الفصل الخامس

مفاهيم في درجة الحرارة وكمية الحرارة

Concepts in Heat & Temperature

بعد أن يكمل القارئ هذا الفصل، ويستوعب المفاهيم والأفكار والمبادئ التي وردت خلاله، من المتوقع أن يكون قادراً على:

- أن يميّز بين مفهوم درجة الحرارة وكمية الحرارة.
- أن يفسّر مفهوم درجة الحرارة الثلاثية للماء، وما هو المقصود بها، وما هي أهميتها في صناعة مقاييس درجات الحرارة.
- أن يشرح مبدأ عمل مقاييس درجة الحرارة، ويصف الفروق الأساسية فيما بينها.
- أن يميّز بين أنواع التمدد الحراري الثلاثة: الطولي والسطحي والحجمي، تمييزاً علمياً.
- أن يضبط عملية الربط العلمي بين مفهومي درجة الحرارة وكمية الحرارة من خلال مبادئ مبسطة في الديناميكا الحرارية.
- أن يعدد طرق التوصيل الحراري، ويميّز الفرق بين كلٍ منها.

مفاهيم في درجة الحرارة وكمية الحرارة

Concepts in Heat & Temperature

5-1 المقدمة *Introduction*:

كنا قد أشرنا في الوحدة الرابعة من هذا الكتاب إلى أن مبدأ حفظ الطاقة الميكانيكية لا يبقى صحيحاً وذلك عند وجود قوى الاحتكاك، تلك التي ترتبط بمفهومنا لارتفاع درجة الحرارة، وهي تؤكد بأن هناك جزءاً من الطاقة قد تحول إلى طاقة حرارية *thermal energy*. في وقت مضى كان هناك لَبساً واضحاً حول مفهوم كمية الطاقة الحرارية وذلك لصعوبة التمييز بينها وبين درجة الحرارة، إلا أن الرؤيا قد تجلّت وأصبحت واضحة تماما، وذلك بعد ترسيخ كلٍ من المفهومين، وكمياته وحساباته الخاصة به، وعمّق ذلك عملياً نشوء علم الديناميكا الحرارية.

ومن المناسب جداً أن ننوه في هذا المقام إلى أن علم "الديناميكا الحرارية" يتعامل مع المادة بكلتا حالتيها؛ الجهرية *macroscopic*، المجهرية *microscopic*، كما أن علم الديناميكا الحرارية يأخذ بالحسبان كمية الطاقة الداخلية للمادة، ولهذا سوف نوضح في هذه الوحدة مجموعة من الكميات الفيزيائية ذات العلاقة، كدرجة الحرارة، وكمية الحرارة، والحرارة النوعية *specific heat*، إضافة إلى قوانين الديناميكا الحرارية.

5-2 مفهوم درجة الحرارة *The Concept of Temperature*:

مما لا شك فيه أن كمية درجة الحرارة هي واحدة من الكميات الرئيسية في النظام الدولي *(SI)* للقياس، وذلك باعتماد مقياس كلفن* *Kelvin scale*. وتعريفا لدرجة الحارة نقول: إن درجة الحرارة هي قياس لصفة فيزيائية للجسم، نميّز من خلالها ارتفاع أو انخفاض حرارته، كما نميّز انتقال الحرارة منه وإليه، مثل درجة حرارة جسم الإنسان، ودرجة حرارة الجو، والحديث عن درجة الحرارة يقودنا إلى سؤالين مهمين هما:

1– هل هناك حدود معينة لارتفاع درجة حرارة الأجسام؟ قد يبدو للوهلة الأولى أن الإجابة بـ"لا" غير مقبولة بهذا الخصوص.

2– هل هناك حدود معينة لانخفاض درجة حرارة الأجسام؟ والإجابة السريعة هنا بـ "نعم" مقبولة جداً، لقد أثبتت التجارب أن درجة حرارة الصفر المطلق تُعتبر غايةً صعبة المنال، توازي في صعوباتها

---

* الوحدة الأولى من هذا الكتاب، انظر كميات النظام الدولي للقياس.

المقدرة على بلوغ سرعة الضوء في معامل الفيزياء عملياً، ومن المناسب ذكره هنا أن العلماء في عام *1992*م كانوا قد توصلوا وبكلفة مالية عالية جداً إلى ما يلي:

أ- إن أكبر مقدار لسرعة للإلكترون بعد تعجيله بمسرعات خاصة *accelerators* وصلت إلى *(0.999999994 c)* حيث إن *(c)* هي سرعة الضوء.

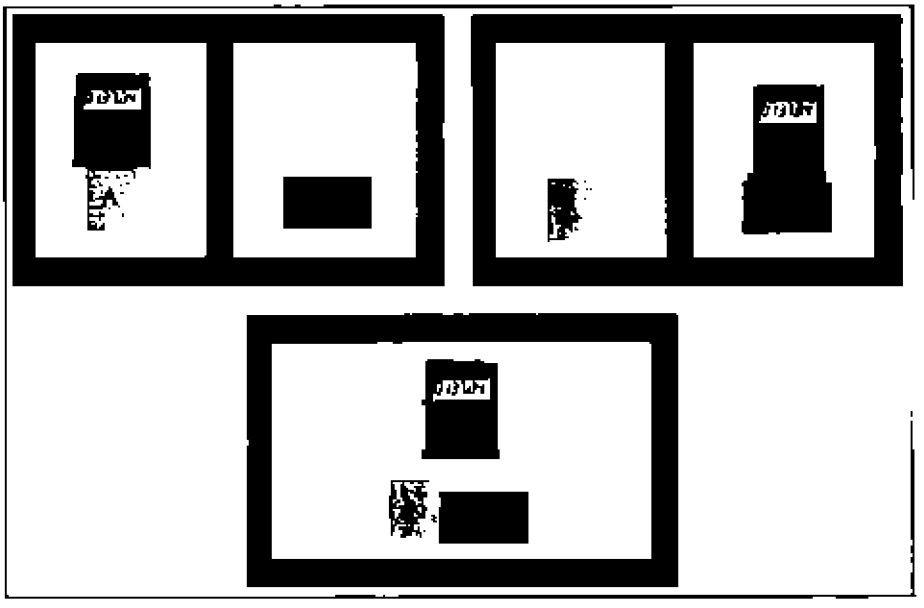
ب- إن أقل مقدار لدرجة الحرارة أمكن التوصل إليها عملياً هي *(0.5000000002 K)*

ومما يمكن قوله هنا هو أن وجه الشبه قائم بين هذين المفهومين، أي أنّه مثلما يُعتبر الوصول إلى سرعة الضوء غايةً صعبة المنال، فإن الوصول إلى درجة الصفر المطلق هو الآخر صعب للمنال، من هذه المعلومة تنتقل إلى معلومة أخرى حول هذا الكوكب الذي نحيا عليه لنبيّن مجدداً عظمة ودقة صنعة الله سبحانه وتعالى، قبل وجود الحياة وتقديراً بحوالي *(10-20)* بليون سنة، أي عند بدء الكون كانت درجة الحرارة – وحسب نظرية الانفجار الكبير *Big Bang theory* التي ظهرت في العام *1955*– تساوي *(1039 K)*، وبدأت بعد ذلك بالبرودة جزئياً وتدريجياً إلى أن وصلت لى قيمتها الحالية *(300 K)* على سطح الأرض بمعدلها العام، ومما يجعلها على هذه الحالة، المسافة لثابتة بين الأرض في مدارها الإهليلجي حول الشمس والشمس ذاتها، ولو اقتربت قليلاً أو ابتعدت قليلاً لاستحالت الحياة عليها.

5-3 قانون الصفر في الديناميكا الحرارية *Zeroth Law of Thermodynamics*:

لقد أُطلق عليه هذه التسمية وذلك لوجود القانون الأول والثاني في الديناميكا الحرارية، بالإضافة إلى أنه يشير إلى حالة التوازن الحراري *thermal equilibrium*، حيث يمكن لمستخدمي هذا الفرع من علوم الفيزياء تسميته بقانون التوازن الحراري، وهو سهل وبسيط في معناه، وفحوى هذا القانون:

إذا كان لدينا نظامان حراريان الأول *(A)* والثاني *(B)* وهما في حالة توازن حراري مع نظام ثالث *(C)* فإن كلاً من النظامين *(A)* و*(B)* يكونان في حالة توازن حراري مع بعضهما البعض. ولمزيد من الإيضاح لنفترض أن النظام الحراري الثالث هو مقياس لدرجة الحرارة *thermometer* وأن كلاً من *(A)* و*(B)* هما نظامان حراريان مختلفان، فعندما تكون درجة حرارة النظام الحراري الأول *(A)* مساوية لدرجة حرارة النظام الحراري الثاني *(B)*، فإننا نصف كلاً من *(A)* و*(B)* بأنهما متوازنان حرارياً، تأمل في الشكل *(1-5)*.



الشكل (5-1) حيث يظهر كل من النظامين (A) و(B)

وكذلك النظام الثالث والذي هو عبارة عن جهاز حساس لقياس درجة الحرارة، كما يظهر في الشكل لعملية عزل كل نظام عزلاً حرارياً، لبيان القواعد المطلوبة لتوضيح قانون التوازن الحراري *thermal equilibrium*.

5-4 قياس درجة الحرارة *Temperature Measurement* :

إن المعرفة المرجعية وتأصيل الأفكار والمسميات في أي علم من العلوم، يُعد مدخلاً لازماً بهدف الوصول إلى حالة الفهم الصحيح للكميات الفيزيائية التي يدرسها طالب العلم. وفي مفهوم قياس درجة الحرارة يتبادر إلى الذهن مجموعة من التساؤلات حول معايرة وتقسيم التدريجات على مقاييس درجة الحرارة المألوفة والمتداولة.

