



جامعة بغداد

كلية التربية للعلوم الصرفة / ابن الهيثم

قسم الفيزياء / المرحلة الاولى

العام الدراسي 2019 - 2020

محاضرات موضوع

الحرارة

أ.د. خالد هلال

م.د. طاهر حمد

أ.م.د. عبد الحميد رحيم

م.د. عدي طارق صبحي

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 ابسط 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. ويعبّر 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 بالمحارير 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 الآتية 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:

$$T = aX \dots\dots\dots (1)$$

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- ان النسبة بين أية درجتين حراريتين تساوي النسبة بين قيمتي الخاصية الفيزيائية عند تلكما الدرجتين الحراريتين, وبتعبير آخر فإن

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

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 وخاصة محرارية معينة ليس بالضرورة ان تكون متطابقة مع قيم درجات الحرارة المتأتية من مقياس آخر يعتمد على مادة أخرى وخاصة 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:

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

أن عملية تدرج 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 $\epsilon_0, R_0, V_0, P_0, L_0$ تمثل قيم الخصائصية المعنوية 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 مديات مختلفة لدرجات, مثلاً بين 0.1K إلى 20K . أما لدرجات الحرارة الأقل من 1K فغالباً ما تستخدم 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 رئيسة 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 انه 0°C ثم يهبط خليط البخار والماء ويوضع المحرار داخله فيرتفع مستوى الزئبق ويستقر عند مستوى معين, يؤشر هذا المستوى على انه 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 اجل الحصول على الدرجات الحرارية الأقل من 0°C , وبعد النقطة 100°C للحصول على الدرجات الحرارية الواقعة بعد 100°C .

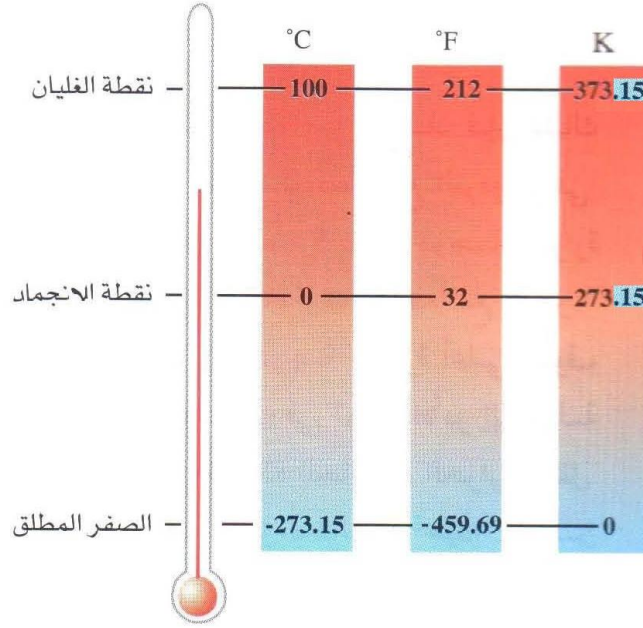
المقياس الفهرنهايتي ($^{\circ}\text{F}$) The Fahrenheit Scale

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 فهرنهايتية (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 للأساس 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 إلى 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 متساوٍ, 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 العادلات الآتية:

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

أو

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

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 تقادي 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) والناجمة 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 لو حدة 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

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

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:

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

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 (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:

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

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

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

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

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

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 $\times 10^{-4}/C$
الجليد	0.5
الماء	2.1
الزئبق	1.8
الكحول الايثيلي	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 γ يساوي

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

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 (ϕ) Expansion of Gases

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 درجتى 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 أن معامل التمدد الحجمي للغاز يكافئ تقريباً $(1/273)$. وهو ما يعرف بقانون جارلس الذي ينص على: أن 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

أن هذا القانون يعني أن حجم الغاز سيصبح صفراً عند درجة حرارة -273°C . إلا أن جميع الغازات تتحول إلى الحالة السائلة لها قبل الوصول إلى درجة حرارة -273°C (أي درجة حرارة الصفر المطلق). وهذا يعني أن قانون جارلس لا يصح تطبيقه عند درجات الحرارة الواطئة.

آليات انتقال الحرارة

تنتقل الحرارة من مكان إلى آخر بأحد الطرق الرئيسية 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 فإن 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 أن تسخن (ترفع) درجة حرارة الفضاء الذي تمر خلاله. ومن المفيد أن نذكر أن مصطلح الإشعاع الحراري يقصد به (في الغالب) الأشعة 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 فإن جزءاً من الطاقة المشعة سيمتص وسيعمل على رفع درجة حرارة المادة، كما يحدث عند مرور الأشعة الكهرومغناطيسية خلال جو الأرض. وسنتطرق إلى طرق انتقال الحرارة بشيء من التفصيل في الفقرات اللاحقة.

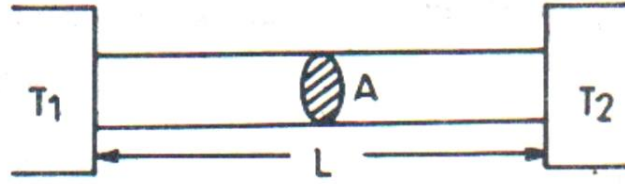
طريقة التوصيل Conduction Method

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.

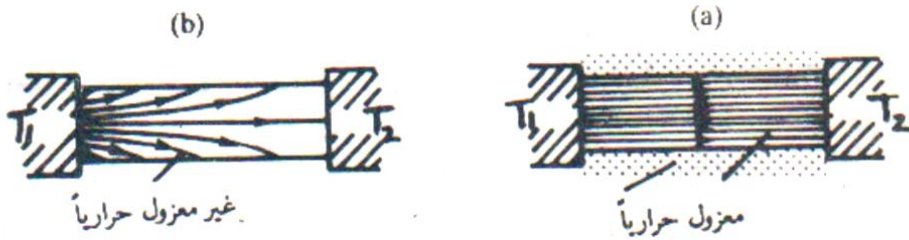
الميل الحراري Temperature gradient

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).

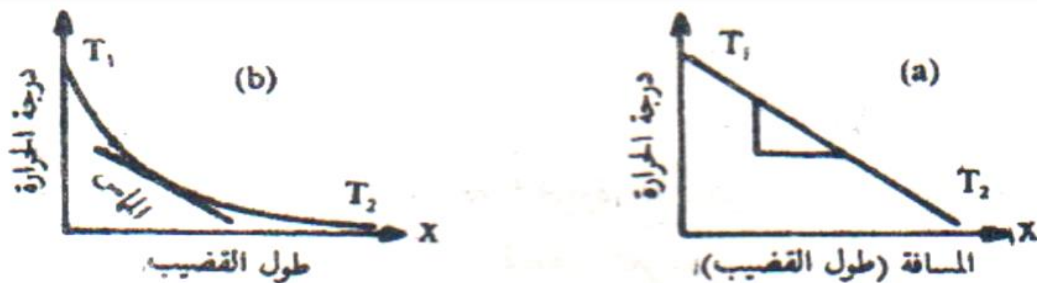


الشكل (5) الميل الحراري



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 مغزولاً أم غير مغزول.



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 °C/m أو °C/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

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

ووحدته 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 لوحد 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 أحيانا بقانون فوريير (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	الالنيوم
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 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) لتمتد 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 فإنه 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.

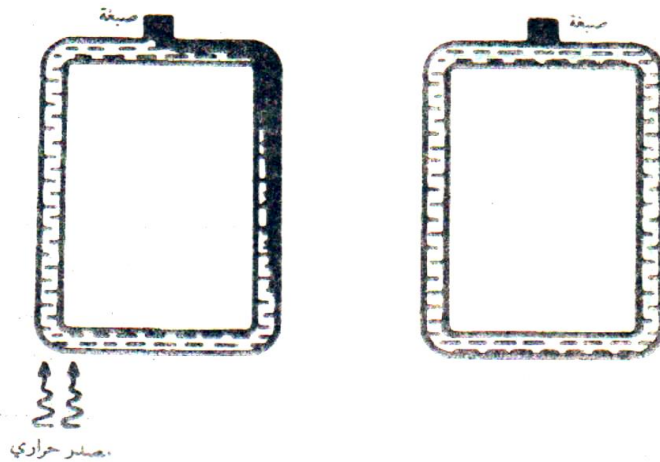
وتعد طريقة الحمل من الطرق الفعالة لانتقال الحرارة وتشكيل تيارات الحمل الهوائية في المناطق الساحلية والجبلية وعند خط الاستواء والقطبين وفي المناطق المدارية.

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 Thermal Convection Coefficient (h) 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 نهايتهما 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

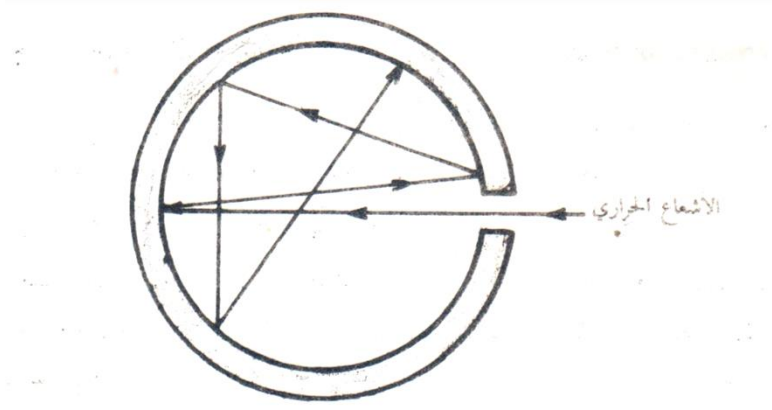
يتم انتقال الحرارة خلال الفضاء بطريقة الإشعاع. ويقصد بالإشعاع أيضاً الانبعاث المتواصل للطاقة من سطوح الأجسام المختلفة إلى الأجسام الأخرى الأقل درجة حرارية ويجب ملاحظة ان الإشعاع الحراري ما هو إلا طاقة كهرومغناطيسية تنبعث من الأجسام الساخنة وتنتقل بسرعة الضوء خلال الفضاء. فينعكس جزء من هذه الطاقة ويمتص الجزء الآخر من قبل الأجسام التي تسقط عليها. ان امتصاص الاشعة الكهرومغناطيسية يؤدي إلى تحويلها إلى طاقة حرارية وسترتفع حرارة الجسم. ان الحرارة التي تصل إلى الأرض والكواكب الأخرى من الشمس بواسطة 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 (r) 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 الكلفينية 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:

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

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:

$$\Delta Q = \sigma A (T_1^4 - T_0^4) t$$

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 الكلفينية 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 الثلجات ومكيفات الهواء هي استخدام الضغط في درجة الحرارة الاعتيادية فقط, حيث تكبس غازات مثل الامونيا والفيرون 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, وتتشترك 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 أقل 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 أقل قيمة للضغط اللازم لتسليطة 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
النترجين	-146	12.8
الهيدروجين	-240	12.8
الهيليوم	-269	2.26

وباستخدام هذه الطريقة (التبريد وتسلط الضغط) جرى تسيل غازات الأكسجين والنترجين والهيدروجين والهيليوم. يملك غاز الهيليوم أقل درجة تسيل من بين جميع الغازات. ان درجة حرارة غليان سائل الهيليوم تحت الضغط الجوي الاعتيادي تساوي 4.2K. الجدول (6) يبين درجة حرارة غليان بعض سائل الغازات بالدرجات السيليزية والكلفنية, وكما يبين أيضا درجة حرارة انجماد سائل الغازات المذكورة.

وغالباً ما يستعان بسائل الغاز ذي درجة حرارة الغليان العالية في تبريد الغاز ذي درجة حرارة الغليان الأقل أولاً ثم القيام بعملية تسيله ثانياً, أي يمكن الاستعانة بسائل الأكسجين (-183°C) في تبريد غاز النترجين إلى درجة حرارة (-183°C) قبل القيام بعملية تحويله إلى سائل (-196°C), ويستعان كذلك بسائل النترجين في تبريد غازات الهيدروجين والهيليوم قبل عملية تحويلها إلى سائل الهيدروجين (-253°C) وسائل الهيليوم (-269°C).

