جامعة ذي قار- كلية العلوم- قسم الكيمياء

الكيمياء الصناعية- المرحلة الثالثة

انتقال الحرارة- Heat transfer

علم انتقال الحرارة هو العلم الذي يصف انتقال الحرارة (الطاقة الحرارية Thermal Energy) والذي يحدث نتيجة الفرق في درجات الحرارة وبالتالي يدرس هذا العلم توزيع الحرارة والتغير الذي يحصل نتيجة انتقالها. بصورة عامة تنتقل الحرارة او الطاقة الحرارية بثلاث طرق او ميكانيكيات مختلفة:

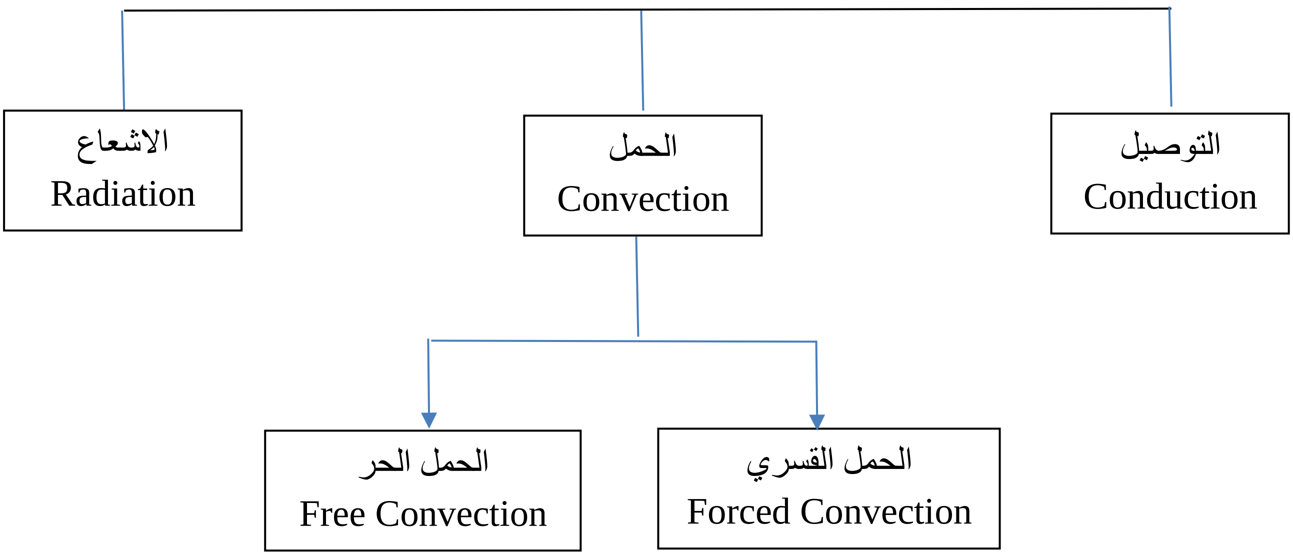
التوصيل (Conduction heat transfer)

الحمل او تيارات الحمل (Convection heat transfer)

الاشعاع (Radiation heat transfer)

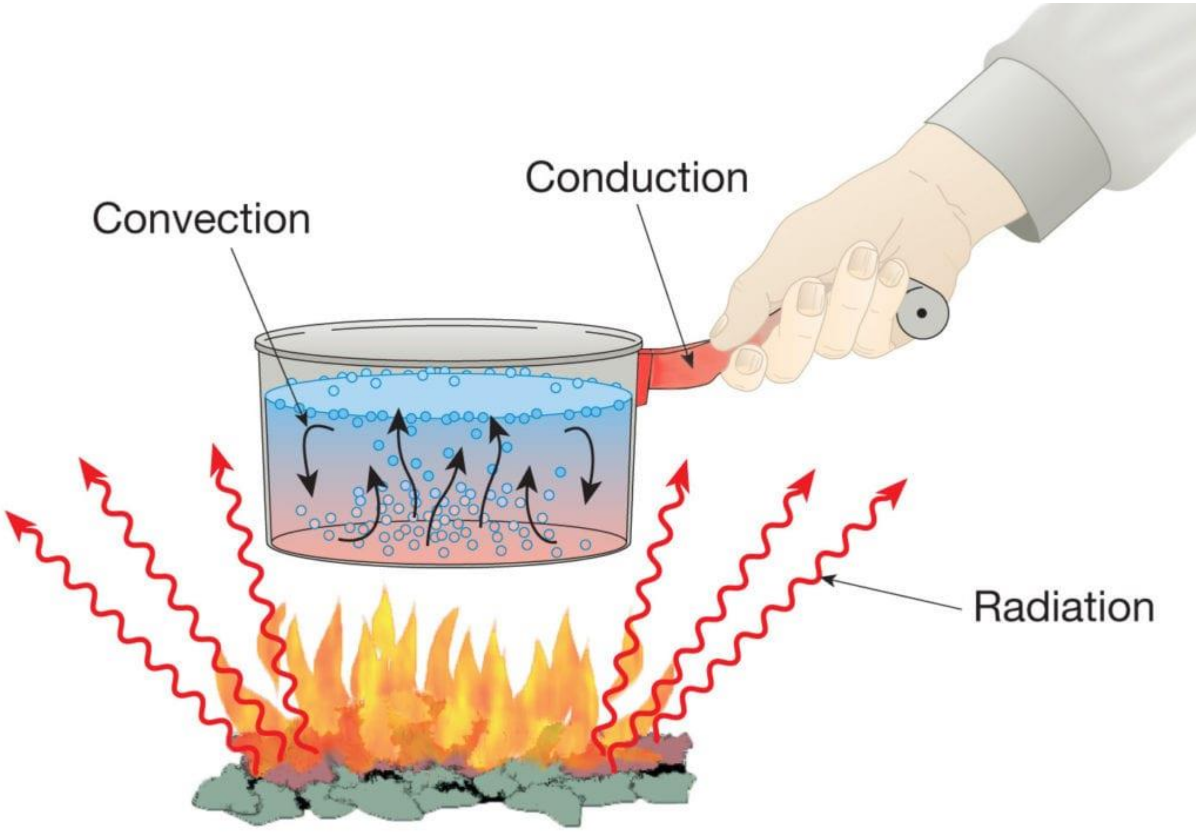
المبادئ والقوانين الاساسية لجميع الميكانيكيات الثلاث المذكورة اعلاه وجدت على اساس قوانين حفظ الطاقة اي ان الطاقة تتحول من شكل الى اخر. لكل ميكانيكية انتقال حرارة هناك قوانين وعلاقات رياضية تصفها والتي من خلالها يمكن حساب كميات الطاقة الحرارية المنتقلة ودرجات الحرارة وغيرها من المتغيرات.