إن تحديد درجة حرارة الماء في حالاته الثلاثة السائلة *liquid* والصلبة *solid* والغازية *gases* (بخار الماء) *vapor* تعتبر مسألة جوهرية في هذا الخصوص لأنها نقطة بداية المعرفة المطلوبة لتدريج ومعايرة مقاييس درجات الحرارة، وبعد جهود علمية مضنية وباستخدام خلية خاصة أُعدت لهذا الغرض تم تحديد درجة الحرارة التي يكون فيها الماء في ذات الوقت في حالاته الثلاثة وهي ما نسميه بالنقطة الثلاثية لماء *triple point of water*، انظر الشكل (5-2) والذي يوضح لنا الخلية الخاصة التي استُخدمت لهذا الغرض، حيث يوجد الماء في حالاته الثلاثة فيها وباتزان حراري، وهي درجة الحرارة المعرفة بالمعادلة الآتية:

$$T_3 = 273.16\ K \qquad (5\text{-}1)$$

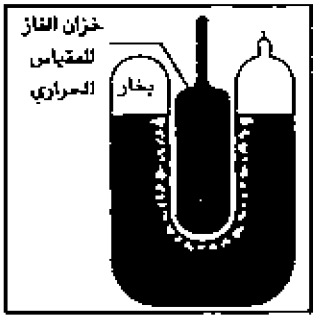
كما يُمكننا أن نثبّت موقع هذه النقطة على مقاييس درجات الحرارة الثلاثة الشائعة الاستخدام وهي:

1- المقياس المئوي *Celsius scale*.

2- مقياس كلفن *Kelven scale*.

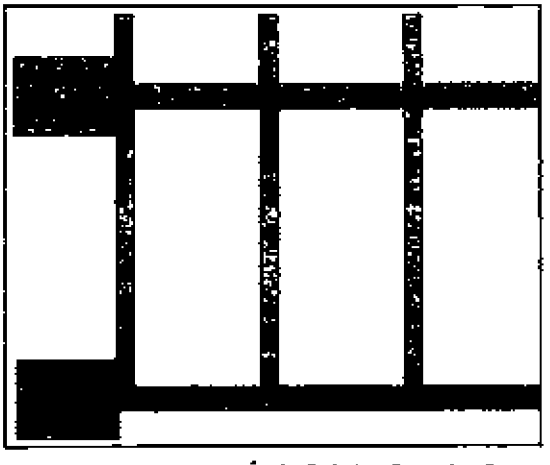
3- مقياس فهرنهايت *Fahrenheit scale*.

انظر الشكل *(3-5)*.



الشكل *(2-5)* خلية تحديد النقطة الثلاثية للماء
التي استخدمت لتحديد درجة الحرارة *(T3 = 273.16 K)*

إن الرقم *(3)* في المعادلة *(1-5)* والذي وضع تحت الحرف *(T)* يشير إلى أن الماء موجود سائلاً وصلباً وبخاراً عند هذه النقطة ومن المناسب ذكره هنا أن *(T_3)* تمّ قياسها باستخدام مقياس درجة الحرارة ذي الضغط الثابت *constant volume gas thermometer*.



الشكل *(3-5)* ويبين موقع النقطة الثلاثية في الأنواع الثلاثة الشائعة لمقاييس درجة الحرارة
كما يبين موقع الصفر المطلق *absolute zero*

5-5 مقياس سليزيوس ومقياس فهرنهايت *The Celsius and Fahrenheit Scale*:

إن أساس بناء وتصميم موازين أو مقاييس درجات الحرارة على الرغم من اختلاف أسمائها، هو أساس واحد يستند في جوهره إلى أن معظم المواد السائلة أو الصلبة أو الغازية تتمدد عند تسخينها وارتفاع درجة حرارتها والعكس صحيح، إذ أن التغير الذي يطرأ على المادة يصبح محسوساً تماماً عندما تصل حالتها إلى التوازن الحراري *thermal equilibrium*، وهذا ما يجعلنا نعتمد بعض السوائل كالزئبق مثلاً *mercury* لتصميم مقياس درجة الحرارة، وهو مادة ينطبق عليها الوصف السابق تماماً.

إن مقياس سليزيوس المئوي *Celsius scales* يبدأ تدريجه من *(-273.15 C°)* وينتهي عند التدريجة *(100 C°)*، مروراً بالصفر المئوي والذي يكتب على النحو الآتي: *(0 C°)* ويقرأ صفر مئوي أو *zero degree centigrade*، انظر الشكل *(5-3)*.

ويمكننا أن نحول أية قراءة على هذا المقياس إلى ما يقابلها على مقياس كلفن *Kelvin scale* باستخدام العلاقة الرياضية:

$$T_C = T - 273.15 \qquad (5-2)$$

حيث (T_C) قراءة درجة الحرارة على مقياس سليزيوس، و(T) هي القراءة المقابلة على مقياس كلفن، ومن الممكن إعادة كتابتها بصيغة أخرى على النحو الآتي:

$$T = T_C + 273.15$$

أما مقياس فهرنهايت *Fahrenheit scale* فيبدأ تدريجه من القياس *(-459.67 F°)* ثم يزداد وصولاً إلى *(32.02 F°)* ويقرأ *zero degree Fahrenheit* ويقابل القياس *(0 C°)* على مقياس سليزيوس، وينتهي عند التدريجة *(212 F°)*، أي أنه مقسّم إلى *(180)* تدريجة بدلاً من مئة تدريجة في كل من مقياس كلفن سليزيوس، ولكن المسافة دائماً متساوية بين الصفر أو بداية التدريج ونهايته، انظر الشكل *(5-3)*.

ومن الممكن تحويل أية قراءة على مقياس سليزيوس إلى ما يقابلها على مقياس فهرنهايت باستخدام العلاقة الرياضية الآتية:

$$T_F = \frac{9}{5}T_C + 32^\circ \qquad (5-3)$$

حيث (T_F) هي القراءة على مقياس فهرنهايت، و(T_C) القراءة المساوية لها على مقياس سليزيوس.

وهناك طريقة عامة للتحويل من أية قراءة على أي من المقاييس الثلاثة إلى ما يقابلها باستخدام العلاقة الرياضية الآتية:

$$\boxed{\frac{T_C - 0}{100} = \frac{T_F - 32}{180} = \frac{T - 273}{100}} \qquad (5-4)$$

مثال *Example (5-1)*:

استخدم العلاقة الرياضية *(5-4)* لحساب القراءة المقابلة على مقياس فهرنهايت لدرجة الحرارة *(25 C°)*، ثم استخدم العلاقة الرياضية *(5-5)* لحسابها مرة أخرى، ثمّ قارن النتيجتين.

الحل *Solution*:

$$T_F = \frac{9}{5}T_C + 32$$
$$= \frac{9}{5}(25) + 32 = 77^\circ F$$

ومن جديد:

$$\frac{T_C - 0}{100} = \frac{T_F - 32}{180}$$
$$\frac{25 - 0}{100} = \frac{T_F - 32}{180}$$
$$(25)(180) = 100T_F - (32)(100)$$
$$100T_F = 4500 + 3200 = 7700$$
$$T_F = 77^\circ F$$

مثال *Example (5-2)*:

إذا أخبرك الطبيب أن درجة حرارة جسمك هي *(310)* درجة فوق الصفر المطلق. ألا يجب عليك أن تقلق؟ وضّح إجابتك.

الحل *Solution*:

من الواضح أن الطبيب في هذه الحالة استخدم مقياس كلفن وليس المقياس المئوي المتعارف عليه، وتعادل درجة الحرارة هذه القراءة المألوفة للجميع على مقياس سليزيوس والتي يمكن إيجادها حسابياً من العلاقة الرياضية:

$$T_C = T - 273$$
$$= 310 - 273 = 37\ C^\circ$$

وتكون كذلك على مقياس فهرنهايت مساوية إلى:

$$T_F = 98.6\ F^\circ$$

أي أنه على مقياس سليزيوس تكون درجة حرارة الجسم طبيعية تماماً *($T = 37\ C^\circ$)*، تأكد من صحة الرقم *(98.6 F°)* على مقياس فهرنهايت باستخدام العلاقة الرياضية *(5-5)*

مثال Example (5-3):

أ) وصلت درجة حرارة إحدى القرى في سيبيريا إلى (-71 C°).

ماذا تقابل هذه القراءة على مقياس فهرنهايت؟ أوجدها حسابياً.

ب) أعلى درجة حرارة سجلت رسمياً في وادي الموت بكاليفورنيا في الولايات المتحدة الأمريكية، كانت (134 F°).

ماذا تقابل هذه القراءة على مقياس سليزيوس؟ أوجدها حسابياً.

الحل Solution:

أ)

$$T_F = \frac{9}{5}T_C + 32$$
$$= \frac{9}{5}(-71) + 32 = -96^\circ F$$

وباستخدام العلاقة الرياضية (5-5) نجد أنَّ:

$$\frac{T_C - 0}{100} = \frac{T_F - 32}{180}$$
$$\frac{-71 - 0}{100} = \frac{T_F - 32}{180}$$
$$100T_F - 3200 = -12780$$
$$T_F = \frac{-12780 + 3200}{100}$$
$$= -96^\circ F$$

ب)

$$T_C = \frac{5}{9}T_F - 17.8$$
$$= \frac{5}{9}(134) - 17.8 = 56.6^\circ C$$

5-6 التمدد الحراري للأجسام الصلبة Thermal Expansion of Solids:

تتمدد الأجسام الصلبة عندما ترتفع درجة حرارتها*، ونستطيع تمييز ثلاثة أنواع من التمدد الحراري للأجسام الصلبة، يعتمد كل نوع منها على طبيعة شكل المادة الهندسي، كما يعتمد على معامل تمددها الطولي، وهذه الأنواع هي:

* كما تتقلص الأجسام الصلبة عندما تنخفض درجة حرارتها، وهذه الظاهرة يمكن تمييزها من خلال تعاقب فصلي الشتاء والصيف.

1- التمدد الطولي *linear expansion*.

2- التمدد السطحي *surface expansion*.

3- التمدد الحجمي *volume expansion*.

وسنعرض للعلاقات الرياضية الخاصة بكلٍ من الحالات الثلاث:

1-6-5 التمدد الطولي *Linear Expansion*:

إن الملاحظات العملية المبنية على التجربة *experimental results* تؤكّد على أنّ التمدد الطولي للأجسام الصلبة يعتمد على العوامل الثلاثة الآتية:

1- الطول الأصلي للمادة الصلبة عند درجة حرارة الغرفة *initial length at room temperature*، وسنرمز له بالرمز (L).

2- التغير الحاصل في درجة الحرارة، والذي نُعبّر عنه بالفرق بين درجة الحرارة النهائية (T_f) ودرجة الحرارة الابتدائية (T)، وسنرمز له بالرمز (ΔT).

