردة، أو قد يمتصه كاملاً، مما يؤدي إلى زيادة الطاقة الحرارية للمادة. يحسب معدل الطاقة الإشعاعية الممتصة من قبل واحدة المساحة للسطح G_{abs} بعد معرفة الخاصية الإشعاعية للسطح والمسماة بالامتصاصية α absorptivity، بالعلاقة التالية:

$$G_{abs} = \alpha G$$

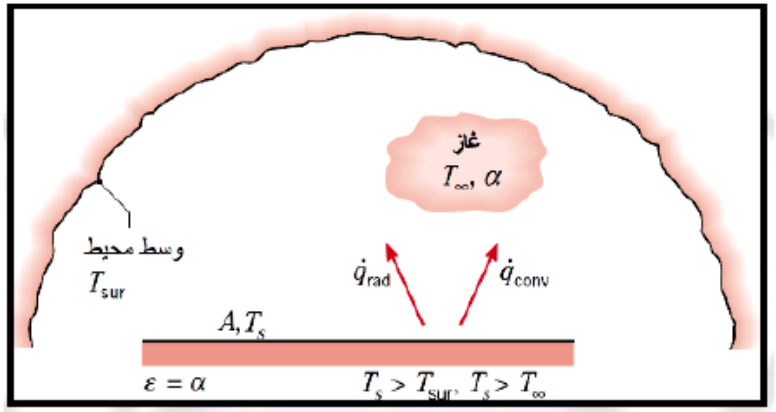
تتراوح قيمة الامتصاصية بين $0 < \alpha < 1$. إذا كان $\alpha < 1$ والسطح غير شفاف، فإن جزءاً من الأشعة الواردة سوف ينعكس. في حال كان السطح نصف شفاف فإن جزءاً من الأشعة الواردة سوف ينفذ عبر السطح. بينما يؤدي كل من الإشعاع الممتص والصادر، على التوالي، لزيادة الطاقة الحرارية للجسم وانقاصها، فإن الإشعاع المنعكس والنافذ لا يؤثران على هذه الطاقة.

يجب ملاحظة أن امتصاصية السطح α تعتمد على طبيعة الأشعة الواردة Eradiation؛ فضلاً عن نوعية السطح. فمثلاً تختلف امتصاصية السطح لأشعة الشمس عن امتصاصيته للأشعة الواردة من فرن صناعي.

توجد حالة خاصة تحدث عادةً، وتتضمن تبادلاً إشعاعياً بين سطح صغير درجة حرارته T_s، وسطح أكبر بكثير ذي درجة حرارة ثابتة يحيط بشكل كامل بالسطح الأول، ودرجة حرارته T_{sur} غير مساوية لدرجة حرارة السطح الصغير $(T_{sur} \neq T_s)$، ويمكن أن يكون السطح المحيط عبارة عن جدران غرفة أو فرن، كما في الشكل (1 – 7).

سنبين لاحقاً خلال دراستنا للإشعاع أنه من أجل ظروف مماثلة للحالة الخاصة السابقة، فإنه يمكن عَدُّ الأشعة الواردة بشكل تقريبي إشعاعاً صادراً عن جسم أسود درجة حرارته T_{sur}، أي:

$$G = \sigma T_{sur}^4$$



الشكل (1 – 7) التبادل الحراري بالإشعاع بين سطح صغير ومحيط كبير.

إذا افترضنا أن السطح رمادي، أي إن $\alpha = \varepsilon$، فإن معدل التدفق الحراري الكلي المحصل بالإشعاع لواحدة المساحة من السطح يحسب من العلاقة:

$$\dot{q}_{rad} = \frac{\dot{Q}}{A} = \varepsilon E_b(T_s) - \alpha G = \varepsilon\sigma\left(T_s^4 - T_{sur}^4\right) \qquad (7-1)$$

إن هذه المعادلة تبين الفرق بين الطاقة الحرارية المتحررة بالإشعاع الصادر والطاقة المكتسبة بالإشعاع الممتص.

يمكن التعبير عن التبادل الحراري بالإشعاع من خلال العلاقة التالية:

$$\dot{q}_{rad} = \alpha_{rad} A\left(T_s - T_{sur}\right) \qquad (8-1)$$

حيث إن α_{rad} يمثل معامل انتقال الحرارة بالإشعاع، ويعطى بالعلاقة:

$$\alpha_{rad} = \varepsilon\sigma\left(T_s - T_{sur}\right).\left(T_s^2 + T_{sur}^2\right) \qquad (9-1)$$

ويعطى معدل انتقال الحرارة الكلي من السطح المبين في الشكل (1 – 7) إلى الوسط المحيط بالعلاقة:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} = \alpha A\left(T_s - T_\infty\right) + \varepsilon A\sigma\left(T_s^4 - T_{sur}^4\right) \qquad (10-1)$$

- مثال:
- احسب الضياع الحراري بالإشعاع من أنبوب من الفولاذ قطره 70 mm وطوله 3m اذا علمت أن درجة حرارته 500 k، إذا وضعنا الأنبوب في غرفة كبيرة من القرميد الذي درجة حرارته 300 k، إصدارية القرميد $\varepsilon = 0.8$.

