إنتقال الحرارة

تعتبر عملية انتقال الحرارة والتبادل الحرارى من العمليات ذات الأهمية الخاصة إذ أن غالبية عمليات التصنيع الغذائى تعتمد أساسا على نقل الحرارة إلى المواد المراد تصنيعها، أى إجراء عمليات تسخين مثل بسترة الألبان وتعقيمها وتجفيف محاصيل الفاكهة والخضر أو امتصاص الحرارة من المواد المراد تصنيعها. أو إجراء عمليات تبريد مثل تجميد الأغذية وعمل الأيس كريم وحفظ المواد المصنعة أو غير المصنعة مثل محاصيل الخضر والفاكهة تحت درجات حرارة منخفضة فى غرف تبريد تمهيدا لتداولها أو تصديرها إلى الخارج.

لذلك نجد أنه من واجب مهندس الأغذية الإلمام الكامل والكافى بالأسس والمبادئ الخاصة بإنتقال الحرارة حتى يمكنه التحكم فى عمليات التصنيع والوصول بالمنتج إلى الجودة المطلوبة للتسويق وهناك ثلاثة طرق رئيسية تنتقل بها الحرارة خلال جسم أو من جسم إلى آخر هى:

١- إنتقال الحرارة بالتوصيل Heat Conduction

وتتم عملية نقل الحرارة نتيجة لتلامس جزيئات المادة مع بعضها بدون تحركها. وتعتبر عملية رئيسية فى المواد الصلبة، وثانوية فى المواد السائلة، وقليلة الأهمية فى الغازات.

٢- إنتقال الحرارة بالحمل Heat Convection

وفيها تنتقل الحرارة من جسم ما إلى سائل أو غاز وذلك أثناء سريانه أو وجوده داخل مواصير أو خارجها. وتتم عملية نقل الحرارة نتيجة لحركة جزيئات السوائل والغازات.

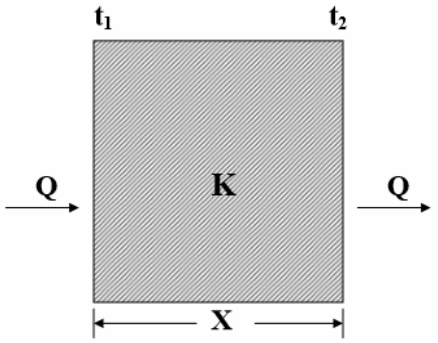
٣- إنتقال الحرارة بالإشعاع Heat Radiation

ويتم إنتقال الحرارة بهذه الطريقة من أى جسم بدون وسيط وذلك نتيجة لإشعاع الحرارة من هذا الجسم على هيئة موجات كهرومغناطيسية Electromagnetic Waves.

انتقال الحرارة بالتوصيل Conduction Heat Transfer

عند حدوث انحدار حرارى فى جسم معين فإنه يحدث انتقال للحرارة من المنطقة ذات درجات الحرارة العالية إلى الأخرى ذات درجات الحرارة المنخفضة فى مثل هذه الحالة فإننا نقول أن الحرارة انتقلت بالتوصيل خلال الجسم وأن معدل انتقال الحرارة لكل وحدة مساحة يتناسب مع الانحدار الحرارى أى أن:

$$Q/A = \Delta T/\Delta X$$



انتقال الحرارة خلال حائط لانهائى

حيث أن: Q : معدل انتقال الحرارة بوحدة الوات W.

A: مساحة المقطع الذى تنتقل خلال الحرارة وهى مساحة السطح العمودى على اتجاه انتقال الحرارة بالمتر المربع (m^2).

$\Delta T/\Delta X$: الانحدار الحرارى فى اتجاه انتقال الحرارة

ولدراسة الانتقال الحرارى بالتوصيل خلال حائط نفترض أن:

١- انتقال الحرارة يتم بمعدل ثابت.

٢- انتقال الحرارة يتم فقط فى اتجاه واحد ولنفرض أن هذا الاتجاه هو (X) ونهمل انتقال الحرارة فى الاتجاهين الأخرين.

٣- لا يوجد توليد حرارى.