الجدول (6) درجات غليان وانجماد سائل الغازات المعروفة

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

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 :

أولاً : باستخدام المعادلة الآتية:

$$^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5} ^{\circ}\text{C} + 32$$

نحصل على

$$\begin{aligned} ^{\circ}\text{F} &= \frac{9}{5} 70 + 32 \\ &= 158 ^{\circ}\text{F} \end{aligned}$$

وباستخدام المعادلة الآتية:

$$\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273$$

نحصل على

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

ثانياً : باستخدام المعادلة الآتية:

$$^{\circ}\text{C} = \text{K} - 273$$

نحصل على

$$^{\circ}\text{C} = 150 - 273 = -123 ^{\circ}\text{C}$$

وباستخدام المعادلة الآتية:

$$^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5} ^{\circ}\text{C} + 32$$

نحصل على

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

$$^{\circ}\text{F} = -189.4 ^{\circ}\text{F}$$

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

الحل :

باستخدام المعادلة الآتية :

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

وبما ان $(^{\circ}\text{F} = ^{\circ}\text{C})$ فان :

$$9 ^{\circ}\text{F} = 5 ^{\circ}\text{F} - 160$$

$$9 ^{\circ}\text{F} - 5 ^{\circ}\text{F} = -160$$

$$4 ^{\circ}\text{F} = -160$$

$$^{\circ}\text{F} = \frac{-160}{4}$$

$$^{\circ}\text{F} = ^{\circ}\text{C} = -40$$

وعليه فان درجتى حرارة $(-40 ^{\circ}\text{C})$ و $(-40 ^{\circ}\text{F})$ متكافئتان .

س3 : يمكن التعبير عن العلاقة بين الدرجة السليزية والدرجة الفهرنهايتية كما في المعادلة

$$\text{الآتية } (^{\circ}\text{C} = a ^{\circ}\text{F} + b) \text{ جد قيم الثوابت } a \text{ و } b .$$

الحل :

درجة حرارة انجماد الماء تحت الظروف الاعتيادية تساوي 0°C وتساوي 32°F .

درجة حرارة غليان الماء تحت الظروف الاعتيادية تساوي 100°C وتساوي 212°F

بما ان

$$^{\circ}\text{C} = a ^{\circ}\text{F} + b$$

حيث ان a و b كميتان ثابتتان يراد تحديد قيمتهما.

نعوض عن درجة انجماد و غليان الماء في المعادلة أعلاه فنحصل على:

$$0 = 32a + b \quad \dots\dots\dots (1) \quad \text{درجة انجماد الماء}$$

$$100 = 212a + b \quad \dots\dots\dots (2) \quad \text{درجة غليان الماء}$$

ب طرح المعادلة (1) من المعادلة (2) نحصل على

$$100 = 180a$$

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

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

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

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

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

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

س4 : جد مقدار التغير في طول قضيب من النحاس طوله 0.8 m إذا تغيرت درجة

حرارته من 15°C إلى 35°C. علماً أن قيمة معامل التمدد الطولي للنحاس يساوي

$$. 17 \times 10^{-6} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$$

الحل :

$$L_0 = 0.8 \text{ m}$$

بما ان

$$\Delta T = 35 - 15 = 20 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

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

$$\Delta L = L - L_0 = \alpha L_0 \Delta T$$

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

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

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

الحل :

بما ان

$$L_0 = 2.5 \text{ m}$$

$$\Delta T = 25 - 15 = 10 \text{ } ^\circ\text{C}$$

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

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$

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

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

$$\Delta L = 0.425 \text{ mm}$$

مقدار الزيادة في الطول

س6: جد مقدار التمدد الطولي لسطح من الخرسانة طوله 20 m عندما تغيرت درجة حرارة الجو من 0°F إلى 113°F . علماً ان قيمة معامل التمدد الطولي للخرسانة تساوي $12 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

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

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

$$^\circ\text{C} = \frac{5}{9} (0 - 32)$$

$$^\circ\text{C} = -17.77 \text{ } ^\circ\text{C} = T_1$$

وكذلك

$$^\circ\text{C} = \frac{5}{9} (113 - 32)$$

$$^{\circ}\text{C} = 45^{\circ}\text{C} = T_2$$

$$\Delta T = T_2 - T_1 = 45 - (-17.77) = 62.77^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$

$$= 12 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} \times 20 \text{ m} \times 62.77^{\circ}\text{C}$$

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

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

الحل :

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

$$\Delta T = 65^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C} = 40^{\circ}\text{C}$$

:

أما التغير في حجم الوعاء الزجاجي فانه يساوي:

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

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

$$= 0.09 \text{ cm}^3$$

التغير في حجم الماء ΔV_w سيكون مساوياً الى :

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

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

وعليه فان حجم الماء المسكوب سيكون مساوياً الى:

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

$$= 2.01 \text{cm}^3$$

س8: قضيب 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 القضيب خلال زمن مقدارة 10 min ؟ علماً بان الموصلية الحرارية تساوي 0.2 cal/cm.s.°C .

الحل:

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

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

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

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

الحل:

يمكن إيجاد الانحدار الحراري من المعادلة الآتية:

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

$$\frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{0^\circ\text{C} - 100^\circ\text{C}}{150 \text{ cm}}$$

$$\frac{\Delta T}{\Delta x} = -0.666 \text{ }^\circ\text{C/cm}$$

الإشارة السالبة تعني ان درجة الحرارة تقل كلما ازدادت المسافة.

الفصل الثاني

الحرارة والقانون الأول للثرموداينمك

يتناول هذا الفصل دراسة كيفية إيجاد كمية الحرارة التي تفقدها أو تكسبها المادة خلال عمليات التسخين أو التبريد أو خلال عمليات التحول في حالة المادة. ويضم هذا الفصل دراسة الحرارة النوعية للمواد وطرائق قياسها, كما يتضمن هذا الفصل القانون الأول للثرموداينمك وتطبيقاته.

الحرارة وتأثيراتها

إن عملية رفع درجة حرارة المادة يعني تزويدها بالطاقة الحرارية, اما عملية خفض درجة الحرارة المادة فتعني سحب مقدار من الطاقة الحرارية. ان كمية الطاقة التي يجب تجهيزها أو سحبها من المادة تعتمد على عدة عوامل منها:

1- كتلة المادة.

2- مقدار الارتفاع أو الانخفاض (مقدار التغير) في درجة حرارة المادة.

3- الحرارة النوعية للمادة.

أما في عمليات الغليان والانصهار والتسامي التي تمر بها المواد, فان كمية من الطاقة الحرارية سوف تمتص من دون ان تسبب أية زيادة في درجة حرارة المادة. وفي حالة عمليات التكاثف والانجماد فان مقداراً من الطاقة الحرارية سوف يتحرر مع بقاء درجة حرارة المادة ثابتة.

ومن خلال دراسة عمليات التسخين والتبريد والعمليات التي تمر بها المادة كالغليان والانصهار والتكاثف والتسامي والانجماد يمكن استنتاج بعض النقاط المهمة:

1- تقوم الطاقة الحرارية المزودة للمادة بزيادة الطاقة الحركية أو الاهتزازية لذرات أو جزيئات المادة مما يؤدي الى رفع درجة حرارتها, والعكس صحيح. مع ملاحظة ان المادة تبقى محافظة على حالتها سواء كانت صلبة أم سائلة أم غازية.

2- ان امتصاص أو تحرير الطاقة الحرارية خلال عمليات الغليان والانصهار والتسامي والتكاثف والانجماد لا يؤدي الى زيادة أو خفض درجة حرارة المادة, بل ان درجة الحرارة تبقى ثابتة طيلة فترة عملية التحول في حالة المادة. ان الطاقة الحرارية التي تمتصها المادة تستخدم في تليين أو تكسر الأواصر التي تربط بين ذرات أو جزيئات المادة. ويحدث العكس عند تكوين وبناء هذه الأواصر.

كمية الحرارة (Q)

باستخدام قانون حفظ الطاقة يمكن تحديد كمية الحرارة (Q) التي تكتسبها أو تفقدها المادة وذلك باستخدام العلاقة الآتية:

$$\text{كمية الحرارة المفقودة} = \text{كمية الحرارة المكتسبة}$$

وهناك بعض النقاط المهمة التي يجب مراعاتها عند القيام بعملية حساب كمية الحرارة المفقودة أو المكتسبة من قبل المادة في الحالات الآتية.

الحالة الأولى: حالة تغير درجة حرارة المادة

ان كمية الحرارة (Q) التي تكتسبها المادة أو تفقدها خلال عمليات التسخين أو التبريد لغرض رفع أو خفض درجة حرارتها فقط من دون حصول عملية تغير في حالة المادة تعطى بالعلاقة الآتية:

$$Q = mC \Delta T \quad \dots\dots\dots (1)$$

إذ ان:

m تمثل كتلة المادة , C تمثل الحرارة النوعية للمادة , ΔT مقدار التغير في درجة حرارتها

الحالة الثانية: حالة تغير حالة المادة

ان كمية الحرارة (Q) التي يجب تزويدها للمادة خلال عمليات تحول حالة المادة كالغليان أو الانصهار أو التسامي أو الانجماد أو التكاثف من دون ان تسبب زيادة أو نقصان في درجة حرارة المادة تعطى بالعلاقة الآتية:

$$Q = mL \quad \dots\dots\dots (2)$$

إذ ان: L تمثل الحرارة الكامنة للانصهار أو الانجماد أو التكاثف أو التسامي.

الحالة الثالثة: حالة تغير طبيعة أو تركيب المادة

وتشمل هذه الحالة حالات التغير المغناطيسية أو الكهربائية أو تغيرات تركيب المادة والتي تحدث عند تغير درجة حرارة المادة.

المكافئ الميكانيكي للحرارة (J)

الحرارة هي شكل من أشكال الطاقة وتقاس بوحدة السعرة (calori) أو الكيلو سعرة (Kcalori). ويمكن تحويل الحرارة الى شغل ميكانيكي وبالعكس ومن تطبيقات تحويل الحرارة الى شغل الماكينة البخارية. ان عامل التحول بين الطاقة الحرارية والطاقة الميكانيكية يسمى بالمكافئ الميكانيكي (J). ومن التجارب المشهورة في قياس هذه الكمية تجربة العالم جول الذي أوجد العلاقة بين الشغل (W) والطاقة الحرارية (Q) وحسب المعادلة الآتية:

$$W = J Q \quad \dots\dots\dots (3)$$

أي أن الطاقة الميكانيكية يمكن ان تتحول الى طاقة حرارية وبالعكس وان أفضل قيمة لمكافئ التحول (J) هي

$$1\text{cal} = 4.186 \text{ J}$$

$$1\text{Kcal} = 4186 \text{ J}$$

الحرارة النوعية للمواد (C)

يطلق على السعة الحرارية النوعية بالحرارة النوعية وهي كمية الحرارة التي يجب ان تناسب الى أو من وحدة الكتلة من المادة لتغيير درجة حرارتها بمقدار درجة واحدة. ويرمز لها بالرمز (C) ويعبر عنها رياضياً من خلال المعادلة الآتية:

$$C = \frac{\Delta Q}{m \Delta T} \quad \dots\dots\dots (4)$$

إذ إن:

(ΔQ) تمثل كمية الحرارة التي تزود بها كتلة مقدارها (m) من المادة تتغير درجة حرارتها بمقدار (ΔT) درجة حرارية.

وتقاس الحرارة النوعية بوحدة (J / Kg.K), أو (J / g.K), أو (J / mole.K), أو (cal / g.K).

وتعتمد الحرارة النوعية للمادة اعتماداً كبيراً على درجة الحرارة, وعلية يجب ذكر درجة الحرارة عند اعطاء قيمة الحرارة النوعية لمادة ما. حيث ان الحرارة النوعية للماء عند درجة حرارة الغرفة تساوي تقريباً (4.2×10^3 J / Kg.K).

تتناقص السعة الحرارية والحرارة النوعية لجميع المواد بانخفاض درجة الحرارة وتصل الى قيمة الصفر عند درجة حرارة الصفر المطلق وتعرف السعة الحرارية على انها كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة مادة ما درجة حرارية واحدة وتقاس بوحدة (J / K).

وترتبط السعة الحرارية للمادة مع الحرارة النوعية لها بالعلاقة الآتية:

$$\text{السعة الحرارية} = \text{الكتلة} \times \text{الحرارة النوعية}$$

يمكن إيجاد كمية الحرارة (Q) التي يزود بها جسم ذات كتلة مقدارها (m) وحرارة نوعية (C) لأجل رفع درجة حرارتها من T_1 الى T_2 وفق العلاقة الآتية:

$$Q = mC (T_2 - T_1) \dots\dots\dots (5)$$

تستخدم هذه العلاقة ايضاً لإيجاد كمية الحرارة التي يحررها جسم كتلته m وحرارته النوعية C عندما تنخفض درجة حرارته من T_2 الى T_1 .