$$Q = \varepsilon . \sigma . A\left({T_s}^4 - {T_{sur}}^4\right)$$

$$Q = 0.8\ x\ 5.67\ x10^{-5}\ x(2\pi\ x\ 35\ x\ 10^{-3} x\ 3) x\ (500^4 - 300^4)$$

$$Q = 1626.1\ W$$

مثال 1 – 3:

يمر أنبوب بخار غير معزول عبر غرفة درجة حرارة الهواء والجدران فيها 25 °C . القطر الخارجي للأنبوب 70 mm ، ودرجة حرارة سطحه 200 °C ، وإصدارية السطح 0.8 . ما استطاعة الإصدار والأشعة الواردة للسطح؟ إذا كان معامل انتقال الحرارة بالحمل الحر من السطح إلى الهواء $15\left[\mathrm{W/m^2.K}\right]$, ما معدل الفقد الحراري من السطح من أجل واحدة الطول للأنبوب؟

الحل:

المعطيات: أنبوب غير معزول قطره معلوم، إصدارية سطح الأنبوب ودرجة حرارته، درجة حرارة سطح الغرفة والهواء داخلها ثابتة.

المطلوب:

شدة الإصدار للسطح، والأشعة الواردة.

معدل الفقد الحراري لواحدة الطول للأنبوب.

الافتراضات:

شروط الحالة المستقرة.

التبادل الحراري بالإشعاع بين الأنبوب والغرفة

هو تبادل بين سطح صغير وإطار مغلق أكبر بكثير.

الإصدارية والامتصاصية متساويتان.

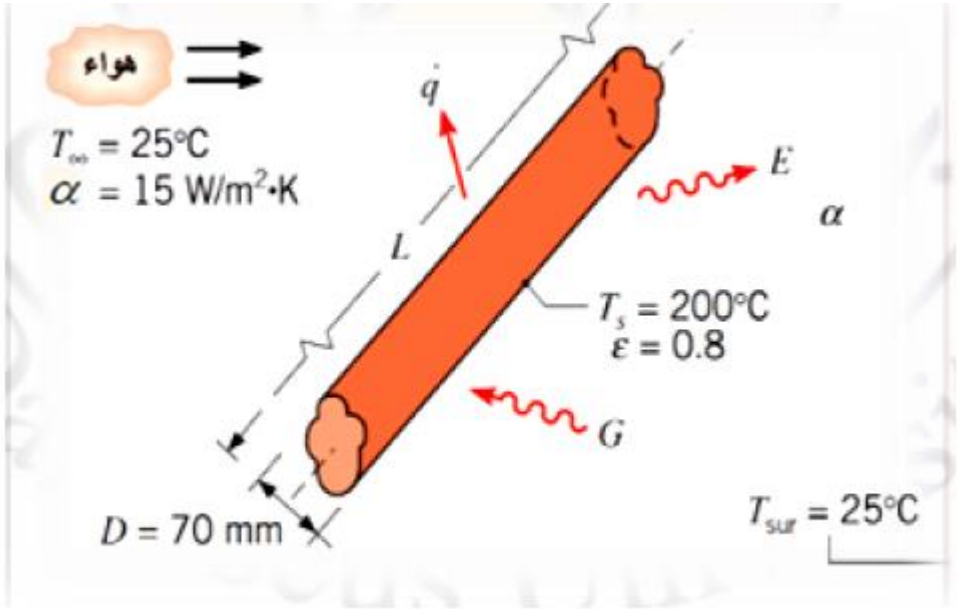
التحليل:

تحسب شدة الإصدار للسطح من العلاقة (1 – 5):

$$E=\varepsilon\sigma T_s^4=0.8\left(5.67\times10^{-8}\,\mathrm{W/m^2.K^4}\right)(473\,\mathrm{K})^4=2270\,\mathrm{W/m^2}$$

بينما تحسب الأشعة الواردة بالعلاقة:

$$G=\sigma T_{sur}^4=5.67\times10^{-8}\,\mathrm{W/m^2.K^4}\,(298\,\mathrm{K})^4=447\,\mathrm{W/m^2}$$



يحدث الفقد الحراري من الأنبوب عن طريق :

الحمل إلى هواء الغرفة والتبادل الإشعاعي مع الجدران. بالتالي فإن

$$\dot{Q}=\dot{Q}_{conv}+\dot{Q}_{rad}$$

وحيث إن مساحة الأنبوب $A=\pi DL$ ، فإننا

نحسب معدل الفقد الحراري من الأنبوب بالعلاقة :

$$\dot{Q}=\alpha(\pi DL)(T_s-T_\infty)+\varepsilon(\pi DL)\sigma\left(T_s^4-T_{sur}^4\right)$$

وبالتالي فإن الفقد الحراري من أجل واحدة الطول للأنبوب, هو :

$$\dot{q}=\frac{\dot{Q}}{L}=15\,\mathrm{W/m^2.K}\left(\pi\times0.07\,\mathrm{m}\right)(200-25)\,^\circ\mathrm{C}$$
$$+0.8\left(\pi\times0.07\,\mathrm{m}\right)5.67\times10^{-8}\,\mathrm{W/m^2.K^4}\left(473^4-298^4\right)\mathrm{K}^4$$
$$\dot{q}=577\,\mathrm{W/m}+421\,\mathrm{W/m}=998\,\mathrm{W/m}$$