يمكن توضيح طرق انتقال الحرارة باستخدام المخطط التالي



شكل 1: مخطط يوضح الميكانيكيات المستخدمة لوصف انتقال الحرارة او الطاقة الحرارية

كمما يوضح الشكل 2 تلك الميكانيكيات بصورة مبسطة:



شكل 2: ميكانيكيات التوصيل الحراري مجتمعة
(https://www.simscale.com/docs/simwiki/heat-transfer-thermal-analysis/what-is-heat-transfer/)

1- التوصيل (Conduction)

التوصيل هو عملية انتقال الحرارة من نقطة الى اخرى او من جسم الى اخر عن طريق الاتصال الجزيئي (molecular communication) عن طريق حركة الالكترونات الحرة في الجزيئات ويكون الجسمين بحالة تماس مباشر حيث تنتقل الطاقة الحرارية او الحرارة من منطقة عالية درجة الحرارة الى منطقة واطئة درجة دون حركة الجسم او جزيئاته عندها نقول ان الحرارة انتقلت بواسطة التوصيل. هذا النوع من انتقال الحرارة يحدث غالبا في الاجسام الصلبة.

اول من اوجد صيغة رياضية واضحة للتعبير عن انتقال الحرارة بالتوصيل هو العالم جوزيف فوريير(Joseph Fourier) في القرن التاسع عشر. يمكن اشتقاق قانون فوريير كما يلي:

$$Q = \frac{q}{A} \propto \frac{dT}{dx}$$

$$Q = \frac{q}{A} = -K\frac{dT}{dx}$$

$$q = -KA\frac{dT}{dx} \qquad (1)$$

المعادلة رقم 1 تمثل قانون فوريير لحساب الحرارة المنتقلة بواسطة التوصيل حيث ان :

Q تمثل الحرارة المنتقلة او المنسابة خلال وحدة المساحة ولها الوحدة $\frac{J}{\sec m^2}$

q تمثل الطاقة الحرارية او الحرارة المنسابة او المنتقلة وتحسب بالواط $\frac{J}{\sec} = W$

A تمثل المساحة التي يحصل عليها او من خلالها الانتقال الحراري m^2

K هو معامل التوصيل الحراري ويختلف من مادة الى اخرى وله الوحدات $\frac{W}{m\,K}$ او $\frac{W}{m\,°C}$ حيث ان المواد الموصلة للحرارة لها معامل توصيل حراري عالي بينما المواد غير الموصلة للحرارة (العازلة) لها معامل توصيل واطئ.

$\frac{dT}{dx}$ يمثل التغير في درجة الحرارة مع المسافة بأتجاه انتقال الحرارة.