قياس الحرارة النوعية

هناك عدة طرق لقياس الحرارة النوعية والتي تختلف فيما بينها باختلاف مديات درجات الحرارة الواطنة أو العالية جداً ومن هذه الطرق ما يأتي:

1- الطريقة الكهربائية لقياس الحرارة النوعية للمواد الصلبة

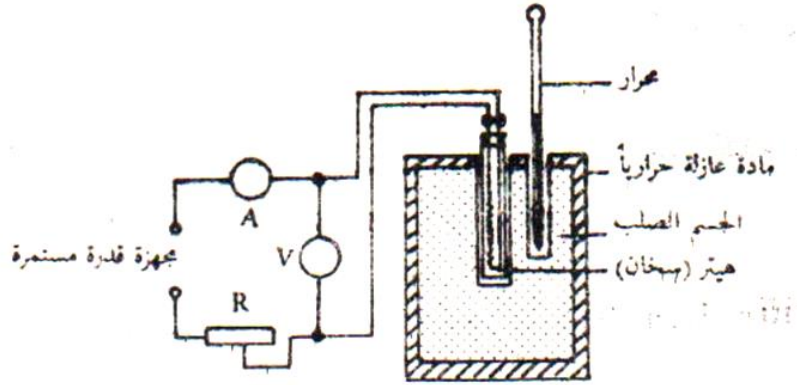
تستخدم هذه الطريقة لقياس الحرارة النوعية للمواد الصلبة الجيدة التوصيل للحرارة كالحاس والألمنيوم. إذ تؤخذ قطعة منتظمة الشكل تحتوي على ثقب يثبت فيه سخان كهربائي (هيتز) ومجس حراري (ثرموميتر). تقاس كتلة المادة ودرجة حرارتها الابتدائية، ثم تحاط القطعة المعدنية بمادة عازلة كالصوف الطبيعي أو الاصطناعي أو البولستيرين ويمرر خلال السخان تيار كهربائي (I) مناسب وتحسب مدة مرور التيار باستخدام ساعة توقيت وتسجل ايضاً قراءات الفولتميتر (V) والأميتر (I). عندما ترتفع درجة الحرارة بمقدار مناسب عشر درجات مثلاً يوقف مرور التيار وساعة التوقيت في الوقت نفسه وتسجل أعلى قراءة يصلها المحرار. فإذا فرضنا ان الطاقة الحرارية المتسربة الى المحيط تساوي صفراً، فإن

الطاقة الكهربائية التي يزود بها السخان = الطاقة الحرارية التي تزود بها القطعة المعدنية

$$mC (T_2 - T_1) = V I t$$

$$C = \frac{V I t}{m (T_2 - T_1)} \dots\dots\dots (6)$$

فإذا كانت قيمة التيار بالأمبير والفولتية بالفولت والزمن بالثانية ودرجة الحرارة بالدرجة الكلفينية والكتلة بالغرام فان وحدة الحرارة النوعية هي الجول لكل غرام لكل درجة كلفينية. الشكل (1) يوضح الطريقة الكهربائية لقياس الحرارة النوعية للمواد الصلبة.



الشكل (1) يوضح الطريقة الكهربائية لقياس الحرارة النوعية للمواد الصلبة.

2- الطريقة الكهربائية لقياس الحرارة النوعية للمواد السائلة

وهي تشبه الى حد كبير طريقة قياس الحرارة النوعية للمواد الصلبة حيث يستخدم وعاء معدني كمسعر حراري يوضع فيه السائل والسخان الكهربائي والمجس الحراري , يحرك السائل باستمرار خلال فترة مرور التيار الكهربائي. حيث يتم إيجاد قيم كتلة السائل (m) وكتلة المسعر (m_c) ودرجة الحرارة الابتدائية (T₁) والنهائية (T₂) وقيم الفولتية (V) والتيار (I) والزمن (t). وهنا يجب ان تكون قيمة الحرارة النوعية للمسعر والمحرك معلومة, ويمكن استخدام المعادلة الآتية:

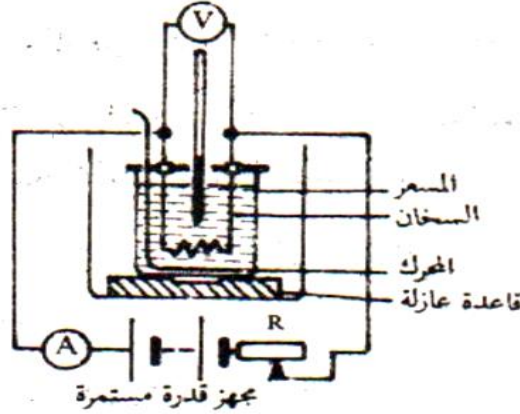
الطاقة التي يزود بها السخان = الطاقة التي اكتسبها السائل + الطاقة التي اكتسبها المسعر والمحرك

$$mC (T_2 - T_1) + m_c C_c (T_2 - T_1) = V I t$$

$$mC (T_2 - T_1) = V I t - m_c C_c (T_2 - T_1)$$

$$C = \frac{V I t - m_c C_c (T_2 - T_1)}{m (T_2 - T_1)} \dots\dots\dots (7)$$

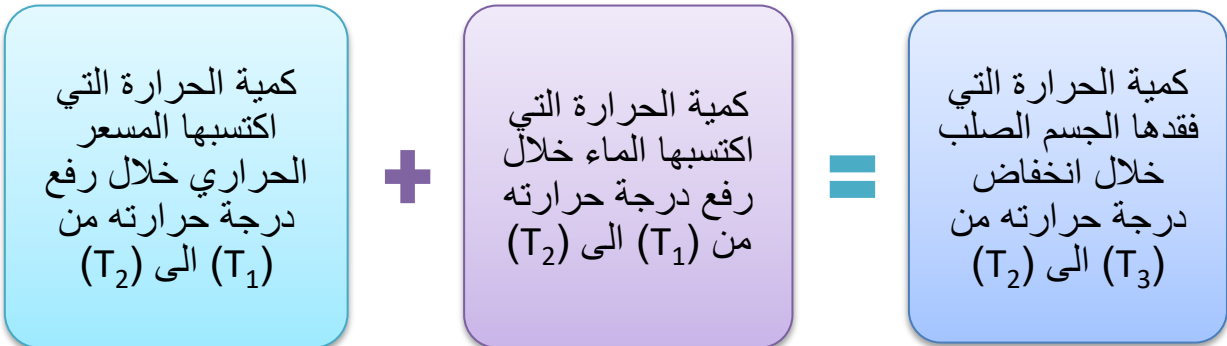
والشكل (2) يوضح الطريقة الكهربائية لقياس الحرارة النوعية للمواد السائلة.



الشكل (2) يوضح الطريقة الكهربائية لقياس الحرارة النوعية للمواد السائلة

3- طريقة الخلط لإيجاد الحرارة النوعية للمواد الصلبة

في هذه الطريقة يتم إيجاد كتلة الجسم الصلب المراد إيجاد حرارته النوعية, ثم يعلق بخيط ويوضع في ماء يغلي لمدة معينة (عشر دقائق مثلاً), إذ تصبح درجة حرارته (T_3) مساوية الى (100°C) , وبعدها ينقل بسرعة الى مسعر حراري كتلة (m_c) يحتوي على كمية من الماء كتلة (m_w) ودرجة حرارتهما (T_1) , يحرك الماء ونسجل اعلى درجة حرارة يصلها المحرار (T_2) . عند فرض ان الجسم الصلب لم يفقد حرارة خلال نقلة الى المسعر فان



فإذا كانت الحرارة النوعية للجسم الصلب تساوي (C) والحرارة النوعية للماء (C_w) والحرارة النوعية للمسعر (C_c) فإنه يمكن الحصول على المعادلة الآتية

$$mC (T_3 - T_2) = m_w C_w (T_2 - T_1) + m_c C_c (T_2 - T_1)$$

$$mC (T_3 - T_2) = (m_w C_w + m_c C_c)(T_2 - T_1)$$

$$C = \frac{(m_w C_w + m_c C_c)(T_2 - T_1)}{m (T_3 - T_2)} \dots\dots\dots (8)$$

4- طريقة الخلط لإيجاد الحرارة النوعية للمواد السائلة

وهي مشابهة الى الطريقة السابقة (3) حيث يتم اختيار الجسم الصلب بحيث تكون قيمة حرارته النوعية معروفة, وتستخدم المعادلات السابقة نفسها لإيجاد الحرارة النوعية للسائل. وهناك طرق اخرى لقياس الحرارة النوعية للمواد مثل طريقة الجريان المستمر والطريقة الميكانيكية وطريقة التبريد.

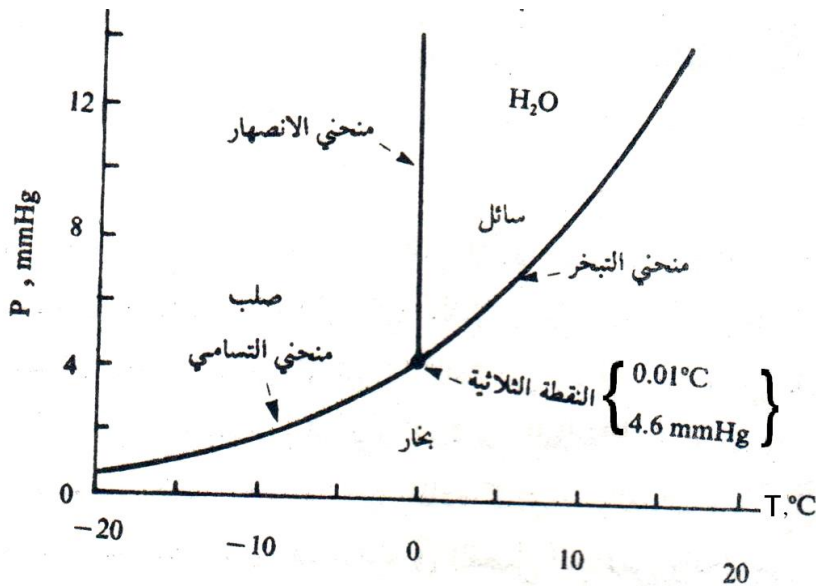
النقطة الثلاثية للمادة Triple Point

يؤثر الضغط المسلط على تغيرات حالات المادة عندما تتغير درجة حرارتها. فنجد ان درجة حرارة غليان الماء تزداد بزيادة الضغط المسلط عليها الى ان تصل قيمة حرجة لها, بحيث لا يمكن فوقها ان تبقى المادة في حالة السيولة مهما ازداد الضغط المسلط عليه. إن تغير درجة غليان المادة مع الضغط المسلط عليها يسمى بمنحني التبخر.

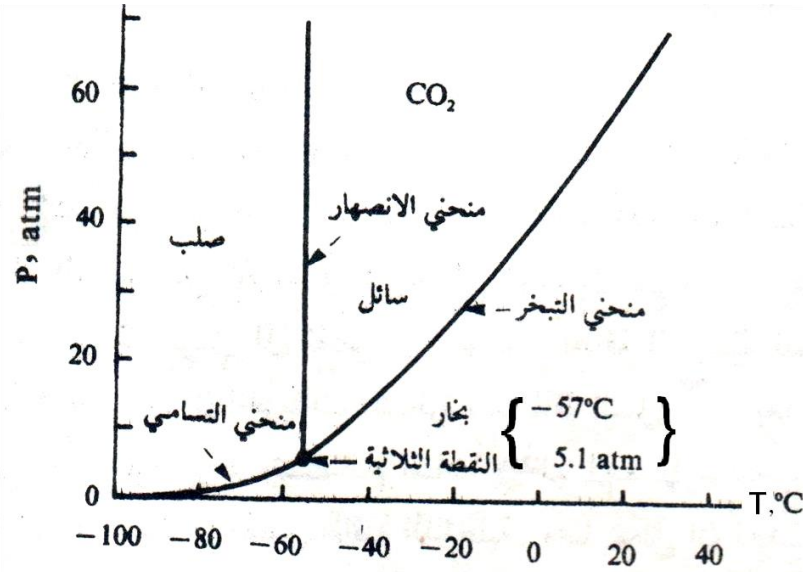
تعتمد درجة حرارة انصهار المواد الصلبة على الضغط المسلط عليها (ولكن بدرجة اقل مما هي عليه لدرجة حرارة الغليان). ان تغير درجة حرارة انصهار الثلج مع الضغط المسلط عليه يسمى بمنحني الانصهار. وقد وجد بان درجة حرارة انصهار الثلج تقل بزيادة الضغط المسلط عليه, على عكس معظم المواد الأخرى والتي تزداد درجة حرارة انصهارها بزيادة الضغط المسلط عليه. وهذا يعني انه يمكن صهر الثلج بطريقتين: بزيادة الضغط المسلط عليه

أو بتسخينه. وقد استغلت هذه الخاصية للثلج في عمليات التزلج عليه, إذ تتكون طبقة من الماء بسبب ضغط المتزلج تساعد على التزلج على الجليد.

