الفصل الأول

درجة الحرارة

المقدمة

يتناول هذا الفصل دراسة درجة الحرارة ومقاييسها وطرق قياسها وأنواع المحارير المستخدمة لذلك. وكذلك دراسة تأثيرات تغير درجة الحرارة على الخواص الفيزيائية للمادة. كما يتم التطرق إلى انتقال الحرارة والآليات المختلفة لانتقالها. وأخيرا توضـــيح درجات الحرارة الواطئة وكيفية الحصول عليها.

درجة الحرارة

يعد مفهوم درجة الحرارة من المفاهيم الأساسية في الفيزياء، شأنه شأن المفاهيم الأساسية الأخرى كالقوى مثلاً. وعلى الرغم من ان الجميع يملك فكرة واضحة أو تصوراً معيناً عن معنى هذا المفهوم وذلك بدلالة أحاسـيسـه، إلا ان مفهوم درجة الحرارة ليس سـهل التعريف والتحديد بدقة.

ومن المفاهيم البسيطة والأولية هو ان درجة الحرارة هي ذلك الشيء المسؤول عن إحساسنا بالسخونة والبرودة. وتُعدُّ حاسة اللمس ابسط طريقة لتمييز سخونة وبرودة الأجسام، إذ نستطيع القول ان الجسم X أشدُّ سخونة من الجسم Y ، والجسم Y أشدُّ أو اقلُّ سخونة من الجسم Z وهكذا نستطيع التعبير عن مفهوم درجة الحرارة.

ومن أجل فهم أكثر لمعنى درجة الحرارة، دعنا نأخذ جسـماً معيناً وليكن X ذا درجة حرارة معينة T_1 ، كأن يكون بارداً عند لمسه باليد، وجسماً ثانياً مماثلاً للأول تماماً وليكن Y وذا درجة حرارة معينة T_2 ، كأن يكون سـاخناً عند لمسـه باليد. فإذا وُضـع الجسـمان في حالة اتصـال حراري، فإن الجسم الساخن يبرد، أي تنخفض درجة حرارته بينما يسخن الجسم البارد أي ترتفع درجة حرارته، وبعد مرور فترة كافية من الزمن فإن كل من الجسـمين X و Y سـيؤولان إلى الدرجة الحرارية نفسـها، وعندها يمكن القول بأن الجسـمين أصـبحا في حالة توازن حراري. ويمكن توضـيح ذلك بافتراضـنا ان هناك شـيء ما، نسـميه الحرارة Heat (وهي نوع من أنواع الطاقة) قد تنساب من الجسم الساخن إلى داخل الجسم البارد. وهذا المثال مشابه إلى ربط وعاءين

يحتويان على الماء بمستويات مختلفة، بأنبوب، إذ نجد أن الماء سينساب خلال الأنبوب من الوعاء الذي يحتوي على سائل ذات مستوى أعلى إلى الوعاء الحاوي على السائل بمستوى أقل.

ومن هذا يتضح لنا بأن درجة حرارة الجسم (أو النظام) تأخذ القيمة نفسها التي تؤول إليها قيم درجات الحرارة المختلفة لتلك الأجسام (أو الأنظمة)، إذا وضعت هذه الأجسام (أو الأنظمة) سوية وباتصال حراري مباشر. ان هذا الشرح أو التفسير يتطابق مع فكرة ان درجة الحرارة هي مقياس لسخونة أو برودة الأجسام (أو الأنظمة)، فضلاً عن انه يقود أيضاً إلى معنى أساس آخر لدرجة الحرارة وهو أنها خاصية ما للمادة تؤول إلى نفس قيمتها في مواد أخرى عندما توضع هذه المواد في حالة اتصال حراري ويتحقق التوازن الحراري.

فضلاً عما تقدم فإنه يمكن اعتبار درجة الحرارة كمقياس للنشاط الحراري لذرات أو جزيئات المادة. وتعرّف على أنها مقياس للطاقة الحركية (أو الاهتزازية) لذرات أو جزيئات المادة. ويعبّر عن درجة الحرارة بالدرجة السليزية (المئوية) °C أو بالدرجة الفهرنهايتية °F أو بالدرجة الكلفنية (أو المطلقة) K .

أسس قياس درجة الحرارة

تسمى الاجهزة المستخدمة لقياس درجة الحرارة بالمحارير والتي تعتمد على تغير الخواص الفيزيائية للمادة، وتتغير هذه الخواص مع تغير درجة الحرارة. ومن هذه الخواص حجم المادة ومقاومة السلك الكهربائية وطول السلك المعدني وضغط الغاز المحفوظ تحت حجم ثابت وحجم الغاز المحفوظ تحت ضغط ثابت ولون سلك التسخين في المصباح الكهربائي، وغيرها. لقد استعان العلماء بالعلاقة بين أي من هذه الخواص الفيزيائية ودرجة الحرارة في بناء مقياس مناسب لدرجة الحرارة (محرار). ان بناء أي مقياس لدرجة الحرارة يعتمد أساسا على الاختيارات الآتية:

1- اختيار المادة المحرارية المناسبة.
2- اختيار الصفة المحرارية المناسبة لتلك المادة.
3- اختيار المدى المناسب لدرجات الحرارة التي يراد قياسها.
4- الافتراض بأن الصفة المحرارية المختارة تتغير باستمرار مع تغير درجة الحرارة.

ان اســـتحضـــار النقاط الآنفة الذكر مهم جداً عند بناء أي مقياس لدرجات الحرارة. فيمكن ان تكون صفة محرارية مناسبة لمدى معين من درجة الحرارة دون غيرها.

فلو فرضنا ان العلاقة بين الخاصية الفيزيائية المحرارية المختارة X، ودرجة الحرارة المطلقة T يمكن كتابتها بالعلاقة الخطية الآتية:

$$T = a X \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

إذ ان a تمثل كمية ثابتة، بالإمكان تحديد قيمتها عند القيام ببناء أي محرار لقياس درجة الحرارة.

ان المعادلة (1) تشير إلى نقطتين مهمتين هما:

1- ان الفروق المتساوية في درجة حرارة المادة ينتج عنها تغيرات متساوية المقدار في قيمة الخاصية الفيزيائية المحرارية المختارة X.
2- ان النسـبة بين أية درجتين حراريتين تسـاوي النسـبة بين قيمتي الخاصـية الفيزيائية عند تلكما الدرجتين الحراريتين، وبتعبير آخر فإن:

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{X_1}{X_2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

إذ ان X_1 و X_2 تمثلان مقدار خاصـــية المادة الفيزيائية عند الدرجتين T_1 و T_2 على التعاقب.

أما قيمة الثابت a فإنها تملك نفس القيمة عند T_1 و T_2، ولذلك فإنها لا تظهر في المعادلة (2).

ان استخدام العلاقات السابقة يحتم علينا ملاحظة النقاط المهمة الآتية:

1- ان قيم درجـات الحرارة المتـأتيـة من اختيـارنـا لمقيـاس معين يعتمـد على مـادة معينـة وخـاصـــية محرارية معينة ليس بالضـــرورة ان تكون متطابقة مع قيم درجات الحرارة المتأتية من مقياس آخر يعتمد على مادة أخرى وخاصية محرارية أخرى.
2- إذا حدث تطابق بين قيم درجات الحرارة المتأتية من مقياسين مختلفين في مدى معين من درجـات الحرارة فـإنـه ليس من الضـــروري ان يحـدث التطـابق في مـدى آخر لـدرجـات الحرارة.
3- ان العلاقة الخطية في (2) لا تصـــح لجميع مديات درجات الحرارة، وهذا يعني ان قيمة الثابت a لا تكون نفسها عند جميع درجات الحرارة.