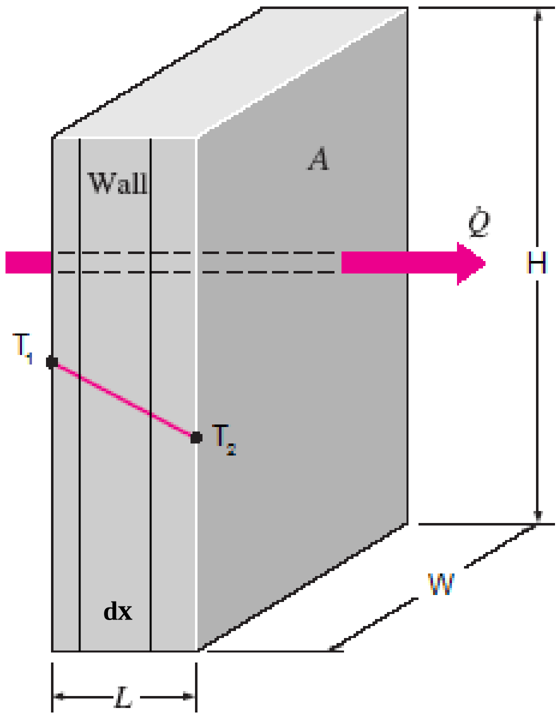
هناك فرضيتان للتعامل مع انتقال الحرارة بالتوصيل هما:

الحالة المستقرة (steady state) حيث ان تغير درجة الحرارة مع الزمن يهمل $\frac{dT}{dt} = 0$

الحالة الغيرالمستقرة (unsteady state) حيث ان تغير درجة الحرارة مع الزمن لا يهمل $\frac{dT}{dt} \neq 0$

في هذا الفصل سوف نتعامل مع الحالة المستقرة مع فرضية ان الحرارة تنتقل بأتجاه واحد فقط.

ولغرض الاستفادة من قانون فوريير للسطح المستوي سوف نتعامل مع الحالة التالية الموضحة في الشكل 3.



شكل 3: انتقال الحرارة خلال جدار (سطح مستوي)

$$q = -KA\frac{dT}{dx}$$

$$qdx = -KAdT$$

$$q\int_0^L dx = -KA\int_{T_1}^{T_2} dT$$

$$qL = KA(T_1 - T_2)$$

$$q = \frac{KA}{L}(T_1 - T_2) \qquad (2)$$

المعادلة 2 تمثل الحرارة المنتقلة خلال سطح مستوي

R تمثل المقاومة الحرارية او المقاومة التي يبديها جسم معين او وسط معين لمرور الحرارة ويمكن حسابها من العلاقة التالية:

$$R = \frac{L}{KA}$$

معنى ذلك ان المعادلة 2 يمكن ان تكتب بالشكل التالي:

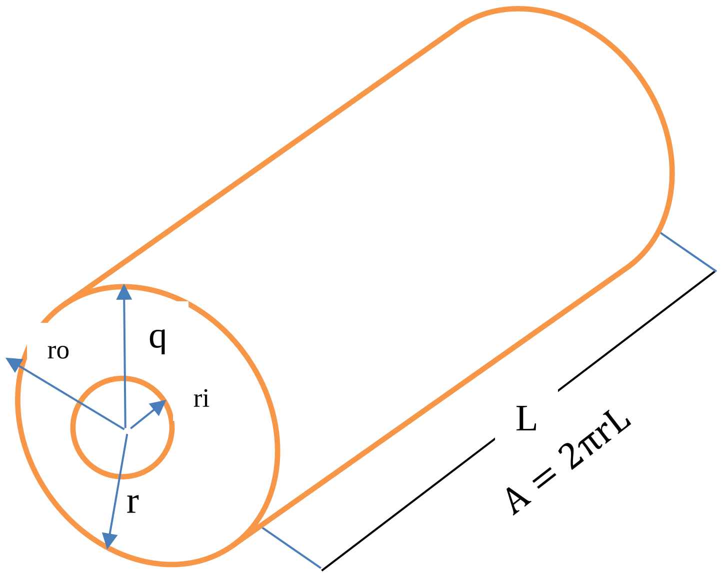
$$q = \frac{1}{R}(T_1 - T_2)$$

اي ان العلاقة ادناه تصبح:

$$q = \frac{\Delta T}{R} \qquad (3)$$

تغيير قيمة R وكذلك طريقة حساب المساحة A في المعادلة اعلاه يؤثر على نوع العلاقة التي منها تحسب قيمة q.

معنى ذلك في حالة الجسم الاسطواني والكروي معادلة فوريير ستكون مختلفة ولنأخذ الجسم الاسطواني الموضح بالشكل 4 حيث ان قانون فوريير يكون كما يلي:



شكل 4: انتقال الحرارة خلال جسم اسطواني

$$q = -KA\frac{dT}{dr} \qquad (4)$$

$$A = 2\pi rL$$

بذلك تكون المعادلة 4 كما يلي

$$q = -2\pi K L r \frac{dT}{dr}$$

$$qdr = -2\pi K L r dT$$

$$q \int_{r_i}^{r_o} \frac{dr}{r} = -2\pi K L \int_{T_i}^{T_o} dT$$

$$q ln \frac{r_o}{r_i} = 2\pi K L (T_i - T_o)$$

$$q = \frac{2\pi K L}{ln \frac{r_o}{r_i}} (T_i - T_o)$$

$$q = \frac{\Delta T}{R}$$

$$R = \frac{ln \frac{r_o}{r_i}}{2\pi K L}$$

$$q = \frac{2\pi K L}{ln \frac{r_o}{r_i}} (T_i - T_o) \qquad (5)$$

المعادلة رقم 5 تمثل انتقال الحرارة خلال جسم اسطواني ويمكن استخدامها لايجاد كمية الحرارة المنتقلة او درجات الحرارة.