3- نوع المادة الصلبة المستخدمة لصناعة الجسم الصلب، وهذا يختلف بطبيعة الحال من مادة لأخرى، ويُعبّر عن ذلك بما هو متعارف عليه، "معامل التمدد الطولي *coefficient of linear expansion*" وسنرمز له بالرمز (α_L)، ولكل مادة معامل تمددها الطولي الخاص بها.

وخلاصة القول: إن التغير في الطول، أي الفرق بين الطول النهائي (L_f) والطول الابتدائي (L) الذي سنشير إليه بالرمز (ΔL) يتناسب مع كل من الطول الابتدائي (L) وكذلك مع الفرق في درجات الحرارة (ΔT)، أي أن:

$$\Delta L \propto L\,\Delta T \qquad (5\text{-}5)$$

حيث:

$$\Delta L = L_f - L$$
$$\Delta T = T_f - T$$

ويُمكننا من الناحية الرياضية إعادة كتابة العلاقة الرياضية (5-5)، والتي يبدو فيها التناسب واضحاً على شكل مساواة، بعد إدخال ثابت التناسب المناسب، وهو في هذه الحالة عبارة عن معامل التمدد الطولي (α_L) إذن:

$$\boxed{\Delta L = \alpha_L\, L\,\Delta T} \qquad (5\text{-}6)$$

$$L_f - L = \alpha_L L \Delta T$$
$$L_f = L + \alpha_L L \Delta T$$
$$L_f = L(1 + \alpha_L \Delta T) \qquad (5\text{-}7)$$

حيث تعبّر العلاقة الرياضية *(5-8)* عن مقدار الطول الجديد للجسم المعدني الذي خضع لعملية التمدد الطولي.

ومن للعادلة *(5-7)* نجد أن معامل التمدد الطولي يمكن التعبير عنه بالعلاقة الرياضية:

$$\alpha_L = \frac{\Delta L}{L \Delta T} = \frac{\text{الزيادة في الطول}}{\text{الطـــول الأصـــلي} \times \text{فرق درجات الحرارة}} \qquad (5\text{-}8)$$

ويعرف (α_L) معامل التمدد الطولي على النحو الآتي:

هو مقدار الزيادة التي تطرأ على وحدة الأطوال عندما ترتفع درجة الحرارة درجة واحدة، وتقرأ ألفا. أما وحدة قياسه فيمكن التعرف عليها من العلاقة الرياضية *(5-8)* وباستخدام نظرية التوافق بين الأبعاد والوحدات في النظام الدولي *(SI)* للقياس، وذلك على النحو الآتي:

$$\alpha_L = \frac{\Delta L}{L \Delta T} = \frac{m}{m.K} = K^{-1}$$

مثال *(5-4) Example*:

سلك مصنوع من معدن النحاس *copper* طوله الأصلي *(1 m)*، ارتفعت درجة حرارته بمقدار درجة مطلقة واحدة، ليصبح طوله الجديد بعد ذلك *(1.000019 m)*، أوجد معامل التمدد الطولي (α_L) للنحاس.

الحل *Solution*:

من العلاقة الرياضية *(5-8)* نجد أنّ:

$$\alpha_L = \frac{\Delta L}{L \Delta T} = \frac{(0.000019m)}{(1m)(1^\circ K)}$$
$$= (19 \times 10^{-6}) K^{-1}$$

مثال *(5-5) Example*:

قضيب مصنوع من النحاس *copper* طوله الأصلي *(2.5 m)*، عند درجة الحرارة *(15 K)*، قمنا بتسخينه إلى درجة الحرارة *(35 K)*، أوجد الزيادة في طول القضيب، إذا كان معامل التمدد الطولي للنحاس المستخدم يساوي $(17.0 \times 10^{-6} K^{-1})$.

الحل *Solution*:

من العلاقة الرياضية *(5-8)* نجد أنَّ:

$$\Delta L = \alpha_L L \Delta T$$
$$= (17.0 \times 10^{-6} K^{-1})(2.5 m)(35 - 15) K$$
$$= 8.5 \times 10^{-4} m$$
$$\Delta L = 0.85 mm$$

وكما أشرنا، فإنَّ معامل التمدد الطولي يختلف من مادة إلى أخرى والجدول *(1-5)* يمثل مجموعة من المواد كثيرة الاستعمال مع معاملات تمددها الطولي.

Substance	المادة	$\alpha (10^{-6}/°C)$ معامل التمدد الطولي
ice (at 0 °C)	الثلج عند الصفر	*51*
lead	الرصاص	*29*
aluminum	الألومنيوم	*23*
brass	النحاس الأصفر	*19*
copper	النحاس	*17*
steel	الفولاذ	*11*
glass (ordinary)	الزجاج العادي	*9*
glass (Pyrex)	زجاج مقاوم للنار	*3.2*
invar	سبيكة الحديد والنيكل	*0.7*
fused quartz	طبقات الكوارتز	*0.5*

الجدول *(1-5)* يبين مجموعة من المواد الصلبة كثيرة الاستعمال، إضافة إلى معاملات تمددها الطولي

5-6-2 التمدد السطحي *Surface Expansion*:

وهذه الظاهرة تحدث عندما يكون شكل المادة الصلبة على هيئة صفيحة مستوية، حيث يشبه الحال هنا التمدد الطولي تماماً، ولكن في اتجاهين، ذلك أن السطح يمتلك بعدين اثنين بدلاً من البعد الواحد في التمدد الطولي.

والتناسب هنا يكون بين:

1- مساحة السطح الابتدائي *(A)*.

2- التغير الحاصل في درجات الحرارة (ΔT)، أي أن:

$$\Delta A \propto A\,\Delta T \qquad (5\text{-}9)$$

حيث إن (ΔA) هو التغير الحاصل في السطح الذي تعرض لفرق في درجات الحرارة مقداره (ΔT). ومن الواضح أن ثابت التناسب هنا أيضاً يختلف عنه في التمدد الطولي، وذلك لكونه مساوياً إلى الضعف منه، حيث إنَّ الجسم الصلب تمدد في الاتجاهين الطول والعرض، على خلاف التمدد الطولي، أي أنَّ:

$$\alpha_A = 2\alpha_L$$

وهكذا تصبح العلاقة الرياضية (5-10) على الشكل الآتي:

$$\boxed{\Delta A = \alpha_A\, A\,\Delta T} \qquad (5\text{-}10)$$

أما المساحة الجديدة، بعد التمدد السطحي، فيعبَّر عنها بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$A_f - A = \alpha_A A\,\Delta T$$
$$A_f = A + \alpha_A A\,\Delta T$$
$$A_f = A\,(1 + \alpha_A\,\Delta T) \qquad (5\text{-}11)$$

مثال (5-6) Example:

صفيحة مصنوعة من مادة الألومنيوم *aluminum* عرضها (30 cm) وطولها (50 cm)، تعرضت لفرق في درجات الحرارة مقداره (100 K)، أوجد التغير الحاصل في مساحة الصفيحة، إذا علمت أن معامل التمدد الطولي للألمنيوم يساوي ($23\times10^{-6}\,K^{-1}$).

الحل Solution:

من العلاقة الرياضية (5-10) نجد أنَّ:

$$\Delta A = \alpha_A\, A\,\Delta T$$
$$\alpha_A = 2\alpha_L = (2\times23\times10^{-6}\,K^{-1})$$
$$\Delta T = 100\,K$$
$$A = (0.3\times0.5) = 0.15\,m^2 = 1500\,cm^2$$
$$\Delta A = (46\times10^{-6}\,K^{-1})\,(0.15\,m^2)\,(100\,K)$$
$$= 6.9\times10^{-4}\,m^2$$
$$= 6.9\,cm^2$$

5-6-3 التمدد الحجمي للجوامد والسوائل *Liqeids Thermal Expansion of Solids and*:

إن التمدد الحراري لكل من الجوامد والسوائل يمكن أن نسميه تمدداً حجمياً *volume expansion*، وهو ما يتضمن في معناه تغيراً في الأبعاد الثلاثة للنوعين كليهما.

لقد وُجد عملياً أن التغيُّر الحاصل في الحجم نتيجة لتغير درجة الحرارة يتناسب تناسباً طردياً مع كل من:

1- الحجم الابتدائي (V).

2- التغير الحاصل في درجات الحرارة (ΔT). أي أنَّ:

$$\Delta V \propto V\,\Delta T \qquad (5\text{-}12)$$

وثابت التناسب هنا هو عبارة عن معامل التمدد الحجمي *volume expansion coefficient*، وحقيقة الأمر هو معامل التمدد الطولي مضروب في العدد ثلاثة، وذلك لأن التمدد في هذه الحالة يحدث في الأبعاد الثلاثة: الطول والعرض والارتفاع، أي أن معامل التمدد الحجمي يعبَّر عنه بالعلاقة الرياضية:

$$\alpha_V = 3\alpha_L = \beta$$

كما أن المعادلة *(5-14)* تأخذ الشكل الآتي:

$$\boxed{\Delta V = \alpha_V V\,\Delta T} \qquad (5\text{-}13)$$

$$\Delta V = V_f - V$$

حيث إن (V_f) يمثل الحجم الجديد بعد تغيُّر درجة الحرارة بمقدار (ΔT). ومن المناسب ذكره هنا، أن كلاً من معامل التمدد الطولي (α_L) ومعامل التمدد السطحي ومعامل التمدد الحجمي تقاس بالوحدة نفسها، أي تقاس بوحدة (K^{-1}).

كما أنَّ:

$$\beta = 3\alpha_L = \alpha_V$$

وهي تعبِّر عن معامل التمدد الحجمي لكل من السوائل والجوامد على حد سواء.

5-7 امتصاص الحرارة بوساطة الأجسام الصلبة والسائلة *The Absorption of Heat by Solids and Liquids*:

قبل الشروع بتقديم مجموعة من المفاهيم ذات الصلة بكمية الحرارة، لا بد أن نؤكد أن الحرارة هي نوع من الطاقة تنتقل من جسم لآخر عن طريق الامتصاص *absorption of heat*.