ويمكن إعادة كتابة المعادلة (2) على النحو الآتي:

$$T_1 = T_2 \frac{X_1}{X_2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (3)$$

أن عملية تدريج المحارير تتطلب اختيار نقطة قياسية ثابتة وتم الاتفاق على اختيار النقطة الثلاثية للماء فإذا فرضنا ان قيمة خاصية المادة X_2 عند النقطة الثلاثية للماء T_2 والمساوية إلى 273.16 K فإن المعادلة (3) يمكن تبسيطها إلى الصيغة الآتية:

$$T_1 = 273.16 \frac{X_1}{X_2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (4)$$

ان العلاقة الأخيرة يمكن تعميمها على أي نوع من المحارير يراد استخدامه، وكما يأتي:

للمحارير السائلة $$T(L) = 273.16 \frac{L}{L_O}$$

للمحارير الغازية ذات الحجم الثابت $$T(P) = 273.16 \frac{P}{P_O}$$

للمحارير الغازية ذات الضغط الثابت $$T(V) = 273.16 \frac{V}{V_O}$$

ولمحارير المقاومة الكهربائية $$T(R) = 273.16 \frac{R}{R_O}$$

ولمحارير المزدوجات الحرارية $$T(\varepsilon) = 273.16 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_O}$$

وهكذا لأي نوع من المحارير.

حيث ان $L_O, P_O, V_O, R_O, \varepsilon_O$ تمثل قيم الخاصية المعنية عند درجة الحرارة 273.16 K

يعتمد قياس درجات الحرارة الواطئة عادة على اســـتخدام أحد أنواع محارير المقاومة، والذي غـالبـاً مـا يتم اختيـار نوع معين منهـا لمـدى معين من درجـات الحرارة، الواطئـة، لأنـه لا يوجـد محرار مقـاومـة واحـد يكون اســـتخدامه كفوءً لجميع الحرارة الواقعة بين 1K إلى درجة حرارة الغرفـة 300K. فيســـتخـدم محرار مقـاومـة البلاتين في مـدى درجـات الحرارة 200K- إلى 1000K ويستخدم محرار مقاومة شبه الموصل لمدى درجة الحرارة بين 2K إلى 20K . كذلك يســـتخدم محرار مقـاومـة الكـاربون في مـديات مختلفة لدرجات، مثلاً بين 0.1K إلى 20K. أما لدرجات الحرارة الأقل من 1K فغالباً ما تســـتخدم صـــفة التأثيرية المغناطيســـية لأحد الأملاح البارامغناطيسية كمحرار لدرجة الحرارة. أما القوة الدافعة الكهربائية لمعظم المعادن فإنها تصبح قليلـة جداً لأجل اســـتخدامهـا في المزدوجـات الحراريـة ولا توفر دقـة عـالية في القياس. وتعتمد كفاءتها على نوع المزدوج الحراري ومدى درجات الحرارة الذي يســـتخدم فيه محرار المزدوج الحراري. أما لدرجـــــات الحرارة الأعلى من 100K فغالباً ما يســـتخدم المحرار البارومتري (Pyrometer).

مقاييس درجة الحرارة The Temperature Scales

بصورة عامة هناك ثلاثة مقاييس رئيسة لدرجة الحرارة، وهي كما يأتي:

1- المقياس السليزي The Celsius (Centigrade) Scale (^oC)
2- المقياس الفهرنهايتي The Fahrenheit Scale (^oF)
3- المقياس الكلفني The Kelvin Scale (K)

المقياس السليزي The Celsius (Centigrade) Scale (^oC)

يتم تدريج هذا المقياس وذلك بتعريف نقطة انجماد الماء على أنها تساوي صفر درجة سليزية، 0^oC تحت الضـغط الجوي الاعتيادي، ونقطة الغليان على أنها تسـاوي 100^oC تحت الضـغط الجوي الاعتيادي، والطريقة المســتخدمة لتدريج المحرار الزئبقي وفق هذا المقياس هي بوضـــع المحرار الزئبقي في خليط الثلج والماء وتركه مدة كافية حتى يســتقر مســتوى الزئبق. ويؤشـــر مســـتوى الزئبق على انـه 0^oC ثم يهيئ خليط البخـار والمـاء ويوضـــع المحرار داخلـه فيرتفع

مستوى الزئبق ويستقر عند مستوى معين، يؤشر هذا المستوى على انه 100^oC ثم تقسم المسافة بين العلامتين 0^oC و 100^oC إلى 100 جزء متساوٍ كل جزء سيمثل تغيراً في درجة الحرارة مقداره درجة سليزية واحدة $1\ ^oC$. ويمكن توسيع مدى المحرار المذكور وذلك بإضافة المسافات نفسها قبل النقطة 0^oC من اجل الحصول على الدرجات الحرارية الأقل من 0^oC ، وبعد النقطة 100^oC للحصول على الدرجات الحرارية الواقعة بعد 100^oC .

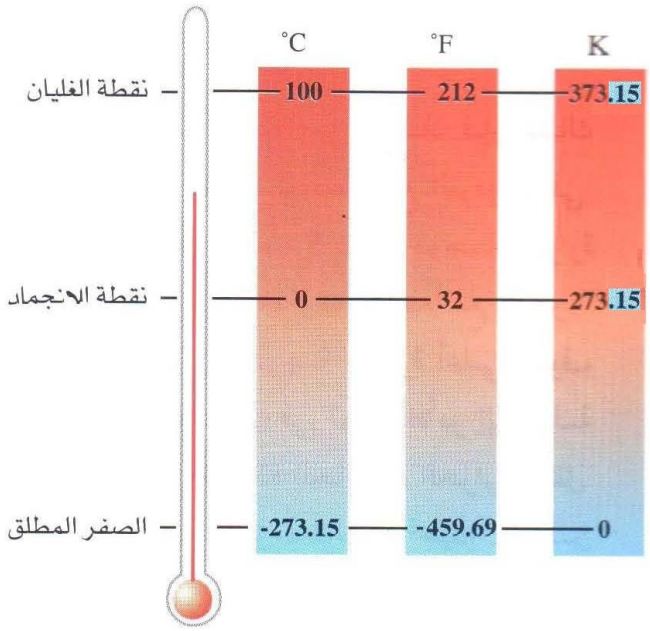
المقياس الفهرنهايتي (ºF) The Fahrenheit Scale

يعد المقياس الفهرنهايتي من مقاييس درجة الحرارة المعروفة. ان مسافة درجة الحرارة الفهرنهايتية على المقياس تساوي ($\frac{5}{9}$) مسافة درجة الحرارة السليزية. ان درجة انجماد الماء في هذا المقياس تساوي 32 درجة فهرنهايتية (32^oF)، ودرجة غليان الماء تساوي 212^oF . وتقسم المسافة بين النقطتين إلى 180 جزءاً متساوياً. وان طريقة تدريجه هي طريقة تدرج المقياس السليزي نفسها.

المقياس الكلفني (K) The Kelvin Scale

يعد المقياس الكلفني المقياس العلمي الأساس لدرجة الحرارة والذي على أساسه يتم تعريف المقياس السليزي. يشبة المقياس الكلفني في تقسيماته المقياس السليزي، ان درجة انجماد الماء في هذا المقياس تساوي 273.15 درجة كلفنيه، وغالباً ما تأخذ على أنها مساوية الى 273 K ، أما درجة حرارة غليان الماء فإنها تساوي 373.15 K درجة كلفنية تحت الضغط الجوي الاعتيادي.