في حالة انتقال الحرارة عبر سر او خلل سطح كروي تصبح العلاقة التي تمثل قانون فورير كما يلي:

$$q = \frac{4\pi K \, (T_i - T_o)}{\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_o}} \qquad (6)$$

علما ان المساحة السطحية للكرة تحسب من العلاقة التالية:

$$A = 4\pi r^2$$

س: اشتق الغلاقة التي تمثل قانون فوريير لانتقال الحرارة خلال سطح كروي. اي اشتق المعادلة رقم 6

تناظر المقاومة الحرارية مع المقاومة الكهربائية:

انتقال الطاقة الحرارية ايضا يواجه مقاومه كما هو الحال في انتقال الطاقة الكهربائية حيث ان الاختلاف في درجة الحراة يكون مشابها للاختلاف في الفولتية في الدوائر الكهربائية وبذلك يمكن ان يكون قانون فوريير مماثلا لقانون أوم ويمكن التغبير عن التماثل بالشكل رقم 5:

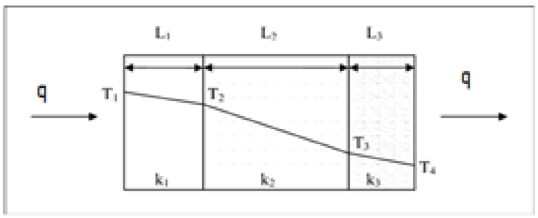
$$R = \frac{L}{KA}$$

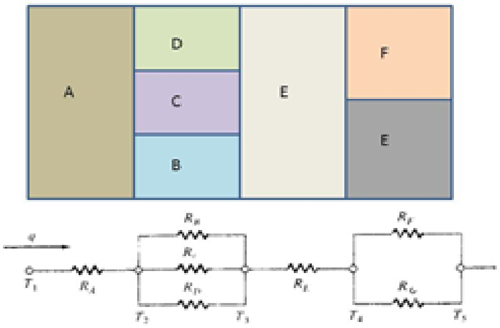
شكل 5: تناظر المقاومة الحرارية مع المقاومة الكهربائية

حيث ان الحرارة تمثل بالعلاقة التالية:

$$q = \frac{\Delta T}{R} = \frac{\text{فرق الجهد الحراري}}{\text{المقاومة للحرارة}}$$

ويمكن ان تكون المقاومات الحرارية على التوالي او على التوازي كما موضح بالشكل 6:





a

b

يمكن تمثيل المقاومات الحرارية التي تمثل الشكل 6a كما في ادناه:

$$R_1 = \frac{L_1}{K_1 A_1} \qquad R_2 = \frac{L_2}{K_2 A_2} \qquad R_3 = \frac{L_3}{K_3 A_3}$$

$$q = \frac{\Delta T}{R_{total}} = \frac{\text{فرق الجهد الحراري}}{\text{المقاومة للحرارة}}$$

$$q=\frac{\Delta T}{R_{total}}=\frac{T_1-T_4}{R_1+R_2+R_3}=\frac{\Delta T_1}{R_1}=\frac{\Delta T_2}{R_2}=\frac{\Delta T_3}{R_3}$$

$$q=\frac{\Delta T}{R_{total}}=\frac{T_1-T_4}{R_1+R_2+R_3}=\frac{T_1-T_2}{\frac{L_1}{K_1A_1}}=\frac{T_2-T_3}{\frac{L_2}{K_2A_2}}=\frac{T_3-T_4}{\frac{L_3}{K_3A_3}} \qquad (7)$$

المعادلة رقم 7 يمكن استخدامها لحساب الحرارة المارة خلال جدار مكون من عدة طبقات

(composite wall) حيث ان الحرارة المارة في اي مقاومة هي نفسها المارة بالمقاومات الاخرى لكن بأختلاف درجة الحرارة لذلك حساب الحرارة المنسابة من اية معلومات متوفرة يمكننا من حساب المجاهيل الاخرى على اعتبار ان الحرارة نفسها تمر ولاتفقد.

بنفس الطريقة يمكن صياغة معادلة لحساب الحرارة المنسابة للشكل b6 مع مراعاة ان بعض المقاومات مربوطة على التوازي وكما موضح في الشكل اعلاه.

امثلة محلولة:

مثال 1: احسب الحرارة المارة خلل جدار سمكه9.12 انج وارتفاعة 1 متر مع عرض للجدار 1 متر ايضا عندما تكون درجة الحرارة داخل الفرن 982 درجة مئوية وخارجه 198 درجة مئوية علما ان مقدار قيمة Kللجدار كما يلي