إنَّ درجة الحرارة كما أسفلنا في بداية هذا الفصل مرتبطة بكمية الحرارة، والحرارة هنا تعني الطاقة الحركية *kinetic energy* المرتبطة بالحركة العشوائية *random motion* لمجموع ذرات أو جزيئات أو الأجسام المجهرية *microscopic* الأخرى المكونة للجسم المقصود بالدراسة نتيجة لارتفاع درجة حرارة المادة، وانتقال الطاقة الداخلية *internal energy* نتيجة لحركة هذه الجزيئات أو الذرات الموضعية في المواد الصلبة، وازدياد طاقتها الحركية، هو ما نطلق عليه انتقال الحرارة أو بالأصح انتقال كمية الطاقة الحرارية، والتي تعودنا على تسميتها بـ "كمية الحرارة". إن الفلزات أجود المواد الصلبة توصيلا للحرارة وسبب ذلك أن الإلكترونات الحرة في المواد الموصلة للكهرباء تساهم في انتقال الحرارة فتؤدي إلى زيادة قدرتها على التوصيل الحراري، إضافة إلى الحركة التذبذبية لها.

لقد تعودنا كذلك أن نشير إلى كمية الطاقة الحرارية بالرمز (Q)، ومن الناحية العملية من الممكن أن تكون هذه الكمية (Q) موجبة أو سالبة أو صفراً و لبيان هذه المسألة، لا بد من تمييز درجة حرارة الجسم وهي ما يرمز لها $(T_S$ *body temperature*$)$، وكذلك درجة حرارة الوسط المحيط بالجسم وهي ما يرمز لها $(T_E$ *environment temperature*$)$، وعلى وجه العموم، وبناءً على ما تقدم، يمكننا أن نميز الحالات الآتية:

$$T_S > T_E$$

فإن (Q) في هذه الحالة تكون سالبة، وهذا ما يؤدي حتماً إلى انتقال الطاقة الداخلية أو الطاقة الحرارية من الجسم إلى الوسط المحيط، أما عندما تكون:

$$T_S < T_E$$

فإن (Q) تكون موجبة، أي أن الطاقة الحرارية تنتقل إلى الجسم، وأخيراً عندما تكون:

$$T_S = T_E$$

فإن (Q) تساوي الصفر، والجسم هنا لا يفقد ولا يكتسب طاقة حرارية.

إذن نستطيع القول: إن كمية الطاقة الحرارية (Q) هي عبارة عن الانتقال الذي يحصل من وإلى الجسم بسبب فروق درجات الحرارة الحاصلة بين الجسم والوسط المحيط به.

يترتب علينا الآن أن نتعرَّض لوحدات قياس كمية الحرارة المستخدمة، فهناك الكالوري (الحريرة) *calorie*، والجول *joule*، والوحدة البريطانية *British thermal unit*، ويمكن الإفصاح عن ذلك بالآتي:

$$1\ calorie = 4.186\ joule$$

$$1\ btu = 1055\ joule = 252.0\ calorie$$

$$1\ k\ calorie = 4186\ joule = 3.969\ Btu$$

كما يمكننا من خلال هذه المعادلات إيجاد العلاقة بين مختلف وحدات قياس الطاقة الحرارية، وبما أن الكالوري، هو الوحدة المعتمدة سواء "الكيلو الكالوري" أو "الكالوري الواحد"، فلا بأس من تقديم تعريف يبيّن ما هو المقصود بهذه الوحدة.

الكالوري (السعرة) *Calorie*:

الكالوري أو السعرة، هو كمية الطاقة الحرارية اللازمة لرفع درجة حرارة غرام واحد من الماء درجة مئوية واحدة على مقياس سليزيوس. عند ضغط يساوي واحد ضغط جوي، ويساوي *joule 186.4*

الوحدة الحرارية البريطانية *Btu*:

هي كمية الطاقة الحرارية اللازمة لرفع درجة حرارة باوند واحد *pound* من الماء درجة فهرنهايتية واحدة، ومن الواضح أن الكيلو كالوري والبالغ ألف كالوري، هو الوحدة المستخدمة في قياس مقدار الطاقة الحرارية في الأطعمة المختلفة من قبل أخصائيي التغذية ويسمى *(1 nutritionists cal)*: وسنعرض عملية الديناميكا الحرارية من خلال المفاهيم الفيزيائية الأساسية الآتية:

5-7-1 السعة الحرارية *The Heat Capacity*:

هي كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة جسم ما درجة مئوية واحدة، وتقاس بوحدات *(J/C°)*، ومن الجانب الرياضي نلاحظ أن السعة الحرارية لجسم ما *heat capacity* والتي يشار لها بالحرف الإنكليزي بحجمه الكبير *(C)* هي عبارة عن عامل التناسب بين كمية الحرارة *(Q)* والتغير الذي تحدثه هذه الطاقة الحرارية في درجات حرارة الجسم. أي أن:

$$Q \propto (T_f - T_i) \qquad (5\text{-}14)$$

حيث إن (T_f) هي درجة حرارة الجسم النهائية *final temperature*، (T_i) هي درجة حرارة الجسم الابتدائية *initial temperature*، إذن:

$$Q = C(T_f - T_i)$$

$$\boxed{C = \frac{Q}{(T_f - T_i)}} \qquad (5\text{-}15)$$

ونلاحظ مجددا من خلال من العلاقة الرياضية *(5-15)*، أن كمية الحرارة *(Q)* اللازمة لرفع درجة حرارة الجسم $(T_f - T_i)$ درجة واحدة على مقياس سليزيوس هي عبارة عن السعة الحرارية *(C)* التي عرفناها في بداية هذه الفقرة.

ومن الممكن التعبير عن السعة الحرارية *(C)* بما يناسب خصوصية الحالة المعنية، فمثلاً نعبّر عنها أحياناً بوحدات *(cal / C°)*، أو *(cal / K)*، أو *(J / K)*.

5-7-2 السعة الحرارية النوعية (الحرارة النوعية *Thermal Capacity*):

السعة الحرارية النوعية (الحرارة النوعية) لجسم ما هي كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة كتلة مقدارها واحد كيلو غرام من هذا الجسم درجة مئوية واحدة.

بعد أن قدمنا لمفهوم السعة الحرارية بشكل عام في الفقرة *(1-7-5)*، من الواضح تماماً أن المواد تختلف في سعتها الحرارية بحسب نوعها من مادة لأخرى، ولهذا لا بد من أن نأخذ بعين الاعتبار مسألة نوع المادة وتأثيرها على مفهوم السعة الحرارية، وهذا ما يقودنا إلى مفهوم السعة الحرارية النوعية. إنَّ السعة الحرارية النوعية هي عبارة عن السعة الحرارية لوحدة الكتلة *heat capacity per unit mass*، واختصاراً يرمز لها بالحرف الإنكليزي الصغير *(c)* لتمييزها عن السعة الحرارية، وعلى هذا الأساس تأخذ العلاقة الرياضية *(5-16)*، الصيغة الآتية:

$$Q = c\,m(T_f - T_i)$$

$$\boxed{c = \frac{Q}{m(T_f - T_i)}} \qquad (5\text{-}16)$$

ونلاحظ مجددا من خلال العلاقة الرياضية *(5-16)* أنَّ كمية الحرارة اللازمة *(Q)* لرفع درجة حرارة وحدة الكتلة *(m=1kg)* بمقدار درجة مئوية واحدة على مقياس سليزيوس $(T_f - T_i)$ هي عبارة عن الحرارة النوعية *(c)*.

ويعبَّر عنها بما يتناسب والحالة العملية من وحدات القياس، فنجدها أحياناً تقاس بوحدات $(cal/g.C°)$ وأخرى $(cal/kg.K)$ وأخيراً $(cal/g.K)$، فعلى سبيل المثال، الحرارة النوعية للماء:

$$c = 1\,cal/g.C° = 1\,Btu/lb.F = 419\,J/kg.K$$

5-7-3 الحرارة النوعية المولرية (المولية) *Molar Heat Capacity*:

إن هذه الكمية الفيزيائية تظهر عندما تكون كمية المادة مقاسة بالمول *mol* والمول الواحد من المادة يعني عدد أفوكادرو من الذرات أو الجزيئات بحسب تركيب المادة، فعلى سبيل المثال يحتوي المول الواحد من الألومنيوم على $(6.0\times10^{23}\ /mol)$ من الذرات *atoms*، كما أن مولاً واحداً من أكسيد الألومنيوم *aluminum oxide* يحتوى على العدد نفسه ولكن من الجزيئات *molecules*، وعدد أفوكادرو يعد من الثوابت الفيزيائية وهو يساوي عددياً:

$$Avogadros\,number\,N_A = 6.02\times10^{23}/mol$$

والجدول (2-5) يوضح مقادير الحرارة النوعية لمجموعة من المواد شائعة الاستخدام، وذلك في درجة حرارة الغرفة، وعلى هذا الأساس فإن وحدات قياس الحرارة النوعية المولرية هي: (Cal / mol.k) أو (J / mol.k)، انظر الجدول (2-5).

Characteristic الخصائص		Thermal Capacity الحرارة النوعية		Molar Heat Capacity الحرارة النوعية المولرية
Substance	المادة	cal / g.K	J / kg.K	J / mol.k
Elemental Solids العناصر الصلبة				
lead	الرصاص	0.0305	128	26.5
tungsten	التنستين	0.0321	134	24.8
silver	الفضة	0.0564	236	25.5
copper	النحاس	0.093	386	24.5
aluminum	الألومنيوم	0.215	900	24.4
Other Solids عناصر صلبة اخرى				
brass	النحاس الأصفر	0.092	380	
granite	الغرانيت	0.19	790	
glass	الزجاج	0.20	840	
ice (-10 °c)	الثلج	0.550	2220	
Liquids السوائل				
mercury	الزئبق	0.023	140	
ethyl alcohol	الكحول الأثيلي	0.58	2430	
seawater	ماء البحر	0.93	3900	
water	الماء	1.00	4190	

الجدول (2-5) يبين الحرارة النوعية لمجموعة من المواد الصلبة والسائلة مقاسة بنوعين من الوحدات، كما يبين الحرارة النوعية المولرية لمجموعة من المواد الصلبة

5-7-4 حرارة التحول Heat of Transformation:

هي كمية الحارة التي تؤدي إلى تغيير حالة المادة من صلبة إلى سائلة أو من سائلة إلى غازية دون أي تغيير في درجة حرارتها.