يتقاطع منحني الانصهار والتبخر للماء عند درجة حرارة 0.01°C وتحت ضغط 4.6mmHg ان نقطة التقاطع تسمى بالنقطة الثلاثية والتي يتواجد فيها الماء في حالاته الثلاث الصلبة والسائلة والغازية. الشكل رقم (3) يوضح النقطة الثلاثية للماء. وعند ضغط أقل من ضغط النقطة الثلاثية لا يمكن لأي مادة ان تبقى في حالتها السائلة. ان منحنى الضغط ودرجة الحرارة الذي يفصل بين الحالة الصلبة والحالة الغازية (البخار) للمادة يسمى منحنى التسامي والذي يمثل الظروف المطلوبة للصلب كي يتحول الى بخار أو البخار الى صلب مباشراً من دون المرور بالحالة السائلة. الشكل (4) يوضح منحنى النقطة الثلاثية لمادة ثنائي اوكسيد الكربون CO_2 . فعند زيادة درجة الحرارة فان ثنائي اوكسيد الكربون الصلب تحت الضغط الجوي الاعتيادي يجعله يتسامى وذلك لوقع النقطة الثلاثية له على ضغط اعلى من الضغط الجوي الاعتيادي. على عكس الماء الذي يتحول فيه الثلج الى سائل عند تزويده بالحرارة تحت الضغط الجوي الاعتيادي وذلك لوقع النقطة الثلاثية للماء عند ضغط أقل بكثير من الضغط الجوي الاعتيادي.



الشكل (3) النقطة الثلاثية للماء



الشكل (4) النقطة الثلاثية لثنائي اوكسيد الكربون

تحولات حالة المادة

يطلق على العمليات التي تتغير فيها حالة المادة بعملية التغير في الطور, فمثلاً يحدث تغير في طور المادة المعدنية عند انصهارها وكذلك يحدث تغير في طور السائل عند غليانه وتحوله الى الحالة الغازية (طور البخار). ولكي يحدث التغير في الطور يجب اضافة الحرارة, ولكن على الرغم من اضافة الحرارة الى المادة فان درجة حرارتها لا ترتفع وهذا يعني ان الطاقة الداخلية للمادة هي التي تتغير عندما تتحول المادة من طور الى آخر. ومثال على ذلك الطاقة الداخلية لجزيئات الماء في الثلج هي أقل من الطاقة الداخلية لها في الماء السائل, وتكون الطاقة الداخلية لجزيئات الماء في بخار الماء اكبر من طاقتها الداخلية بعد ان تتكثف وتصبح سائلاً.

وهناك تحولات من نوع آخر تحدث داخل المادة وتغير من خواصها الفيزيائية أو الكيميائية كالتحولات المغناطيسية والكهربائية وتركيب المادة. يحدث هذا النوع من تغيرات الطور نتيجة لتسخين أو تبريد المادة الى درجة حرارة حرجة. ان هذه التحولات تكون مصحوبة بامتصاص أو تحرير كمية من الطاقة الحرارية فضلاً عن تغيرات خواص المادة. سنتناول بعض حالات تغير المادة كالتبخر والغليان والانصهار والانجماد وغيرها.

التبخر Evaporation

يمكن ان تعرف الحرارة الكامنة للتبخر على انها كمية الحرارة اللازمة (الطاقة اللازمة) لفصل وحدة الكتلة من جزيئات السائل عن بعضها البعض وتحويلها من طور السيولة الى طور الغاز (البخار) تحت ضغط ثابت ودرجة حرارة ثابتة. وهناك حقيقة اخرى وهي ان نفس كمية الحرارة سوف تنطلق (تتحرر) عندما يتكاثف البخار, أي عندما تتحول جزيئات الغاز (البخار) من طور الغاز (البخار) الى طور السيولة.

اما من ناحية علاقة الحرارة الكامنة للتبخير مع درجة الحرارة فان الحرارة الكامنة تتغير عكسياً مع تغير درجة الحرارة, أي انها تقل كلما ارتفعت درجة حرارة السائل ويعود ذلك الى كون جزيئات السائل تكون اقل ترابطاً مع بعضها عند درجات الحرارة العالية عنها عند درجات الحرارة المنخفضة. ومثال ذلك الحرارة اللازمة لتبخير الماء عند درجة حرارة 100°C تساوي 539 cal/g بينما تساوي 590 cal/g عند درجة حرارة 10°C . وغالباً ما تعطى الحرارة الكامنة للتبخير عند درجة غليان السائل العادية, والجدول (2) يبين بعض قيم الحرارة النوعية للتبخير لبعض المواد.

جدول (2) قيم الكامنة لتبخر بعض السوائل

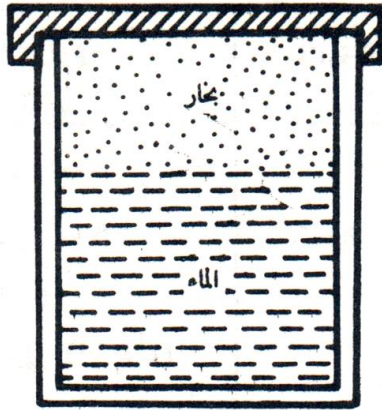
المادة	حرارة التبخر cal/g
الماء	539
النيتروجين	48
الإوكسجين	51
كحول ايثيلي (ايثانول)	204
الزئبق	71
الزنك	475
الرصاص	175
حامض الكبريتيك	122

إن معظم الحرارة الكامنة للتبخير تصرف للتغلب على قوة التجاذب الكبيرة لجزيئات المادة في حالة السيولة وبصرف جزء قليل منها كمشغل خلال عملية التمدد ضد الضغط المسلط على السائل (كالضغط الجوي).

اما وحدات قياس الحرارة الكامنة للتبخر فهي cal/g أو J/g. وفي نظام الوحدات العالمي (SI) فيستخدم وحدة J/Kg.

اذا وضع سائل في وعاء مغلق مفرغ من الهواء, فان جزيئات السائل سوف تتبخر الى الفراغ الموجود فوق سطح السائل, كما وتعود بعض جزيئات البخار وتصطدم بسطح السائل وتعود اليه, وتستمر هذه العملية الى ان تحصل حالة التوازن, وهي الحالة التي تتساوى فيها عدد الجزيئات التي تترك السائل في زمن معين مع الجزيئات التي تعود اليه من البخار في نفس الزمن. وهذا يعني ان عدد جزيئات البخار ستبقى ثابتة عند حد معين بشرط عدم تغير درجة حرارة النظام, ويقال عندئذ بان البخار مشبعاً تحت هذه الظروف. ويطلق على ضغط الجزيئات في البخار تحت هذه الشروط بضغط البخار للسائل, الذي يزداد بارتفاع درجة الحرارة ويقل بانخفاضها. مثال ذلك يكون ضغط بخار الماء 9.21 و 149.4 و 760 ملم زئبق عند درجة حرارة 10 و 60 و 100 درجة سليزية على التوالي.

ملاحظة 1ملم زئبق يساوي 1تور (1mm Hg = 1Torr). الشكل (5) يوضح حالة البخار المشبع.



الشكل (5) يوضح حالة البخار المشبع

الانصهار Melting

تعرف الحرارة الكامنة لانصهار على انها كمية الحرارة اللازمة لتحول وحدة الكتلة من المادة من الحالة الصلبة الى الحالة السائلة تحت درجة حرارة ثابتة وضغط ثابت. والجدول (3) يبين قيم الحرارة الكامنة لانصهار بعض المواد الصلبة. وبما ان الطاقة الداخلية للمادة في حالتها السائلة اعلى بكثير من طاقتها الداخلية في حالتها الصلبة, فان المادة عند تحويلها من الحالة الصلبة الى الحالة السائلة تحتاج الى تزويدها بالطاقة الحرارية مثلاً.

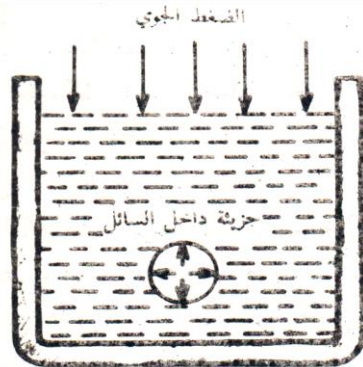
ان وحدة قياس الحرارة الكامنة للانصهار هي cal/g . اما في نظام (SI) فانها تساوي (J/Kg). ان الحرارة الكامنة لانصهار الجليد في درجة حرارة 0°C هي 80 cal/g تحت الضغط الجوي الاعتيادي. ان الطاقة المجهزة للجسم الصلب تعمل على مساعدة الجزيئات على التغلب على القوى التي تربطها مع الجزيئات الأخرى في التركيب الصلب وجعلها تتحرك بحرية اكبر. تبدأ المادة الصلبة عند تسخينها بالانصهار عند درجة حرارة معينة. وعند تسخين خليط المادة الصلبة مع السائل تبقى درجة حرارة الخليط ثابتة الى ان يكتمل انصهار المادة الصلبة. ولكل مادة درجة حرارة انصهار معينة. وتحرر نفس الكمية من الحرارة من المادة عند تحويلها من الحالة السائلة الى الحالة الصلبة عند نفس درجة الحرارة والضغط الجوي. تمتص الحرارة الكامنة لعرق الجسم من الجسم عند التعرق لكي يتبخر العرق وبذلك يتم تبريد الجسم.

الغليان Boiling

تنشأ ظاهرة الغليان عندما تكتسب مجموعة من الجزيئات في داخل السائل طاقة تكفي لفصلها عن بقية الجزيئات وتكوين فقاعة صغيرة. ان ضغط البخار داخل الفقاعة يعتمد على درجة الحرارة, فإذا كانت درجة الحرارة أقل من درجة غليان السائل, فان الضغط الجوي المسلط على السائل يكون اكبر من ضغط البخار داخل الفقاعة. وبناء على ذلك فان الفقاعة سوف تتلاشى تدريجياً قبل ان تجد الفرصة للنمو والوصول الى سطح السائل. وعندما ترتفع درجة الحرارة (كما في حالة تسخين السائل) يرتفع معها ضغط بخار السائل داخل الفقاعات وسوف يصل الى درجة حرارة معينة يتساوى عندها الضغط الجوي مع ضغط البخار داخل

الفقاعة, وعندها سوف تنمو الفقاعة ويزداد حجمها كلما ارتفعت نحو سطح السائل (بدلاً من التلاشي والاختفاء) وبتكرار حدوث هذه الظاهرة في اماكن متفرقة كثيرة داخل السائل تنشأ ظاهرة الغليان. والشكل (6) يوضح ظاهرة الغليان.

وتعرف درجة الغليان على انها الدرجة الحرارية التي يتساوى عندها ضغط بخار السائل داخل الفقاعة مع الضغط الخارجي المسلط على السائل. ان انخفاض الضغط المسلط على السائل يؤدي الى انخفاض درجة غليان السائل والعكس صحيح. ان عملية هروب بخار السائل يحتاج الى طاقة عالية تكتسبها من جزيئات السائل الأخرى. ان الاستمرار في الغليان يحتاج الى امداد السائل بالحرارة. ولن ترتفع درجة حرارة السائل اعلى من درجة حرارة الغليان مهما كانت كمية الحرارة التي يزود بها السائل خلال عملية الغليان. تتكون الفقاعة بسهولة اكبر اذا كان السائل يحتوي على الشوائب كدقائق الغبار أو فقاعات الهواء, ومن الممكن ان يسخن السائل النقي الى اعلى من درجة غليانه من دون تكون الفقاعات, ولكن عندما يبدأ تكوين الفقاعات فانه يحدث بشدة كبيرة تقرب من الانفجار. تعطى درجة الغليان (في الغالب) لمختلف السوائل تحت الضغط الجوي القياسي اي 760mmHg أو (1atm). ان درجة حرارة غليان الماء تساوي 100°C تحت نفس الظروف. اما الحرارة الكامنة لتبخير الماء تحت الظروف السابقة فتساوي 539cal/g. ان درجة غليان الماء في المدن الواقعة في الجبال تكون اقل من 100°C. وذلك بسبب ان الضغط الجوي يقل كلما ارتفعنا عن سطح البحر. وهذا يفسر لنا اهمية استخدام قدور الضغط في عمليات الطهو.