$K=0.405*10^4 \frac{W}{m\,°C}$

الحل:

$$q=\frac{\Delta T}{R}$$

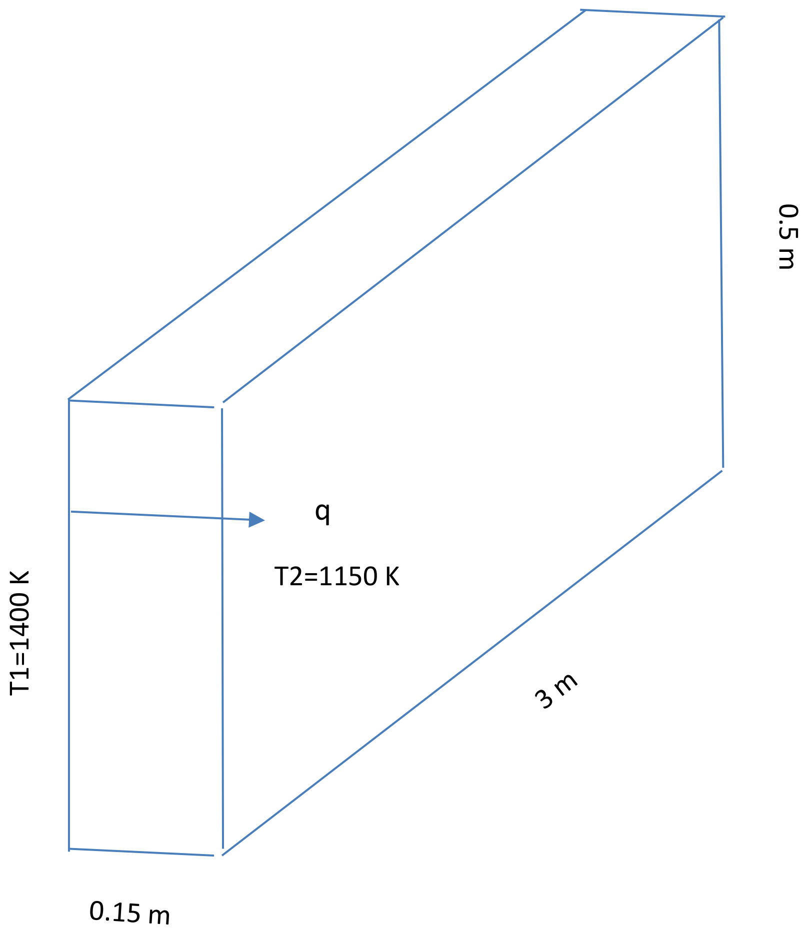
$$q=\frac{T_1-T_2}{\frac{L}{KA}}$$

$$L=9{,}12\ in\times\frac{2.5\ cm}{1\ in}\times\frac{1\ m}{100\ cm}=0.22\ m$$

$$q=\frac{T_1-T_2}{\frac{L}{KA}}=\frac{982-198}{\frac{0.22}{0.405\times10^4\times(1\times1)}}=\frac{784}{0.000054}=14518518\ W=14518\ kW$$

مثال 2 :جدار فرن صناعي صنع من الطابوق الناري بسمك 0.15 متر وله معامل توصيل حراري $k=1.7 w/m.K$. قياسات درجة الحرارة اوضحت ان درجات الحرارة داخل وخارج الفرن على الترتيب هي 1440 و1150 K.ماهو معدل الحرارة المنسابة خلال الجدار اذا كان عرض الجدار 3 متر وارتفاعه 0.5 متر.

الحل:



$$q=\frac{T_1-T_2}{\frac{L}{KA}}=\frac{1400-1150}{\frac{0.15}{1.7\times(3\times0.5)}}=\frac{250}{\frac{0.15}{2.55}}=4250\ W=4.250\ kW$$

مثال 3: صفيحة من النحاس سمكها 3 سم ودرجة حرارة احد وجهيها 400 درجة مئوية والوجه الاخر 100 درجة مئوية اذا كانت قيمة ثابت التوصيل الحراري K= 370 W/m .C احسب الحرارة المارة خلال الصفيحة:

الحل:

$$q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{L}{KA}} = \frac{400 - 100}{\frac{3/100}{370 \times 1}} = \frac{300}{\frac{0.03}{370}} = 3700000W = 3700\ kW$$

في الحالة اعلاه اعتبرنا ان المساحة التي عبرها انتقال الحرارة 1 متر مربع. بالامكان ان نقسم على المساحة في حالة عدم معرفتها ونقول بان

$$Q = \frac{q}{A} = \frac{400 - 100}{\frac{3/100}{370 \times 1}} = \frac{300}{\frac{0.03}{370}} = 3700000W = 3700\ kW$$

2- الحمل (Convection)

هذا النوع المهم من عملية انتقال الطاقة الحرارية يحدث عادة في الموائع والتي تشمل الغازات والسوائل ويحدث انتقال الحرارة عن طريق انتقال جزيات المادة اي بواسطة الحركة الجزيئية. ويمكن ان نسمي الحالة بانها انتقال الطاقة الحرارية بين سطح صلب والمائع الملاصق له.

هناك نوعين من من الانتقال بواسطة تيارات الحمل

أ: الحمل الحراري الحر: في هذه الحالة تحدث عملية انتقال الحرارة عن طريق حركة جزيئات المائع الحرة ويحدث ذلك بسبب فرق الكثافة والذي يؤي الى حركة جزيئات المائع وبالتالي انتقال الحرارة.

ب: الحمل الحراري القسري (forced convection) ويحدث عند استخدام وسائل لحركة السائل كالمضخات والمراوح.