ومن معادلة فورير نجد أن:

$$Q = -K\ A\ \Delta T/\Delta X$$

وحيث أن $T_1 > T_2$ فإن القيمة $T_2 - T_1$ تصبح سالبة وعليه يمكن كتابة المعادلة على هذه الصورة $Q = KA\ (T_1 - T_2)/L$

ثبت عمليا أن معدل انتقال الحرارة خلال حائط يتناسب تناسبا طرديا مع كل من الفرق فى درجات الحرارة بين سطحى الحائط ومساحة السطح للحائط وعكسيا مع سمك الحائط أى أن:

$$Q \simeq A,\ \Delta T,\ (1/X)$$

ومعناها أن

$$Q = K\ A\ \Delta T/X$$

حيث أن:

ΔT : هى الفرق الموجب لدرجات الحرارة $(T_{high} - T_{low})$.

استنتاج وحدات معامل التوصيل الحرارى:

Q	=	- K	A	$\Delta T/X$
↓		↓	↓	↓
Watt		?	m^2	K/m

$$K = Q/A\ (\Delta T/X)$$
$$= watt/m^2\ .\ (K/m)$$
$$= watt.m/m^2.K\ =\ watt/m.K$$

قانون فورير هو الأساس لانتقال الحرارة بالتوصيل وهناك بعض النقاط الهامة أو الخصائص التى يتميز بها هذا القانون وهى:

١- أنه قانون عام مبنى على الدلائل التجريبية والمنطقية.
٢- أنه قانون لم يأتى كنتيجة للاستنتاج من المبادئ الأولية أو البرهنة الرياضية.
٣- أنه قانون يعرف خاصية هامة للمواد ألا وهى معامل التوصيل الحرارى.
٤- أنه قانون يمثل قيمة (Vector) يوضح أن اتجاه سريان الحرارة Heat flux يكون عمودى على السطح ذو درجة الحرارة الثابتة Isotherm وفى اتجاه تناقص درجات الحرارة.
٥- أنه قانون ينطبق على جميع المواد على اختلاف أحوالها سواء الصلبة أو السائلة أو الغازية.

معامل التوصيل الحرارى Thermal conductivity:

يمكن تعريف معامل التوصيل الحرارى باستخدام قانون فورير. وهو ينص على أنه عند انحدار حرارى معين فإن معدل سريان الحرارة يتناسب طرديا مع معامل التوصيل الحرارى. ولابد أن نؤكد على أن معامل التوصيل الحرارى يختلف من مادة إلى أخرى علاوة على أن معامل التوصيل الحرارى للمواد الصلبة يختلف من مادة إلى آخرى علاوة على أن معامل التوصيل الحرارى للمواد الصلبة أكبر منه للمواد السائلة وهذا الأخير بدوره أكبر من معامل التوصيل الحرارى للمواد الغازية. ومعامل التوصيل الحرارى للمواد الصلبة يكون تقريبا أربعة أضعاف ذلك للمواد الغازية وهذا طبعا يرجع إلى اختلاف الفراغات بين الجزيئات وبعضها فى كلتا الحالتين.

* معامل الانتشار الحرارى (α) Thermal diffusivity:

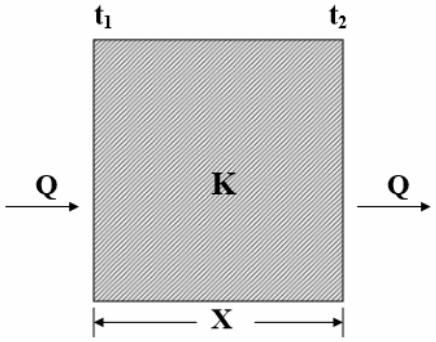
$$A = K/(\rho.cp)$$

ومعامل الانتشار الحرارى يمثل النسبة بين معامل التوصيل الحرارى K والنسبة الحرارية (ρ.cp) وهذا يعنى أنه كلما زادت α [أى كلما زادت K أو تناقصت cp أو ρ أو كليهما] لمادة معينة فإن هذه المادة تكون أكثر فاعلية فى نقل الحرارة عنه فى تخزينها والعكس صحيح.

مثال: جدار فرن يتكون من طبقة من الطوب الحرارى سمكها ٠.١٥ متر ومعامل التوصيل الحرارى لها ١.٧ وات/متر.كالفن، إذا كانت درجة الحرارة على جانبى جدار الفرن الداخلى والخارجى هى ١٤٠٠ كالفن، ١١٥٠ كالفن على الترتيب. أوجد معدل فقد الحرارة من جدار الفرن إذا كان ارتفاعه نصف متر وعرضه ٣ أمتار أعتبر أن انتقال الحرارة فى اتجاه واحد.

