

الموضوع : الحرارة وخواص المادة

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. ولقد تم التطرق إلى انتقال الحرارة والآليات المختلفة لانتقالها. وأخيراً تم توضيح 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 أحاسيسه, إلا ان مفهوم درجة الحرارة ليس سهل التعريف والتحديد بدقة. ومن المفاهيم البسيطة والأولية هو ان درجة الحرارة هي ذلك الشيء المسؤول عن إحساسنا بالسخونة والبرودة. وتُعدُّ حاسة اللمس أبسط طريقة لتمييز سخونة وبرودة الأجسام, إذ نستطيع القول ان الجسم X أشدُّ سخونة من الجسم Y , والجسم Y أشدُّ أو أقلُّ سخونة من الجسم Z وهكذا نستطيع التعبير عن مفهوم درجة الحرارة.

ومن أجل فهم أكثر لمعنى درجة الحرارة, دعنا نأخذ جسماً 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 ساخناً عند لمسه باليد. فإذا وُضع الجسمان في حالة اتصال 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 الجسمين X و Y سيؤولان إلى الدرجة الحرارية نفسها, وعندها يمكن القول بأن الجسمين أصبحا في حالة توازن حراري. ويمكن توضيح ذلك بافتراضنا ان هناك شيء ما, نسميه 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 وبتصال 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. ويعبر عن درجة الحرارة بالدرجة السليزية (أو المئوية) $^{\circ}\text{C}$ أو بالدرجة الفهرنهايتية $^{\circ}\text{F}$ أو بالدرجة الكلفينية (أو المطلقة) K .

أسس قياس درجة الحرارة

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

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

إذ ان a تمثل كمية ثابتة, بالا مكان 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- أن النسبة بين أية درجتين حراريتين تساوي النسبة بين قيمتي الخاصية الفيزيائية عند تلكما الدرجتين الحراريتين, وبتعبير آخر فإن

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

إذ ان X_1 و X_2 تمثلان مقدار خاصية 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 درجات الحرارة المتأتية من اختيارنا لمقياس معين يعتمد على مادة معينة وخاصية محرارية معينة ليس بالضرورة 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 درجات الحرارة فإنه ليس من الضروري ان يحدث التطابق في مدى آخر لدرجات الحرارة.

3- ان العلاقة الخطية في (2) لا تصح 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:

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

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:

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

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

$$T(L) = 273.16 \frac{L}{L_0} \quad \text{للمحارير السائلة}$$

$$T(P) = 273.16 \frac{P}{P_0} \quad \text{للمحارير الغازية ذات الحجم الثابت}$$

$$T(V) = 273.16 \frac{V}{V_0} \quad \text{للمحارير الغازية ذات الضغط الثابت}$$

$$T(R) = 273.16 \frac{R}{R_0} \quad \text{ولمحارير المقاومة الكهربائية}$$

$$T(\varepsilon) = 273.16 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad \text{ولمحارير المزدوجات الحرارية}$$

وهكذا لأي نوع من المحارير.

حيث ان $\varepsilon_0, R_0, V_0, P_0, L_0$ تمثل قيم الخاصية المعنية عند درجة الحرارة 273.16 K

يعتمد قياس درجات الحرارة الواطئة عادة على استخدام أحد أنواع محارير المقاومة, والذي غالباً ما يتم اختيار نوع معين منها لمدى معين من درجات الحرارة, الواطئة, لأنه لا يوجد محرار مقاومة واحد يكون استخدامه كفوءاً لجميع الحرارة الواقعة بين 1K إلى درجة حرارة الغرفة 300K . فيستخدم محرار مقاومة البلاتين في مدى درجات الحرارة 200K - إلى 1000K ويستخدم محرار مقاومة شبه الموصل لمدى درجة الحرارة بين 2K إلى 20K . كذلك يستخدم محرار مقاومة الكربون في مدىات مختلفة لدرجات, مثلاً بين 0.1K إلى 20K . أما لدرجات الحرارة الأقل من 1K فغالباً ماتستخدم صفة التأثيرية المغناطيسية لأحد الأملاح

البارامغناطيسية كمحرار لدرجة الحرارة. أما القوة الدافعة الكهربائية لمعظم المعادن فإنها تصبح قليلة جداً لأجل استخدامها في المزدوجات الحرارية ولا توفر دقة عالية في القياس. وتعتمد كفاءتها على نوع المزدوج الحراري ومدى درجات الحرارة الذي يستخدم فيه محرار المزدوج الحراري. أما لدرجات الحرارة الأعلى من 100K فغالباً ما يستخدم المحرار البارومتري (Pyrometer) .