عندما يتم امتصاص الحرارة من قبل الجسم الصلب أو السائل *absorption of heat*، فإنه ليس من الضروري دائماً أن يرافق ذلك ارتفاع أو انخفاض في درجة الحرارة *change in temperature*، وبدلاً من ذلك تتغير حالة المادة أو الطور الذي تتواجد فيه، والذي نسميه بالإنكليزية *phase*، أو

(state) (صلبة، سائلة، غازية) دون أن تتغير درجة الحرارة constant temperature transformation. فعلى سبيل المثال يتحول الثلج ice إلى ماء والماء إلى بخار الماء بامتصاص كمية من الطاقة الحرارية مع بقاء درجة حرارته ثابتة. وعلى العكس من ذلك يتجمد الماء ويتكثف البخار ويرافق ذلك تحرير كمية من الطاقة الحرارية بدون تغيُّر في درجات الحرارة، وعلى هذا الأساس يمكننا القول:

إن كمية الحرارة لوحدة الكتلة التي يجب أن تتحول عند تحول المادة تماماً من طور إلى آخر، هي عبارة عن حرارة التحول heat of transformation ويرمز لها بالحرف الإنكليزي الكبير (L). وهكذا عندما تخضع كتلة من المادة مقدارها (m) لعملية تحول كامل من طور لآخر، فإن كمية الحرارة التحول هي:

$$\boxed{Q = Lm} \qquad (5\text{-}17)$$

أما عندما يتحول الماء إلى بخار فإن الحرارة المتحولة تسمى: heat of vaporization واختصاراً (L_V)، وتساوي حرارة التبخير للماء.

$$L_V = 539\ cal/g = 40.7\ kJ/mol$$
$$= 2260\ kJ/kg$$

أما عندما تتحول المادة من الطور الجامد solid phase إلى الطور السائل liquid phase فإن الحرارة المتحولة تسمى heat of fusion واختصاراً (L_F)، وتساوي:

$$L_F = 79.5\ cal/g = 6.01\ kJ/mol = 333\ kJ/kg$$

وذلك بالنسبة للماء عند تجمده أو ذوبانه، والجدول (5-3) يوضّح حرارة التحول لبعض العناصر

Substance		Melting الذوبان		Boiling الغليان	
		melting point (K)	heat of fusion (kJ/kg) حرارة التحول	boiling point (K) نقطة الغليان	heat of vaporization (kJ/kg) حرارة التبخر
hydrogen	الهيدروجين	14.0	58.0	20.3	455
oxygen	الأوكسجين	54.8	13.9	90.2	213
mercury	الزئبق	234	11.4	630	296
water	الماء	273	333	373	2256
lead	الرصاص	601	23.2	2017	858
silver	الفضة	1235	105	2123	2336
copper	النحاس	1356	207	2868	4730

الجدول (5-3) يبين حرارة التحول في حالتي الذوبان melting والتبخر vaporization لبعض العناصر، كما يبين درجة حرارة الذوبان ودرجة حرارة التبخر لهذه المواد

5-8 القانون الأول في الديناميكا الحرارية *First Law of Thermodynamics*:

إنّ هذا القانون الهام في الديناميكا الحرارية، هو القانون الذي يعبرّ عن مبدأ حفظ الطاقة لعنصر أو جسم يخضع لعملية تبادل حراري مع محيطه بواسطة الشغل والحرارة، ويمكننا التعبير عنه بالعلاقتين الرياضيتين:

$$\Delta E_{int} = E_{int,f} - E_{int,i} = Q - W \qquad (5\text{-}18)$$

أو بالصيغة التفاضلية:

$$dE_{int} = dQ - dW \qquad (5\text{-}19)$$

حيث تمثل كل من:

E_{int}: الطاقة الداخلية للجسم أو العنصر، وهي تعتمد على حالته الفيزيائية (درجة الحرارة، الضغط، الحجم).

(Q): كمية الطاقة الحرارية المتبادلة.

(W): الشغل المنجز بواسطة العنصر أو المجموعة خلال عملية التبادل الحراري، ومن الممكن أن يكون موجباً في حالة تمدد المجموعة، وسالباً في حالة تقلصها.

ولهذا القانون تطبيقات هامة جداً، فعلى سبيل المثال:

1- عمليات كظومة الحرارة *adiabatic processes* وفيها يكون الجسم معزولاً تماماً ولا يحدث أي نوع من أنواع التبادل الحراري، ونعبّر عن هذه الحالة بالعلاقة الرياضية:

$$\Delta E_{int} = -W \qquad (5\text{-}20)$$

ومن الواضح أن كمية الطاقة الحرارية مساوية للصفر، أي أن:

$$Q = 0$$

2- عمليات ثبوت الحجم *constant volume processes* أي أن حجم الجسم الذي يخضع لعملية التبادل الحراري يبقى ثابتاً، كثبوت حجم الغاز مثلاً، حيث لا تقوى المجموعة في هذه الحالة على أداء أي نوع من الشغل، ونعبّر عن هذه الحالة بالعلاقة الرياضية:

$$\Delta E_{int} = Q \qquad (5\text{-}21)$$

ومن الواضح أن كمية الشغل المنجز خلال هذه العملية يكون مساوياً للصفر، أي أن:

$$W = 0$$

3- عمليات تمر بجميع المراحل *cyclic processes*، وفيها تعود المجموعة الخاضعة لعملية التبادل إلى وضعها الابتدائي بعد هذا التبادل بين كمية الحرارة والشغل، ونعبّر عنها بالعلاقة الرياضية:

$$Q = W \qquad (5\text{-}22)$$

ومن الواضح أن كمية التغير في الطاقة الداخلية مساوٍ للصفر، أي أن:

$$\Delta E_{int} = 0$$

4- عمليات التمدد الحراري *free expansion processes*، وفي هذا النوع من العمليات الحرارية لا يحصل إنتاج أي مقدار من الشغل، ونعبّر عنها بالعلاقة الرياضية:

$$\Delta E_{int} = 0 \qquad (5\text{-}23)$$

ومن الواضح أن كلاً من كمية الحرارة والشغل في هذه الحالة تكون مساويةً للصفر، أي أن:

$$Q = W = 0$$

ولسهولة تذكر الحالات المهمة الأربعة، تأمل الجدول *(4-5)*.

The Law: $\Delta E_{int} = Q - W$ *(Eq. 5-23)*

Process نوع العملية	*Restriction* الخصوصية	*Consequences* النتائج
adiabatic عمليات كظومة حرارياً	$Q = 0$	$\Delta E_{int} = -W$
constant volume عمليات ثبوت الحجم	$W = 0$	$\Delta E_{int} = Q$
closed cycle عمليات مغلقة	$\Delta E_{int} = 0$	$Q = W$
free expansion عمليات التمدد الحراري	$Q = W = 0$	$\Delta E_{int} = 0$

الجدول *(4-5)* يبين أربع حالات خاصة وهامة للقانون الأول في الديناميكا الحرارية

مثال *(5-7) Example*:

أوجد حسابياً كمية الحرارة التي نحتاجها لكي نرفع درجة حرارة كتلة من الثلج مقدارها *(720 g)* من درجة الحرارة *(-10 C°)* إلى الحالة السائلة عند درجة الحرارة *(15 C°)*.

الحل *Solution*:

يتحول الثلج إلى سائل وذلك بعد مروره بثلاث مراحل، وعليه سنقوم بحل هذه المسألة على ثلاث خطوات:

1- ارتفاع درجة الحرارة من *(-10 C°)* إلى *(0 C°)*.

$$Q_1 = C_{ice}\, m\, (T_f - T_i)$$
$$= (2220\ J/kg.\ K°)\ (0.720\ kg)\ [0° - (-10\ C°)]$$
$$= 15.98\ kJ$$

2- وفي هذه المرحلة سيتم ذوبان الثلج إلى أن يصبح سائلاً، وهي تحدث دون تغيُّر في درجة الحرارة، حيث تبقى مساوية للصفر.

$$Q_2 = L_F\, m = (333\ kJ/kg)\ (0.720\ kg)$$
$$= 239.8\ kJ$$

3- المرحلة الثالثة وفيها يتم انتقال السائل من درجة الحرارة (0 C°) إلى (15 C°).

$$Q_3 = L_{Liq}\, m = (T_f - T_i)$$
$$= (4190\ J/kg.\ K°)\ (0.720\ kg)\ (15\ C° - 0\ C°)$$
$$= 45.25\ kJ$$
$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$$
$$= 300\ KJ$$

5-9 انتقال الحرارة *The Transfer Of Heat*:

أصبح مألوفاً لدينا أن هناك ثلاثة طرق لانتقال الحرارة، وهي تهتم بصفة عامة بدراسة كيفية انتقال الحرارة. وسنقدم تفسيراً مبسطاً لانتقال الحرارة بهذه الطرق الثلاث بهدف التعرف عليها، كما أننا سندرس العلاقة الرياضية التي تعبّر عن كلٍ منها؛ وهذه الطرق هي: التوصيل والحمل والإشعاع.

5-9-1 انتقال الحرارة بالتوصيل *Transfer Of Heat By Conduction*:

إن هذا النوع من انتقال الحرارة *thermal energy* يحدث دون أن ينتقل الجسم الذي زادت حرارته، فلو أخذنا مثالاً على ذلك: كوباً من القهوة الساخنة جداً ووضعنا فيه ملعقة معدنية، فإننا وبعد فترة زمنية قصيرة نجد وبطريقة اللمس أن طرف الملعقة غير المغمور قد أصبح ساخناً، وتفسير ذلك أن الحرارة انتقلت من الجسم الساخن (القهوة) إلى الجسم المعتدل (الملعقة) تدريجياً حتى وصلت الطرف غير المغمور. وحقيقة الأمر أن هذه الحرارة تنتقل إلى ذرات والكترونات الملعقة وتؤدي إلى زيادة سعة الترددات لبداية المنطقة المغمورة، ثم تنتقل عن طريق التصادم مع الإلكترونات والذرات المجاورة إلى أن تصل الطرف الآخر، ثم بعد ذلك أصابع اليد، أي أن هذا النوع من انتقال الحرارة يحتاج إلى وسط مادي.