الشكل (6) يوضح ظاهرة الغليان

التسامي The Sublimation

لا يمكن ان تبقى المادة في حالتها السائلة تحت ضغط اقل من ضغط نقطتها الثلاثية, يسمى منحني الضغط - درجة الحرارة الفاصل بين الحالة الصلبة وحالة البخار بمنحني التسامي, لانه يمثل الظروف المناسبة لجزيئات الحالة الصلبة للتبخر مباشرة دون المرور بالحالة السائلة بالعكس. ان اضافة الحرارة الى الثلج تحت الضغط الجوي الاعتيادي يسبب انصهار الثلج, اي الانتقال من الحالة الصلبة الى الحالة السائلة والسبب في ذلك يعود الى ان ضغط النقطة الثلاثية للماء اقل بكثير من الضغط الجوي الاعتيادي. بينما اضافة الحرارة الى صلب ثنائي اوكسيد الكربون تسبب حالة التسامي أي الانتقال من الحالة الصلبة الى الحالة البخارية لان ضغط النقطة الثلاثية لثنائي اوكسيد الكربون اعلى بكثير من الضغط الجوي الاعتيادي.

القانون الأول في الثرموداينمك

لو تصورنا أن حجماً معيناً من غاز (V_1) في درجة حرارة (T_1) وتحت ضغط (P_1) موجود في وعاء ذي مكبس, فإذا ضغط الغاز الى حجم (V_2) وانخفضت درجة حرارته الى (T_2) فان الضغط سيزداد الى (P_2). ان الانتقال من الحالة الأولى (P_1, V_1, T_1) الى الحالة الجديدة (P_2, V_2, T_2) يمكن ان يتم بعدة طرق منها زيادة الضغط ثم خفض درجة الحرارة او خفض درجة الحرارة اولاً ثم زيادة الضغط المسلط على الغاز ثانياً. ان كبس الغاز يتطلب انجاز شغل, كما وان تبريد الغاز يتطلب سحب كمية من الحرارة منه. ان عملية انجاز الشغل وسحب كمية من الحرارة سوف يغير من الطاقة الداخلية للغاز. ان العلاقة بين الكميات الثلاثة, الشغل المنجز ΔW وكمية الحرارة ΔQ والتغير في الطاقة الداخلية ΔU هي كما يأتي

$$\Delta U = \Delta Q - \Delta W \quad \dots\dots\dots (9)$$

إن إشارة ΔQ تكون موجبة اذا اضيفت الحرارة الى الغاز وسالبة اذا سحبت منه الحرارة. وإشارة ΔW تكون موجبة اذا انجز الغاز شغلاً وسالبة اذا انجز الشغل على الغاز, ومهما كانت ترتيب العمليات التي يتعرض لها الغاز لجلبه من الحالة الابتدائية (P_1, V_1, T_1) الى الحالة النهائية (P_2, V_2, T_2) فإن صافي التغير في الطاقة الداخلية ΔU هو دائماً نفسه. أي

ان كلاً من ΔQ و ΔW يتغير، ولكن مجموع تغير ΔQ و ΔW يكون ثابتاً. وهذا هو جوهر القانون الأول للترموداينمك. والذي يعني ان الطاقة تكون دائماً محفوظة، أي لا يمكن استحداثها او أفنائها، ولكنه يمكن تحويلها من شكل الى آخر.

ان مقدار التغير في ΔU يمكن ان يكون صفرأ في حالة التمدد الحر للغاز الذي يكون فيه ΔQ و ΔW تساويان صفر. وهذا يعني ان تغير الحجم لا يغير الطاقة، أي ان طاقة الغاز ليس دالة لحجمه. بل ان الطاقة دالة لدرجة الحرارة فقط.

تطبيقات على القانون الأول

ينطبق القانون الأول للترموداينمك على جميع الأنظمة مهما كانت معقدة. ومن الأنظمة المألوفة لنا هو جسم الإنسان الذي يفقد طاقة داخلية باستمرار، اذ تفقد معظم هذه الطاقة على شكل حرارة يفقدها الجسم الى المحيط ويمثل الشغل الذي يبذله الجسم جزءاً من هذه الطاقة. وبناءً على ما تقدم يمكن صياغة القانون الأول ليناسب الجسم كما يأتي

$$\text{الشغل المبذول} + \text{الحرارة المفقودة} = \text{النقص في الطاقة الداخلية}$$

يمكن حساب الشغل الذي ينجزه نظام يتمدد ضد محيطه ويبقى فيها الضغط ثابتاً بينما يتغير الحجم من V_i الى V_f من العلاقة الآتية.

$$W = \int_{V_i}^{V_f} PdV$$

$$W = P \int_{V_i}^{V_f} dV$$

$$W = P(V_f - V_i) \dots\dots\dots (10)$$

وتسمى هذه العملية بالعملية الثابتة الضغط (Isobaric Process) وتعرف بأنها العملية التي تحدث للنظام بحيث يبقى الضغط المؤثر عليه ثابتاً.

يبين الشكل رقم (7) عملية ثابتة الضغط وتتكون من كمية من الماء محصورة في وعاء اسطواني مجهز بمكبس حر الحركة وفوقه ثقل معين. يمكن تزويد الماء بالطاقة الحرارية وذلك بتسخينه الى ان يتحول جزء من الماء الى بخار ويتمدد النظام (الماء والبخار) ويحرك المكبس, أي ينجز شغلاً ضد المكبس. فإذا تحولت كتلة مقدارها (m) من الماء الى بخار وازداد حجمها من V_i الى V_f وكان الضغط ودرجة الحرارة ثابتين فان الشغل المنجز خلال هذه العملية يعطى بالعلاقة الآتية :

$$W = P (V_f - V_i)$$

إن تحول السائل الى بخار يحتاج الى كمية من الحرارة (Q) تعطى بالعلاقة الآتية:

$$Q = mL$$

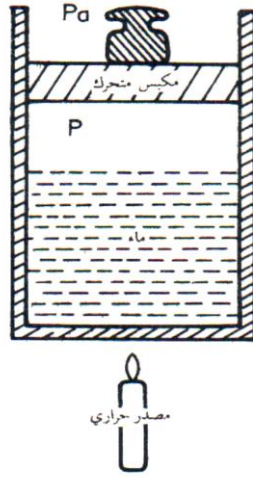
حيث أن L تمثل الحرارة الكامنة للتبخر.

ان هذه الحرارة ستؤدي الى تغير في الطاقة الداخلية للنظام تعطى بالعلاقة الآتية:

$$\Delta U = U_2 - U_1 \quad \dots\dots\dots (11)$$

حيث أن U_1 و U_2 تمثلان الطاقة الداخلية للسائل والبخار على التوالي. وعند تطبيق القانون الأول للثرموداينمك على هذه العملية نحصل على الصيغة الآتية :

$$Q = P (V_f - V_i) + (U_2 - U_1) \quad \dots\dots\dots (12)$$



الشكل (7) يوضح عملية ثابتة الضغط

وهناك تطبيقات أخرى على القانون الأول للثرموداينمك منها: العملية الأدياباتية والعملية تحت حجم ثابت والتمدد الحر والعملية عند درجة حرارة ثابتة.

العملية الأدياباتية Adiabatic Process

العملية الأدياباتية هي العملية التي تحدث للنظام، بحيث لا تدخله ولا تخرج منه حرارة. ويمكن ان يتم ذلك إما:

- 1- بإحاطة النظام بمادة عازلة حرارياً (كالفلين).
- 2- بالقيام بالعملية بسرعة كبيرة بحيث نضمن عدم انتقال حرارة من النظام او إليه. وذلك لان انتقال الحرارة عملية بطيئة نسبياً، وبتطبيق القانون الأول للثرموداينمك على هذه العملية نحصل على:

$$\Delta U = - \Delta W \quad \dots\dots\dots (13)$$

ومن هنا نرى انه في العملية الأدياباتية يكون التغير في طاقة النظام الداخلية مساوياً للقيمة المطلقة للشغل. فإذا كان الشغل سالباً، كما هي الحال عندما يضغط النظام، فان (U_2) اكبر من (U_1) وبذلك فان الطاقة الداخلية للنظام تزداد. أما عندما يكون الشغل موجباً، كما هي

الحال عند تمدد النظام, فان (U_2) اقل من (U_1) وبذلك فان الطاقة الداخلية للنظام تقل. والجدير بالذكر ان زيادة الطاقة الداخلية للنظام يصاحبها عادة ارتفاع في درجة حرارة النظام. أما عند انخفاض الطاقة الداخلية للنظام فإن ذلك يصاحبه عادة انخفاض في درجة حرارته.

والأمثلة على العملية الأديباتيكية كثيرة فانضغاط مزيج البنزين والهواء في آلة الاحتراق الداخلي (في شوط الانضغاط) هو عملية أديباتيكية. وفي هذه الحالة ترتفع درجة حرارة النظام (مزيج البنزين والهواء). كذلك تمدد نواتج الاحتراق (في شوط القوة) هو عملية أديباتيكية, ولكن في هذه الحالة تنخفض درجة الحرارة.

العملية تحت حجم ثابت Isochoric Process

ان هذه العملية تحدث للنظام مع بقاء حجمه ثابتاً. فإذا سخنا إناء غير قابل للتمدد ويحوي مادة ما كغاز مثلاً, فإن هذه العملية هي عملية تحت حجم ثابت, وفي هذه العملية الشغل يساوي صفرأ, لان الحجم لم يتغير وبذلك فإن القانون الأول للثرموداينمك يكون بالشكل التالي:

$$\Delta U = \Delta Q \quad \dots\dots\dots (14)$$

إن معنى ذلك ان الحرارة التي تعطى للنظام تذهب كلها في زيادة الطاقة الداخلية للنظام. ويمكن اعتبار أن الزيادة المفاجئة في درجة الحرارة والضغط المصاحبين لانفجار مزيج البنزين والهواء في آلة الاحتراق الداخلي ناجمة عن عملية تحت حجم ثابت.

التمدد الحر Free Expansion

يمكن توضيح التمدد الحر كما يلي, فإذا تصورنا انه لدينا وعاء بجدران صلبة ومغطاة بعازل حراري, ولنفترض أننا قسمنا الوعاء الى قسمين بحاجز رقيق, بحيث ان احد القسمين يحتوي غازاً والآخر مفرغ من أي مادة. ثم لنفترض ان الحاجز الرقيق انكسر في هذه الحالة يبدأ الغاز بالتدفق من أحد القسمين إلى الآخر ويحدث له ما يسمى بالتمدد الحر. وحيث ان الوعاء معزول

حرارياً فإن هذه العملية هي أدياباتية، وبذلك فإن $(Q = 0 \Delta)$. وحيث ان جدران الوعاء صلبة فأنه لا يبذل شغل خارجي على النظام، وبذلك $(W = 0 \Delta)$ وبتطبيق القانون الأول للثرموداينمك نحصل على

$$\Delta U = 0$$

$$U_2 = U_1 \quad \dots\dots\dots (15)$$

وبذلك نستنتج انه في التمدد الحر فان الطاقة الداخلية الابتدائية تساوي الطاقة الداخلة النهائية، ويجب الانتباه ان التمدد الحر ليس له قيمة عملية وذلك لصعوبة الحصول عليه.

العملية عند درجة حرارة ثابتة Isothermal Process

في هذه العملية تتغير حالة النظام دون ان تتغير درجة حرارته، أي أن

$$U_2 = U_1$$

وعليه فعند تطبيق القانون الأول للثرموداينمك نحصل على

$$\Delta Q = \Delta W \quad \dots\dots\dots (16)$$

إن معنى ذلك ان الحرارة المعطاة تتحول كلها بالكامل الى شغل، أو ان الشغل المعطى يتحول كله الى حرارة.

وكمثال على هذه العملية نتصور اسطوانة غير معزولة حرارياً بداخلها مكبس، وبداخل الاسطوانة كمية من الهواء، ونتصور ان الاسطوانة موضوعة في حمام مائي عند درجة حرارة معينة. فإذا تحرك المكبس داخل الاسطوانة أنجز شغلاً على النظام يتحول كله كاملاً الى حرارة.