مقاييس درجة الحرارة The Temperature Scales

بصورة عامة هناك ثلاثة مقاييس رئيسية لدرجة الحرارة, وهي كما يأتي:

1- المقياس السليزي The Celsius (Centigrade) Scale ($^{\circ}\text{C}$)

2- المقياس الفهرنهايتي The Fahrenheit Scale ($^{\circ}\text{F}$)

3- المقياس الكلفني The Kelvin Scale (K)

المقياس السليزي The Celsius (Centigrade) Scale ($^{\circ}\text{C}$)

يتم تدريج هذا المقياس وذلك بتعريف نقطة انجماد الماء على أنها تساوي صفر درجة سليزية, 0°C تحت الضغط الجوي الاعتيادي, ونقطة الغليان على أنها تساوي 100°C تحت الضغط الجوي الاعتيادي, والطريقة المستخدمة لتدريج المحرار الزئبقي وفق هذا المقياس هي بوضع المحرار الزئبقي في خليط الثلج والماء وتركه مدة كافية حتى يستقر مستوى الزئبق. ويؤشر مستوى الزئبق على أنه 0°C ثم يهبط خليط البخار والماء ويوضع المحرار داخله فيرتفع مستوى الزئبق ويستقر عند مستوى معين, يؤشر هذا المستوى على أنه 100°C ثم تقسم المسافة بين العلامتين 0°C و 100°C إلى 100 جزء متساوٍ كل جزء سيمثل تغيراً في درجة الحرارة مقداره درجة سليزية واحدة 1°C . ويمكن توسيع مدى المحرار المذكور وذلك بإضافة المسافات نفسها قبل النقطة 0°C من أجل الحصول على الدرجات الحرارية الأقل من 0°C , وبعد النقطة 100°C للحصول على الدرجات الحرارية الواقعة بعد 100°C .

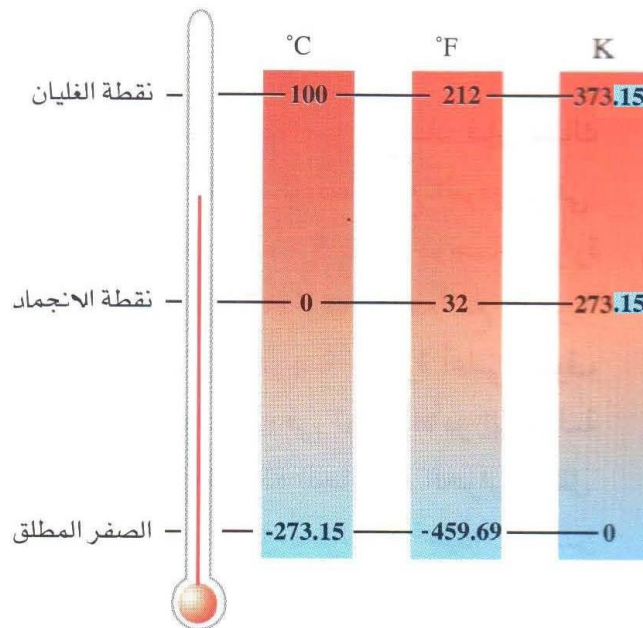
المقياس الفهرنهايتي (°F) The Fahrenheit Scale