لقد أوضحت التجارب أن معدل التدفق الحراري *rate of heat conduction* واختصاراً (H_c) يتناسب طردياً مع كل من مساحة مقطع التوصيل (A)، والفرق بين درجتي حرارة بداية ونهاية

منطقتي التوصيل $(T_H - T_C)$، كما يتناسب سماكة المسار الذي تسلكه كمية الحرارة المنتقلة (L)، ويعبَّر عن ذلك بالعلاقة الرياضية:

$$H_C = \frac{Q_C}{t} = k_C \frac{(T_H - T_C)}{L} \qquad (5\text{-}24)$$

حيث إن:

(H_C): انتقال الطاقة بالتوصيل — *Rate of heat conduction*

(Q_C): كمية الحرارة المنتقلة — *Transfere thermal energy*

(t): الزمن اللازم لذلك — *Duration time*

(k_C): ثابت التوصيل الحراري — *Conductivity constant*

(A): مساحة منطقة التوصيل — *Conduction area*

(T_H): درجة الحرارة المرتفعة — *Hot reservoir temperature*

(T_C): درجة الحرارة المنخفضة — *Cold reservoir temperature*

(L): سماكة مسار الانتقال الحراري — *Conduction path thickness*

وخلاصة القول: إنّ مقدار الحرارة المنقولة بطريقة التوصيل خلال جسم صلب تتناسب تناسباً طردياً مع الفرق في درجة الحرارة بين طرفيه والزمن ومساحة مقطعه وعكسياً مع طوله.

ومن العلاقة الرياضية (5-25) يُمكننا أن نعرف ثابت التوصيل الحراري (k_C) على النحو الآتي:

هو مقدار الحرارة التي تمر عمودياً (Q_C) عن طريق التوصيل في الثانية الواحدة (t) خلال مساحة (A) مقدارها واحد متر مربع وسماكتها (L) واحد متر، حيث يكون الفرق في درجة الحرارة (ΔT) بين وجهيها المتقابلين درجة واحدة على مقياس سليزيوس.

أما معدل التدفق الحراري *rate of heat conduction* فهو عبارة عن كمية الحرارة المنتقلة خلال وحدة الزمن، ونعبر عنه بالعلاقة الرياضية:

$$H_C = \frac{Q_C}{t}$$

وبصفة عامة تبدي المواد مقاومة للانتقال الحراري *thermal resistance to conduction* ويعبَّر عنها رياضياً على النحو الآتي:

$$R_{ther} = \frac{L}{k_C} \qquad (5\text{-}25)$$

حيث إن:

(R_{ther}): هي المقاومة الحرارية.

(L): طول المسار للانتقال الحراري.

(k_C): ثابت التوصيل الحراري.

وهي تختلف من مادة لأخرى، ولغرض التعرف على هذا الاختلاف انظر الجدول (5-5)، وبتعويض مقدار الثابت (k_C) من العلاقة الرياضية (5-26) في العلاقة الرياضية (5-25) نجد أن:

$$H_C = A\frac{(T_B - T_C)}{R_{ther}} \qquad (5\text{-}26)$$

ويعطى عادة مقدار المقاومة الحرارية (R_{ther}) في المسائل، أو يُطلب إيجادها من خلال المعلومات التي تُعطى لهذا الغرض. انظرالجدول (5-5).

Substance المواد		Conductivity التوصيلية $K_C(W/m.K)$	R–Value المقاومة الحرارية* $ft^2.h.F/Btu$
Metal المعادن			
stainless steel	الفولاذ	14	0.010
lead	الرصاص	35	0.0041
aluminum	الألومنيوم	235	0.0006
copper	النحاس	401	0.00036
silver	الفضة	428	0.00034
Gases الغازات			
air (dry)	الهواء الجاف	0.026	5.5
helium	الهليوم	0.15	0.96
hydrogene	الهيدروجين	0.18	0.80

* نلاحظ أن المقاومة الحرارية تم قياسها لشريحة سماكتها واحد بوصة. ويمكن إيجادها وفق النظام (SI) بضرب مقادير المقاومة الحرارية بالمقدار (0.14 k).

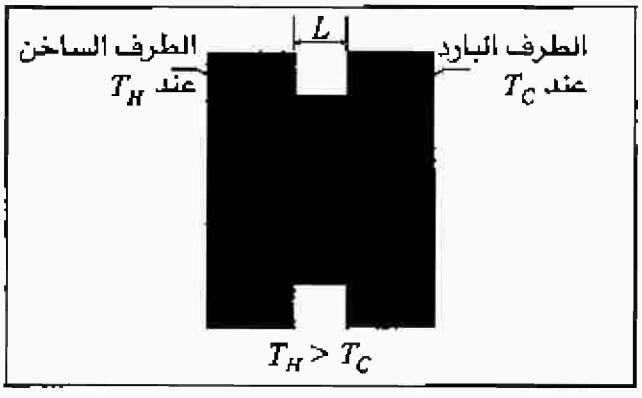
Substance المواد		Conductivity الناقلية $K_C(W/m.K)$	R-Value المقاومة الحرارية $ft^2.h.F/Btu$
Building Materials مواد البناء			
polyurethane foam	رغوة اليوريثن	0.024	5.9
rock wool	صوف صخري	0.043	3.3
fiberglass	الزجاج الليفي	0.048	3.0
white pine	خشب الصنوبر الأبيض	0.11	1.3
window glass	زجاج النوافذ	1.0	0.14

الجدول (5-5) يبين مقادير ثوابت التوصيل (kC) الحراري والمقاومة الحرارية (R) لمجموعة من المعادن والغازات ومواد البناء

مثال (5-8) Example:

يعبّر الشكل (5-4) عن شريحة معدنية طولها (25 cm) ومساحة مقطعها (90 cm2)، أما درجة الحرارة العالية (125 C°) بينما الواطئة (10 C°)، استمرت عملية الانتقال الحراري حتى توصلنا إلى حالة الاستقرار.

أوجد حسابياً معدل التدفق الحراري (H_C) خلال الشريحة المعدنية.



الشكل (4-5)، المثال (8-5)

الحل Solution:

باستخدام العلاقة الرياضية (5-25) نجد أن:

$$H_C = \frac{Q_C}{t} = k_C \frac{(T_H - T_C)}{L}$$

ثابت التوصيل الحراري (k) للنحاس تساوي (401 W/m.K).

$$H_c = (401\ W/m.k)(90 \times 10^{-4}\ m^2)(125 - 10)\,°C / (0.25)\ m$$
$$= 1.66 \times 10^3\ J/S$$

5-9-2 انتقال الحرارة بالحمل *Transfer of Heat by Convection*:

إن انتقال الحرارة بالحمل *convection* يحدث عندما تتعرض طبقة من السائل كالماء أو الهواء للتلامس مع جسم آخر بحيث تكون درجة حرارته أعلى من درجة حرارة السائل مما يؤدي إلى ارتفاع درجة حرارته وتمدد حجمه وذلك في معظم حالات انتقال الحرارة بالحمل.

ويمكننا أن نضرب في هذه المناسبة مثالاً قريباً جداً لكل منا، وهو تبريد الجسم بالهواء بواسطة الحمل الناتج عن تأثير قوة خارجية. إن تفسير مثل هذه الظواهر يتم عادة من خلال قانون نيوتن للتبريد، الذي يزودنا بمعرفة معدل فقدان الحرارة، وصيغته الرياضية هي:

$$\boxed{H_{conv} = k_{conv} A(T - T_i)} \qquad (5\text{-}27)$$

إن معدل فقدان الحرارة بطريقة الحمل *convection* لكل وحدة مساحة من السطح يتناسب مع الفرق في درجة الحرارة حيث إن: (T) هي درجة حرارة السطح، و (T_i) هي درجة حرارة الطبقة الساكنة من السطح، ويكون المقدار $(T - T_i)^{1/3}$ في المعادلة *(5-27)* صحيحاً عندما تنتقل الحرارة بشكل طبيعي، أما إذا كانت تنتقل بسبب تأثير قوة ما فإن التناسب يكون مع المقدار $(T - T_i)$.

ونلاحظ من المعادلة *(5-28)* أننا نستطيع تعريف ثابت الحمل الحراري (k_{conv}) على النحو الآتي:

هو كمية الحرارة المنقولة خلال سطح مساحته واحد متر مربع، بفعل فرق درجة الحرارة درجة واحدة على مقياس سليزيوس.

ونلاحظ من خلال طريقة انتقال الحرارة هذه أن الوسط الناقل يتحرك بشكل حر من المكان الساخن إلى المكان البارد، ومن الأمثلة المباشرة على ذلك: السخانات المائية الكهربائية والتدفئة المركزية.

مثال *Example (5-9)*:

سطح مساحته $(100\ m^2)$ ودرجة حرارته $(40\ C°)$ موجود في الهواء حيث درجة حرارة الهواء $(22)°C$. إذا كان متوسط معامل انتقال الحرارة بالحمل بين السطح والهواء يساوي $(10\ W/m^2C°)$.

أوجد حسابياً معدل التدفق الحراري.

الحل *Solution*:

$$H_{conv} = k_{conv} A (T - T_0)$$
$$k_{conv} = 10\ W/m^2\,°C$$

$A = 100\ m^2$

$T = 40\ ℃$

$T_i = 22℃$

$H_{conv.} = (10\ W/m^2\ ℃)\ (100\ m^2)\ (40 - 22)\ ℃$

$= 18000\ W$

5-9-3 انتقال الحرارة بالإشعاع *Tranter of Heat by Radiation*:

من الممكن تقريب فهم هذه الطريقة في انتقال الحرارة وذلك إذا افترضنا جسمين مستقيمين الأول *(A)* والثاني *(B)* يتبادلان الطاقة على شكل إشعاع كهرومغناطيسي *electromagnetic radiation* أو إشعاع فوق الحمراء *ultra violet radiation* في مدى الطول الموجي للضوء المرئي *visible light* من *(1.0 μm)* إلى *(100 μm)*.

إن جميع الأجسام يمكن أن يصدر عنها أمواج كهرومغناطيسية على شكل إشعاع إذا ما كانت درجة حرارتها فوق الصفر المطلق، كما أن جميع الأجسام يمكن لها أن تمتص هذه الإشعاعات إذا ما توفر لها الفرق في قوة الإشعاع وكذلك الفرق في درجات الحرارة. إن عملية التبادل للحرارة بواسطة الإشعاع هذه لها أهمية بالغة في الحفاظ على المعدل العام لدرجة حرارة الأرض الملائمة للحياة والتي تساوي تقريباً *(300 K°)* في معدلها العام، وذلك في حالة حصول أي نقصان أو زيادة في درجة الحرارة المذكورة فإن الحياة تتعرض مباشرة لانعكاسات هذه التغيرات. ولابد من التنويه إلى أنَّ انتقال الحرارة بهذه الطريقة لا يحتاج إلى وسط مادي بين الجسمين الساخن والبارد.

