الباب الرابع

الحرارة وقياسها

Heat and its measurement

4.1 مصادر الطاقة الحرارية The Heat Resources

للطاقة الحرارية مصادر منها:

1- التفاعلات الكيميائية Chemical Reactions

تعتبر التفاعلات الكيميائية من أهم المصادر التقليدية للطاقة، فعندما تتحِد مادتان كيميائياً ينتج عن ذلك امتصاص أو إطلاق للطاقة الحرارية، فالحرارة الناشئة عن حرق الوقود الكيميائي تنتج عن تفاعل كيميائي بين الوقود وأكسجين الهواء.

2- الطاقة الميكانيكية Mechanical Energy

للطاقة الحرارية مصدر آخر ينشأ عن تحويل أنواع مختلفة من الطاقة إلى حرارة، فمثلاً عند تصادم الأجسام أو احتكاكها الخارجي أو الداخلي تنشأ الحرارة.

3– الطاقة الكهربائية Electrical Energy

ويظهر ذلك عند مرور تيار كهربائي في سلك مقاوم نلاحظ سخونته مما يدل على تحوّل الطاقة الكهربائية إلى طاقة حرارية.

4– الطاقة النووية Nuclear Energy

وهي طاقة غير تقليدية، تؤدي التفاعلات النووية فيها إلى إنتاج طاقة حرارية هائلة نتيجة تحويل جزء صغير من المادة إلى طاقة ويتم ذلك عند اتحاد أو انشطار نوى المواد المتفاعلة. وتُحسب الطاقة الناتجة بالعلاقة:

$$E = mc^2$$

حيث m هي الكتلة المحولة إلى طاقة و c هي سرعة الضوء.

5– الطاقة الشمسية Solar Energy

وهي نوع من الطاقة النووية إذ أنه معروف أن الحرارة المنبعثة من الشمس ناتجة عن تفاعل نووي تحررت بسببه كمية كبيرة من الطاقة ترفع درجة حرارة الشمس لتكون مصدراً مشعّاً للحرارة.

4.2 درجة الحـرارة وقياسـها

Temperature and Its Measurement

تُحدد درجة الحرارة لجسم المستوى الحراري له وتختلف تماماً عن كمية الحرارة المخزونة به. فدرجة الحرارة دالة على وجود الطاقة فتزداد بزيادتها وتنقص تبعاً لها ويصاحب عادةً التغيُّر في درجة حرارة جسم تغيُّر في خواصه الفيزيائية مثل التغيّر في حجمه أو مقاومته الكهربائية أو التغيّر في الضغط خاصة للغازات وهكذا.

وتسمى أجهزة قياس درجة الحرارة بالترمومترات Thermometers .

ومقاييس درجة الحرارة نوعان: نسبي Relative ومطلق Absolute .

1– المقيـاس النسبي The Relative Scale:

ومـن أمثلـة **المقيـاس النـسبي** المقـياس المئـوي Centigrade أو مـا يـسمى Celsius Scale نـسبة لواضعــه (1701-1744) Anders Celsius والمقيـاس الفهرنهايتي Fahrenheit Scale نسبة لواضعه -1686) Gabriel Fahrenheit (1736 ويعتمدان على الماء. حيث تؤخذ نقطتا التجمد والغليان كدرجتين قياسيتين. ففـي الأول قـسم التـدرّج بـين القيمـة ($0.0^{\circ}C$) وعنـدها ينـصهر الجليـد والقيمـة $100.0^{o}\,C$ إلى مائة قسم وأطلق على كـل منهـا درجـة مئويـة أو (واحـد سـلزيوس) ونرمز لها بالرمز T_C وفي الثاني أعطيت نقطة انصهار الجليد القيمة $32.0^{o}F$ ونقطة

الغليان أعطيت القيمة 212.0^oF أي أن التدريج قد قسِّم إلى 180 قسماً سمِّي كل منها درجة فهرنهايت ونعطيها الرمز T_F .

2- المقياس المطلق Absolute Scale

وهذا النوع لا يعتمد على أي مادة قياسية وإنما يحدد مستواه الحراري مقدار الطاقة المخزونة في الجسم وتعتبر درجة الصفر المطلق هي الدرجة التي تنتهي عندها كمية الطاقة المخزونة في الجسم المراد قياس درجة حرارته ودرجة الصفر المطلق تقابل -273.15^oC على المقياس المئوي وهذا المقياس يسمى Kelvin نسبة لواضعه Lord Kelvin (1824-1907) ونرمز له بالرمز T. ويوجد مقياس آخر يدعى رانكين Rankine نسبة إلى واضعه William Rankine (1820-1872) ونرمز له بالرمز T_R ويُكتب (^oR).

ويربط بين المقاييس الأربعة العلاقات الآتية:

أولاً- العلاقة بين المقياسين المئوي والمطلق

$$T_c = (T - 273.15K)\ C^0/K \tag{4.1}$$

وحيث إن درجة الغليان هي $373.15\ K$ فإن:

$$T_{100} = 373.15 - 273.15 = 100.0^o\ C$$

ثانياً- العلاقة بين مقياسي الكيلفين والرانكين هي:

$$T_R = \frac{9}{5}T \tag{4.2}$$

ثالثاً- العلاقة بين مقياس الرانكين ومقياس الفهرنهايت هي:

$$T_F = T_R - 459.67^0R \tag{4.3}$$

رابعاً- العلاقة بين المقياس المئوي والمقياس الفهرنهايتي:

بالتعويض من المعادلتين (4.1) و (4.2) في المعادلة (4.3) والتي منها تظهر العلاقة بين المقياسين النسبيين بالصيغة:

$$T_F = \frac{9}{5}T_C + 32^0 F \qquad (4.4)$$

أو

$$T_C = \frac{5}{9}(T_F - 32)^0 C \qquad (4.5)$$

ومنها يتضح ما ذكرنا سابقاً من أن $0.0^o\ C$ يقابل 32.0^oF و 100^oC تقابل 212^oF . والجدول (4.1) يوضح القيم المتناظرة على المقاييس الأربعة.

جدول (4.1) قيم مختلفة لدرجات الحرارة على المقاييس الأربعة

F	R	C	K
212°	672°	100°	373
32°	492°	0°	273
-109°	351°	-78°	195
-298°	162°	-183°	90
-460°	0°	-273°	0

مثال 4.1

مريض درجة حرارته 39.0^0C ، احسب درجة حرارته باستخدام المقاييس الثلاثة الأخرى.

الحل:

1- لحساب درجة حرارته بالفهرنهايت نستخدم المعادلة (4.4)

$$T_F = \left[\frac{9}{5}\times 39.0 + 32.0\right]^0 F = 102.20^0 F$$

2- ولحساب درجة حرارته بالكيلفن نستخدم المعادلة (4.1)

$$T = 39 + 273.15 = 312.15K$$

3- ولحساب درجة حرارته بالرانكين نستخدم المعادلة (4.2)

$$T_R = \frac{9}{5}T = 561.87^0\ R$$

مثال 4.2

أ– عيِّن درجة الحرارة المئوية التي تكون قيمتها على المقياس المئوي نصف قيمتها على المقياس الفهرنهايتي.

الحل :

يوضع $T_C = \dfrac{T_F}{2}$ في المعادلة (4.4)

$$T_F = \frac{9}{5}\left(\frac{T_F}{2}\right) + 32F^{\circ}$$

وبترتيب الحدود نجد أن:

$$T_F = 320.0^0\ F$$

و

$$T_C = \frac{320.0^{\circ}C}{2} = 160^0\ C$$

ب- عيِّن درجة الحرارة المئوية والفهرنهايتية التي يتساوى عندها المقياسان عددياً.

بوضع $T_F = T_C$ في المعادلة (4.4)

$$T_F = \frac{9}{5} T_F + 32.0$$

وبالضرب في المقام وإعادة الترتيب بضم المعادلة بالصيغة:

$$9T_F - 5T_F = -160.0$$

$$4T_F = -160.0$$

إذن:

$$T_F = T_C = -40.0^{\circ}$$

4.3 أنواع الترمومترات kinds of Thermometers [1]

يقتصر استخدام خاصية التمدد في الأجسام الصلبة لقياس درجة الحرارة فقط، عندما تكون فروق الدرجات كبيرة وذلك لصغر معاملات تمددها، وعلى العكس من ذلك نجد أن التمدد في الغازات كبير جداً، فهي أفضل من ناحية حساسيتها للتغير في الدرجة، ولكن تكمن صعوبة استخدامها في كبر حجم مستودع الترمومتر الغازي، مما جعلها عديمة الفائدة لقياس الدرجة في أي حيز صغير. ويستخدم عادة الزئبق كمادة ترمومترية لما يتميز به من صفات، إذ يغلي في درجة $356.7^{0}\,C$ ويتجمد عند درجة $-38.9^{0}\,C$، وذلك يسمح بمدى متسع نسبيا من درجات الحرارة التي يمكن له قياسها، كما أنه سائل معتم تسهل رؤيته في الأنابيب الزجاجية، ومعامل تمدده الحجمي (0.00018 لكل درجة حرارة) كبير مما يسهل قياس التغير في

(1) منقولة من أساسيات الفيزياء، واصف.