ومن هذا يتبين ان المسافة بين النقطتين مقسمة إلى 100 جزء متساو، كما هي الحالة في المقياس السليزي، فضلاً عن ان تساوي الدرجة الكلفنية مع الدرجة السليزية. يوضح الشكل (1) هذه المقاييس الثلاثة والدرجات الحرارية المهمة فيها:



الشكل (1) يمثل تخطيطاً مبسطاً للمقاييس الثلاثة

التحويل من مقياس إلى آخر Conversion of Scales

يمكن تحويل درجة الحرارة من مقياس إلى آخر النسبة الاتية:

$$\frac{^oC-0}{100}=\frac{K-273}{100}=\frac{^oF-32}{180}$$

1- من المقياس السليزي إلى المقياس الفهرنهايتي وبالعكس كما في المعادلات الآتية:

$$^oF=\frac{9}{5}\,^oC+32 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (5)$$

أو

$$^oC=\frac{5}{9}(\,^oF-32) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (6)$$

2- من المقياس السليزي إلى المقياس الكلفني وبالعكس كما في المعادلات الآتية:

$$K=\,^oC+273 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (7)$$

أو

$$^{o}C = K - 273 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (8)$$

3- من المقياس الكلفني إلى المقياس الفهرنهايتي وبالعكس كما في العادلات الآتية:

$$^{o}F = \frac{9}{5}(K - 273) + 32 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (9)$$

أو

$$K = \frac{5}{9}(^{o}F - 32) + 273 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (10)$$

التمدد الحراري Thermal Expansion

ان تغير درجة حرارة المادة يؤدي إلى تغيرات في الخواص الأخرى للمادة ومن ابرز هذه التغيرات هو تغير أبعاد المادة أو تغير حالتها. ان رفع درجة حرارة المادة يؤدي إلى زيادة الطاقة الاهتزازية لذراتها أو جزيئاتها وعندها تزداد سعة اهتزاز تلك الجسيمات، وهذا معناه زيادة معدل أو متوسط المسافة بين الذرات أو الجزيئات، أي ان جميع أبعاد المادة سوف تتغير، تزداد بارتفاع درجة حرارتهما وتنكمش بانخفاض درجة حرارتها (عدا بعض الاستثناءات مثل الماء الذي يتقلص حجمه عند رفع درجة حرارته من $0^{o}C$ إلى $4^{o}C$). وتسمى ظاهرة تغير أبعاد المادة نتيجة لتغير درجة حرارتها بالتمدد الحراري. ولأجل تفادي المشاكل التي يسببها التمدد الحراري تترك فواصل بين قضبان السكك الحديدية وخرسانة الطرق السريعة.

تمدد الأجسام الصلبة Expansion of Solids

التمدد الطولي (α) Linear Expansion

ان التغير الذي يحصل في أي بعد من أبعاد المادة الصلبة كالطول والعرض والارتفاع نتيجة لتغير درجة حرارتها يعرف بالتمدد الطولي. وقد ثبت عملياً ان الزيادة الحاصلة في طول المادة الصلبة (ΔL) والناتجة عن زيادة درجة حرارة المادة (ΔT) يتناسب طردياً مع كل من طول المادة (L_o) ومقدار التغير في درجة حرارتها (ΔT)، أي ان

$$\Delta L \propto L_o \Delta T$$

$$\Delta L = \alpha\ L_o \Delta T \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (11)$$

إذ ان (α) تمثل ثابت التناسب وتسمى بمعامل التمدد الحراري الطولي. يعرف معامل التمدد الطولي (α) : على انه الزيادة في طول المادة لوحدة الأطوال نتيجة لتغير درجة حرارة المادة بمقدار درجة حرارية واحدة. ويمكن أعادة كتابة المعادلة (11) بالصيغة الآتية:

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

وبما ان $\Delta L = L - L_o$

فان الطول الجديد (L) عند أية درجة حرارية (T) يساوي

$$L = L_o (1 + \alpha\ \Delta T) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (12)$$

ان وحدة معامل التمدد الطولي هي مقلوب درجة الحرارة، أي K^{-1} أو $^oC^{-1}$ أو $^oF^{-1}$ وذلك نتيجة لاختصار وحدات الطول مع بعضها.

ان قيمة معامل التمدد الطولي تعتمد على نوع المادة المستخدمة، وان قيمتها ليست ثابتة تماماً، ولكنها تتغير بصـــورة بطيئة مع تغير درجة الحرارة. ان قيم (α) التي نجدها في الجدول (2) تمثل معدل القيم لمدى معين من درجات الحرارة، أو تمثل قيمة واحدة عند درجة حرارية معينة. وللأغراض العملية الاعتيادية يمكن اعتبار قيمة (α) ثابتة لمدى محدود من درجات الحرارة للمواد التي لا تعاني تغيراً في الطور ضمن ذلك المدى.

الجدول (2) معامل التمدد الطولي لبعض المواد

المادة	معامل التمدد الطولي x 10^{-6}/°C	المادة	معامل التمدد الطولي x 10^{-6}/°C
النحاس	17	الزجاج المقام للحرارة	3.2
الالمنيوم	23	(پايركس)	
الفضة	20	الماس	0.50
الحديد	12	المطاط الصلب	80
البرونز	19	الكونكريت (الخرسانة)	7 — 12
الزجاج العادي	6 — 9	الرصاص	29
الحديد (الستيل)	12	الجليد	51

التمدد السطحي (β) Surface Expansion

ان تغير مساحة السطوح مع تغير درجة حرارتها يعرف بالتمدد السطحي أو تمدد المساحة. ويعرف معامل التمدد السطحي (β) على انه مقدار الزيادة في المساحة لوحدة المساحة عند ارتفاع درجة الحرارة درجة حرارية واحدة. ان قيمة (β) تعطى بالمعادلة الآتية:

$$\beta = \frac{\Delta A / A_o}{\Delta T} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (13)$$

ويمكن التعبير عن تغير المساحة مع تغير درجة حرارتها بالمعادلة الآتية:

$$A = A_o (1+\beta \Delta T) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (14)$$

حيث تمثل A_o و A المساحة الأصلية والمساحة الجديدة عند درجتا الحرارة T_o و T على التعاقب، ان وحدة β هي K^{-1} أو $^oC^{-1}$ أو $^oF^{-1}$ ، وذلك لاختصار وحدتي المساحة. ويمكن البرهنة على ان معامل التمدد السطحي يساوي تقريباً ضعف معامل التمدد الطولي للمادة نفسها أي ان:

$$\beta \cong 2\,\alpha \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (15)$$

ويكون مقدار التغير في وحدة الطول الناتج عن تأثير تغير درجة حرارة المادة متساوياً في جميع الاتجاهات في المادة بشرط ان تكون المادة الصلبة متجانسة الخواص، أي يكون لها الخواص نفسها في جميع الاتجاهات. وهذا يعني ان المسافة بين أية نقطتين في المادة تتغير بالمقدار نفسه لمقدار التغير في درجة الحرارة نفسها.

التمدد الحجمي (γ) Volume Expansion

ان حجم المادة يتغير اذا تغيرت درجة حرارة المادة بنفس طريقتي التمدد الطولي والتمدد السطحي ويعرف معامل التمدد الحجمي (γ) على انه التغير النسبي في حجم المادة نتيجة لتغير درجة حرارتها درجة واحدة. ان معامل التمدد الحجمي يعطى بالمعادلة الآتية:

$$\gamma = \frac{\Delta V / V_o}{\Delta T} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (16)$$

ان حجم المادة الجديد V يمكن الحصول عليه من المعادلة الاتية:

$$V = V_o (1+\gamma \Delta T) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (17)$$

ويمكن البرهنة على ان معامل التمدد الحجمي (γ) يساوي تقريباً ثلاثة أمثال معامل التمدد الطولي (α) ، للمادة نفسها أي ان

$$\gamma \cong 3\alpha \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (18)$$

ويعود ذلك إلى ان الجسم المتجانس يتمدد في أبعاده الثلاثة بالمقادير نفسها أي انه يتمدد باتجاه الطول والعرض والارتفاع. ومن المعروف انه لا توجد جداول لقيم معاملات تمدد الأجسام الصلبة السطحية والحجمية وذلك لأنه يمكن إيجاد قيمها مباشرة من قيم معاملات التمدد الطولية للمادة نفسها. يبين الجدول (3) قيم معامل التمدد الحجمي لبعض السوائل المعروفة