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 فهرنهايت (32°F), ودرجة غليان الماء تساوي 212°F. 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. يشبه 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 الآتية:

$$\frac{^{\circ}C - 0}{100} = \frac{K - 273}{100} = \frac{^{\circ}F - 32}{180}$$

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

$$^{\circ}F = \frac{9}{5} ^{\circ}C + 32 \quad \dots\dots\dots (5)$$

أو

$$^{\circ}C = \frac{5}{9} (^{\circ}F - 32) \quad \dots\dots\dots (6)$$

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

$$K = ^{\circ}C + 273 \quad \dots\dots\dots (7)$$

أو

$$^{\circ}C = K - 273 \quad \dots\dots\dots (8)$$

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

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

أو

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

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 حرارتها وتنكمش بانخفاض درجة حرارتها (عدا بعض الاستثناءات مثل الماء الذي يتقلص حجمه عند رفع درجة حرارته من 0°C إلى 4°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 Linear Expansion α

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_0) ومقدار التغير في درجة حرارتها (ΔT), أي ان

$$\Delta L \propto L_0 \Delta T$$

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T \quad \dots\dots\dots (11)$$

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 إعادة كتابة المعادلة (11) بالصيغة الآتية:

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

$$\Delta L = L - L_0 \quad \text{وبما ان}$$

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

$$L = L_0 (1 + \alpha \Delta T) \quad \dots\dots\dots (12)$$

ان وحدة معامل التمدد الطولي هي مقلوب درجة الحرارة, أي K^{-1} أو $^{\circ}C^{-1}$ أو $^{\circ}F^{-1}$ وذلك نتيجة لاختصار وحدات الطول مع بعضها.

ان قيمة معامل التمدد الطولي تعتمد على نوع المادة المستخدمة, وان قيمتها ليست ثابتة تماماً, ولكنها تتغير بصورة 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 $\times 10^{-6} / ^{\circ}C$	المادة	معامل التمدد الطولي $\times 10^{-6} / ^{\circ}C$
النحاس	17	الزجاج المقام للحرارة	3.2
الالمنيوم	23	(بايركس)	
الفضة	20	الماس	0.50
الحديد	12	المطاط الصلب	80
البرونز	19	الكونكريت (المخرسانة)	7 – 12
الزجاج العادي	6 – 9	الرصاص	29
الحديد (الستيل)	12	الجليد	51

التمدد السطحي Surface Expansion β

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:

$$\beta = \frac{\Delta A / A_0}{\Delta T} \quad \dots\dots\dots (13)$$

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

$$A = A_0 (1 + \beta \Delta T) \quad \dots\dots\dots (14)$$

حيث تمثل A_0 و A المساحة الأصلية والمساحة الجديدة عند درجتا الحرارة T_0 و T على التعاقب, ان وحدة β هي K^{-1} أو $^{\circ}C^{-1}$ أو $^{\circ}F^{-1}$, وذلك لاختصار وحدتي المساحة. ويمكن البرهنة على ان معامل التمدد السطحي يساوي تقريباً ضعف معامل التمدد الطولي للمادة نفسها أي ان:

$$\beta \cong 2 \alpha \quad \dots\dots\dots (15)$$

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 Volume Expansion γ

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:

$$\gamma = \frac{\Delta V / V_0}{\Delta T} \dots\dots\dots (16)$$

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

$$V = V_0 (1 + \gamma \Delta T) \dots\dots\dots (17)$$

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

$$\gamma \cong 3 \alpha \dots\dots\dots (18)$$

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 $\times 10^{-4} / ^\circ \text{C}$
الجليد	0.5
الماء	2.1
الزئبق	1.8
الكحول الانيلي	11
الكلسرين	5.1
الزجاج (الاعتيادي)	0.2
الزجاج (البيركس)	0.09

تمدد السوائل Expansion of Liquids

من المعروف ان السوائل (الموائع بصورة عامة) لا تمتلك شكلاً 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

$$\psi = \frac{\Delta V / V_0}{\Delta T} \dots\dots\dots (19)$$

إذ ان V_0 تمثل حجم السائل الأصلي و ΔV تمثل مقدار التغير في حجم السائل الناتج عن تغير في درجة حرارته مقداره ΔT . ان قيمة ψ لا تتأثر كثيراً بتغير درجة الحرارة.

يزداد حجم السوائل بصورة عامة إذا ارتفعت درجة حرارتها, ويشذ عن هذه القاعدة بعض السوائل مثل الماء الذي يقل حجمه (ينكمش) إذا ارتفعت درجة حرارته من 0°C إلى 4°C . أما بعد هذه الدرجة الحرارية فان الماء يسلك سلوكاً طبيعياً كبقية السوائل, أي يزداد حجمة بزيادة درجة حرارته.