حجمه برفع درجة الحرارة. ويتركب الترمومتر الزئبقي المعتاد من مستودع زجاجي رقيق الجدران ، مملوء زئبقاً ويتصل بأنبوبة شعرية دقيقة المقطع ومقفلة من طرفها العلوي . عندما ترتفع درجة حرارة الترمومتر يتمدد الزئبق في المستودع فيرتفع شريط منه في الأنبوبة الشعرية ، ولمعايرة الترمومتر يوضع المستودع في جليد مجروش في درجة الصفر المئوي ثم في ماء يغلي ، ويحدد ارتفاع شريط الزئبق في الأنبوبة الشعرية في كل من الحالتين، ثم تقسم المسافة بينهما إلى مائة قسم يعادل كل منها درجة مئوية. ويوجد أنواع من الترمومترات الزئبقية كترمومتر بكمان الشديد الحساسية إذ يستطيع قياس التغير في درجة الحرارة بمقدار يصل إلى 0.01 من الدرجة وهناك أيضا الترمومتر الطبي المستخدم لتسجيل درجة حرارة الإنسان .

4.3.1 ترمومتر المقاومة البلاتيني

Platinum Resistance Thermometer

تتغير مقاومة الموصل المعدني مع درجة حرارته وفقاً للمعادلة التالية :

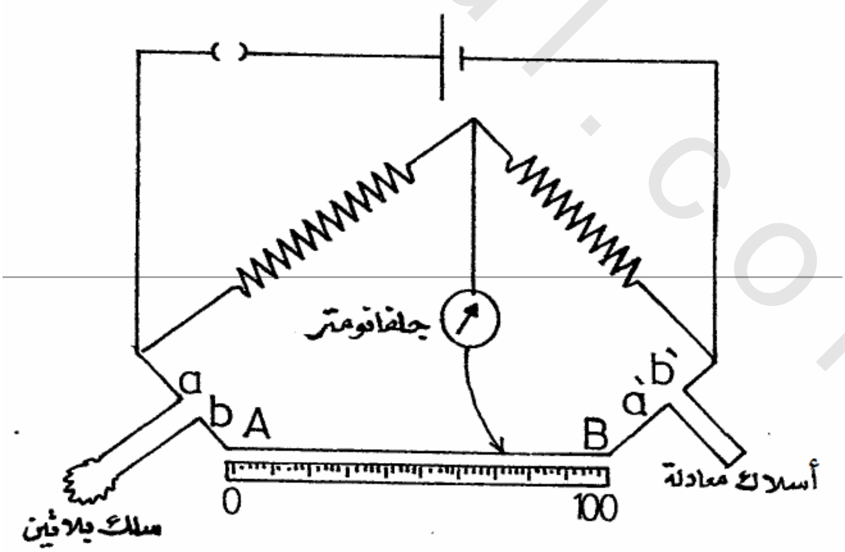
$$R_T = R_0\left(1+\alpha T\right) \tag{4.6}$$

حيث R_0 , R_T هما مقاومتا الموصل عند الدرجتين 0 , T على الترتيب ، α هو معامل زيادة المقاومة مع درجة الحرارة . وتستخدم هذه الظاهرة في ترمومتر المقاومة البلاتيني لقياس درجة الحرارة.

يتركب الترمومتر من سلك من البلاتين يلتف حول شريحة رقيقة من الميكا العازلة وتتصل نهايتا السلك بجهاز حساس لقياس المقاومة يتركب عادة من قنطرة هويتستون شكل (4.1) يوضع السلك البلاتيني كأحد أذرعها ، ثم يوجد وضع الاتزان وعدم الانحراف في الجلفانوميتر، ومنه يمكن حساب قيمة مقاومة السلك بدلالة مقاومة باقي أذرع القنطرة.

لمعادلة التغير في مقاومة أسلاك التوصيل ab للترمومتر البلاتيني – نتيجة لوجودها داخل الوسط الساخن – يوضع في ذراع القنطرة المقابل للترمومتر أسلاك معادلة b ، a تمثل أسلاك التوصيل البلاتيني ، وتوضع في نفس الوسط الساخن شكل (4.1) حتي تتغير مقاومتها بنفس القدر كأسلاك توصيل سلك الترمومتر ، وبذلك يكون التغير في المقاومة الذي تسجله قنطرة هويتستون ناشئاً فقط عن تغير مقاومة سلك البلاتين وحدة مع درجة الحرارة .

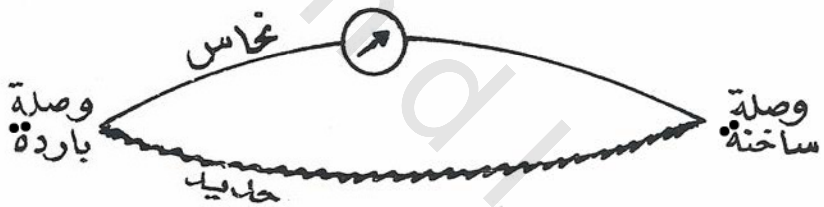
ويعاير الجهاز ليعطي درجات الحرارة المقاسة مباشرة دون الاحتياج لحساب مقاومة الترمومتر في كل حالة . وذلك باستخدام سلك مقاومة AB كالموجود بالقنطرة المترية حيث يعين عليه مواضع الاتزان في درجات معلومة (كنقطتي انصهار الجليد وغليان الماء) فإذا قسمت المسافة بينهما إلى عدد مائة قسم يناظر كل قسم منها درجة واحدة مئوية . وبذلك يمكن قراءة درجة حرارة وسط بمجرد إيجاد موضع الاتزان على السلك AB الذي يمثل حينئذ ساق الترمومتر .



شكل(4.1) ترمومتر المقاومة البلاتيني

4.3.2 ترمومتر الازدواج الحراري The Thermo Couple

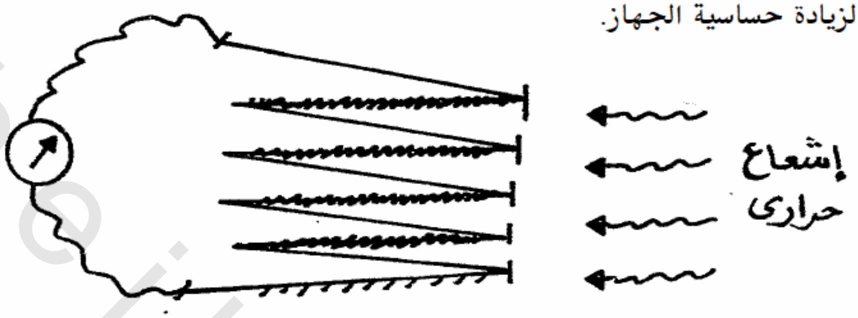
وجد سيبك أنه حينما يوصل فلزان مختلفان – كالنحاس والحديد مثلا – ليكونان ازدواجا حراريا كالمبين بشكل (4.2) تتولد قوة دافعة كهربية عندما ترتفع درجة حرارة إحدى الوصلتين بالنسبة للأخرى.وتتوقف شدة التيار الناشئ – كما يسجله الجلفانومتر الموجود بالدائرة – على فرق درجات الحرارة بين الوصلتين وتعرف هذه الظاهرة بالخاصة الكهروحرارية. ويمكن هنا أيضا معايرة مقياس الجلفانومتر ليعطي درجات الحرارة مباشرة ، وذلك بوضع الوصلة الساخنة في ما ء يغلي درجة حرارته $100^{o}C$، وبتقسيم مقدار الانحراف إلى مائة قسم يعبر كل منها عن درجة حرارة مئوية .



شكل (4.2) ترمومتر الازدواج الحراري

ونظراً لشدة حساسية هذا الترمومتر يستخدم عادة لقياس التغيرات الصغيرة في درجات الحرارة كما أن لصغر سعته الحرارية (وهي هنا السعة الحرارية للوصلة الكهربائية) لا يؤثر وضع الترمومتر في الوسط المختبر على درجة حرارته، خاصة إذا كان هذا الوسط له سعة حرارية صغيرة.