مسائل

س1: إذا كان معدل انسياب سائل خلال مسعر الانسياب المستمر تساوي 15g/s, وان السخان الكهربائي يقوم بتزويد قدرة مقدارها 200 W . تحت هذه الظروف تم الحصول على فرق في درجة الحرارة مقدارها 3°C, ولأجل الحصول على نفس الفرق في درجات الحرارة تحت معدل انسياب مقداره 5g/s يجب تبديد قدره مقدارها 80 W . جد الحرارة النوعية للسائل ومعدل فقدان الحرارة إلى المحيط. افرض أن درجة حرارة المحيط هي نفسها في الحالتين.

الحل :

$$1W = 1J/s$$

$$200 J/s = \text{الطاقة الكهربائية للحالة الأولى} , \quad 80 J/s = \text{الطاقة الكهربائية للحالة الثانية}$$

$$Q = \Delta T \quad \text{كمية الحرارة المكتسبة بواسطة الماء في الثانية الواحدة تساوي}$$

m C

$$\Delta T = T_2 - T_1 = 3^\circ C = 3K$$

$$H = \text{نفرض أن معدل فقدان الحرارة إلى المحيط خلال الثانية الواحدة}$$

$$\text{كمية الحرارة المكتسبة} = \text{كمية الحرارة المفقودة}$$

$$200 J/s = (15 \times 10^{-3} \text{ Kg/s}) C (3K) + H \quad \text{في الحالة الأولى}$$

$$80 J/s = (5 \times 10^{-3} \text{ Kg/s}) \times C \times (3K) + H \quad \text{في الحالة الثانية}$$

وبطرح الحالة الثانية من الحالة الأولى نجد

$$(200 - 80) J/s = (15 - 5) \times 10^{-3} \text{ Kg/s} \times C \times (3K)$$

$$120 J/s = 30 \times 10^{-3} \text{ Kg/s} \times C$$

$$C = \frac{120 J/s}{30 \times 10^{-3} \text{ Kg.K/s}} = 4 \times 10^3 J/\text{Kg.K}$$

بالتعويض عن C في الحالة الأولى أو الثانية نجد أن

$$200 \text{ J/s} = (15 \times 10^{-3} \text{ Kg/s}) (4 \times 10^3 \text{ J/ Kg.K}) (3\text{K}) + H$$

$$200 \text{ J/s} = 180 \text{ J/s} + H \quad \rightarrow \quad H = 200 \text{ J/s} - 180 \text{ J/s} \quad \rightarrow \quad H = 20 \text{ J/s}$$

س2: سخنت قطعة من النحاس كتلتها 100 g إلى درجة حرارة 100°C , ونقلت إلى مسعر النحاس جيد العزل كتلته 50 g يحتوي على 200 g من الماء عند درجة حرارة 10°C . جد القيمة النهائية لدرجة حرارة الماء مع العلم إن الحرارة النوعية للنحاس تساوي $4 \times 10^2 \text{ J/Kg.K}$ وللماء تساوي $4.2 \times 10^3 \text{ J/Kg.K}$. أهمل أي فقدان في درجة الحرارة إلى المحيط.

الحل :

الحل:- نفرض ان درجة الحرارة النهائية T_2

مقدار التغير في درجة حرارة قطعة النحاس $(100 - T_2)^\circ\text{C}$

مقدار التغير في درجة حرارة الماء والمسعر $(T_2 - 10)^\circ\text{C}$

كمية الحرارة التي فقدتها قطعة النحاس $Q = m C \Delta T$

$$Q = (100 \times 10^{-3} \text{ Kg}) \times (4 \times 10^2 \text{ J/Kg.K}) \times (100 - T_2) = 40 (100 - T_2)$$

كمية الحرارة التي اكتسبها المسعر النحاس $Q = m C \Delta T$

$$Q = (50 \times 10^{-3} \text{ Kg}) \times (4 \times 10^2 \text{ J/Kg.K}) \times (T_2 - 10) = 20 (T_2 - 10)$$

كمية الحرارة التي اكتسبها الماء $Q = m C \Delta T$

$$Q = (200 \times 10^{-3} \text{ Kg}) \times (4.2 \times 10^3 \text{ J/Kg.K}) \times (T_2 - 10) = 840 (T_2 - 10)$$

كمية الحرارة المكتسبة = كمية الحرارة المفقودة

$$40 (100 - T_2) = 20 (T_2 - 10) + 840 (T_2 - 10)$$

$$4000 - 40 T_2 = (20 + 840) (T_2 - 10)$$

$$4000 - 40 T_2 = 860 T_2 - 8600$$

$$4000 + 8600 = 860 T_2 + 40 T_2$$

$$12600 = 900 T_2$$

$$T_2 = 14 \text{ }^\circ\text{C}$$

س³ : جد مقدار التغير في الطاقة الداخلية لنظام يتكون من 1g من الماء المقطر يتحول إلى بخار تحت الضغط الجوي الاعتيادي في درجة حرارة 100°C . وكان 1cm³ من الماء المقطر يشغل 167 cm³ في حالة البخار تحت نفس الضغط. وان الحرارة الكامنة للتبخر تساوي 540 cal/g

الحل :

$$Q = mL$$

$$Q = 1g \times 540 \text{ cal/g} \rightarrow Q = 540 \text{ cal}$$

$$W = P (V_f - V_i)$$

$$W = 1.01 \times 10^5 \text{ N/ m}^2 (1671 - 1) \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$W = 168.67 \text{ Joule}$$

$$= \frac{168.76}{4.186} = 40.293 \text{ cal}$$

وعليه فان الزيادة في الطاقة الداخلية للنظام تكون مساوية إلى ΔU , أي أن

$$\Delta U = U_2 - U_1 = Q - P (V_f - V_i)$$

$$\Delta U = 540 \text{ cal} - 40.293 \text{ cal}$$

$$\Delta U = 499.707 \text{ cal}$$

الفصل الثالث

الغازات

مقدمة

تتكون الغازات من جزيئات صغيرة, تكون الجزيئات مستقلة تقريباً بعضها عن البعض , أي لا تؤثر بعضها على البعض الآخر بأي قوى ما عدا في لحظات تصادمها. كما انها في حركة مستمرة وتتجول في الفضاء (space) متصادمة مع بعضها من دون ان تتلاصق نتيجة هذا التصادم. تكون الطاقة الحركية لجزيئات الغاز كافية للتغلب على القوى الضئيلة التي تربط بين هذه الجزيئات. كما وتكون جزيئات الغاز متباعدة كثيراً عن بعضها, اذ يقدر معدل المسافة بين الجزيئات بعشرة امثال قطر الجزيئة تقريباً. تكون سرعة جزيئات الغاز (في الأحوال الاعتيادية) مقاربة لسرعة الصوت في الهواء (أي 300 الى 400 متر في الثانية), وبناء على ذلك يكون المعدل الزمني لعدد التصادمات بين جزيئات الغاز بحدود 10^9 تصادم لكل ثانية. وتؤدي التصادمات بين جزيئات الغاز وجدران الوعاء الذي يحتويه الى تكوين الضغط المؤثر على هذه الجدران. ان تباعد جزيئات الغاز بعضها عن البعض الاخر بمسافات اكبر من اقطار هذه الجزيئات ادى الى انعدام الاحتكاك الداخلي بينها, والى هذا السبب ايضاً تعزى قابلية الغازات على الانكماش لكونها لا تمتلك شكلاً محدداً ولا حجماً ثابتاً, اذ تملأ جزيئات الغاز كل أنحاء الوعاء الذي توضع فيه.

ان التغيرات التي تطرأ (اثناء تصادم الجزيئات) على قيمة واتجاه سرعة أحد الجزيئات يقابله تغير معاكس (مضاد) في قيمة سرعة الجزيئة الثانية واتجاهها, اذ يكون معدل التغير في القيمة والاتجاه لسرع الجزيئات المختلفة مساوياً للصفر, وعلى هذا الأساس يكون للكتلة المعينة المتزنة من الغاز وعند درجة الحرارة الثابتة ما يأتي:

- 1- تكون اتجاهات حركة الجزيئات موزعة بالتساوي على جميع الاتجاهات.
- 2- يكون معدل الطاقة الحركية لجميع جزيئات الغاز متساوية, ويعتمد على درجة الحرارة.

The Ideal Gases الغاز المثالي

الغاز المثالي هو الغاز الذي تكون جزيئاته متناهية في الصغر (نقطية), تامة المرونة, ينعدم بينها الاحتكاك لأنها لا تؤثر في بعضها البعض باية قوى, ان الغاز المثالي غير موجود في الحقيقة.

The Real Gases الغاز الحقيقي

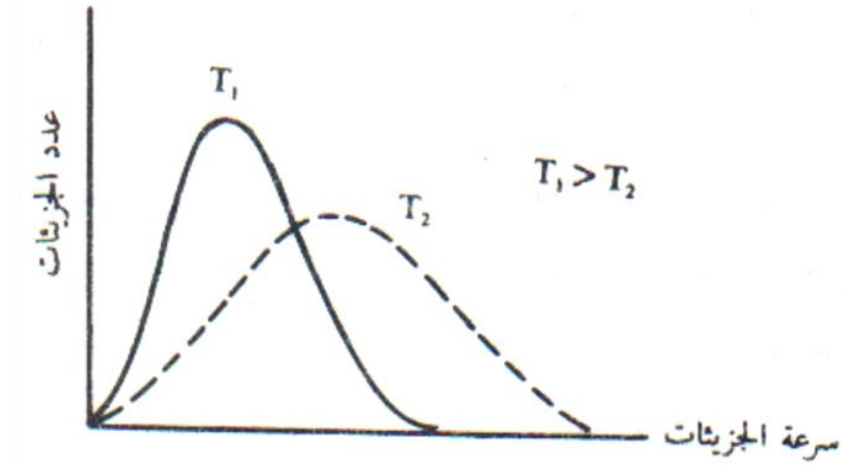
هو الغاز الذي تكون جزيئاته صغيرة ومدبا عدة بعضها عن بعض. وعند الظروف الاعتيادية من ضغط ودرجة حرارة تقترب خواص الغازات الخفيفة من خواص الغاز المثالي, بشرط أن تكون درجة الحرارة اعلى بكثير من درجة حرارة تسيل الغاز.

The Kinetic Theory of Gases النظرية الحركية للغازات

ان الكثير من خواص الغازات يمكن توقعها بالاعتماد على اساسيات النظرية الحركية للغازات. تعتمد هذه النظرية على الفرضيات الرئيسة التي يمكن اجمالها في النقاط الآتية:

- 1- تتكون الغازات من جزيئات متناهية في الصغر (كتلة نقطية), أي انها تملك كتلة ولا تملك حجماً.
- 2- اهمال القوى المؤثرة بين جزيئات الغاز, ما عدا لحظة التصادم.
- 3- تكون حركة الجزيئات عشوائية ومستمرة وبخطوط مستقيمة بين التصادمات.
- 4- تكون جزيئات الغاز تامة المرونة, كما ويكون التصادم بين هذه الجزيئات مرناً ايضاً, اذ تهمل الطاقة المفقودة عند التصادم بين الجزيئات او عند التصادم مع جدران الوعاء الذي يحتويها, كما وتحفظ الطاقة الحركية خلال التصادم, وقد يحصل تبادل بين الجزيئات للطاقة المذكورة. ان الوقت المستغرق خلال التصادم يكون قصير جداً يمكن اهماله.
- 5- ان درجة حرارة الغاز هي مقياس لمتوسط الطاقة الحركية التي تمتلكها جزيئاته نتيجة لحركتها.

ان سرعة جزيء معين تتغير باستمرار نتيجة للتصادم مع الجزيئات الأخرى أو مع جدران الوعاء الذي يحتويها, كما وتختلف قيم سرعة الجزيئات بعضها عن البعض عند اية لحظة من الزمن, وتبعاً لذلك ستختلف طاقتها الحركية. وهذا يعني ان هناك مدى واسعاً جداً لسرع الجزيئات عند اية درجة حرارية. ان توزيع سرع الجزيئات وبالتالي طاقتها الحركية تتبع توزيعاً معيناً يعرف بتوزيع ماكسويل – بولتزمان. الشكل (1) يوضح هذا النوع من التوزيع.



الشكل (1) تغير عدد الجزيئات مع سرعتها كدالة لدرجة الحرارة

ان الطاقة الحركية للجزيئات تتناسب طردياً مع مربع سرعتها.