يوصف معدل انتقال الحرارة بتيارات الحمل بصورة مبسطة بواسطة قانون نيوتن للتبريد وكما يلي.

$$q = h\, A_s\, (T_s - T_\infty) \qquad (7)$$

حيث ان A تمثل المساحة السطحية والتي تنتقل من خلالها الحرارة بينما T_s هي درجة حرارة السطح الحار والذي تنتقل منه الحرارة وتمثل T_∞ هي حرارة الوسط المحيط بالجسم الحار. المتغير الجديد في هذه المعادلة هو h وهو معامل انتقال الحررة (heat transfer coefficient) وله الوحدات $(\frac{W}{m^2K})$.
يعتمد معامل الانتقال الحاري على خواص الوسط المائع المحيط بالجسم الحار الصلب وهو لذلك ليس مواصفة مادة صلبة بل مواصفة النظام المحيط.

المعادلة رقم 7 يمكن ان تكتب بالشكل التالي:

$$q = h\, A_s\, \Delta T$$

$$q = \frac{\Delta T}{R}$$

حيث ان R في هذه الحالة يكون كما يلي:

$$R = \frac{1}{h\,A_s}$$

وبصورة مشابهه لانتقال الحرارة بالتوصيل فأن R هي المقاومة الحرارية والتي تعيق انتقال الحرارة.

س: ماهي وحدات كل من معامل التوصيل الحراري K ومعامل الانتقال الحراري. اشتق وحدات كل ثابت.

لنأخذ على سبيل المثال سلك معدني بطول L وقطر D او نصف قطر r

لهذا السلك فأن

$$A_x = \frac{\pi}{4} D^2$$

$$A_s = \pi D l = 2\pi r l$$

في بعض الاحيان ولحساب الحرارة المنتقلة الى مائع متحرك او مستقر من الممكن ان نستخدم المعادلة التالية.

$$q = m^{\cdot} C_p \Delta T \qquad (8)$$

حيث ان $m^{\cdot}$ هي كتلة المائع سواء كان سائل او غاز C_p هي السعة الحرارية لذلك المائع والتي تختلف من مائع الى اخر.

أمثلة:

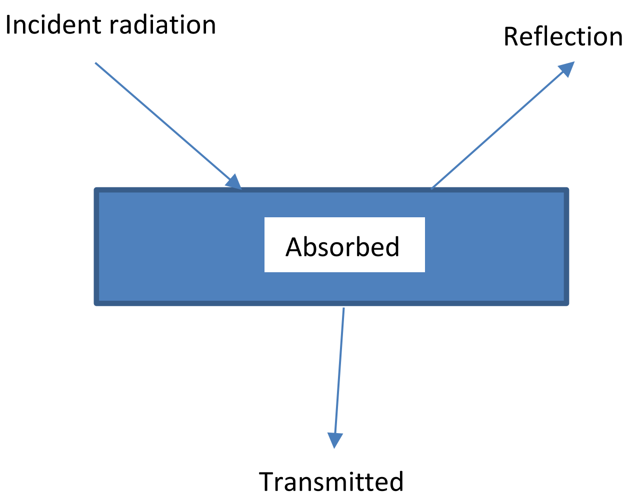
مثال 1: هواء درجة حرارته 20 درجة مئوية ينفخ على صفيحة حارة بابعاد 20*30 انج درجة حرارتها 250 درجة مئوية معامل انتقال الحرارة هو $25\ W/m^2\ C$. احسب الحرارة المنتقلة بتيارات الحمل؟

الجواب:

3- الاشعاع (Radiation)

اعتمادا على علم الفيزياء فأن انتقال الطاقة الحرارية بفعل انبعاث الموجات الكهرومغناطيسية يسمى بالاشعاع الحراري.

يوضح الشكل 7 عند سقوط الاشعاع على سطح فأن قسم من هذا الاشعاع ينعكس (Reflection) وقسم اخر يمتص داخل الجسم (Absorbed) والجزء الثالث من الاشعاع الضوئي يمر من خلال الجسم (Transmitted)



شكل 7: سقوط الضوء على جسم

كما موضح بالشكل 7 فأن الموجات الكهرومغناطيسية تنتقل في الفراغ وتسقط على الجسم الذي يعترض طريقها. الموجات الممتصة داخل الجسم تتحول مرة اخرى الى طاقة لترفع الطاقة الداخلية للجسم او ترفع درجة حرارته.

يمكن تعريف الجسم الاسود في هذه الحالة بأنه الجسم الذي يمتص جميع الضوء الساقط على سطحه وان كانت هذه الحلة مثالية. الحرارة المنبعثة من الجسم الاسود يمكن التعبير عنها بالمعادلة التالية:

$$q_b = \sigma A T^4 \qquad (9)$$

where

q = heat transfer per unit time (W)

σ = 5.669 ×10^{-8} (W/m^{2}K^4) - ***The Stefan-Boltzmann Constant***

تسمى المعادلة 9 بأنها معادلة ستيفن بولتزمان نسبة الى العالمين ستيفن وبولتزمان والذين اثبتا هذه النظرية. تطبق هذه المعادلة على الجسم الاسود الذي يمتص جميع الاشعاع الساقط عليه.