ويستخدم أيضا ترمومتر الازدواج الحراري في قياس الإشعاع الحراري بجهاز يسمى الترموبيل، ويتركب من مجموعة كبيرة من الازدواجات تتصل على التوالي لزيادة حساسية الجهاز.



شكل(4.3) جهاز الترموبيل

عندما تتعرض الوصلة الأمامية للإشعاع الحراري ترتفع درجة حرارتها بالنسبة لدرجة حرارة الوصلات الخلفية . إذ أنها محفوظة داخل الجهاز بعيدا عن الإشعاع ، ويسبب الفرق في درجتي الحرارة بين الوصلات الأمامية والخلفية تياراً كهربائياً ، ينتج عنه انحراف الجلفانومتر بمقدار يتناسب مع شدة الإشعاع الساقط ويستخدم الترموبيل عادة كأداة تسجيل لطيف الأشعة تحت الحمراء.

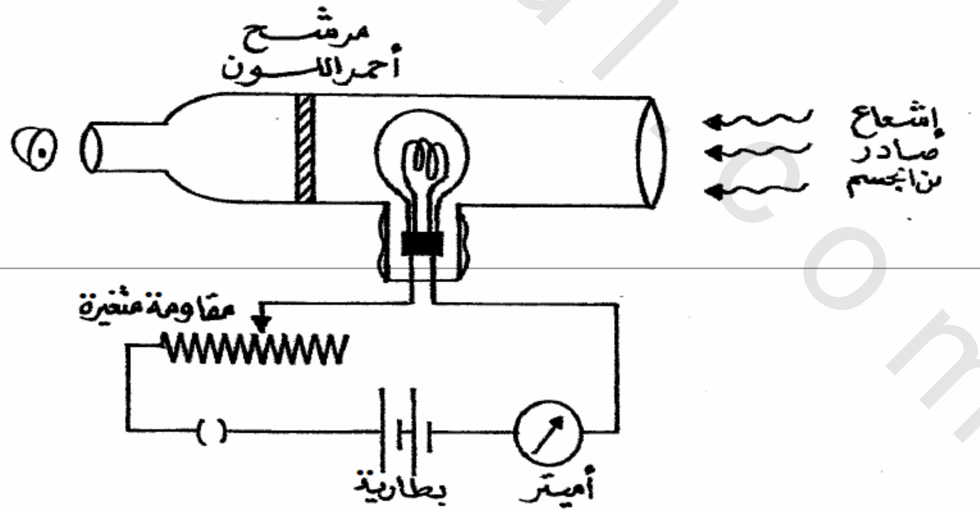
4.3.3 البيرومتر الضوئي Optical Pyrometer

عندما يسخن جسم لدرجة حرارة مرتفعة يصل لدرجة معينة يبدأ فيها لونه بالاحمرار ، ثم بزيادة الدرجة يصل الجسم إلى درجة التوهج ، مما يدل على أن درجة الحرارة تتحكم في طول الموجة الضوئية المشعة من الجسم ، فتقل أطوال هذه الموجات كلما ارتفعت درجة الحرارة .

وتستخدم هذه الخاصية في قياس درجات الحرارة الشديدة الارتفاع ، كما في مواقد المصانع والأفران الآلية. ويطلق على الجهاز المستخدم لذلك بالبيرومتر الضوئي او بيرومتر الفتيل المختفي .

يتركب البيرومتر الضوئي كما في الشكل (4.4) من تلسكوب يوجد بداخل قصبته مرشح ضوئي أحمر اللون ، ومصباح كهربائي صغير يتصل بدائرة كهربائية مكونة من بطارية و أميتر ومقاومة متغيرة . عند النظر في الجسم الساخن من خلال تلسكوب يظهر مجال الرؤية مضيئاً باللون الأحمر ، وذلك بالنسبة لوجود مرشح أحمر اللون في طريق الأشعة الصادرة من الجسم .

أما إذا أمررنا تياراً كهربياً في فتيل المصباح ، ورفعنا شدته تدريجيا باستخدام المقاومة المتغيرة ، يبدأ الفتيل في التوهج ثم نصل إلى حد يتعذر فيه تماماً رؤية الفتيل، وذلك عندما تكون حرارة الفتيل هي نفس درجة حرارة الجسم الساخن ، وإذا زيدت شدة التيار عن ذلك يبدأ ظهور الفتيل كخط مضيء وليس كخط مظلم كما كان من قبل . ولمعايرة بيرومتر الفتيل المختفي لكي يعطي درجات حرارة مباشرة ، نستخدم درجات حرارة عيارية لأجسام ساخنة ويدرج مقياس الأميتر بدائرة المصباح ، حتى يعطي درجة الحرارة مباشرة.



شكل(4.4) البيرومتر الضوئي

مثال 4.3

ترمومتر مقاومة بلاتيني مقاومته عند درجة الصفر المئوي $6.5\ \Omega$ ، بينما مقاومته عند درجة حرارة $100^0\ C$ هي $8\ \Omega$ ، فإذا كانت درجة الحرارة في وسط ما $40^0\ C$. فكم مقدار مقاومته في هذا الوسط ؟

الحل :

من المعادلة (4.6) يتم حساب معامل التمدد الحراري α

$$R_{100} = R_0(1 + \alpha \times 100)$$
$$8 = 6.5(1 + \alpha \times 100)$$
$$\alpha = 2.31 \times 10^{-3}\ C^{-1}$$
$$R_t = 6.5 \times (1 + 2.31 \times 10^{-3} \times 40) \therefore R_t = 7.1\Omega$$

4.4 التمدد الحراري Thermal Expansion

رأينا مما سبق أن درجة الحرارة للمادة دليل على الطاقة الداخلية لجزيئاتها . وبزيادة درجة الحرارة للسائل أو الجامد تزداد طاقة جزيئاته وبالتالي تزداد سعة الهزة لها. وهذا يؤدي إلى زيادة متوسط المسافة بين الجزيء وكافة الجزيئات المجاورة له . أي أن السائل أو الجامد يتمدد عند رفع درجة حرارته ، مع بعض الاستثناءات إذ مثلاً ينكمش الماء عند تسخينه من $0.0^{\circ}C$ إلى $4.0^{\circ}C$. أي أن أبعاد معظم المواد خاصة الصلبة تزداد عند رفع درجة حرارتها. ولأهمية هذه الظاهرة ولتسهيل دراستها فإنا نصنفها إلى ثلاثة أنواع. وهي التمدد الطولي والتمدد المساحي والتمدد الحجمي، أي أنا نصنف تمدد المواد اعتماداً على شكلها إلى :

4.4.1 التمدد الحراري الطولي The Linear Thermal Expansion

لنفرض أن قضيباً طوله L_0 عند درجة حرارة T_0 سخِّن ليصبح طوله L عند درجة الحرارة T وعليه يكون مقدار الزيادة في طوله هي $\Delta L = L - L_0$ وقد وجد تقريباً أن الزيادة في الطول تتناسب طرداً مع الطول الأصلي L_0 وتتناسب تقريباً مع الزيادة في درجة الحرارة أي أن:

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T \tag{4.7}$$

وثابت التناسب α يسمى عامل التمدد الطولي Coefficient of Linear Expansion وتختلف قيمتها باختلاف المواد ويمكن إعادة كتابة المعادلة (4.7) بالصيغة:

$$\alpha = \frac{1}{L_0}\frac{dL}{dT} \tag{4.8}$$

وذلك لتغيُّر بسيط في درجة الحرارة ويمكن كذلك إعادة كتابة المعادل (4.7) باستخدام $L\text{-}L_0$ مكان ΔL للحصول على طول القضيب بعد التسخين.

$$L = L_0(1 + \alpha \Delta T) \tag{4.9}$$

ولما كانت L_0 و L و ΔL كلها مقاسة بالوحدة نفسها فإن وحدة α هي "مقلوب الدرجة" (إما درجة سلزيوس أو درجة فهرنهيت) فعامل التمدد الحراري للنحاس مثلاً يُكتب بالشكل $\alpha = 1.4\times10^{-5}\,(C^0)^{-1}$. أي أن قضيباً من النحاس طوله $1.0cm$ في درجة حرارة $0.0°C$ يزداد طوله بمقدار $1.4\times10^{-5}\ cm$ إذا سخن إلى درجة حرارة $1.0°C$. ويعطي الجدول (4.2) قيم عامل التمدد الطولي لبعض المواد.