الحـل:

عادة فى مسائل انتقال الحرارة فإننا نبدأ بعمل كروكى أو رسم تخطيطى للمسألة كما يلى.



انتقال الحرارة خلال حائط لانهائى

حيث أن انتقال الحرارة خلال الجدار يتم بالتوصيل فقط فإن الفيض الحرارى (q/A) يتحدد من قانون فورير كما يلى:

$$Q = K\ A\ \Delta T/L$$

$$= 1.7\ w/m.k * (0.5\ m * 3\ m) * [(1400\ k - 1150\ k)/0.15\ m$$

$$= 4250\ \ w\ .\ m^{-1}\ .\ K^{-1}\ .\ m^{2}\ .\ K\ .\ m^{-1}$$

$$= 4250\ w$$

انتقال الحرارة بالحمل Convection heat transfer:

انتقال الحرارة بالحمل يتم كنتيجة للحركة العشوائية للجزيئات أو الانتشار (diffusion) والحركة الإجمالية أو الميكروسكوبية للمائع (Bulk or Macroscopic) أى أن انتقال الحرارة بالحمل يحدث كنتيجة لسريان الموائع. وعادة يحدث انتقال للحرارة بالحمل عند حركة حجم معين من سائل أو غاز من منطقة ذات درجة حرارة مرتفعة إلى منطقة ذات درجة حرارة منخفضة وانتقال الحرارة بالحمل أما أن يكون:

أ- حمل طبيعى أو حر بسبب الفرق فى الكثافة.

ب- حمل جبرى يتم بواسطة حركة الرياح أو المضخات وانتقال الحرارة بالحمل. ربما يحدث على أسطح الجدران أو السطح الداخلى والخارجى لماسورة ساخنة أو بين الأسطح والموائع كما فى جميع أنواع المبادلات الحرارية.

يجدر هنا الإشارة إلى أن انتقال الطاقة أما أن تتم فى صورة محسوسة (Sensible) أو فى صورة كامنة (Latent) كما يحدث فى حالة الغليان (Boiling) أو التكثيف (Condensation) وبغض النظر عن الطريقة التى يتم فيها انتقال الحرارة بالحمل فإن معدل انتقال الحرارة بالحمل يمكن وصفه بالمعادلة:

$$Q = h \cdot A \cdot (T_s - T_f)$$

حيث أن:

Q : معدل انتقال الحرارة (وات watt).

A : مساحة مقطع السطح الناقل للحرارة (متر^{2} m^2)

T_s : درجة حرارة السطح K

T_f : درجة حرارة المائع K

h : معامل انتقال الحرارة بالحمل $(w/m^2.K)$

وتعرف المعادلة السابقة بقانون نيوتن للتبريد Newton's law of cooling

ويختلف معاملة انتقال الحرارة بالحمل على حسب سرعة السائل أو المائع ونوعه وحالته.

انتقال الحرارة بالإشعاع Radiation heat transfer:

الإشعاع الحرارى عبارة عن طاقة منبعثة من جسم له درجة معينة، يتم انتقال الطاقة كنتيجة للإشعاع بواسطة الموجات الكهرومغناطيسية ولذلك لا يتطلب وجود وسط (media) كما فى حالة الحمل والتوصيل.

والإشعاع يحدث بأعلى كفاءة فى حالة التفريغ (vacuum). أقصى معدل لانتقال الحرارة بالإشعاع من سطح ما يعطى بواسطة قانون استيفن – بولتزمان (Stefan-Boltzman law) كما يلى:

$$Q = \sigma \cdot A \cdot T_s^4$$

حيث أن:

T_s : درجة الحرارة المطلقة للسطح بالكالفن K

σ : ثابت استيفن بولتزمان $\sigma = 5.67 * 10^{-8}$ بوحدات $w/m^2 \cdot K^4$

A : مساحة السطح المشع

وعادة يصدر أقصى إشعاع عن السطح الأسود والذى يسمى بالسطح المثالى [Ideal or black body] إنما الإشعاع من جسم حقيقى يكون أقل من ذلك للجسم المثالى ويعطى بالعلاقة.