عند تبادل الحررة بين جسمين متقابلين احدهما حار والاخر بارد يمكن ان نستخدم المعادلة التالية.

$$q = \sigma\, A_h\left(T_h^4 - T_c^4\right) \qquad (10)$$

هذه المعادلة تطبق على الجسمين الاسودين اما اذا لم يكن الجسم اسود يدخل هنا متغير جديد وهو € او الامتصاصية حيث ان:

$$€ = \frac{E}{E_b}$$

حيث ان :

$$E = \sigma T^4$$

$$E_b = \sigma T^4$$

E تمثل الحرارة الممتصة الى وحدة المساحة $E = \frac{W}{m^2}$

€ تحسب من جداول خاصة معدة ومن الممكن استخدامها.

ولحساب انتقال الحرارة بين الاجسام التي لها لون غير اللون الاسود نستخدم المعادلة التالية:

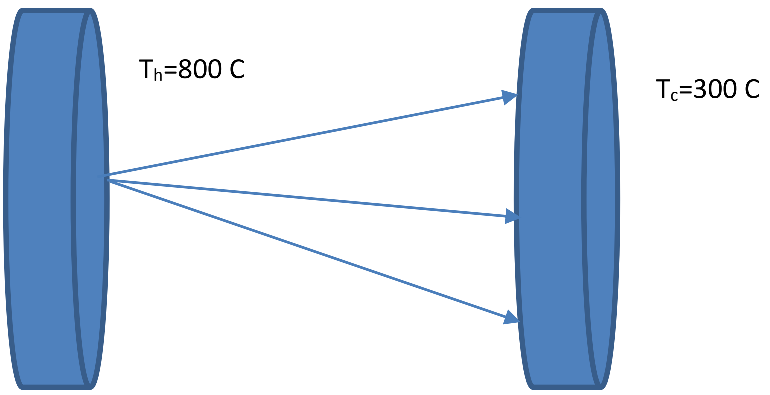
$$q = €\sigma A_h\left(T_h^4 - T_c^4\right) \qquad (11)$$

أمثلة:

1- احسب الحرارة المتبادلة بالاشعاع الى وحدة المساحة بين جسمين اسودين درجة حرارة الجسم الحار 800 درجة مئوية والجسم البارد 300 درجة مئوية علما ان ثابت بولتزمان هو

$$\sigma = 5.669 \times 10^{-8}$$

الحل:



$$q = \sigma A_h\left(T_h^4 - T_c^4\right)$$

$$\frac{q}{A_h} = \sigma\left(T_h^4 - T_c^4\right)$$

$$\frac{q}{A_h} = 5.669 \times 10^{-8}[(800 + 273)^4 - (300 + 273)^4]$$

$$\frac{q}{A_h} = 69.03\ \frac{W}{m^2}$$

2- فرن حراري درجة حرارته 2250 K يحتوي على نافذة زجاجية بقطر 6 سم لمراقبة عملية الصهر داخل الفرن. أذا كانت قيمة € 0.08 احسب الحرارة المفقودة من خلال النافذة الزجاجية:

الحل:

$$q = \epsilon\sigma A_h(T_h^4)$$

$$q = 0.08 \times 5.669 \times 10^{-8} \times \frac{\pi}{4}(\frac{6}{100})^2(2250)^4$$

$$q = 328530\ \text{W} = 328.53\ \text{kW}$$

3- قرص من السليكون بقطر 20 سم موضوع على خط انتاجي ويجب ان يحافظ على حرارته 100 درجة مئوية. يفقد القرص حرارة الى الغرفة الموضوع فيهاعن طريق الاشعاع وتيارات الحمل من سطحه الاعلى ويجهز بالحرارة من سطحه الاسفل بمعدل ثابت. درجة حرارة الهواء المحيط 20 درجة مئوية ومعامل انتقال الحرارة من القرص الى الهواء