جدول (4.2) عوامل التمدد الطولي لبعض المواد

المادة	$\alpha\left(C^{0}\right)^{-1}$
الألمنيوم	2.4×10^{-5}
النحاس الأصفر	2.0×10^{-5}
النحاس الأحمر	1.4×10^{-5}
الزجاج	$(4-9)\times10^{-5}$
الفولاذ	1.2×10^{-5}
الكوارتز المصهور	0.04×10^{-5}

مثال 4.4

قضيب من الحديد طوله $200.0m$ عند درجة الصفر المئوي. احسب الزيادة في طوله إذا سُخّن إلى درجة $100.0°C$. علماً بأن عامل التمدد الطولي للحديد يساوي $1.5\times10^{-5}\left(C^{0}\right)^{-1}$.

الحل:

من المعادلة (4.7) نحسب الزيادة في الطول:

$$\Delta L = (200.0m)\left(1.0\times10^{-5}\left(C^{0}\right)^{-1}\right)\left(100.0^{0}C\right)$$

$$= 0.2m$$

مثال 4.5

أسطوانة من النحاس كان قطر قاعدتها $10.0\ cm$ عند تسخينها إلى $150.0^{0}C$.

عين درجة الحرارة التي يجب أن تصلها الأسطوانة من أجل إنقاص قطر القاعدة إلى $9.95\ cm$.

الحل:

من العادلة (4.7) لدينا

$$\Delta T = \frac{\Delta L}{\alpha L}$$

وبالتعويض فإن:

$$\Delta T = \frac{(9.95 - 10.0)cm}{(2.0\times10^{-5} / C^{\circ})\times(10.0cm)} = -250^{0}C$$

لكن

$$T = T_0 + \Delta T$$

إذن

$$T = (\ 150.0 - 250.0)^{0}C = -100.0^{0}\ C$$

مثال 4.6

عند التخطيط لبناء الجسور يراعى التمدد لمادة الجسر مما يُلزم بتحرك قواطع عرضية تمنع الانحناء عند التمدد.

عين طول هذه القواطع عند بناء جسر طوله $0.5km$ وتتغير درجة الحرارة بين $-20.0^{0}C$ و $45.0C^{\circ}$ علماً أن مادته من الفولاذ.

الحل:

$$\Delta l = \alpha\ L\ \Delta T = \left(1.2\times10^{-5}\left(C^{0}\right)^{-1}\right)(500.0m)\left(45.0^{0}C - \left(-20.0^{0}\right)C\right)$$

$$= 0.39m == 39.0cm$$

أي أن أقصى زيادة في طول الجسر هي $0.39m$ ويراعى في القواطع ألا تقل عن هذا الطول .

4.4.2 التمدد السطحي والتمدد الحجمي

Surface and Volume Expansions

عند تسخين مادة صلبة ذات بعدين مثل الألواح المعدنية فإن التمدد يحصل لبُعدَيه ويحصل زيادة في مساحة سطحه. فإذا أخذنا لوحاً قبل التسخين طوله a_0 وعرضه b_0 وذلك في درجة حرارة T_0 فإذا سخنَّاه إلى درجة حرارة T أصبح بُعداه a و b ويُكتبا بدلالة التغيُّر في درجة الحرارة على الصور:

$$a = a_0(1+\alpha\,\Delta T)$$

$$b = b_0(1+\alpha\,\Delta T)$$

فإذا كانت المساحة الأصلية للوح هي:

$$A_0 = a_0\, b_0$$

فإنها تصبح بعد التسخين على الصورة:

$$A = ab = a_0 b_0\,(1+\alpha\,\Delta T)^2$$

$$= A_0\left[1+2\alpha\,\Delta T+(\alpha\,\Delta T)^2\right]$$

وحيث إن α^2 صغيرة جداً فإنه يمكن إهمال الحد الثالث دون تغيُّر يُذكر في المساحة الجديدة لتصبح:

$$A = A_0(1+2\alpha\,\Delta T) \qquad (4.10)$$

وقياساً على المعادلة (4.7) فإن الزيادة في مساحة السطح يمكن كتابتها على الصورة:

$$\Delta A = \gamma A_0\,\Delta T \qquad (4.11)$$

حيث γ هو ثابت التناسب ويسمى عامل التمدد المساحي ويمكن إعادة كتابة المعادلة بالصيغة :

$$A = A_0(1+\gamma\,\Delta T) \tag{4.12}$$

وبمقارنة المعادلتين (4.10) و (4.12) يتضح أن :

$$\gamma = 2\,\alpha \tag{4.13}$$

أي أن عامل التمدد السطحي يساوي ضعف عامل التمدد الخطي. وبالرغم من أن البرهان تمَّ على لوح مستطيل فإن النتيجة صحيحة مع الأشكال الأخرى .

وللحصول على عامل التمدد الحجمي نتبع الخطوات في حال التمدد السطحي مع أخذ الأبعاد c_0 و b_0 و a_0 للجسم وعليه يكون :

$$V = V_0(1+\alpha\Delta T)^3$$

$$= V_0\left[1+3\alpha\Delta T+3\alpha^2(\Delta T)^2+\alpha^3(\Delta T)^3\right]$$

وإذا كان ΔT صغيراً وكذلك نعلم أن α^2 و α^3 صغيرة جداً فإنه يمكن إهمال الحدين الثالث والرابع لنجد أن :

$$V \cong V_0(1+3\alpha\Delta T)$$

أو

$$V_0+\Delta V = V_0(1+3\alpha\Delta T)$$

فإذا عرفنا عامل التمدد الحجمي β بالعلاقة

$$V = V_0(1+\beta\Delta T)$$

أي أن

$$\Delta V = V_0\beta\,\Delta T$$

وبالمقارنة نجد أن:

$$\beta = 3\alpha \qquad (4.14)$$

أي أن عامل التمدد الحجمي يساوي التمدد الطولي مضروباً في ثلاثة.

مثال 4.7

صفيحة من الألمنيوم أبعادها $2.0cm$ و $4.0cm$ عند درجة $15.0^0\,C$ ، احسب الزيادة في مساحة وجه الصفيحة عند رفع درجة الحرارة إلى $100.0^0\,C$.

الحل:

بما أن مساحة الصفيحة عند درجة $15.0^0\,C$ هي:

$$A_0 = a_0 b_0 = 8.0\ cm^2$$

وبما أن

$$a = 2.0\ cm \times \left(1.0 + 2.4\times10^{-5}\left(C^0\right)^{-1}\times 85.0C^0\right)$$

$$= 2.0041\ cm$$

و

$$b = 4.0\ cm \times \left(1.0 + 2.4\times10^{-5}\left(C^0\right)^{-1}\times 85.0C^0\right)$$

$$= 4.0082\ cm$$

فإن مساحة الصفيحة عند درجة $100.0^0\,C$ هي:

$$A = ab = 8.033\ cm^2$$

إذن الزيادة في مساحة الصفيحة عند رفع درجة الحرارة إلى $100.0^0\,C$ هي

$$A\text{-}A_0 = 0.033\ cm^2$$

مثال 4.8

وعاء زجاجي حجمه $500.0\ cm^3$ مليء بالزئبق عند درجة حرارة $30.0°C$ رُفعت درجة الحرارة إلى $80.0°C$ فتمدد الزئبق والوعاء لينسكب جزء من الزئبق. كم حجم الجزء المنسكب من الزئبق؟

الحل:

نحسب الزيادة الحقيقية في حجم كل من الوعاء والزئبق والتي يمثل الفرق بينهما الزيادة الظاهرة في حجم الزئبق وهي الكمية المنسكبة.

نعلم أن عاملي التمدد الحجمي للزجاج والزئبق هما:

$$\beta_g = 5.0\times10^{-5}\left(C^0\right)^{-1} \text{ و } \beta_{Hg} = 18.0\times10^{-5}\left(C^0\right)^{-1}$$

الزيادة في حجم الزجاج

$$\Delta V_g = \left(5.0\times10^{-5}\left(C^0\right)^{-1}\right)\left(500.0\ cm^3\right)\left(80.0^0C - 30.0^0C\right)$$
$$= 1.25\ cm^3$$

الزيادة في حجم الزئبق

$$\Delta V_{Hg} = \left(18.0\times10^{-5}\left(C^0\right)^{-1}\right)\left(500.0\ cm^3\right)\left(80.0^0C - 30.0^0C\right)$$
$$= 4.5\ cm^3$$

إذن

$$\Delta V = \Delta V_{Hg} - \Delta V_g = 3.25\ cm^3$$

ويمثل حجم الزئبق المنسكب نتيجة رفع درجة الحرارة.

مثال 4.9

سلك من الفولاذ مساحة مقطعه $10.0cm^2$. ما أقل قوة تمنعه من الانكماش

عند خفض درجة حرارته من $520.0°C$ إلى $20.0°C$.