تمدد الغازات Expansion of Gases ϕ

يتغير حجم الغاز تغيراً كبيراً إذا تغيرت درجة حرارته عند ثبوت الضغط المسلط عليه, ان قيمة معامل التمدد الحجمي للغازات تكاد تكون ثابتة تقريباً. ان قيمة معامل التمدد الحجمي لغاز الهيدروجين تساوي (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:

$$\phi = \frac{\Delta V / V_0}{\Delta T}$$

إذ ان V_0 تمثل حجم كتلة معينة من غاز عند درجة حرارة 0°C . ان الإشارة إلى حجم الغاز عند درجة حرارة 0°C ضروري 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:

$$V_2 = V_1 [1 + \phi (T_2 - T_1)] \quad \text{لا تصح}$$

بل يجب ان يشار إلى ان القيم V_1 و V_2 نسبة إلى الحجم V_0 عند درجة حرارة 0°C , وكما يأتي:

$$V_2 = V_0 (1 + \phi T_2)$$

$$V_1 = V_0 (1 + \phi T_1)$$

وبقسمة المعادلة الأولى على الثانية نحصل على المعادلة الآتية:

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

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 ضغط ثابت, يزداد بنسبة ثابتة تعادل $(1/273)$ من حجمة عند درجة حرارة 0°C لكل زيادة في درجة حرارته مقدارها درجة حرارية واحدة

ان هذا القانون يعني ان حجم الغاز سيصبح صفراً عند درجة حرارة -273°C . إلا ان جميع الغازات تتحول إلى الحالة السائلة لها قبل الوصول إلى درجة حرارة حرارة -273°C (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.

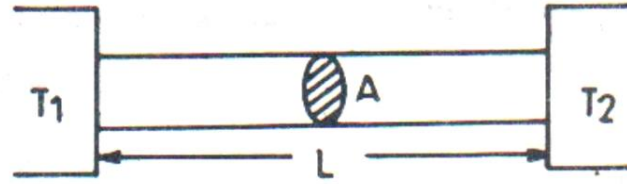
طريقة التوصيل Conduction Method

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 حرارتهما 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 اكبر 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 التوصيلية الكهربائية موصلات حرارية جيدة لان

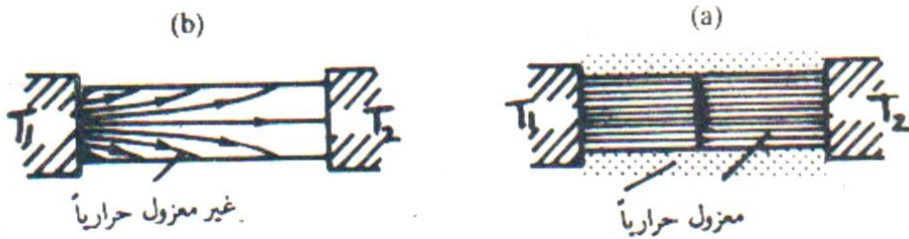
الكثرونات التكافؤ تتحرك بحرية تامة تقريباً خلال المعدن حاملة معها الحرارة إلى أجزاء المعدن المختلفة.

الميل الحراري Temperature gradient

يعرف الميل الحراري على انه تغير درجة الحرارة مع تغير المسافة على طول الجسم. نأخذ قضيباً معدنياً طوله (L) ومساحة مقطعه العرضي (A) ودرجة حرارته (T), متصلاً بجهازين (خزانين) درجتا حرارتهما T_1 و T_2 (افرض ان $T_2 < T_1$) كما هو موضح في الشكل (5), وكما هو معلوم بأن الحرارة تنساب من الطرف الساخن إلى الطرف البارد, إلا ان شكل خطوط انتقال الحرارة خلال المادة يعتمد أساساً على طريقة العزل الحراري للمادة. فعندما يغلف القضيب بمادة عازلة للحرارة, نرى ان خطوط انتقال الحرارة تكون بصورة مستقيمة ومنتظمة وكما هو مبين في الشكل (6a). أما في حالة عدم عزل القضيب حرارياً فان خطوط انتقال الحرارة تسلك مسارات غير منتظمة وكما هو مبين في الشكل (6b).