الجدول (3) معامل التمدد الحجمي لبعض السوائل

المادة	معامل التمدد الحجمي $\times 10^{-4}/^{o}C$
الجليد	0.5
الماء	2.1
الزئبق	1.8
الكحول الاثيلي	11
الكلسرين	5.1
الزجاج (الاعتيادي)	0.2
الزجاج (البايركس)	0.09

تمدد السوائل Expansion of Liquids

من المعروف ان السـوائل (الموائع بصـورة عامة) لا تمتلك شـكلاً محدداً ولذلك فان التمدد الحراري المهم فيها هو تمددها الحجمي، حيث يتغير حجم السائل عندما تتغير درجة حرارته. ان معامل التمدد الحجمي للسائل ψ يساوي:

$$\psi = \frac{\Delta V / V_o}{\Delta T} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (19)$$

إذ ان V_o تمثل حجم السـائل الأصـلي و ΔV تمثل مقدار التغير في حجم السـائل الناتج عن تغير في درجة حرارته مقداره ΔT . ان قيمة ψ لا تتأثر كثيراً بتغير درجة الحرارة.

يزداد حجم السـوائل بصـورة عامة إذا ارتفعت درجة حرارتها، ويشـذ عن هذه القاعدة بعض السـوائل مثل الماء الذي يقل حجمه (ينكمش) إذا ارتفعت درجة حرارته من 0^oC إلى 4^oC. أما بعد هذه الدرجة الحرارية فان الماء يسـلك سـلوكاً طبيعياً كبقية السـوائل، أي يزداد حجمه بزيادة درجة حرارته.

تمدد الغازات (φ) Expansion of Gases

يتغير حجم الغاز تغيراً كبيراً إذا تغيرت درجة حرارته عند ثبوت الضـغط المسـلط عليه، ان قيمة معامل التمدد الحجمي للغازات تكاد تكون ثابتة تقريباً. ان قيمة معامل التمدد الحجمي لغاز الهيدروجين تسـاوي (3.66×10^{-3}) لكل درجة حرارية، ويزيد قليلاً عن هذه القيمة لبقية الغازات. ويمكن الحصول على معامل التمدد الحجمي للغاز (φ) من المعادلة الآتية:

$$\varphi = \frac{\Delta V / V_o}{\Delta T}$$

إذ ان V_o تمثل حجم كتلة معينة من غاز عند درجة حرارة 0^oC . ان الإشـارة إلى حجم الغاز عند درجة حرارة 0^oC ضـروري جداً لان معامل التمدد الحجمي للغاز كبير جداً. إذا كان V_1 و V_2 تمثلان حجم الغاز عند درجتي الحرارة T_1 و T_2 على الترتيب، فانه لا يصح تطبيق المعادلة الآتية:

لا تصح $V_2 = V_1 \left[1 + \varphi (T_2 - T_1) \right]$

بل يجب ان يشـار إلى ان القيم V_1 و V_2 نسـبة إلى الحجم V_o عند درجة حرارة 0^oC ، وكما يأتي:

$$V_2 = V_o \ (1 + \varphi T_2)$$

$$V_1 = V_o \ (1 + \varphi T_1)$$

وبقسمة المعادلة الأولى على الثانية نحصل على المعادلة الاتية:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1 + \varphi T_2}{1 + \varphi T_1}$$

وقد وجد عملياً ان معامل التمدد الحجمي للغاز يكافيء تقريباً (1/273). وهو ما يعرف بقانون جارلس الذي ينص على: ان حجم كتلة معينة من غاز محفوظ تحت ضـــغط ثابت، يزداد بنســـبة ثـابتـة تعـادل (1/273) من حجمـه عنـد درجـة حرارة 0^oC لكل زيادة في درجة حرارته مقدارها درجة حرارية واحدة.

ان هذا القانون يعني ان حجم الغاز سيصـبح صـفراً عند درجة حرارة -273^oC . إلا ان جميع الغـازات تتحول إلى الحـالة السـائلة لها قبل الوصـــول إلى درجة حرارة حرارة -273^oC (أي درجة حرارة الصفر المطلق). وهذا يعني ان قانون جارلس لا يصح تطبيقه عند درجات الحرارة الواطئة.

آليات انتقال الحرارة

تنتقل الحرارة من مكان إلى آخر بأحد الطرق الرئيسة الثلاثة:

1- التوصيل.
2- الحمل.
3- الإشعاع.

تنتقل الحرارة بالتوصيل من الأجزاء الساخنة إلى الأجزاء الباردة من الوسط المادي، دون حركة موضعية للوسط. أما في طريقة الحمل فان الحرارة تنتقل بحركة الأجزاء الساخنة للوسط المادي (سائل أو غاز)، ولا تحدث ظاهر الحمل في المواد الصلبة. تنتقل الحرارة بواسطة الإشعاع الكهرومغناطيسي من مكان إلى آخر من دون الحاجة إلى وسط مادي من دون ان تسخن (ترفع) درجة حرارة الفضاء الذي تمر خلاله. ومن المفيد ان نذكر ان مصطلح الإشعاع الحراري يقصد به (في الغالب) الاشعة تحت الحمراء، إذ إنها تحمل الجزء الأكبر من الطاقة التي تصل إلى الأرض من الشمس. وإذا مر الإشعاع الكهرومغناطيسي في الفضاء الحاوي على مادة ما فان جزءاً من الطاقة المشعة سيمتص وسيعمل على
رفع درجة حرارة المادة، كما يحدث عند مرور الاشعة الكهرومغناطيسية خلال جو الأرض. وسنتطرق إلى طرق انتقال الحرارة بشيء من التفصيل في الفقرات اللاحقة.

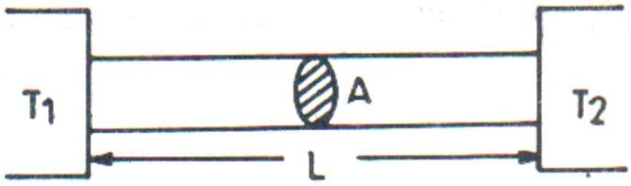
طريقة التوصيل Conduction Method

من المعروف انه إذا تلامس جسمان فان الحرارة تنتقل من الجسم الساخن إلى الجسم الأقل سخونة، وبتعبير آخر تنتقل الحرارة من الجسم ذي درجة الحرارة المرتفعة إلى الجسم ذي درجة الحرارة الأقل، ويتوقف انتقال الحرارة بين الجسمين عندما تتساوى درجتا حرارتيهما ويتحقق التوازن الحراري. ان انتقال الحرارة بين الأجسام يعني انتقال الطاقة الحرارية من الجزء الساخن إلى الجزء البارد. فإذا عرفنا ان الحركة الاهتزازية لجسيمات المادة تمثل معظم الطاقة الحرارية في المادة، فان جسيمات الجزء الساخن تكون ذات سعة اهتزازية أكبر من جزيئات الجزء البارد، ونتيجة التصادم بين هذه الجسيمات والجسيمات المجاورة تنتقل إليها جزءاً من طاقتها الحرارية، أي تزداد سعة اهتزازها وهذه بدورها تعمل على نقل الطاقة الحرارية بالتصادم إلى الجسيمات المجاورة، وهكذا تستمر العملية إلى ان تكتسب جميع الجسيمات نفس معدل الطاقة الحرارية، وعندها يتوقف انتقال الحرارة. ان انتقال الحرارة في الأجسام الصلبة يتم بوساطة التصادمات الجزيئية، وتسمى هذه الطريقة لانتقال الحرارة في الأجسام الصلبة بالتوصيل. وتكون المعادن جيدة التوصيل الحراري، وبصورة عامة تكون الموصلات الجيدة

التوصـيلية الكهربائية موصـلات حرارية جيدة لان الكترونات التكافؤ تتحرك بحرية تامة تقريباً خلال المعدن حاملة معها الحرارة إلى أجزاء المعدن المختلفة.