الحل:

معادلة التمدد (في هذه الحالة ينكمش السلك) هي :

$$\Delta L = L_0 \alpha \Delta T \Rightarrow \frac{\Delta L}{L_0} = \alpha \Delta T$$

أما القوة اللازمة لمنع انكماش سلك طوله ΔL وذلك حسب معادلة المرونة فهي :

$$F = (\frac{\Delta L}{L_0})(YA) = (\alpha \Delta T)(AY)$$

وحيث إن :

$$A = 10.0\ cm^2 = 10.0\times10^{-4} m^2 \quad , \ Y = 2.0\times10^{11} Pa$$

$$\alpha = 1.2\times10^{-5} (C^0)^{-1} \ , \quad \Delta T = 20.0^0 C - 520.0^0 C = -500.0^0 C$$

فإن :

$$F = AY\alpha\Delta T = (10.0\times10^{-4} cm^2)(2.0\times10^{11} Pa)(1.2\times10^{-5}(C^0)^{-1})(-500.0^0 C)$$

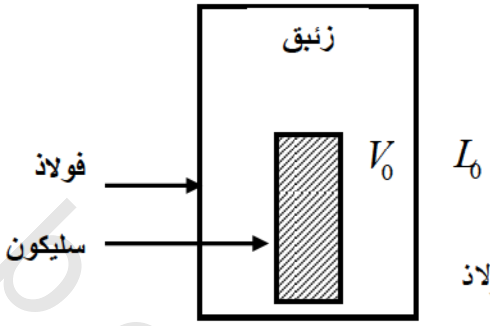
$$= -1.2\times10^6 N$$ (أي أن اتجاه القوة نحو الأطراف)

ويبين الجدول (4.3) عوامل التمدد الحجمي لمجموعة من المواد السائلة والصلبة.

مثال 4.10 :

أنبوب من الفولاذ يحوي زئبقاً حجمه عند درجة الصفر $10^{-5}\ m^3$. نرغب أن يظل ارتفاع الزئبق ثابت مع رفع درجة الحرارة وهذا يحصل عادة بإضافة عمود من مادة السليكون الذي لا يتمدد مع زيادة درجة الحرارة. احسب حجم عمود السليكون الذي يحفظ ارتفاع الزئبق ثابتاً.

الحل:



نفرض أن حجم عمود السليكون عند الصفر المئوي هو V_0 ، وأن حجم الزئبق هو V ، كما أن ارتفاع أنبوب الفولاذ ومساحة مقطعه على التوالي هما L_0 و A_0 .

وحيث إن الأنبوب ملئ بالزئبق والسليكون عند الصفر فإن:

$$L_0 A_0 = V + V_0 \qquad (1)$$

وبزيادة درجة الحرارة فإن حجم الزئبق ومساحة قاعدة الأنبوب ستتغير وفقا لمعادلات التمدد والقيم الجديدة هي:

$$A = A_0(1+2\alpha T) \quad \text{و} \quad V' = V(1+\beta T)$$

وحيث إننا فرضنا أن الارتفاع و حجم السليكون ثابتان فإن:

$$L_o A = V' + V_0 \quad \text{أو} \quad L_0 A_0(1+2\alpha T) = V(1+\beta T) + V_0 \qquad (2)$$

وبالتعويض من (1) في (2) فإن:

$$(V+V_0)(1+2\alpha T) = V(1+\beta T) + V_0$$

وبإعادة ترتيب المعادلة فإنها تصبح:

$$2\alpha T V_0 = V(\beta T - 2\alpha T)$$

ومنها نحسب الحجم قبل التسخين:

$$V_0 = \frac{V(\beta - 2\alpha)T}{2\alpha T} = \frac{V(\beta - 2\alpha)}{2\alpha} = \frac{10^{-5} m^3 (1.8\times10^{-4} - 3.6\times10^{-5}) C^{-1}}{3.6\times10^{-5} C^{-1}} = 4\times10^{-5} m^3$$

جدول (4.3) عوامل التمدد الحجمي لبعض المواد

$\beta\left(C^{0}\right)^{-1}$.	سوائل	$\beta\left(C^{0}\right)^{-1}$	مود صلبة
0.75×10^{-5}	الكحول الإيثيلي	7.2×10^{-5}	الألمنيوم
115.0×10^{-5}	ثاني كبريت الفحم	6.0×10^{-5}	النحاس الأصفر
49.0×10^{-5}	جليسرين	5.1×10^{-5}	النحاس
18.0×10^{-5}	الزئبق	$1.2\text{-}2.7\times 10^{-5}$	الزجاج
20.0×10^{-5}	الماء عند 20.0°C	3.6×10^{-5}	الفولاذ
60.0×10^{-5}	الماء عند 50.0°C	0.27×10^{-5}	إنفار
90.0×10^{-5}	البترول	$.012\times 10^{-5}$	كوارتز

4.5 كمية الحرارة Quantity of Heat

نعلم أن كمية الحرارة هي طاقة تختزنها أو تفقدها الأجسام ولها نفس وحدة القياس التي تُقاس بها الطاقة الميكانيكية من حركة ووضع وخلافه. وتُعرَّف وحدة قياس الطاقة الحرارية بأنها كمية الحرارة اللازمة لإحداث تغيير عياري متفق عليه.

وهناك وحدتان شائعتا الاستعمال لقياس كمية الحرارة .

الوحدة الأُولى: السعر أو الحريرة **Calorie** وهي كمية الحرارة اللازمة **لرفع درجة حرارة واحد جرام من الماء درجة مئوية واحدة.** إلا أن هذا التعريف غير دقيق إذ وجِد أن الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة واحد جرام من الماء من $90.0°C$ مثلاً إلى $91.0°C$ أكبر من كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة واحد جرام من الماء من درجة $30.0°C$ إلى درجة $31.0°C$ وأصبح المعروف الآن هو

"سعر الـ $15°C$" والذي تعريفه: هو كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة واحد جرام من الماء من درجة $14.5°C$ إلى $15.5°C$.

الوحدة الثانية: وهي ما يقابل السعر في الوحدات البريطانية وتسمى وحدة الحرارة البريطانية British Thermal Unit (Btu) وهي كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة واحد رطل من الماء من درجة $63.0°F$ إلى درجة $64.0°F$.

أما الكيلو سعر Kcal فإنه يُستخدم عادةً لقياس طاقة المواد الغذائية.

وحيث إن الرطل يساوي $454.0g$ والدرجة المئوية الواحدة تعادل $\frac{5}{9}$ الدرجة الفهرنهايتية فإنه يمكن إيجاد العلاقة بين الوحدتين

$$1Btu = 454.0\times\frac{5}{9} = 252.2\ cal = 0.2522\ Kcal$$

المعادل الميكانيكي للحرارة Joule

يعبَّر عادةً عن الطاقة الميكانيكية بالجول $Joule$ أو بالقدم. باوند $ft.lb$ ويعبر عنها في الحرارة بالسعر أو الوحدة البريطانية

وقد وجد أن:

$$1\ Kcal = 4186\ Joules \text{ و } 1\ cal = 4.186\ Joules \text{ و } 1\ Btu = 778\ ft.\ Lb$$

ويعبر عن هذه العلاقات بالقول بأن المعادل الميكانيكي للحرارة هو 4.186Joules/calorie أو 778.0ft.Lb/Btu لكن أدق رابط بين وحدات قياس كمية الحرارة ووحدات الطاقة الميكانيكية هي اعتبار الكيلو سعر بأنه تماماً جزء من 860.0 جزءاً من الكيلو واط ساعة (kwh/860.0).

ومنها ينتج أن:

$$One\ cal = 4.18605J$$

وكذلك ينتج أن:

$$1.0Btu = 252.0cal \times 4.186J/cal = 1054.87J = 1054.87N.m$$
$$= 1054.87N \times (Lb/4.42N) \times (3.26ft/m) = 778.23ft.Lb$$

مثال 4.11

أ– وعاء به غاز طاقته *110.0 Btu*، كم تساوي طاقته بالقدم.باوند *ft-lb* ؟

ب– كم عدد السعرات الحرارية التي نحصل عليها من تسخين *1.0 g* من الماء بين درجتي 10.0^0C و 100.0^0C ؟

الحل:

أ–

$$110.0\ Btu = 778.26\frac{ft.lb}{Btu} \times 110.0Btu$$
$$= 85.6086 \times 10^3\ ft.lb$$

ب– عدد السعرات الحرارية التي نحصل عليها من تسخين 1.0g من الماء 90.0^0C هي.

$$90.0^0C \times 1.0g \times 1.0\ cal/g.C^0 = 90.0\ calories$$

مثال 4.12

سخان موصل بخط *110.0V* وتياره *5.0 Amp* . احسب الطاقة الحرارية الناتجة في عشر دقائق.