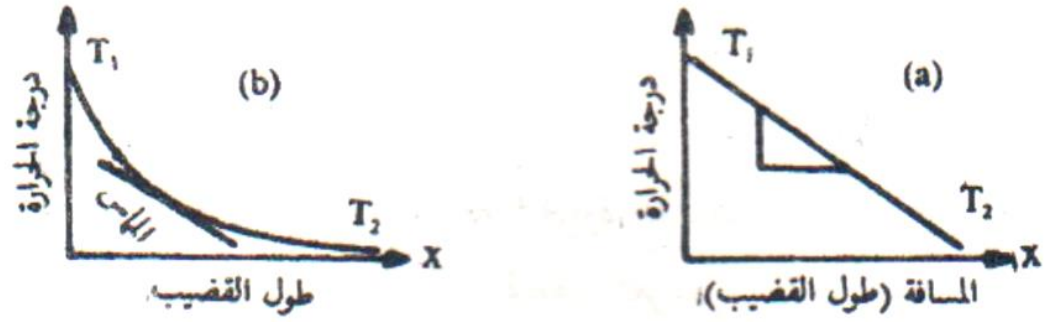


الشكل (5) الميل الحراري



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 تسمى الحالة الثابتة (أو المستقرة) steady state. يبين الشكل (7) العلاقة بين درجات الحرارة المقاسة عند مسافات مختلفة على القضيب في الحالتين سواء كان معزولاً أم غير معزول.



الشكل (7) العلاقة بين درجة الحرارة والمسافة

ان ميل الخط المستقيم في شكل (7a) وميل المماس في شكل (7b) يمثلان تدرج درجة الحرارة Temperature gradient الذي عرفناه سابقاً على انه تغير 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 $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ أو $^{\circ}\text{C}/\text{cm}$. تنتقل الحرارة دائماً من الجزء الساخن إلى الجزء الأقل سخونة (البارد)، ويعرف التيار الحراري Thermal Current على انه كمية الحرارة (dQ) المنتقلة أو العابرة لمقطع في المادة خلال فترة زمنية (dt)، أي ان

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

ووحده هي J/s أو cal/s .

معامل التوصيل الحراري (K_L)

لقد وجد عملياً (تجريبياً) ان التيار الحراري $(\frac{dQ}{dt})$ يتناسب طردياً مع

مساحة المقطع العرضي وتدرج درجة الحرارة $(\frac{\Delta T}{\Delta x})$ ، أي أن

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

أو

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

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:

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

ويسمى هذا القانون أحياناً 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.

K_L (cal/cm,sec,°C)	المادة	K_L (cal/cm,sec °C)	المادة
0.0005	المطاط	1.006	الفضة
0.0005	ورق اميستوس	0.918	النحاس
0.004	الجليد	0.50	الالمنيوم
0.0001	الفلين	0.25	البرونز (النحاس الاصفر)
0.00006	الهواء	0.0025	الزجاج
0.00004	الاركون	0.12	الفولاذ
0.000034	الهيليوم	0.0013	الماء

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 بواسطة 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) ليمتزج 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 الاضطرابي Forced Convection Current إذا كان ناتجاً عن تأثير اصطناعي كاستخدام المروحة أو المضخة أو غيرها.

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

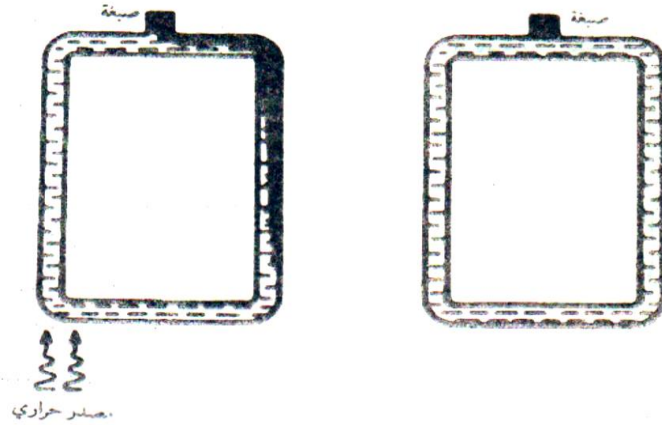
ان دراسة الحمل بطريقة المعادلات الرياضية ليس شيئاً سهلاً وذلك يرجع إلى ان فقدان واكتساب الحرارة من الأجسام الملامسة للمائع (غاز أو سائل) عملية معقدة رياضياً وتعتمد على كثير من العوامل مثل شكل السطح وكثافة المائع ولزوجته وعلى عوامل أخرى. ويتم أحياناً تعريف