الميل الحراري Temperature gradient

يعرف الميل الحراري على انه تغير درجة الحرارة مع تغير المسـافة على طول الجسـم. نأخذ سـلكاً معدنياً طوله (L) ومسـاحة مقطعه العرضـي (A) ودرجة حرارته (T)، متصـلاً بجهازين (خزانين) درجتا حرارتهما T_1 و T_2 (افرض ان $T_2 < T_1$) كما هو موضـح في الشـكل (5)، وكما هو معلوم بأن الحرارة تنساب من الطرف الساخن إلى الطرف البارد، إلا ان شكل خطوط انتقال الحرارة خلال المادة يعتمد أساسا على طريقة العزل الحراري للمادة. فعندما يغلف السلك بمادة عازلة للحرارة، نرى ان خطوط انتقال الحرارة تكون بصـورة مسـتقيمة ومنتظمة وكما هو مبين في الشـكل (6a). أما في حالة عدم عزل السـلك حراريا فان خطوط انتقال الحرارة تسـلك مسارات غير منتظمة وكما هو مبين في الشكل (6b).

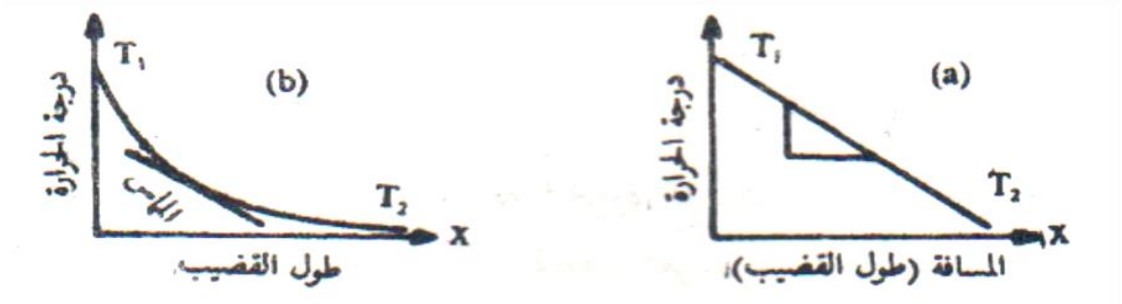


الشكل (5) الميل الحراري

الشكل (6) خطوط انتقال الحرارة في المادة الصلبة

ففي كلتا الحالتين، وبعد مرور فترة زمنية كافية تستقر درجة حرارة الأجزاء المختلفة من المعدن عند قيم ثابتة لا تتغير، وهذه الحالة تسـمى الحالة الثابتة (أو المسـتقرة) steady state. يبين

الشـكل (7) العلاقة بين درجات الحرارة المقاسـة عند مسـافات مختلفة على السـلك في الحالتين سواءً كان معزولاً أم غير معزول.



الشكل (7) العلاقة بين درجة الحرارة والمسافة

ان ميل الخط المسـتقيم في شـكل (7a) وميل المماس في شـكل (7b) يمثلان تدرج درجة الحرارة Temperature gradient الذي عرفناه سابقاً على انه تغيّر درجة الحرارة مع المسافة على طول المادة عند أية نقطة من نقاطها وعند أية لحظة زمنية، ويرمز لها عادة بـ $(\frac{\Delta T}{\Delta x})$ ووحدته $^oC/m$ أو $^oC/cm$. تنتقل الحرارة دائماً من الجزء السـاخن إلى الجزء الأقل سـخونة (البارد)، ويعرف التيار الحراري Thermal Current علـى انه كمية الحرارة (dQ) المنتقلة أو العابرة لمقطع فـي المادة خلال فترة زمنية (dt)، أي ان

$$H = \frac{dQ}{dt} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (20)$$

ووحدته هي J/s أو cal/s .

معامل التوصيل الحراري (K_L)

لقد وجد عملياً (تجريبياً) ان التيار الحراري $(\frac{dQ}{dt})$ يتناسـب طردياً مع مسـاحة المقطع العرضي وتدرج درجة الحرارة $(\frac{\Delta T}{\Delta x})$ ، أي أن

$$\frac{dQ}{dt} \propto A \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

أو

$$\frac{dQ}{dt} = - K_L A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (21)$$

إذ ان (K_L) تمثل ثابت التناسب وتسمى بمعامل التوصيل الحراري أو الموصلية الحرارية Thermal Conductivity. تعني الإشارة السالبة ان انسياب الحرارة يكون باتجاه درجة الحرارة الأقل، أي انه كلما زادت المسافة (x) من المصدر الحراري قلت معها درجة الحرارة (T) وهذا يجعل الكمية ($\frac{\Delta T}{\Delta x}$) سالبة الإشارة. ان إضافة الإشارة السالبة في المعادلة أعلاه يفيد في جعل الكميتين ($\frac{dQ}{dt}$) و(K_L) كميتين موجبتين. وتعرف الموصلية الحرارية (K_L) على أنها المعدل الزمني لانسياب الحرارة خلال المادة لوحدة المساحة لكل وحدة تدرج حراري. ومن الصيغ الأخرى للمعادلة (21) بعد تكامل طرفيها الصيغة الآتية:

$$Q = K_L A t \frac{(T_1 - T_2)}{L} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (22)$$

ويسمى هذا القانون أحيانا بقانون فورير (Fouriers Law)

ان وحدة K_L هي J/s.m.K أو W/m.K .

ان الجدول (4) يحتوي على قيم الموصلية الحرارية لبعض المواد.

الجدول (4) قيم الموصلية الحرارية لبعض المواد.

المادة	K_L (cal/cm,sec C°)	المادة	K_L (cal/cm,sec,°C)
الفضة	1.006	المطاط	0.0005
النحاس	0.918	ورق اسبستوس	0.0005
الالمنيوم	0.501	الجليد	0.004
البرونز (النحاس الاصفر)	0.25	الفلين	0.0001
الزجاج	0.0025	الهواء	0.00006
الفولاذ	0.12	الاركون	0.00004
الماء	0.0013	الهيليوم	0.000034

طريقة الحمل Convection Method

يعرف الحمل على انه طريقة انتقال الحرارة من مكان إلى آخر خلال السوائل والغازات وذلك بحركة جزيئات مادة الوسط نفسها من مكان إلى آخر، على عكس حركة جزيئات المادة الصلبة خلال عملية التوصيل الحراري والتي لا تتضمن حركة الجزيئات من مكان إلى آخر، إذ تنتقل الحرارة من جزيء إلى آخر بالتصادم. ومن الأمثلة على انتقال الحرارة بطريقة الحمل تدفئة الغرف في الشتاء بوساطة المدفئات أو جهاز تسخين الماء، إذ تمتص جزيئات الهواء أو السائل كمية من الحرارة من الجزء الساخن فيتمدد الهواء أو السائل أي تقل كثافته فينتقل إلى الجهة الأخرى (إلى الأعلى) لتمتزج هذه الجزيئات مع جزيئات الهواء أو السائل الأقل طاقة حرارية وتكسبها كمية من الحرارة التي امتصتها. ان انتقال المادة (غاز أو سائل) من المنطقة ذات الدرجة الحرارة العالية إلى المنطقة ذات الدرجة الحرارة الواطئة (الأقل) يولد تياراً يسمى تيار الحمل الحراري (Thermal Convection Current) الذي يعرف على انه كمية الحرارة المكتسبة أو المفقودة من قبل السطح الملامس للغاز أو السائل خلال وحدة الزمن.

واعتماداً على الطريقة التي يتولد بها تيار الحمل فانه يكون بصورة عامة على نوعين هما:

1- تيار الحمل الطبيعي Natural Convection Current إذا كان ناتجاً عن تغيير كثافة الوسط.