يتساوى معدل الطاقة الحركية للجزيئات المختلفة عند درجة الحرارة نفسها, فإذا فرضنا ان

m_1 و m_2 تمثلان كتلة جزيئين من غازين مختلفين, فعند درجة الحرارة نفسها يكون:

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 = \frac{1}{2} m_2 v_2^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

حيث أن v_1^2 و v_2^2 تمثلان متوسط قيم مربع سرع الجزيئين, وعلية فان:

$$\frac{v_1}{v_2} = \sqrt{\frac{m_2}{m_1}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

عدد افوكادرو (N_A) Avogadro's Number

تحتوي الحجوم المتساوية للغازات جميعها على نفس العدد من الجزيئات, بشرط ان تكون تحت الظروف نفسها من ضغط ودرجة حرارة. وبناء على ما تقدم فان عدد افوكادرو من جزيئات أي غاز تشغل الحجم نفسه تحت الظروف نفسها من ضغط ودرجة حرارة.

وعلى وجه الدقة فان المول الواحد من أي غاز تحت الظروف القياسية من ضغط ودرجة حرارة سوف يشغل الحجم نفسه الذي مقداره 22.4 لتر.

يعد عدد افوكادرو ذا أهمية اساسيه وبخاصة عند التعامل مع الذرات والجزيئات, وغالباً ما يرمز لعدد افوكادرو بـ (N_A). وهذا العدد يعني ان الكتلة الذرية او الجزيئية (الوزن الذري او الجزيئي) من المادة يحتوي على عدد محدد من الذرات او الجزيئات هو عدد افوكادرو. ونورد هنا بعض الأمثلة لتوضيح فكرة عدد افوكادرو والوزن الذري والوزن الجزيئي ومنها: ان الكتلة الذرية للهيدروجين تساوي (1) وهذا يعني ان كيلوغرام واحد من غاز الهيدروجين يحتوي على عدد افوكادرو (N_A) من ذرات الهيدروجين.

وبما ان الكتلة الذرية (الوزن الذري) للاوكسجين تساوي 16, فان هذا يعني 16 كيلوغرام من غاز الاوكسجين يحتوي على افوكادرو من ذرات الاوكسجين والشيء نفسه يقال عن الكتلة الجزيئية (الوزن الجزيئي), فإذا أخذنا الماء (H₂O) فان الكتلة الجزيئية (الوزن الجزيئي) له يساوي 18 . أي ان 18 كيلوغرام من الماء يحتوي على عدد افوكادرو من جزيئات الماء.

ان احسن قيمة تجريبية لعدد افوكادرو هي :

$$N_A = 6.022 \times 10^{26} \text{ particles / Kg.mol}$$

وبما ان الكيلوغرام الواحد يساوي 1000 غرام, فان

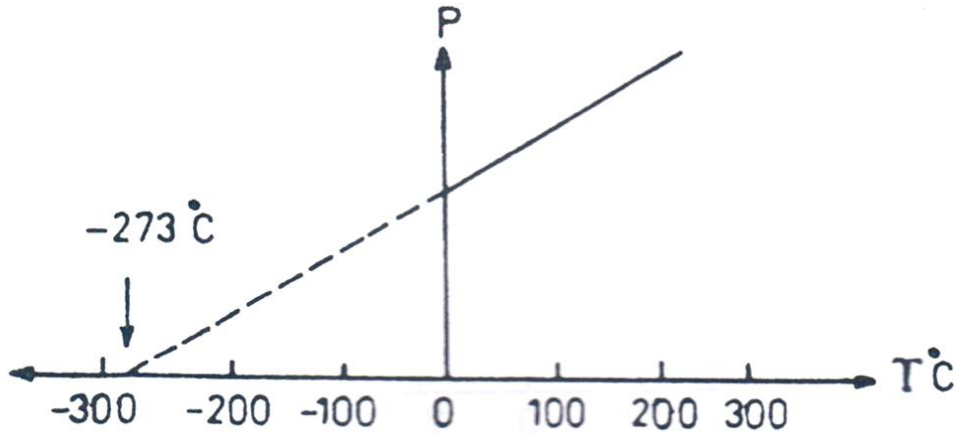
$$N_A = 6.022 \times 10^{23} \text{ particles / g.mol}$$

وغالباً ما يستخدم مصطلح المول عوضاً عن الجزيء الغرامي.

قانون الغاز Gas Law

يعد قانون الغاز الذي يحكم سلوك الهواء وكثير من الغازات بسيطاً ويمكن تحقيقه تجريبياً. يعتمد قانون الغاز على ثلاثة متغيرات هي الضغط ودرجة الحرارة وعدد الجزيئات في وحدة الحجم.

عند تسخين كمية من الغاز محبوسة في وعاء مغلق (الحجم ثابت) فان ضغطها سوف يزداد زيادة خطية مع درجة الحرارة, شرط الا يكون الغاز قريباً من ظروف اسالته من ضغط ودرجة حرارة. ان العلاقة بين الضغط ودرجة الحرارة في هذه الحالة تكون علاقة خطية وكما هو مبين في الشكل (2), إن امتداد الخط المستقيم سيقطع محور درجة الحرارة عند درجة الحرارة $(-273.15^{\circ}\text{C})$



الشكل (2) علاقة ضغط الغاز مع درجة حرارته عند ثبوت الحجم

عند ثبوت حجم الغاز فان:

$$P \propto T$$

$$P = (\text{constant}) \times T \quad \dots\dots\dots (3)$$

بشرط أن يعبر عن قيمة درجة الحرارة بالمقياس الكلفني (المطلق).

أما عند تسخين الكمية نفسها من الغاز تحت ضغط ثابت فان حجمها سيتغير تغيراً خطياً مشابهاً الى التغير السابق, وسنحصل على علاقة خطية بين حجم الغاز ودرجة الحرارة, وان امتداد الخط المستقيم سوف يقطع محور درجة الحرارة مرةً أخرى عند درجة حرارة $(-273.15^{\circ}\text{C})$. يبين الشكل (3) العلاقة بين حجم الغاز ودرجة الحرارة ويوضح ان انكماش الغاز تحت ضغط ثابت سيصاحبه انخفاض في درجة حرارته. وباستخدام المقياس الكلفني (المطلق) يكون

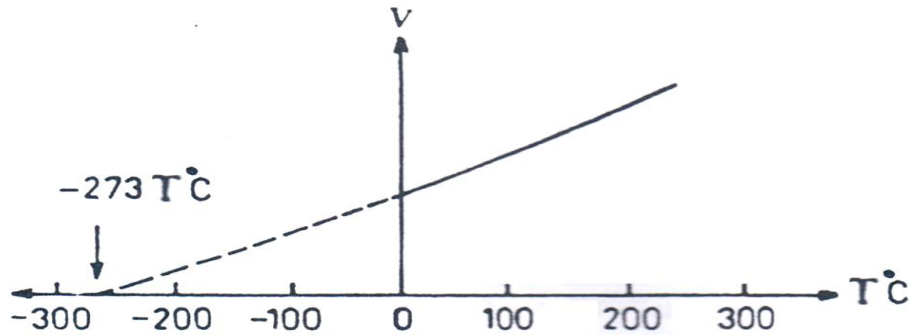
$$V \propto T$$

عند ثبوت الضغط المسلط على الغاز

$$V = (\text{constant}) \times T \quad \dots\dots\dots (4)$$

يمكن إعادة صياغة العلاقتين السابقتين بعلاقة واحدة وهي

$$PV = (\text{constant}) \times T \quad \dots\dots\dots (5)$$



الشكل (3) علاقة حجم الغاز مع درجة حرارته عند ثبوت الضغط

يتبع الغاز هذه المعادلة بشرط ان تكون قيم كل من الضغط المسلط على الغاز ودرجة حرارته بعيدين عن قيم شروط اسالته.

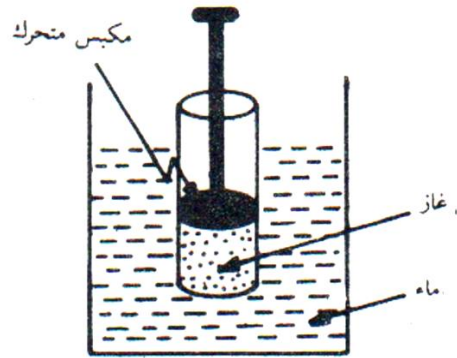
إن قانون الغاز المثالي ينطوي على قانونين ثانويين وهما:

قانون بويل Boyle's Law

وينص على انه حاصل ضرب ضغط كمية محدودة من غاز في حجمها يجب ان تكون كمية ثابتة في حالة التمدد او الانكماش بشرط ثبوت درجة الحرارة, أي انه:

$$PV = \text{constant} \text{ (عند ثبوت درجة الحرارة)}$$

يمكن التحقق من صحة هذا القانون وذلك بوضع كمية محددة من الغاز في اسطوانة ذات مكبس متحرك محاطة بمادة ذات درجة حرارة ثابتة (كحمام الماء مثلاً) وذلك للمحافظة على درجة حرارة ثابتة للغاز. كما الشكل (4).



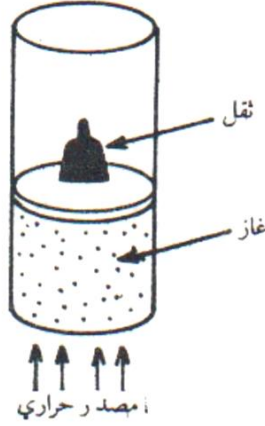
الشكل (4) التحقق من قانون بويل

قانون شارل Charle's Law

وينص على انه ثبوت الضغط فان نسبة حجم كمية من الغاز الى درجة حرارته المطلقة تبقى ثابتة في حالة التسخين او التبريد, أي ان:

$$\frac{V}{T} = \text{constant} \text{ (عند ثبوت الضغط)}$$

يمكن التحقق من هذه العلاقة وذلك بوضع كمية محددة من الغاز في اسطوانة ذات مكبس متحرك ووضع ثقل ثابت فوق المكبس. ثم يسخن الغاز لأجل تغيير درجة حرارته كما في الشكل (5).



الشكل (5) التحقق من قانون شارل

ثابت الغاز (R) The Gas Constant

يطلق على القانون الاتي

$$P V = (\text{constant}) T \quad \dots\dots\dots (6)$$

بقانون الغاز المثالي. تمثل P ضغط كمية معينة من الغاز المثالي و V حجم الغاز و T درجة حرارة الغاز المطلقة. وتم تحديد قيمة الكمية الثابتة (constant) تجريبياً فوجد بانها مساوية الى (nR) , أي ان

$$\text{constant} = n R \quad \dots\dots\dots (7)$$

تمثل n عدد الجزيئات الكيلوغرامية أو الغرامية (المولات) من الغاز الموجود في الحجم V , اما R فتمثل ثابت الغاز. ان احسن قيمة تم ايجادها لثابت الغاز مساوية الى:

$$R = 8314 \text{ J/Kmol.k}$$

أو

$$R = 8.314 \text{ J/mol.k}$$

قانون الغاز المثالي The Ideal Gas Law

يمكن الان اعادة كتابة قانون الغاز, كما في الصيغة الآتية:

$$P V = n R T \quad \dots\dots\dots (8)$$

و غالباً ما يطلق على هذا القانون. قانون الغاز المثالي او العام.

هناك عدة نقاط مهمة يجب مراعاتها عند تطبيق هذا القانون واهمها:

- 1- ان قيمة درجة الحرارة T يجب ان تكون دائماً بالدرجة الكلفينية.
- 2- استخدام الوحدات المناسبة لمختلف الكميات المستخدمة.
- 3- ان قيمة R تكون اما

(أ) مساوية الى 8314 في حالة كون (n) تمثل عدد الجزيئات الكيلوغرامية في الحجم V

(ب) مساوية الى 8.314 في حالة كون (n) تمثل عدد الجزيئات الغرامية في الحجم V.

4- يجب ان يكون الحجم الذي تشغله جزيئات الغاز نفسها صغيراً جداً (مهملاً) مقارنة بالحجم الذي يشغله الغاز.

5- يجب ان يكون الغاز بعيداً عن شروط اسالته من ضغط ودرجة حرارة.

ولتحقيق هذا الشرط يجب ان تكون درجة حرارة الغاز عالية لدرجة حرارية تكفي لان يكون عدداً قليلاً جداً من الجزيئات ترتبط ببعضها. وهذا يعني ان تكون الطاقة الحركية الانتقالية لجزيئات الغاز كبيرة بالمقارنة بالطاقة التي تعمل على التصاق الجزيئات مع بعضها. ان عملية التصاق الجزيئات مع بعضها تعني تكاثف الغاز وتحوله الى سائل.