$$Q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4$$

حيث أن:

ε : تسمى "معامل البث" أو Emissivity

توضح ε مدى كفاءة انبثاق الإشعاع من جسم ما. والمعادلة السابقة تحدد معدل الإشعاع من جسم ما. إنما لحساب معدل تبادل الإشعاع الحرارى بين سطحين مشعين فإنها عملية معقدة جدا فمثلا فى الحالة الخاصة التى تحتوى على تبادل الإشعاع بين سطح كبير جدا والآخر صغير بحيث أن السطح الكبير يحيط السطح الصغير من جميع الجوانب فإن كمية الإشعاع المتبادل Q بالوات تحسب كما يلى:

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

حيث أن:

A : مساحة السطح.

T_{sur} : درجة حرارة الوسط المحيط

يمكن كتابة المعادلة السابقة على صورة مماثلة للمعادلات المستخدمة فى حالة انتقال الحرارة بالحمل والتوصيل كما يلى:

$$Q_{rad} = hr \cdot A \cdot (T_s - T_{sur})$$

حيث أن:

hr : معامل انتقال الحرارة بالإشعاع

وفى هذه الحالة تحسب hr كما يلى

$$hr = \varepsilon \sigma . (T_s + T_{sur}) (T_s^2 + T_{sur}^2)$$

ومما سبق يتضح أن كمية الإشعاع تتناسب طرديا مع الفرق فى درجات الحرارة. وفى معظم الحالات يتم انتقال الحرارة بواسطة كل من الإشعاع والحمل وبالتالى تكون كمية الحرارة (Q).

$$Q = Q_{Con} + Q_{Rad}$$

حمل اشعاع

$$Q = h A (T_s - T_f) + \varepsilon A \sigma (T_s^4 - T_{sur}^4) \quad \text{أو}$$

مثال: فى أحد مصانع الأغذية تمر ماسورة بخار غير معزولة فى غرفة درجة حرارة جدرانها وهوائها هى ٢٥°م إذا كان القطر الخارجى للماسورة ٧٠ مم ودرجة حرارة السطح الخارجى ٢٠٠°م ومعامل الانبعاث ($\varepsilon = 0.8$) ومعامل انتقال الحرارة بالحمل من سطح الأنبوبة والهواء ($15\ w/m^2 . K$) أوجد معدل الفقد الحرارى من سطح الأنبوبة لكل وحدة طول من طولها.

الفقد الحرارى من الأنبوبة إلى هواء الغرفة عبارة عن فقد بواسطة الحمل وفقد بواسطة الإشعاع بين الأنبوبة وجدار الحجرة وعلى ذلك تكون Q

$$Q = h (\pi dL) (T_s - T_f) + \varepsilon A \sigma (T_s^4 - T_{sur}^4)$$

$$Q = 15\ w/m^2 . K . (\pi * 0.07\ m * 1\ m) (200 - 25)°C + 0.8 (\pi * 0.07\ m * 1\ m)\ 5.67 * 10^{-8}\ w/m^2 . K^4 (473^4 - 298^4)\ K^4$$

$$Q = 577\ w/m + 421\ w/m$$

$$Q = 998\ w/m$$

ويجدر الإشارة إلى أنه عند حساب معدل انتقال الحرارة بالحمل أو التوصيل يمكن التعويض عن درجات الحرارة K أو °C فى حين أنه فى حالة انتقال الحرارة بالإشعاع يجب أن تستخدم درجة الحرارة المطلقة فقط K كالفن.

ومن الناحية العملية لا يحدث انتقال للحرارة من نوع واحد فقط، بل دائما نجد على الأقل اشتراك نوعين فى نقل الحرارة وتسمى العملية بانتقال الحرارة المختلط Combined Heat Transfer ويتوقف معدل انتقال الحرارة خلال جسم على عدة عوامل أهمها:

- الفرق بين درجات حرارة أسطح الجسم.
- مساحة سطح التبادل الحرارى العمودى على اتجاه انتقال الحرارة.
- مقدرة الجسم على نقل الحرارة أو مدى مقاومة الجسم لانتقال الحرارة

* وعموما يعبر عنه بمعامل انتقال الحرارة.