معامل الحمل الحراري (h) Thermal Convection Coefficient حسب المعادلة الآتية:

$$h = \frac{H_c}{A \Delta T} \dots\dots\dots (23)$$

إذ تمثل H_c تيار الحمل الحراري و A المساحة و ΔT الفرق بين درجة حرارة السطح 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 احد الأنبوبتين بالطريقة المبينة في الشكل (8) نجد ان السائل سيبدأ بالانسياب والدوران داخل الأنبوبة, حاملاً معه الصبغة, وبعد فترة من الزمن نجد ان الصبغة قد انتشرت في جميع أنحاء السائل, مما يدل على انتقال جزيئات السائل خلال الأنبوبة ودورانها خلالها. ان سبب هذه الحركة يعود إلى تمدد السائل (تقل كثافته) عند التسخين فيصبح اخف من باقي السائل, ولهذا فانه يحدث اختلال توازن الضغط بين العمودين الأيسر والأيمن, فيرتفع السائل في الطرف الساخن وينخفض السائل في الطرف الأقل حرارة مؤدياً إلى انسياب السائل ودورانه وبذلك تنتقل الحرارة خلال حركة السائل إلى الأماكن البعيدة من المصدر الحراري, والشئ نفسه يحدث في انتقال الحرارة خلال الغاز أو الهواء. واعتماداً على طريقة انتقال الحرارة بالحمل تُصمم 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 أيضاً 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

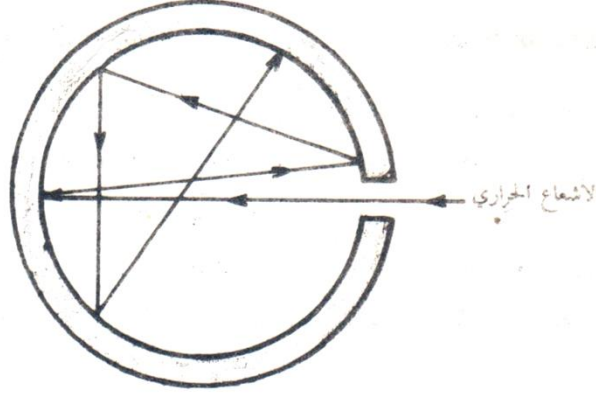
$$a + r = 1 \quad \dots\dots\dots (24)$$

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 (a) وفي حالة التوازن يكون:

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

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 الآتية:

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

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

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

أو

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

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

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

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

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:

$$\Delta Q = \sigma A (- T_2^4) t T_1^4 \quad \dots\dots\dots (28)$$

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 كلفينية (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 فتتخفض 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
الأكسجين	-118	50.1
النيتروجين	-146	12.8
الهيدروجين	-240	12.8
الهيليوم	-269	2.26

وباستخدام هذه الطريقة (التبريد وتسييل الضغط) جرى تسييل غازات الأكسجين والنيتروجين والهيدروجين والهيليوم. يملك غاز الهيليوم أقل 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 والكلفينية، 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 أولاً ثم القيام بعملية تسييله ثانياً، أي يمكن الاستعانة بسائل الأكسجين (-183°C) في تبريد غاز النيتروجين إلى درجة حرارة (-183°C) قبل القيام بعملية تحويله إلى سائل (-196°C)، ويستعان كذلك بسائل النيتروجين في تبريد غازات الهيدروجين والهيليوم 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)	
النيتروجين	-196 (77K)	-210
الهيدروجين	-253 (20.4 K)	-259
الأكسجين	-183 (90 K)	-218