الحل:

نعلم أن القدرة هي معدل تغير الطاقة بالنسبة للزمن، أي أن

$$P = \frac{E}{t} = I^2R$$

حيث R هي المقاومة و I هو التيار و P هي القدرة .

لكن

$$R = \frac{V}{I}$$

أي أن

$$P = I(IR) = IV = 5.0\,Amp \times 110.0V = 550.0\,Watt$$

$$E = P\,t = 550.0\,W \times 10.0 min \times 60.0\,sec/min$$

$$= 3.3 \times 10^5\,J = 3.3\times10^5\,J\times\frac{1\,cal}{4.186\,J} = 7.9\times10^4\,cal$$

4.6 السعة الحرارية Heat Capacity

تختلف المواد من حيث كمية الحرارة المكتسبة أو كمية الحرارة المفقودة وذلك عند تغيُّر درجة حرارتها. فتبعاً لهذا التغيُّر تزيد الطاقة بزيادته وتنقص بنقصه وكذلك تزيد الطاقة المكتسبة مع زيادة كتلة المادة. فإذا كان التغير في كمية الحرارة هو ΔQ والتغير في درجة الحرارة هو ΔT وكتلة المادة هي m فإن ثابت التناسب c بينها يُعطى بالصيغة:

$$c = \frac{1}{m}\frac{\Delta Q}{\Delta T} \qquad (4.15)$$

وهو ما عُرف بالسعة الحرارية النوعية للمادة Specific Heat Capacity أو ما يُعرف إختصاراً بالحرارة النوعية Specific Heat. أما $\frac{\Delta Q}{\Delta T}$ فتسمى السعة الحرارية Heat Capacity . ويمكن أن تعرف بأنها " **كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة الجسم درجة مئوية واحدة** "

إن السعة الحرارية النوعية لمادة تساوي عددياً كمية الحرارة التي يجب أن تُقدَّم إلى وحدة الكتلة من المادة لرفع درجة حرارتها درجة واحدة. وعليه فإن السعة

الحرارية النوعية للماء هي :

$4.18605\ J/g.C^{\circ}$ $\quad$ $4186.05\ J/kg.C^{\circ}$

$1.0\ Btu\ /\ Lb.F^{\circ}$ $\quad$ $1.0\ cal\ /\ g.C^{\circ}$

ونجد هنا أنه من المناسب كتابة الطاقة الحرارية المخزونة بدلالة الجرام الجزيئي (mole) حيث يُعرَّف المول الواحد بأنه كمية من المادة كتلتها بالجرام تساوي عددياً الكتلة الجزئية M (الوزن الجزيئي) ولحساب عدد الجرامات الجزيئية (المولات) n تقسّم كتلة المادة m على وزنها الجزيئي.

$$n = \frac{m}{M}$$

ومن المعادلة (4.15) ينتج أن :

$$C = Mc = \frac{1}{n}\frac{dQ}{dT} \qquad (4.16)$$

وهي ما عُرفت بالسعة الحرارية المولية.

وحيث إن $M=18$ للماء فإن الحرارة النوعية المولية للماء تساوي $18.0 cal/mol.C^{o}$ أو $75.35 J/mol.C^{o}$. ويعطي الجدول (4.4) الحرارة النوعية والحرارة النوعية المولية لمجموعة عناصر.

* * *

جدول (4.4) الحرارة النوعية والحرارة النوعية المولية مع ثبات الضغط

المعدن	النوعية $J/g.C^o$	درجة الحرارة C^o	M (g/mol)	المولية $C = Mc$ $J/mol.C^o$
بريليوم	1.97	20-100	9.01	17.7
ألمنيوم	0.91	17-100	27.0	24.6
حديد	0.47	18-100	55.9	26.3
نحاس	0.39	15-100	63.5	24.8
فضة	0.234	15-100	108.0	25.3
زئبق	0.138	0-100	201.0	27.7
رصاص	0.130	20-100	207.0	26.9

إذا كانت السعة الحرارية النوعية ثابتة مع تغيُّر درجة الحرارة من T_1 إلى T_2 فإن كمية الحرارة المعطاة لجسم كتلته m تعطى بالمعادلة .

$$Q = mc\,(T_2 - T_1) \tag{4.17}$$

وكذلك إذا اعتبرنا السعة الحرارية المولية ثابتة فإن

$$Q = nC\,(T_2 - T_1) \tag{4.18}$$

لكن في الواقع إن السعات الحرارية تتغير تبعاً لتغير درجات الحرارة. وعليه فإن كمية الحرارة تكتب بالصيغ

$$Q = m\int_{T_1}^{T_2} c(T)\,dT \tag{4.19}$$

$$Q = n\int_{T_1}^{T_2} C\,(T)\,dT \tag{4.20}$$

حيث c هنا هي الحرارة النوعية الحقيقية وكذلك C هي الحرارة النوعية المولية الحقيقية. وعليه فإن المعادلتين (4.17) و (4.18) هما حالتان خاصتان من المعادلتين (4.19) و (4.20).

مثال 4.13

أُسقط جسم كتلته $1000.0g$ رأسياً ولمسافة $10.0m$ ،إذا حولت كل طاقة الجسم المختزنة إلى حرارة ، احسبها وقدرها بالأرج والسعر.

الحل:

الشغل المبذول

$$W = 1.0\ kg \times 9.8\ ms^{-2} \times 10m$$

$$= 98.0J$$

$$98.0J = \frac{98.0J}{4.186\ J.cal^{-1}} = 23.4\ cal$$

$$98.0J = \frac{98.0J \times 10.0^{7}\, erg}{1.0\ J} = 9.8 \times 10^{8}\, erg$$

مثال 4.14

تسير رصاصة بسرعة 100.0m/s لتصطدم بقالب من الخشب لتسكن فيه . ما الزيادة في درجة حرارة الطلقة عند سكونها ؟

الحـل:

نعتبر أن الطاقة الحركية للرصاصة قد تحولت إلى طاقة حرارية ومنه فإن:

$$Q = \frac{1}{2}mv^{2} = mc\Delta T$$

$$\Delta T = \frac{v^{2}}{2c} = \frac{(100.0)^{2}}{2.0 \times 130.0}C^{\circ} = 38.5^{\circ}C$$

مثال 4.15

مصباح غازي يعمل بالبنزين يبعث إضاءة تعادل إضاءة لمبة كهربية قدرتها 40.0W افرض أن كفاءة المصباح لتحويل الحرارة إلى ضوء تعادل كفاءة اللمبة الكهربية .كم من البنزين يتم استهلاكه في ساعة واحدة ؟

الحـل:

كمية الطاقة الناتجة في ساعة هي:

$$Q = Pt = 40.0J/s \times 3600.0s = 1.44\times10^{5} J$$

لكن الطاقة اللازمة لإحراق واحد جرام من البنزين هي $4.6\times10^{4} j/g$

إذن كتلة البنزين المحترقة في ساعة هي:

$$m = \frac{Q}{Q1} = \frac{1.44\times10^{5} J}{4.6\times10^{4} J/g} = 3.13g$$

مثال 4.16

تتغير السعة الحرارية المولية لمادة عند ضغط ثابت وفقاً للصيغة:

$$C_p = 20.0J/mole.K + \left(2.0\times10^{-6} j/mole.K^{3}\right)T^{2}$$

احسب كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة 20.0 mole من $0.0°C$ إلى $10.0°C$.

الحـل:

$$Q = 20.0\int_{273}^{283}\left(20.0J/mole.K + 2.0\times10^{-6} J/mole.K^{3}\ T^{2}\right)dT$$

$$= 20.0\times\left[20.0T + 2.0\times10^{-6}T^{3}/3\right]_{273}^{283} J = 20.0[200.+1.55]J = 4030.92\ J$$

مثال 4.17

كوب مادته من النحاس وكتلته $0.1kg$ ودرجة حرارته $20.0°C$ مليء بالماء الساخن الذي كتلته $0.2kg$ ودرجة حرارته $80.0°C$. احسب درجة حرارتهما بعد حصول الاتزان الحراري.

الحل:

لحل كافة المسائل من هذا النوع فإننا نعتمد مبدأ أن كمية الحرارة المفقودة من الأجسام الساخنة تساوي كمية الحرارة التي اكتسبتها الأجسام الباردة مع إهمال الجزء المفقود في الوسط المحيط بها.