2- تيار الحمل الاضـــطراري Forced Convection Current إذا كان ناتجاً عن تأثير اصطناعي كاستخدام المروحة أو المضخة أو غيرها.

وتعد طريقة الحمل من الطرق الفعالة لانتقال الحرارة وتشـــكيل تيارات الحمل الهوائية في المناطق الساحلية والجبلية وعند خط الاستواء والقطبين وفي المناطق المدارية.

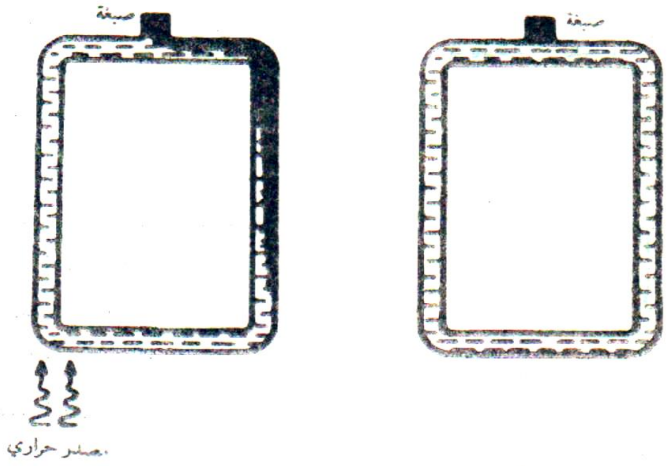
ان دراســـة الحمل بطريقة المعادلات الرياضـــية ليس شـــيئاً ســـهلاً وذلك يرجع إلى ان فقدان واكتساب الحرارة من الأجسام الملامسة للمائع (غاز أو سائل) عميلة معقدة رياضياً وتعتمد على كثير من العوامل مثل شـــكل الســـطح وكثافة المائع ولزوجته وعلى عوامل أخرى. ويتم أحيانا تعريف معامل الحمل الحراري Thermal Convection Coefficient (h) حسـب المعادلة الآتية:

$$h = \frac{H_C}{A \Delta T} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (23)$$

إذ تمثل H_C تيار الحمل الحراري و A المســـاحة و ΔT الفرق بين درجة حرارة الســـطح والمائع. ان المعادلة في أعلاه تدل على ان (h) تعتمد على الفرق بين درجات الحرارة، وعليه يجب تعيين قيمتها لكل حالة من الحالات.

يمكن إجراء تجربة بسيطة توضح ظاهرة الحمل، فلو أخذنا الأنبوبان الموضحان في الشكل (8) وملأناهما بالماء ووضعت قليل من الصبغة قرب نهايتيهما عند الفتحتين. عند تسخين أحد الأنبوبتين بالطريقة المبينة في الشـــكل (8) نجد ان الســـائل ســـيبدأ بالانســـياب والدوران داخل الأنبوبة، حاملاً معه الصبغة، وبعد فترة من الزمن نجد ان الصبغة قد انتشرت في جميع أنحاء الســـائل، مما يدل على انتقال جزيئات الســـائل خلال الأنبوبة ودورانها خلالها. ان ســـبب هذه الحركة يعود إلى تمدد السائل (تقل كثافته) عند التسخين فيصبح أخف من باقي السائل، ولهذا فانه يحدث اختلال توازن الضغط بين العمودين الأيسر والأيمن، فيرتفع السائل في الطرف الساخن وينخفض الســـائل في الطرف الأقل حرارة مؤدياً إلى انســـياب الســـائل ودورانه وبذلك تنتقل الحرارة خلال حركة السائل إلى الأماكن البعيدة من المصدر الحراري، والشيء نفسه يحدث في انتقال الحرارة خلال الغاز أو الهواء. واعتماداً على طريقة انتقال الحرارة بالحمل تُصـــمم

الأجهزة في أنظمة التدفئة بحيث تسمح بالهواء البارد أو السائل البارد بالعودة إلى المصدر الحراري لإكمال الدورة.



الشكل (8) يوضح ظاهرة الحمل في السوائل

طريقة الإشعاع Radiation Method

يتم انتقال الحرارة خلال الفضاء بطريقة الإشعاع. ويقصد بالإشعاع أيضا الانبعاث المتواصل للطاقة من سطوح الأجسام المختلفة إلى الأجسام الأخرى الأقل درجة حرارية ويجب ملاحظة ان الإشعاع الحراري ما هو إلا طاقة كهرومغناطيسية تنبعث من الأجسام الساخنة وتنتقل بسرعة الضوء خلال الفضاء. فينعكس جزء من هذه الطاقة ويمتص الجزء الآخر من قبل الأجسام التي تسقط عليها. ان امتصاص الاشعة الكهرومغناطيسية يؤدي إلى تحولها إلى طاقة حرارية وسترتفع حرارة الجسم. ان الحرارة التي تصل إلى الأرض والكواكب الأخرى من الشمس بوساطة الإشعاع الذي ينتقل خلال الفراغ الشاسع ودونما الحاجة إلى وسط مادي لتصل إلى الأرض. لو فرضنا ان جزء الطاقة التي تمتص من قبل الجسم تساوي (a) والجزء الذي ينعكس يساوي (r) فان

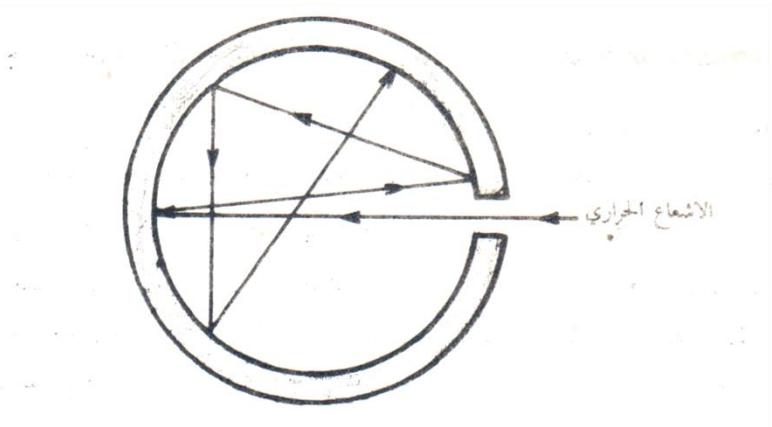
$$a + r = 1 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (24)$$

وفي حالة التوازن الحراري التي تبقى درجة حرارة الجسم عندها ثابتة، فان الجسم يشع كمية من الطاقة الحرارية مساوياً إلى الكمية التي يمتصها، أي ان قابليته الإشعاعية (e) (emissivity) تساوي قابليته الامتصاصية (r) وفي حالة التوازن يكون:

$$a = e \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (25)$$

وتعتمد كل من القابلية الإشعاعية والقابلية الامتصاصية على طبيعة الجسم وعلى طول الموجة الكهرومغناطيسية الساقطة. ويطلق على الجسم الذي يمتص جميع الإشعاع الساقط عليه بالجسم الأسود (Black Body). ويمثل هذا الجسم بفجوة معزولة حرارياً ذات فتحة صغيرة لدخول الإشعاع، الذي يعاني انعكاسات متتالية عن السطح الداخلي للفجوة، وتصمم الفجوة بحيث تصبح فرصة خروج الإشعاع من الفتحة ضئيلة جداً، كما في الشكل (9).

ومن المؤكد ان الجسم الأسود مشع جيد للحرارة مثلما هو ماص جيد لها. وإشعاعية الجسم الأسود تكون اكبر من انعكاسية الأجسام العادية، وبصورة عامة تكون الأجسام ذات الامتصاصية الحرارية الجيدة مشعات حرارية جيدة.