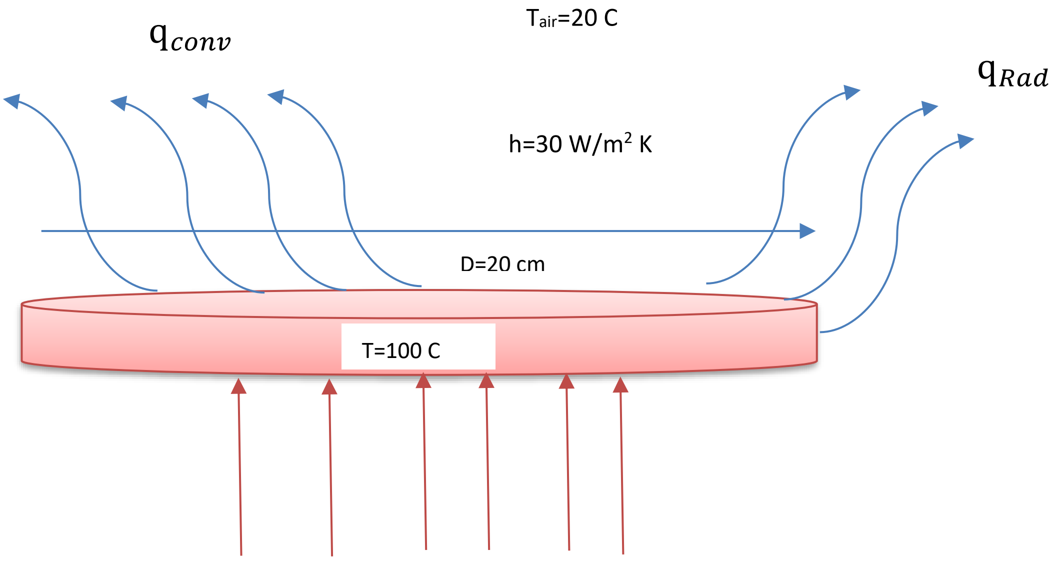
$$h = 30\ \frac{W}{m^2K}$$

وقيمة

$$\epsilon = 0.85$$

احسب الحرارة المجهزة الى القرص على فرض لاتوجد حرارة متراكمة في القرص؟

الحل:



q_{in} =?

الموازنة الحرارية heat balance

$$q_{in} = q_{out} + Acc$$

$$Acc = 0$$

لايوجد حرارة متراكمة على فرض ان الحالة مستقرة.

$$q_{in} = q_{conv} + q_{Rad}$$

$$q_{conv} = hA(T_{disk} - T_{air})$$

$$q_{Rad} = \varepsilon\sigma A_h(T_{disk}^4 - T_{air}^4)$$

$$q_{in} = hA(T_{disk} - T_{air}) + \varepsilon\sigma A_h(T_{disk}^4 - T_{air}^4)$$

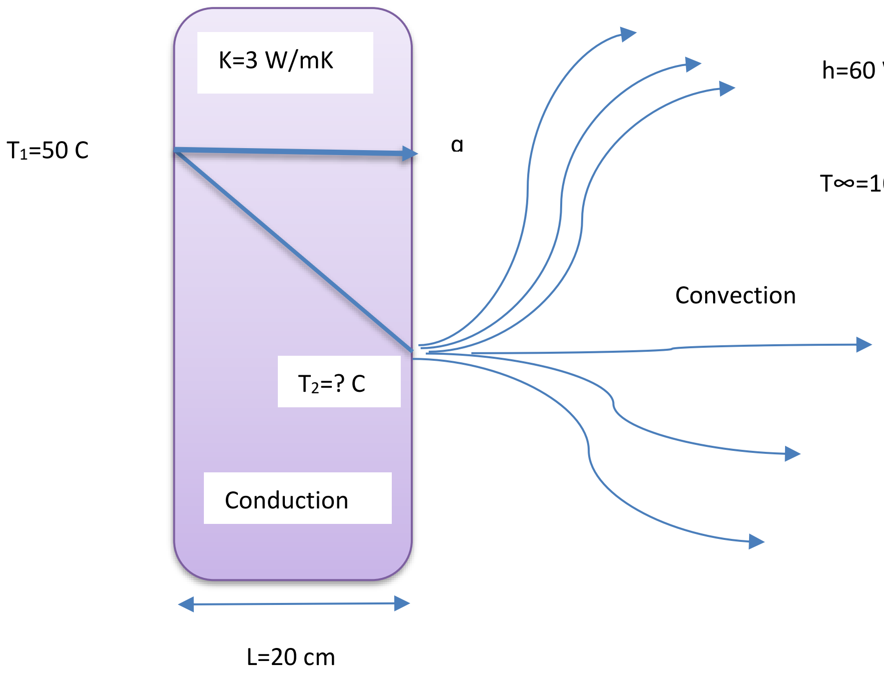
$$q_{in} = hA(T_{disk} - T_{air}) + \varepsilon\sigma A_h(T_{disk}^4 - T_{air}^4)$$

$$q_{in} = 30(\frac{\pi}{4}(0.2)^2)(100-20) + 0.85 \times 5.669 \times 10^{-8} \times (\frac{\pi}{4}(0.2)^2)[(100+273)^4 - (20+273^4)]$$

$$q_{in} =$$

4- في الشكل التالي احسب درجة الحارة المطلوبة معتمدا على موازنة الطاقة حيث ان الحرارة المنتقلة بالتوصيل هي نفسها المنتقلة بتيارات الحمل؟

الحل:



بالاعتماد على قانون حفظ الطاقة فأن الحرارة المنتقلة عبر الجدار بالتوصيل تساوي الحرارة المفقودة بتيارات الحمل من السطح الاخر للجدار وبذلك نستطيع القول:

$$q_{conduction} = q_{convection}$$

$$-\frac{KA}{L}(T_2 - T_1) = hA(T_2 - T_\infty)$$

$$-\frac{3A}{0.2}(T_2 - 50) = 60A(T_2 - 10)$$

$$-3 \times A(T_2 - 50) = 60 \times 0.2 \times A(T_2 - 10)$$

$$-3T_2 + 150 = 12T_2 - 120$$

$$120 + 150 = 15T_2$$

$$T_2 = \frac{270}{15} = 18C$$