الحرارة المفقودة من الماء = الحرارة المكتسبة للكوب

$$Q_{CU} = Q_w$$

$$Q_{CU} = m_{cu}\, c_{cu}(T - 20)$$

$$Q_w = m_w\, c_w\,(80 - T)$$

حيث T هي درجة الحرارة النهائية . إذن

$$\therefore (0.2\text{ kg})\,(4186\text{ J/kg.C})\,(80 - T)$$
$$= (0.1\text{ kg})\,(390\text{ J/kg.C})\,(T - 20)$$
$$\therefore 66976 - 837.2 = 39T - 780$$
$$T = 77.33\ °C$$

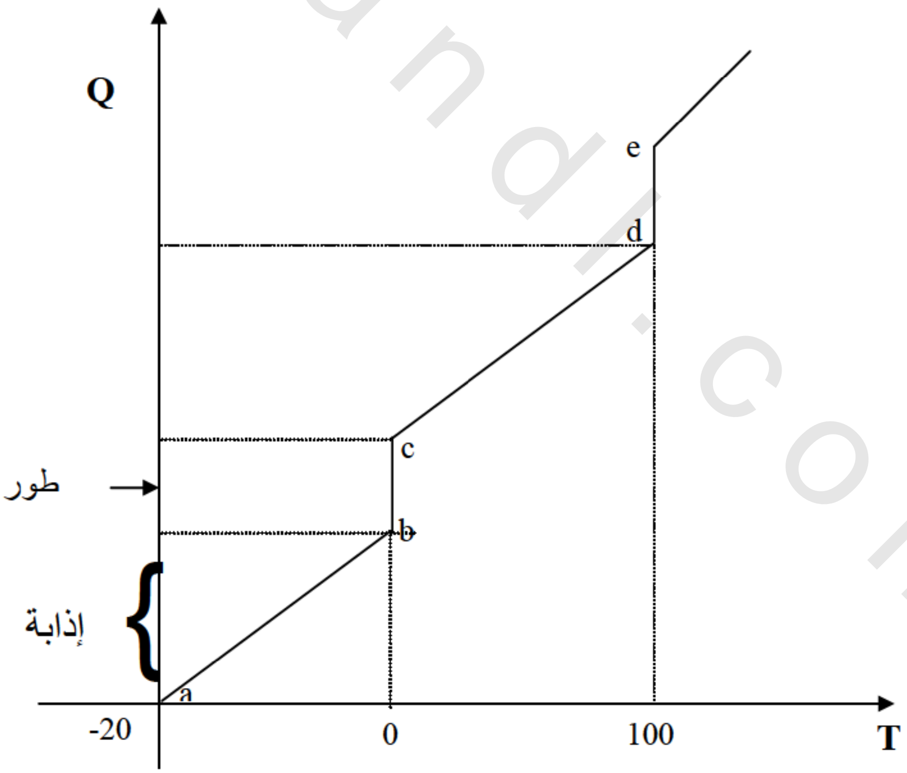
4.7 تغيُّر الطور للمادة Change of Phase

إن كلمة الطور المستعملة هنا تدل على حال المادة من صلابة أو سيولة أو غازية. فالماء يكون سائلاً في الظروف العادية ويكون صلباً ، ثلجاً ، عند فقده لجزءٍ كبير من حرارته ويكون بخاراً بامتصاصه كمية إضافية من الحرارة. ومعظم المواد يمكن أن توجد في هذه الأطوار الثلاثة إذا تحققت لها شروط مناسبة من ضغط ودرجة حرارة. ويصاحب الانتقال من طور إلى آخر امتصاص أو تحرير كمية من الحرارة مصحوباً

بتغيير في حجم المادة. وكمثال نفرض أننا أخذنا جليداً عند درجة حرارة - $20.0°C$ ونبدأ في رفع درجة حرارته بإيصاله بمصدر ثابت للطاقة فنلاحظ تناسباً طردياً بين كمية الحرارة الممتصة ودرجة الحرارة. وهذا يظهر في الشكل (4.5) ممثلاً بالجزء ab إلى أن نصل إلى درجة الصفر المئوي.

وعند الصفر يظهر بعض الماء وباستمرار الخلط والتسخين نلاحظ زيادة الماء مع ثبات درجة الحرارة عند الصفر إلى أن يتحوَّل كامل الثلج إلى ماء (وهذا يمثله الجزء bc من الشكل) ونقول إن عملية الذوبان هي تغيُّر للطور من الصلب إلى السائل. وهذه الحالة تستهلك جزءا من الطاقة يسمى **الطاقة الكامنة للانصهار** Latent Heat . فإذا فرضنا أن L ترمز لكمية الطاقة اللازمة لتحويل مادة كتلتها الوحدة من طور إلى طول آخر، فإن كمية الحرارة اللازمة لتحويل جسم كتلته m هي Q

$$Q = m\,L \tag{4.21}$$



شكل(4-5) تغير الطور

بعد ذلك تعود الحرارة إلى الارتفاع وبمعدل ثابت (وهذا يمثله الجزء cd) ولكن هذا المعدل أبطأ من السابق أي أننا نحتاج إلى طاقة أكبر لرفع درجة حرارة جرام من الماء من تلك التي نحتاجها لرفع درجة حرارة واحد جرام من الثلج درجة واحدة وذلك أن الحرارة النوعية للماء أكبر من الحرارة النوعية للثلج. وعند بلوغ درجة الحرارة إلى $100.0°C$ "النقطة d" يبدأ الماء في الغليان وتبقى درجة الحرارة ثابتة حتى يتبخر كل الماء وهذا تغيُّر آخر في الطور يمثله الجزء de من الشكل . ونسمي كمية الحرارة اللازمة لتحويل الماء عند $100.0°C$ إلى بخار عند نفس الدرجة بالحرارة الكامنة للتبخير. إذا حجز بخار الماء فهذا يحتاج إلى وعاء كبير ومغلق فإن عملية التسخين وارتفاع درجة الحرارة تستمر ويمثلها الجزء ef من الشكل . هذا ويعطي الجدول (4.5) قائمة ببعض المواد مصحوبة بدرجات الحرارة التي يتم عندها الانصهار والغليان وكمية الحرارة اللازمة لذلك.

جدول 4.5 درجات الحرارة للانصهار والغليان وكمية الحرارة اللازمة لعمليتي الانصهار والغليان لكل مادة

المادة	درجة حرارة	الحرارة اللازمة	درجة حرارة	الحرارة اللازمة
الهيدروجين	-259.31	58. 6	-252.86	452.0
النتروجين	-209.97	25.5	-195.81	201.0
الأكسجين	-218.79	13.8	-182.97	213.0
الزئبق	-39.0	11.8	357.00	272.0
الماء	0.0	335.0	100.00	2256.0
الكبريت	119.00	38.1	444.60	326.0
الرصاص	327.3	24.5	1750.00	871.0
الفضة	960.8	88.3	2193.00	2336.0
الذهب	1063.00	64.5	2660.00	1578.0
النحاس	1083.00	134	1187.00	5069.0

مثال 4.18

احسب الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة $2.0g$ من الثلج من -20.0^0C إلى ماء عند درجة 25.0^0C.

الحل :

$$Q = m\left[c_{ice}\Delta T_1 + L + c_w\Delta T_2\right]$$

$$= 2.0\times10^{-3}kg\begin{bmatrix}2000.0J/kg.C^0(0.0-(-20.0))+33.5\times10^4J/kg\\ +4186.0J/kg.C^0\left(25.0^0-0.0^0\right)\end{bmatrix}$$

$$= 959.3.0J$$

مثال 4.19 :

ما السرعة التي يجب أن تتحرك بها رصاصة درجة حرارتها الابتدائية $30.0^\circ C$ وذلك ليتم إذابتها بالكامل عند اصطدامها بصفيحة من الفولاذ ؟ , علما أن درجة حرارة الإذابة $430.0^\circ C$ والحرارة النوعية لمادتها $0.031cal/g.C^\circ$ والحرارة الكامنة $5.0cal/g$

الحل :

نعتبر أن طاقة الحركة للرصاصة قد تحولت إلى طاقة رفعت درجة الحرارة إلى 430.0^oC وكذلك إلى طاقة إذابة ، أي أن:

$$K = Q_1 + Q_2$$

حيث

$$Q_1 = mc(T_2 - T_1) = m(0.031cal/g.C^\circ)(430.C^\circ - 30.0C^\circ) = 12.4m(cal/g)$$

و

$$Q_2 = mL = 5m(cal/g)$$

و بالتعويض فإن :

$$\frac{1}{2}mv^2 = m(12.4 + 5.00)cal/g$$

إذن

$$v^2 = 34.8 \times 4.186 J/10^{-3} kg = 145672.8 m^2/s^2$$

وبأخذ الجذر فإن :

$$v = 381.0 m/s$$

مثال 4.20 :

مسعّر من النحاس كتلته $320.0g$ يحوي ثلجاً كتلته $60.0g$ ودرجة حرارتهما هي الصفر . أُرسل تيار بخاري درجة حرارته $100.0^{\circ}C$ وكتلته $15.0g$ داخل المسعر . ما هي الدرجة النهائية للمسعر ومحتوياته ؟

الحل :

من السهل في هذه المسألة التأكد من أن الثلج قد ذاب بالكامل ، كذلك يسهل التحقق من أن البخار قد تكثف بالكامل . وعليه نبحث عن درجة الحرارة النهائية بين الصفر المئوي والمائة درجة .