الشكل (9) يوضح الجسم الأسود

ان كمية الإشعاع الحراري (R) التي تنبعث من وحدة المساحة من سطح أسود في الثانية الواحدة تعطى بالعلاقة الاتية:

$$R = \sigma T^4 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (26)$$

إذ تمثل T درجة حرارة الجسم المشع بالدرجات الكلفنية و σ تمثل كمية ثابتة، قيمتها تساوي

$$\sigma = 5.57 \times 10^{-8} \text{ Joule}/\text{m}^2.\text{s}.\text{K}^4$$

أو

$$\sigma = 5.57 \times 10^{-5} \text{ erg}/\text{cm}^2.\text{s}.\text{K}^4$$

ويطلق على العلاقة (26) بقانون ستيفان – بولتزمان Stefan – Boltzmann Law .

يمكن إعادة كتابة قانون ستيفان – بولتزمان للجسم غير الأسود بالصيغة الآتية:

$$R = e\,\sigma T^4 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (27)$$

إذ تمثل (e) القابلية الإشعاعية للجسم المذكور.

أما كمية الحرارة المنبعثة (ΔQ) من الجسم الساخن إلى الأجسام الأخرى الأقل درجة حرارية، فانه يمكن كتابتها كما في الصيغة الآتية:

$$\Delta Q = \sigma A (T_{1^4}^4 - T_o^4) t$$

إذ تمثل t الزمن بالثانية. وتعرف هذه المعادلة بقانون ستيفان. ومن شروط استخدام هذا القانون هو: ان تكون كل من T_1 و T_2 مقاسة بالدرجات الكلفنية والفرق بينهما ليس قليلاً.

درجات الحرارة الواطئة Low Temperatures

يطلق على العلم الذي يهتم بدراسة الخواص الفيزيائية للمواد في درجات الحرارة الواطئة بعلم الزمهرير، وغالباً ما تطلق تسمية درجات الحرارة الواطئة على الدرجات الحرارية الأقل من مائة درجة كلفنية (أي 100 K).

يمكن الحصول على درجات حرارية واطئة باستخدام العديد من الطرق. تستند جميع هذه الطرق على فكرة واحدة وهي يجب سحب جزء أو كل الطاقة الداخلية للمادة المراد خفض درجة حرارتها.

ان طريقة التبريد المستخدمة في الثلاجات ومكيفات الهواء هي استخدام الضغط في درجة الحرارة الاعتيادية فقط، حيث تكبس غازات مثل الامونيا والفريون بمكبس، فيؤدي ذلك إلى رفع درجة حرارتها (أي تسخن فوق درجة حرارة المحيط) ثم يتم تبريدها إلى درجة حرارة المحيط، وبما ان هذا الغاز واقع تحت ضغط فيؤدي إلى تحويله إلى سائل. ثم يُسمح لهذا السائل ان يتمدد ويتبخر فتنخفض درجة حرارته مما يؤدي إلى سحب حرارة من المنطقة المحيطة به مؤدياً إلى خفض درجة حرارتها، ومن ثم يعاد الغاز إلى المكبس ثانية لإكمال الدورة. وبهذه الطريقة يقوم الغاز بنقل الحرارة من الجزء المراد خفض درجة حرارته إلى المحيط الخارجي.

تعد طريقة تحويل الغاز إلى سائل من الطرق المستخدمة على نطاق واسع في الحصول على درجات الحرارة المنخفضة، وتشترك هذه الطرق المختلفة بما يأتي:

1- خفض درجة حرارة الغاز المراد تسييله.
2- زيادة الضغط المسلط عليه.

يجب تبريد الغاز المراد تحويله إلى سائل إلى درجة حرارية اقل من الدرجة الحرارية الحرجة له. وتعرّف الدرجة الحرجة للغاز بأنها الدرجة الحرارية التي لا يمكن تسييل الغاز فوقها مهما بلغ الضغط المسلط عليه. كما ويعرف الضغط الحرج على انه اقل قيمة للضغط اللازم تسليطة على الغاز المراد تسييله عند درجة حرارته الحرجة. وكلما انخفضت درجة حرارة الغاز المراد تسييله إلى ما دون درجة حرارته الحرجة سهل تسييله وقلت قيمة الضغط الذي يجب تسليطه لأجل تحويل الغاز إلى سائل. الجدول (5) يوضح قيم درجة الحرارة الحرجة والضغط الحرج لعدد من الغازات.

الجدول (5) درجات الحرارة الحرجة والضغط الحرج لعدد من الغازات

الغاز	درجة الحرارة الحرجة (°C)	الضغط الحرج(جو)
الأمونيا	132	111.3
الفريون	111.4	39.6
الاوكسجين	−118	50.1
النتروجين	−146	12.8
الهيدروجين	−240	12.8
الهيليوم	−269	2.26

وباستخدام هذه الطريقة (التبريد وتسليط الضغط) جرى تسييل غازات الاوكسجين والنتروجين والهيدروجين والهيليوم. يملك غاز الهيليوم اقل درجة تسييل من بين جميع الغازات. ان درجة حرارة غليان سائل الهيليوم تحت الضغط الجوي الاعتيادي تساوي 4.2K . الجدول (6) يبين درجة حرارة غليان بعض سوائل الغازات بالدرجات السيليزية والكلفنية، وكما يبين أيضا درجة حرارة انجماد سوائل الغازات المذكورة.

وغالباً ما يستعان بسائل الغاز ذي درجة حرارة الغليان العالية في تبريد الغاز ذي درجة حرارة الغليان الأقل أولا ثم القيام بعملية تسييله ثانياً، أي يمكن الاستعانة بسائل الأوكسجين (-183°C)

في تبريد غاز النتروجين إلى درجة حرارة (-183°C) قبل القيام بعملية تحويله إلى سائل (-196°C)، ويستعان كذلك بسائل النتروجين في تبريد غازات الهيدروجين والهليوم قبل عملية تحويلها إلى سائل الهيدروجين (-253°C) وسائل الهيليوم (-269°C).

الجدول (6) درجات غليان وانجماد سوائل الغازات المعروفة

سائل غاز	درجة حرارة غليان السائل (°C)	درجة حرارة انجماد السائل (°C)
الهيليوم	−269 (4.2 K)	
النتروجين	−196 (77K)	−210
الهيدروجين	−253 (20.4 K)	−259
الاوكسجين	−183 (90 K)	−218

مسائل الفصل الاول

س1: حول الدرجات الحرارية الآتية إلى ما يقابلها:

1- 70°C إلى قيمتها الفهرنهايتية والكلفنية.

2- 150K إلى قيمتها السليزية والفهرنهايتية.

الحل :

أولا : باستخدام المعادلة الآتية:

$$^{o}F = \frac{9}{5}\,^{o}C + 32$$

نحصل على

$$^{o}F = \frac{9}{5}70 + 32$$

$$= 158\,^{o}F$$

وباستخدام المعادلة الآتية:

$$K = {}^{o}C + 273$$

نحصل على

$$= 70 + 273 = 343\ \mathrm{K}$$

ثانياً : باستخدام المعادلة الآتية:

$$^{o}\mathrm{C} = \mathrm{K} - 273$$

نحصل على

$$^{o}C = 150 - 273 = -123\ ^{o}C$$

وباستخدام المعادلة الآتية:

$$^{o}\mathrm{F} = \frac{9}{5}\ ^{o}\mathrm{C} + 32$$

نحصل على

$$^{o}F = \frac{9}{5}(-123) + 32 = -221.4 + 32$$

$$^{o}F = -189.4\ ^{o}F$$

س2 : جد قيمة درجة الحرارة التي تتساوى عندها الدرجة السليزية مع الدرجة الفهرنهايتية.