وبصفة عامة فإن الجسم المشع الجيد *good radiator* يعد جسماً ممتصاً جيداً *absorber*، ونطلق على الجسم الذي يمتص كامل الأشعة الكهرومغناطيسية الساقطة عليه الجسم الأسود *black body*، كما أنه من الممكن أن يرسل بدوره إشعاعاً وذلك تبعاً لفروق درجات الحرارة، ولقد تمَّ تصنيف الأجسام الأخرى وفقاً لإمكانياتها الإشعاعية مقارنة بالجسم الأسود. إنَّ مقدرة الجسم على الإشعاع هي الطاقة الكلية المشعة لجميع الأطوال الموجية الصادرة عن الجسم لكل متر مربع واحد من سطحه لكل ثانية واحدة. ومن المفيد جداً أن نذكر هنا بأن معدل الانتقال الحراري الإشعاعي للجسم الأسود يتناسب مع درجة حرارته المطلقة مرفوعة للأس أربعة، أي أن:

$$H_{rad} = \frac{Q_{rad}}{t} = \epsilon \sigma A T^4 \qquad (5\text{-}28)$$

ومن هذه العلاقة الرياضية نجد أن الطاقة المنتصة يمكن التعبير عنها بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$Q_{rad} = \sigma A t T^4$$

وإذا كان الجسم المشع حرارياً عند درجة الحرارة (T_1) ودرجة حرارة الوسط المحيط به (T)، فإن معدل انتقال الطاقة من الجسم إلى الوسط هو:

$$H_{rad} = \in \sigma A(T_1^4 - T^4)$$

ونلاحظ أيضاً إذا كانت $(T_1 = T)$ فإن معدل انتقال الطاقة يساوي الصفر.

وهذا ما يعرف بقانون ستيفان – بولتزمان *Stefan– Boltzman*.

حيث إنَّ:

(H_{rad}): معدل انتقال الحرارة أو الانبعاث الإشعاعي.

(σ): ثابت ستيفان – بولتزمان $(5.685\times10^{-8}\ Wm^{-2}K^{-4})$ وهو ثابت تناسب الانتقال الحراري بالإشعاع.

(T): درجة الحرارة المطلقة للجسم المشع.

(A): مساحة سطح الجسم المعرض للإشعاع.

$(\in)$: معامل الامتصاص الحراري *emissivity*، وهو يختلف من سطح لآخر فهو في حالة المعدن المشع مثلاً يساوي (0.1) أما بالنسبة للجسم الأسود فيساوي (0.9).

ومن المسائل التي قد تبدو متناقضة في ظاهرها إلا أنَّها صحيحة من الناحية العلمية، هي ارتداء الناس الذين يعيشون في الصحراء حيث تكون الحرارة مرتفعة الملابس ذات الألوان السوداء أو الداكنة القريبة من الأسود بدلاً من اللون الأبيض، إن اللون الأسود بسبب امتصاصه للحرارة فإنه يؤمن فرقاً في درجة الحرارة بين الجسم والوسط المحيط مقداره على وجه التقريب $(6\ C^o)$ أي أن الفراغ بين جسم الإنسان الذي يرتدي الثوب الأسود والثوب ذاته تكون درجة حرارته أعلى من درجة حرارة الوسط الخارجي بست درجات مئوية، مما يؤدي إلى تسرب جزيئات الهواء من نسيج الثوب إلى الخارج وهذا ما يحدث تخلخلاً ونقصاً يتم تعويضه من الفتحة الكبيرة أسفل الثوب عن طريق تيار هوائي بطيء يجعل الإنسان في الصحراء يحس ببرودة بسبب تيار الهواء المار بصفة مستمرة على جسمه، وهذا ما أثبتته التجارب العلمية.

وأخيراً لا بد من الإشارة في هذا المقام إلى أن الحرارة تنتقل بطريقة الإشعاع دون الحاجة إلى وسط مادي لهذا الانتقال، كما أن الطاقة الحرارية المتصة تختلف من مادة لأخرى، هذا ما يؤدي بالضرورة إلى أنّ لكل مادة معاملها الخاص بها، ونستطيع أن نعرّف هذا المعامل على النحو الآتي:

$$\epsilon = \frac{\text{الطاقة الممتصة بواسطة الجسم}}{\text{الطاقة الكلية الساقطة على الجسم}}$$

كما يُمكننا أن نعبِّر عن ذلك بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$\epsilon = \frac{H_{ab}}{H_i} \qquad (5\text{-}29)$$

مثال (Example (5-10:

إذا كان معدل الطاقة الشمسية الساقطة على جسم يساوي (80 W)، يمتص منها (30%) فقط ويعكس الباقي، أوجد حسابياً معامل الامتصاص الحراري للجسم.

الحل Solution:

من العلاقة الرياضية (5-30) نجد أنَّ:

$$\epsilon = \frac{H_{ab}}{H_i}$$

$$H_{ab} = 80W$$

$$H_i = \frac{30 \times 80}{100} = 24W$$

$$\epsilon = \frac{24W}{80W} = 0.3$$

مسائل عامة محلولة
Solved problems

5-1 كمية من الزئبق *mercury* حجمها *(0.1 liter)* وذلك عند درجة الحرارة *(10 C°)* ارتفعت درجة حرارته بعد ذلك لتصبح *(35 C°)*.

أوجد حسابياً مقدار الحجم الجديد للزئبق، علماً بأن معامل تمدده الحجمي يساوي $(18\times10^{-5}\ K^{-1})$.

الحل:

$$1.0\ liter = 1000 cm^3$$
$$V_o = 0.1 liter = 0.1\times1000 = 100 cm^3$$
$$= 100\times10^{-6}\ m^3$$
$$\Delta T = T_f - T_o = [(273+35)-(273+10)]$$
$$= 25°K$$
$$\Delta V = \beta V_o \Delta T$$
$$= (1\times10^{-4}\ m^3)(18\times10^{-5}\ K^{-1})(25°K)$$
$$= 0.45\times10^{-6}\ m^3$$
$$\Delta V = V_f - V_o$$
$$V_f = \Delta V + V_o = (100+0.45)\times10^{-6}\ m^3$$

5-2 سلك مصنوع من مادة الفولاذ *steel* طوله *(130 cm)* وقطره *(1.1 mm)*، تم تسخينه إلى درجة الحرارة *(101 C°)* ثم تم تثبيته بقوة عند نهايته إلى جسمين متماسكين، ثم ترك السلك ليبرد حتى درجة الحرارة *(20 C°)*.

أوجد حسابياً قوة الشد الناتجة عن عملية التبريد في السلك، إذا علمت أن معامل التمدد الحراري الطولي للفولاذ يساوي $(11.0\times10^{-6}\ K^{-1})$.

الحل:

نلاحظ في هذه المسألة أننا نبحث عن النقص الحاصل في طول السلك وليس الزيادة، والمبدأ في هذا الأمر واحد.

إن مقدار نقص طول السلك (ΔL) يمكن حسابه من العلاقة الرياضية:

$$\Delta L = \alpha_L L_o \Delta T$$

وذلك بفرض أن السلك تُرك حراً:

$$\Delta L = (11\times10^{-6}\ K^{-1})(1.3\,m)(81\,K)$$
$$= 1.16\times10^{-6}\ m = 1.16\ cm$$

نحن نعلم من الخصائص الميكانيكية للمواد الصلبة أن معامل يونج *Young`s modulus* يربط كلاً من الانفعال *strain* والإجهاد *stress* على النحو الآتي:

$$E = (F/A)/(\Delta L/L_o)$$
$$F = AE\frac{\Delta L}{L_o}$$

حيث إن:

(E): هو معامل يونج للفولاذ ويساوي $(200\times10^{9}\ N/m^2)$.

(A): مساحة مقطع السلك.

$$A = \pi r^2 = \pi\left(\frac{d}{2}\right)^2 = \left(\frac{1.1\times10^{-3}}{2}\right)^2\pi$$
$$F = \left(200\times10^{9}\frac{N}{m}\right)\frac{22}{7}\left(\frac{1.1\times10^{-3}m}{2}\right)^2\frac{(1.16\times10^{-2}m)}{1.3m}$$
$$= 1700\ N$$

مسائل وتمارين الفصل الخامس

Chapter Five Exercises & Problems

5-1 عند أي درجة حرارة يعطي كل من الزوجين الآتيين القراءة نفسها:

1. الفهرنهايت والسليزيوس.

2. الفهرنهايت والكلفن.

3. السليزيوس والكلفن.

5-2 قضيب من الفولاذ طوله عند درجة الحرارة *(32 C°)* يساوي تماماً *(20 cm)*، أوجد حسابياً التغير الحاصل في طول القضيب وذلك عندما ترتفع درجة حرارته إلى *(50 C°)*.

5-3 فتحة دائرية الشكل في صفيحة من الألومنيوم، يبلغ مقدار قطرها *(2.725 cm)* عند درجة الحرارة *(0 C°)*.

أوجد حسابياً قطر هذه الفتحة عندما ترتفع درجة حرارة الصفيحة إلى *(100 C°)*.

5-4 كرة من معدن الألومنيوم يبلغ نصف قطرها *(10 cm)*.

أوجد حسابياً التغير الحاصل في حجمها، إذا تغيرت درجة حرارتها من *(0 C°)* إلى *(100 C°)*.

5-5 وعاء من الألومنيوم سعته *($100\ cm^3$)*، تم ملؤه بمادة الغليسرين عند درجة الحرارة *(22 C°)*، ثم ارتفعت درجة حرارة الوعاء مع الغليسرين إلى *(28 C°)*.