نعلم أن

الطاقة المكتسبة = الطاقة المفقودة

أو $$Q_{ice} + Q_{can} = Q_{stream} \qquad (1)$$

حيث

$$Q_{ice} = m_{ice}[L + c_w(T - 0.0^{\circ}C)] = 60.0[80 + 1.0(T - 0.0^{\circ}C)cal = (4800 + 60.0T)cal$$

$$Q_{can} = mc\Delta T = 320.0 \times 0.093(T - 0.0^{\circ}C) = (29.76T)cal$$

$$Q_{stream}=mL+mc\Delta T=15.0g\times 539\frac{cal}{g}+15.0g\times\frac{1cal}{gC^{\circ}}(100.0^{\circ}C-T)=7985cal-(15.0T)cal$$

حيث mL هي الحرارة الكامنة لبخار الماء. وبالتعويض عن Q_{ice} و Q_{can} و Q_{stream} في (1) فإن:

$$4800cal+60.0T+29.76T=8085cal+1500cal-(15.0cal/C^{\circ})T$$

ومنها فإن:

$$T=45.7^{0}C$$

* * *

مســائل

1- يدور قمر صناعي كتلته $2000kg$، مصنوع من الألمنيوم، حول الأرض بسرعة $3200.0km/h$. احسب الطاقة اللازمة لرفع درجة حرارته إلى 600.0^0C وقارنها بطاقة حركته.

2- وعاء به $250.0g$ من الماء عند درجة الصفر المئوي. غُمِرت به أسطوانتان من النحاس والرصاص كتلة كل منهما $1.25kg$. احسب درجة الحرارة النهائية إذا فرضنا عدم وجود فقد حراري عبر الوعاء.وكانت درجة حرارتهما 100.0^0C .

3- ترمومتر كتلته $5.5g$ وحرارته النوعية $0.2cal/g.C^o$ وقراءة حرارته $15.0^\circ C$. غُمر تماماً في ماء كتلته $300.0g$ لتنخفض درجة حرارته إلى $44.5^\circ C$. كم كانت درجة حرارة الماء قبل غمر الترمومتر ؟

4 – ملئ خزان سيارة سعته $100L$ تماماً عند درجة $40\ ^\circ F$ قبل أن تنتقل السيارة إلى مكان درجة حرارته $85\ ^\circ F$. احسب كمية الفاقد من البنزين نتيجة تمدده علماً بأن عامل التمدد الحجمي للبنزين هو $0.0012\ \ /\ C^\circ$.

5 – أنبوب من النحاس يحوي زئبقاً . عند درجة $20.0C^\circ$ كان حجم الزئبق $10^{-4}\,m^3$. نرغب أن تظل مساحة القاعدة ثابتة مع رفع درجة الحرارة إلى الدرجة T وهذا يحصل عادة بإضافة عمود من مادة السليكون الذي لا يتمدد مع زيادة درجة الحرارة (انظر مثال 4.10) . احسب حجم عمود السليكون .

6- أ- قارن السعة الحرارية $\left(\frac{\Delta Q}{\Delta T}\right)$ لكتل متساوية من الماء و الفولاذ والنحاس.

ب- قارن السعة الحرارية لأحجام متساوية من الماء ، الفولاذ ، والنحاس.

7- إذا تغيرت السعة الحرارية المولية عند ضغط ثابت وفقاً للصيغة التجريبية الآتية

$$C_P = 27.2\ J/mol.k + \left(4.0\times10^{-3} J/mol.k^2\right)T$$

فاحسب كمية الحرارة اللازمة لتغيير درجة 10.0 mole من 20.0^0C إلى $520.0°C$.

8- يندفع الماء بمعدل $3.0\ m/s$ من ارتفاع $100.0\ m$. احسب أقصى فرق بين درجتي الحرارة للماء عند قمة وقاع مصب الماء.

9- عند درجات الحرارة المنخفضة تتغير درجة حرارة الملح الصخري حسب قانون ديبي

$C = k\frac{T^3}{T_0^3}$ حيث $k = 1940.0\ J/mol.k$ و $T_0 = 281.0K$

أ- كم نحتاج من الحرارة لرفع درجة $5.0\ mole$ من الملح من $10.0K$ إلى $60.0K$ ؟

ب- كم متوسط الحرارة النوعية المولية في هذه الحالة ؟

ج- كم القيمة الفعلية للحرارة النوعية المولية عند درجة حرارة $60K$ ؟

10– أخرجت قطعة من النحاس كتلتها $80.0g$ من فرن, ثم أسقطت في وعاء زجاجي كتلته $320.0g$ وبه ماء كتلته $200.0g$, لترتفع درجة حرارة الماء بمقدار $16.0^{\circ}C$. احسب درجة حرارة الفرن.

11– كرة من الرصاص كتلتها $0.5\ kg$ ودرجة حرارتها $100.0°C$ وُضعت في ثُقب داخل كتلة من الثلج. إذا كانت سعة الحرارة النوعية للرصاص هي 0.03 $J/kg.C^{o}$ فاحسب كتلة الثلج المذابة.

12– مكعب من الثلج كتلته $250.0\ kg$ وضع في ماء كتلته $640.0\ kg$ ودرجة حرارته $25.0°C$. صف حالة الخليط بعد الوصول إلى حالة الاتزان.

13– أُضيفت قطعة من الثلج كتلتها $100.0g$ عند درجة حرارة $0.0°C$ إلى $400.0g$ من الماء عند درجة حرارة $35.0°C$. كم درجة الحرارة النهائية مع إهمال الفقد الحراري ؟

14– اُستخدمت ماكينة قدرتها $100.0hp$ لرفع درجة حرارة $100.0kg$ من الماء. احسب الزمن اللازم لرفع درجة حرارة الماء $10.0^{0}\ C$.

15– لدينا ثلاثة سوائل مختلفة لها نفس الكتل حفظناها على التوالي عند درجات الحرارة $15.0°C$, $22.0°C$, $29.0°C$. قمنا بخلط السائلين الأول والثاني لنحصل على درجة حرارة اتزان قدرها $18.0^{\circ}C$ ثم قمنا بخلط السائلين الثاني والثالث لنحصل على درجة اتزان قدرها $25.0°C$. كم درجة حرارة الاتزان لو قمنا بخلط السائلين الأول والثالث ؟

16– احسب كمية الحرارة اللازمة لتحويل 25.0kg من الثلج عند درجة حرارة $-10.0°C$ إلى بخار عند $100.0°C$.

17– في تجربة لحساب المكافئ الميكانيكي الحراري حصلنا على البيانات الآتية مقاومة الملف 55.0 ohms ، الجهد المستخدم 110.0V ، كتلة الماء 153.0g، كتلة المِسعر 60.0g ، الحرارة النوعية للمِسعر 0.1 cal/g.C ، وزمن مرور التيار 75.0s ، درجة حرارة الماء الابتدائية $10.0°C$ ودرجته النهائية $35.0°C$.
احسب المعادل الميكانيكي للحرارة (كم يساوي واحد سعر حراري جولاً ميكانيكياً) ؟

18– وعاء ذو كتلة صغيرة جداً به 400.0 g من الماء عند درجة حرارة $50.0°C$. كم جرام من الثلج درجة حرارته $-15.0°C$ يجب إضافته إلى الماء لتصل درجة الحرارة النهائية $20.0°C$ ؟

19– أُضيف 0.30 kg من الثلج درجة حرارته $-20.0°C$ إلى مِسعر يحوي 1.0kg من الماء درجة حرارته $25.0°C$ ، إذا كان المسعر من النحاس وكتلته 300.0g . فاحسب درجة الحرارة النهائية.

20– مسعر من النحاس كتلته 320.0g يحوي 50.0g من الثلج عند درجة الصفر. مُرِر عليه بخار درجة حرارته $100.0°C$ ، إذا علمت أن الثلج ذاب بالكامل وإن البخار تكثف بالكامل. احسب درجة الحرارة النهائية للمجموعة.

21- سلك من النحاس الأصفر نصف قطر مقطعه 8.0 cm عند درجة حرارة 180.0^0 C برد لتصل درجة حرارته النهائية -120.0^0C .

احسب نصف قطر مقطعه بعد التبريد.