الحل :

باستخدام المعادلة الاتية :

$$^{o}\mathrm{C} = \frac{5}{9}\ (\ ^{o}\mathrm{F} - 32\ )$$

وبما ان $(^{o}F = {}^{o}C)$ فان :

$$9\ ^{o}\mathrm{F} = 5\ ^{o}\mathrm{F} - 160$$

$$9\ ^{o}\mathrm{F} - 5\ ^{o}\mathrm{F} = -160$$

$$4\ ^{o}\mathrm{F} = -160$$

$$^{o}\mathrm{F} = \frac{-160}{4}$$

$$^{o}\mathrm{F} = {}^{o}\mathrm{C} = -40$$

وعليه فان درجتي حرارة $(-40\ ^{o}C)$ و $(-40\ ^{o}F)$ متكافئتان .

س3 : يمكن التعبير عن العلاقة بين الدرجة السليزية والدرجة الفهرنهايتية كما في المعادلة الآتية $(^{o}C = a\ ^{o}F + b)$ جد قيم الثوابت a و b .

الحل :

درجة حرارة انجماد الماء تحت الظروف الاعتيادية تساوي $0^{o}C$ وتساوي $32^{o}F$.

درجة حرارة غليان الماء تحت الظروف الاعتيادية تساوي $100^{o}C$ وتساوي $212^{o}F$

بما ان

$$^{o}C = a\ ^{o}F + b$$

حيث ان a و b كميتان ثابتتان يراد تحديد قيمتهما.

نعوض عن درجة انجماد وغليان الماء في المعادلة أعلاه فنحصل على:

$0 = 32\,a + b$ ..... (1) درجة انجماد الماء

$100 = 212\,a + b$ ..... (2) درجة غليان الماء

بطرح المعادلة (1) من المعادلة (2) نحصل على

$$100 = 180\ a$$

$$a = \frac{100}{180} = \frac{5}{9}$$

وبالتعويض عن قيمة a في المعادلة (1) نحصل على قيمة b

$$b = -\frac{5}{9}\ (32)$$

وبالتعويض عن قيم كل من a و b في المعادلة العامة نحصل على

$$^{o}C = \frac{5}{9}\ ^{o}F - \frac{5}{9}\ (32)$$

$$^{o}C = \frac{5}{9}\,(^{o}F - 32)$$

س4 : جد مقدار التغير في طـول سلك من النحاس طولـه 0. 8 m إذا تغيرت درجة حرارتـه من $15^{o}C$ إلى $35^{o}C$. علماً ان قيمة معامل التمدد الطولي للنحاس يساوي 17×10^{-6} . $^{o}C^{-1}$

الحل : بما ان $L_o = 0.8\,m$

$$\Delta T = 35 - 15 = 20\,^{o}C$$

$$\alpha = 17 \times 10^{-6}\ ^{o}C^{-1}$$

$$\Delta L = L - L_o = \alpha\, L_o\, \Delta T$$

$$\Delta L = 17 \times 10^{-6}\ ^{o}C^{-1} \times 0.8\,m \times 20\,^{o}C$$

$$\Delta L = 272 \times 10^{-6}\,m = 0.272\,mm$$

س5 : جد مقدار التغير في طول قطعة نحاس على شكل سلك طولها 2.5 m إذا ارتفعت درجة حرارتها من $15^{o}C$ الى $25^{o}C$. إذا علمت ان معامل التمدد الطولي لمادة النحاس تســاوي 17 . $\times 10^{-6}\ C^{-1}$

الحل : بما ان $L_o = 2.5\ m$

$$\Delta T = 25 - 15 = 10\,^{o}C$$

$$\alpha = 17 \times 10^{-6}\ ^{o}C^{-1}$$

$$\Delta L = \alpha\, L_o\, \Delta T$$

$$\Delta L = 17 \times 10^{-6}\ ^{o}C^{-1} \times 2.5\ m \times 10^{o}C$$

$$\Delta L = 425 \times 10^{-6}\,m$$

مقدار الزيادة في الطول $\Delta L = 0.425\,mm$

س6 : جد مقدار التمدد الطولي لسطح من الخرسانة طوله 20 m عندما تغيرت درجة حـــرارة الجــو من 0^oF الى 113^oF . علماً ان قيمة معامل التمدد الطولي للخرسانة تساوي 12×10^{-6} C^{-1}.

الحل : يجب تحويل الدرجات الفهرنهايتية إلى درجات سليزية، واستخدام المعادلة الآتية:

$$^oC = \frac{5}{9} (\ ^oF - 32\ )$$

$$^oC = \frac{5}{9} (\ 0 - 32\ )$$

$$^oC = -17.77\ ^oC = T_1$$

وكذلك

$$^oC = \frac{5}{9} (\ 113 - 32\ )$$

$$^oC = 45\ ^oC = T_2$$

$$\Delta T = T_2 - T_1 = 45 - (-17.77) = 62.77\ ^oC$$

$$\Delta L = \alpha\ L_o\ \Delta T$$

$$= 12 \times 10^{-6}\ ^oC^{-1} \times 20\ m \times 62.77\ ^oC$$

$$= 1.5064 \times 10^{-2}\ m = 1.5064\ cm$$

س7 : جد كمية الماء التي ستنسكب من وعاء زجاجي سعته $250\ cm^3$ مملوء تماماً بالماء إذا تغيرت درجة حرارتـه من 25^oC الى 65^oC . علماً بان قيمة معامل التمدد الحجمي للماء $2.1 \times 10^{-4}\ ^oC^{-1}$ وللزجاج $0.09 \times 10^{-4}\ ^oC^{-1}$.

الحل :

عندما تتغير درجة الحرارة من 25ºC الى 65ºC فان كلا من الوعاء الزجاجي والماء سوف يتمددان. ان مقدار الماء الذي ينسكب سيكون مساوياً الى الفرق بين حجمي الماء والوعاء الزجاجي الذي يحتويه.

وعليه فان التغير في درجة الحرارة يساوي :

$$\Delta T = 65\,^{o}C - 25\,^{o}C = 40\,^{o}C$$

أما التغير في حجم الوعاء الزجاجي فانه يساوي:

$$\Delta V_g = \gamma_g V_o \Delta T$$

$$= 0.09 \times 10^{-4}\ ^{o}C^{-1} \times 250\ cm^3 \times 40\ ^{o}C$$

$$= 0.09\ cm^3$$

التغير في حجم الماء ΔV_w سيكون مساوياً الى :

$$\Delta V_w = \gamma_w V_o \Delta T$$

$$= 2.1 \times 10^{-4}\ ^{o}C^{-1} \times 250\ cm^3 \times 40\ ^{o}C \qquad = 2.1\ cm^3$$

وعليه فان حجم الماء المسكوب سيكون مساوياً الى:

$$\Delta V_w - \Delta V_g = 2.1 - 0.09$$

$$= 2.01 cm^3$$

س8 : سلك معدني طوله 1.5 m ومساحة مقطعة العرضي $2\ cm^2$ ، وضع احد طرفية في ماء مغلي ووضع الطرف الآخر في خليط الثلج والماء. جد كمية الحرارة المنتقلة خلال السلك خلال زمن مقدارة 10 min ؟ علماً بان الموصلية الحرارية تساوي 0.2 cal/cm.s.ºC .

الحل :

$$Q = K_L A t \frac{(T_1 - T_2)}{L}$$

$$Q = 0.2\ cal/cm.s.^{o}C \times 2\ cm \times 10 \times 60\ s \frac{(100^{o}C - 0^{o}C)}{150\ cm}$$

$$Q = 160\,\text{cal}$$

س9 : جد مقدار الميل الحراري خلال السلك المعدني في المثال السابق ؟

الحل :

يمكن إيجاد الانحدار الحراري من المعادلة الآتية:

$$\frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{T_2 - T_1}{L} = \frac{0^oC - 100^oC}{150m}$$

$$\frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{0^oC - 100^oC}{150\ cm}$$

$$\frac{\Delta T}{\Delta x} = -0.666\ {}^oC/cm$$

الإشارة السالبة تعني ان درجة الحرارة تقل كلما ازدادت المسافة.