هل سيسكب جزء من الغليسرين خارج الوعاء؟ وضّح ذلك حسابياً. علماً بأن معامل التمدد الحجمي للغليسرين هو: $5.1\times10^{-4}\ C°$

5-6 مساحة قطعة معدنية على شكل مستطيل طوله *(a)* وعرضه *(b)* تساوي *($A = ab$)*، معامل تمددها الطولي *(α)*، ارتفعت درجة حرارتها بمقدار *(ΔT)*، بحيث ازداد طول الأضلاع بالمقادير *(Δa)*، *(Δb)* على التوالي، أثبت أنّ التغيُّر الحاصل في المساحة:

$$\Delta A = 2\alpha A\,\Delta T$$

وذلك إذا أهملنا المقدار:

$$\frac{\Delta a \Delta b}{ab}$$

مساعدة: أوجد أولاً المساحة الابتدائية، ثم أوجد المساحة النهائية، ثم أوجد الفرق بينهما.

5-7 تُعرَّف الكثافة (أو الكتلة الحجمية) بأنها الكتلة مقسومة على الحجم. فإذا كان كل من الحجم والكثافة يعتمدان على درجة الحرارة، أثبت أن التغير البسيط الحاصل في الكثافة ($\Delta\rho$) والمصاحب لتغير في درجة الحرارة مقداره (ΔT) يمكن التعبير عنه بالعلاقة الرياضية:

$$\Delta\rho = -\beta\,\rho\,\Delta T$$

حيث (β) هي معامل التمدد الحجمي.

ماذا تعني الإشارة السالبة؟ وضح ذلك.

5-8 أوجد حسابياً أقل كمية من الحرارة –مقدرة بالجول– نحتاجها لكي نذيب كتلة من الفضة مقدارها (130 g)، درجة حرارتها الابتدائية (15 C°)، إذا علمت أن الحرارة النوعية للفضة تساوي:

(236 J/kg. K°)

5-9 سخان كهربائي صغير قدرته تساوي (200 W)، غُمِر في وعاء يحتوي على (100 g) من الماء وذلك لتحضير القهوة السريعة.

أوجد حسابياً الزمن اللازم لتسخين الكمية المذكورة من الماء وذلك من درجة حرارة ابتدائية مقدارها (23 C°) وصولاً إلى درجة حرارة الغليان، إذا كانت السعة الحرارية النوعية للماء تساوي: (4100 J/kg. K°).

5-10 سيارة مقدار كتلتها (1500 kg)، تسير بسرعة مقدارها (90 km/h)، تمَّ إيقافها باستخدام تسارع تباطئي بدون انزلاق خلال مسافة قدرها (80 m).

أوجد حسابياً معدل الطاقة الحرارية التي تمّ استهلاكها خلال عملية إيقاف السيارة.

5-11 جسم أسود مثالي black body مساحة سطحه ($50\ cm^2$)، ودرجة حرارته (1000 C°).

أوجد حسابياً الطاقة الإشعاعية المنبعثة منه خلال زمن قدره (30 s).

ملاحظة: ثابت ستيفان – بولتزمان يساوي $5.67\times10^{-8}\ W.m^{-2}\ K^{-4}$

مساعدة: استخدم العلاقة الرياضية (5-29).

الخلاصة

Summary

- **درجة الحرارة:** هي قياس لصفة فيزيائية من صفات الجسم بواسطة أحد مقاييس درجات الحرارة المعتمدة، ، نميِّز من خلالها ارتفاع أو انخفاض حرارته بالنسبة لحرارة الوسط المحيط، كما نميِّز انتقال الحرارة منه وإليه، وتقاس في النظام الدولي *(SI)* بوحدة الكلفن.

- **كمية الحرارة:** هي ما نصطلح على تسميته بالطاقة الحرارية، وهي مزيج من الطاقة الحركية والطاقة الكامنة المرتبطة بالحركة العشوائية التذبذبية لذرات أو جزيئات الجسم، وبتعبير آخر فإن الانتقال الحاصل للطاقة الداخلية خلال المادة بسبب الحركة العشوائية لمكونات الجسم هو التفسير المجهري للطاقة الحرارية أو "كمية الحرارة" وتقاس بوحدات الطاقة في النظام الدولي.

- **القانون الصفري في الديناميكا الحرارية:** إذا كان كلٍ من النظام *(A)* و*(B)* في حالة اتزان حراري مع نظام ثالث *(C)*، فإن النظام *(A)* يكون متزناً حرارياً مع النظام *(B)*. وهذا هو مضمون القانون الصفري في الديناميكا الحرارية.

- **مقاييس درجة الحرارة:** يعتبر مقياس كلفن هو المقياس المعتمد لدرجة الحرارة في النظام الدولي للقياس. إلا أن هناك مقياسان آخران شائعان هما سليزيوس وفهرنهايت، وهناك علاقة رياضية عامة يمكننا استخدامها للتحويل من مقياس إلى آخر وهي:

$$\frac{T_C - 0}{100} = \frac{T_F - 32}{180} = \frac{T_K - 273}{100}$$

- **التمدد الطولي للأجسام الصلبة:** يمكننا إيجاد التمدد الطولي للأجسام الصلبة باستخدام العلاقة الرياضية:

$$\Delta L = \alpha_L \, L \, \Delta T$$

حيث إن: *(ΔL)* تمثل التغير الحاصل في الطول، *(α_L)* معامل التمدد الطولي للجسم الصلب، *(L)* الطول الابتدائي له، *(ΔT)* الفرق الحاصل في درجات الحرارة.

- **التمدد السطحي للأجسام الصلبة:** وهو عبارة عن تمدد طولي في اتجاهين، ونعبِّر عنه رياضياً بالعلاقة:

$$\Delta A = \alpha_A \, A \, \Delta T$$

حيث تمثل (ΔA) التغير الحاصل في المساحة، (α_A) معامل التمدد السطحي، وهو ضعف معامل التمدد الطولي، (A) المساحة الابتدائية للجسم الصلب، (ΔT) الفرق الحاصل في درجات الحرارة.

- **التمدد الحجمي للجوامد والسوائل:** وهو عبارة عن تمدد طولي في ثلاث اتجاهات، ونعبّر عنه رياضياً بالعلاقة:

$$\Delta V = \alpha_V V \Delta T$$

حيث تمثل (ΔV) التغير الحاصل في الحجم، (α_V) معامل التمدد الحجمي، (V) الحجم الابتدائي للجسم الصلب أو السائل، (ΔT) الفرق في درجات الحرارة، ونلاحظ هنا أيضاً أن معامل التمدد الحجمي يساوي ثلاثة أضعاف معامل التمدد الطولي.

- **السعة الحرارية لجسم:** هي عبارة عن كمية الحرارة (Q) اللازمة لرفع درجة حرارة الجسم $(T_f - T_i)$، درجة واحدة على مقياس من سليزيوس، وتقاس بوحدة $(J/C°)$ أو (J/K)، ويعبّر عنها رياضياً بالعلاقة:

$$C = \frac{Q}{(T_f - T_i)}$$

- **السعة الحرارية النوعية:** هي عبارة عن كمية الحرارة (Q) اللازمة لرفع درجة حرارة وحدة الكتلة (m) بمقدار درجة واحدة على مقياس سليزيوس $(T_f - T_i)$، وتقاس بوحدة $(J/kg\ C°)$ أو $(J/kg\ K)$، ويعبّر عنها رياضياً بالعلاقة:

$$C = \frac{Q}{m(T_f - T_i)}$$

- **القانون الأول في الديناميكا الحرارية:** هو العلاقة الرياضية التي تربط بين الشغل المبذول على النظام الحراري أو من قبله (W)، وكمية الحرارة التي يفقدها أو يكتسبها (Q)، ومقدار تغير طاقته الداخلية (ΔE_{int})، عندما تتغير حالته من حالة ابتدائية معلومة إلى حالة أخرى نهائية معلومة. ويعبّر عنه رياضياً بالعلاقة:

$$\Delta E_{int} = Q - W$$

ونؤكد هنا على أنّ (Q) تكون مقداراً موجباً إذا اكتسب النظام كمية من الحرارة، كما تكون مقداراً سالباً إذا فقد النظام كمية من الحرارة. ويكون الشغل (W) موجباً إذا بذله النظام ذاته، وسالباً إذا بُذل عليه.

- **طرق انتقال الحرارة:** تنتقل الحرارة بثلاث طرق، وهي: التوصيل والحمل والإشعاع، ونعبّر عنها رياضياً بالقوانين الرياضية الآتية:

$$H_C = k_c \frac{(T_H - T_C)}{L}$$ (التوصيل)

$$H_{conv} = k_{conv} A(T - T_i)$$ (الحمل)

$$H_{rad} = \epsilon \sigma A T^4$$ (الإشعاع)

الكميات الفيزيائية التي تمّ تداولها في الفصل الخامس*

اسم الكمية		الرمز الشائع	وحدة القياس
درجة الحرارة	*Temperanure*	T	K
مقياس سلسيوس	*Celsius scale*	T_C	$°C$
مقياس فهرنهايت	*Fahrenheit scale*	T_F	$°F$
معامل التمدد الطولي	*linear expansion coefficient*	α_L	K^{-1}
معامل التمدد السطحي	*surface expansion coefficient*	$\alpha_A = 2\alpha_L$	K^{-1}
معامل التمدد الحجمي	*volume expansion coefficient*	$\alpha_V = 3\alpha_L$ $\beta = \alpha_V$	K^{-1}
الطاقة الحرارية	*thermal energy*	Q	J
السعة الحرارية	*heat capacity*	C	J / K
السعة الحرارية النوعية	*heat capacity per unit mass*	C	$J / kg . K$
عدد أفوكادرو	*Avogadro's number*	N_A	$6.02 \times 10^{23} / mol$
طاقة التحول	*heat of transformation*	L	J / kg
معدل انتقال الطاقة الحرارية بالتوصيل		H_C	W
ثابت انتقال الطاقة الحرارية بالتوصيل		k_C	$W / m . K$
المقاومة الحرارية للتوصيل		R_C	$(ft^2 . h . F / Btu)$
معدل انتقال الطاقة بالحمل		H_{conv}	W
ثابت انتقال الطاقة بالحمل		K_{conv}	$W / m^2 C°$
معدل انتقال الطاقة بالإشعاع		H_{rad}	W
ثابت انتقال الطاقة بالإشعاع		σ	$Wm^{-2} K^{-4}$

* تسهيلاً على أبنائنا الطلبة وضعنا قائمة بالكميات الفيزيائية، التي تمّ تداولها في هذه الوحدة، مع وحدات قياسها.