ان مجالات استخدام قانون الغاز المثالي وتطبيقاته واسعة جدا ومفيدة ومن أهمها:

- 1- استخدام القانون المذكور في تعريف مقياس كلفن لدرجات الحرارة.
- 2- استخدام قانون الغاز المثالي لإيجاد قيم P او V او T او n اذا كانت جميع الكميات معلومة ما عدا واحدة.
- 3- استخدام قانون الغاز المثالي لإيجاد قيم P او V او T او n تحت شروط أخرى بشرط ان تكون معلومة تحت شروط معينة.

معادلة فاندر فالز Vander Waals Equation

توصل فاندر فالز الى معادلة الغازات الحقيقية والتي هي :

$$(P + \frac{a}{V^2})(V - b) = R T \quad \dots\dots\dots (9)$$

حيث تمثل كل من a و b كميات ثابتة تختلف قيمتها من غاز الى آخر. ويتم إيجاد قيمهما تجريبياً.

الطاقة الداخلية للغاز (E) The Potential Energy of Gas

يمكن التعبير عن ضغط الغاز بدلالة الكتلة ومعدل مربع سرعة الجزيئات كما في المعادلة الآتية:

$$PV = \frac{Nm \bar{v}^2}{3} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ومن خلال مقارنة هذه المعادلة مع المعادلة العامة للغازات (او قانون الغاز المثالي) الذي يعبر عنه كما يأتي:

$$P V = N k_B T \quad \dots\dots\dots (11)$$

k_B : يمثل ثابت بولتزمان (Boltzmann Constant)

ومن خلال مساواة الطرف الأيمن للمعادلتين في أعلاه نجد العلاقة الآتية:

$$\frac{Nm \bar{v}^2}{3} = N k_B T$$

$$\frac{m \bar{v}^2}{3} = k_B T \quad \dots\dots\dots (12)$$

إن هذه المعادلة تبين ان معدل مربع السرعة تعتمد على درجة الحرارة.

يمكن الحصول على معدل الطاقة الحركية من العلاقة السابقة وذلك بقسمة طرفي المعادلة على (2) نجد ان:

$$\frac{1}{2} m \bar{v}^2 = \frac{3}{2} k_B T \quad \dots\dots\dots (13)$$

ويمكن الحصول على الطاقة الحركية الكلية الانتقالية لجميع الجزيئات من خلال ضرب طرفي المعادلة السابقة بـ (N), أي ان

$$\frac{1}{2} m \bar{v}^2 N = \frac{3}{2} N k_B T \quad \dots\dots\dots (14)$$

إن الطاقة الحركية للغاز المثالي هي نفسها الطاقة الكلية, وعليه فان

$$E = K.E = \frac{3}{2} N k_B T \quad \dots\dots\dots (15)$$

إن هذه المعادلة تمثل الطاقة الحركية لغاز مثالي احادي الذرة, وهي تعني ان الذرات او الجزيئات تملك طاقة حركية انتقالية ولكنها لا تملك طاقة داخلية. ان الغازات الحقيقية الخاملة أحادية الذرة كالهليوم والاركون والكربون وغيرها تتصرف (تقريباً) بهذه الطريقة. اما الغازات ثنائية الذرة كالأوكسجين والنتروجين فأنها تتصرف بطريقة مختلفة, إذا انها تخزن مقداراً من الطاقة الإضافية في حركة ذراتها الداخلية ضمن التركيب الجزيئي لها. تعتبر جزيئات الغاز الثنائي الذرة متكونة من كرتين نقطيتين متصلتين مع بعضهما بنابض حلزوني له القابلية على الانضغاط والتمدد. وفي الحالتين كليهما تخزن طاقة فضلاً عن الطاقة الحركية الانتقالية للجزيء. ويمكن للجزيء ان يدور. أي انه سيمتلك طاقة دورانية. وقد وجد ان مركبات الحركتين كليهما الانتقالية والدورانية للحركة العشوائية للجزيء تمتلك معدل

طاقة حركية مساوية الى $(\frac{1}{2} k_B T)$ وهذا ما يعرف بنظرية التوزيع المتساوي.

وطبقاً لهذه النظرية فان مركبات الطاقة الحركية الدورانية ستمتلك مقدراً من الطاقة مساوياً الى $(\frac{1}{2} k_B T)$ لكل منهما, وبتعبير آخر فان مجموع معدل الطاقة الحركية الدورانية تساوي $(k_B T)$ وان الطاقة الحركية الكلية للجزيئة الواحدة ستساوي

$$K_B T + \frac{3}{2} K_B T = \frac{5}{2} k_B T \quad \dots\dots\dots (16)$$

ولمجموع الجزيئات فان هذه الطاقة ستساوي

$$E = \frac{5}{2} N k_B T \quad \dots\dots\dots (17)$$

ويجب أن نتذكر من انه تم إهمال طاقات أخرى كالطاقة الاهتزازية لذرات الجزيئة الثنائية, فضلاً عن إهمال الطاقة الناتجة من تغير قوة الربط بين الذرات المذكورة. ويمكن تعريف الطاقة الداخلية للغاز: على انها تمثل جميع أنواع الطاقات التي تملكها الذرات او الجسيمات الأخرى المكونة للمادة.

الحرارة النوعية للغازات The specific Heat of Gases

عند تسخين غاز ما, فان درجة حرارته سترتفع وستزداد معها ايضاً الطاقة الداخلية للغاز ويزداد ضغطه واذا سمح له ان يتمدد فانه سينجز شغلاً. ان قيمة الحرارة النوعية للغاز تعتمد على ما اذا كان الوعاء الذي يحتوي الغاز سيسمح للغاز بالتمدد ام لا. وبصورة عامة فان للغاز نوعين من الحرارة النوعية وهما كما يأتي:

1- الحرارة النوعية عند الضغط الثابت C_p .

2- الحرارة النوعية عند الحجم الثابت C_v .

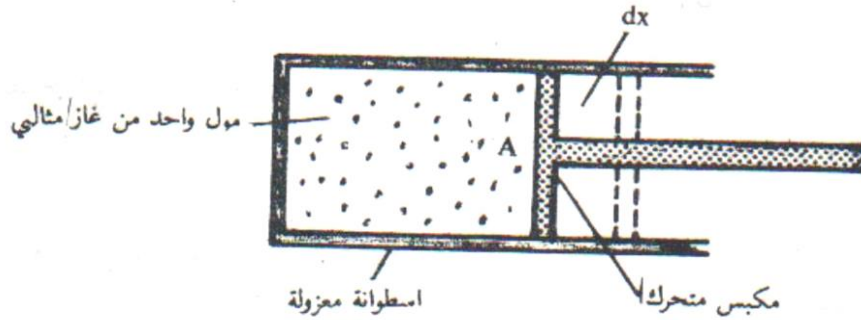
ويقصد بهما كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة مول واحد من الغاز درجة حرارية واحدة مع بقاء ضغطه او حجمه ثابتاً على التوالي, وقد وجد ان C_p اكبر من C_v للغازات. والسبب في ذلك يعود الى ان الحرارة التي يزود بها الغاز ذو الحجم الثابت ستؤدي الى زيادة

طاقته الداخلية, اما الحرارة التي يزود بها الغاز ذو الضغط الثابت فأنها ستؤدي الى رفع طاقة الداخلية فضلاً عن قيامها بإنجاز شغل من خلال تمدد الغاز (زيادة حجمه) ضد الضغط الثابت المسلط عليه.

العلاقة بين C_p و C_v للغاز المثالي

The Relation between C_V and C_p

لنأخذ مولاً واحداً من غاز مثالي ونضعه في اسطوانة ذات مكبس طليق الحركة كما في الشكل (6), ولنفرض أن مساحة المكبس تساوي (A) وازيح مسافة مقدارها (dx), نتيجة لتزويد الغاز بكمية من الحرارة مقدارها (dQ), وهذا يعني ان حجم الغاز قد ازداد من (V) إلى (V + dV) نتيجة لارتفاع درجة حرارة من T الى (T + dT).



الشكل (6) التحقق من العلاقة بين C_p و C_v

إن القوة التي يسلطها الغاز على المكبس تساوي (PA), والتي ستنتج شغلاً (dW) يعطى بالعلاقة الآتية:

$$dW = PA dx = p dV \quad \dots\dots\dots (18)$$

ان كمية الحرارة (dQ) ستؤدي الى رفع درجة حرارة مول واحد من الغاز درجة حرارية واحدة, ومن تعريف الحرارة النوعية المولية عند الضغط الثابت C_p فان

الارتفاع في درجة الحرارة $\times C_p \times$ عدد المولات = dQ

$$dQ = C_p dT \quad \dots\dots\dots (19)$$

أما الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة مول واحد من الغاز درجة حرارية واحدة عند ثبوت الحجم فانها ستؤدي الى رفع طاقته الداخلية (dU), ومن تعريف الحرارة النوعية المولية عند الحجم الثابت C_V نجد ان

$$dU = C_V dT \quad \dots\dots\dots (20)$$

وباستخدام القانون الأول للثرموداينمك والذي ينص على ان

$$dQ = dU + dW \quad \dots\dots\dots (21)$$

وبالتعويض عن قيم dW و dQ و dU بما يساويهما من المعادلات (18) و (19) و (20) نجد أن

$$C_P dT = C_V dT + PdV \quad \dots\dots\dots (22)$$

وعندما نطبق القانون العام للغاز المثالي على المرحلتين الابتدائية والنهائية لمول واحد من الغاز نجد ان

$$PV = RT$$

$$P (V + dV) = R(T + dT)$$

وبالطرح نجد أن

$$PdV = RdT \quad \dots\dots\dots (23)$$

وبالتعويض في المعادلة (22) نجد أن

$$C_P dT = C_V dT + RdT \quad \dots\dots\dots (24)$$

أي أن

$$C_P - C_V = R \quad \dots\dots\dots (25)$$

والتي تساوي (8.314J/mol.K) أو تقريبا (2cal/ mol.K). وهكذا نجد ان C_p اكبر من C_v بحوالي (2cal / mol.K).

ان العلاقة السابقة تصح بصورة تقريبية لجميع الغازات الحقيقية.

حساب C_p و C_v للغاز المثالي (احادي الذرة)

ان الزيادة في الطاقة الداخلية (dU) لمول واحد من الغاز المثالي تحت الحجم الثابت نتيجة لارتفاع درجة حرارته بمقدار dT تعطى بالعلاقة الآتية:

$$dU = C_v dT \quad \dots\dots\dots (26)$$

وبما أن الطاقة الداخلية للغاز المثالي احادي الذرة تتكون كلياً من الطاقة الحركية الانتقالية نجد ان

$$dU = \frac{3}{2} R dT \quad \dots\dots\dots (27)$$

وبمقارنة المعادلتين (26) و(27) نجد أن

$$C_v = \frac{3}{2} R \quad \dots\dots\dots (28)$$

وبما أن

$$C_p = R + C_v \quad \dots\dots\dots (29)$$

إذن

$$C_p = R + \frac{3}{2} R = \frac{5}{2} R \quad \dots\dots\dots (30)$$

وللغاز المثالي ثنائي الذرة نجد ان

$$C_v = \frac{5}{2} R \quad \dots\dots\dots (31)$$

$$C_p = \frac{7}{2} R \quad \dots\dots\dots (32)$$

إن نسبة C_p إلى C_v يرمز لها بـ (γ) , أي أن

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \quad \dots\dots\dots (33)$$

إن هذه النسبة تظهر في معادلة حساب سرعة الصوت في الغاز وفي معادلات التغيرات الترموديناميكية . كما يمكن أن تفيد هذه النسبة في إعطائها معلومات عن عدد ذرات جزيئة الغاز. الجدول (2) يبين بعض قيم (γ) التجريبية التقريبية, والتي غالباً ما تقل قيمتها بارتفاع درجة الحرارة.

الجدول (1) يبين قيم C_p و C_v و $C_p - C_v$ لبعض الغازات المعروفة بوحدة cal/mole. K عند الظروف الاعتيادية من ضغط ودرجة الحرارة

الغاز	C_p	C_v	$(C_p - C_v)$
الهيليوم (H_e)	4.98	3.00	1.98
الاركون (A_r)	5.00	3.00	2.00
الايوكسجين (O_2)	6.95	4.96	1.99
النروجين (N_2)	6.95	4.96	1.99
اول اوكسيد الكربون CO	6.95	4.93	2.02
ثنائي اوكسيد الكربون CO_2	8.75	6.74	2.01
الميثان CH_4	8.49	6.48	2.01

الجدول (2) يبين بعض قيم γ

قيمة γ	نوعية الجزيئي
1.67	احادي الذرة
1.40	ثنائي الذرة
1.30	متعدد الذرات

The Entropy الانتروبي

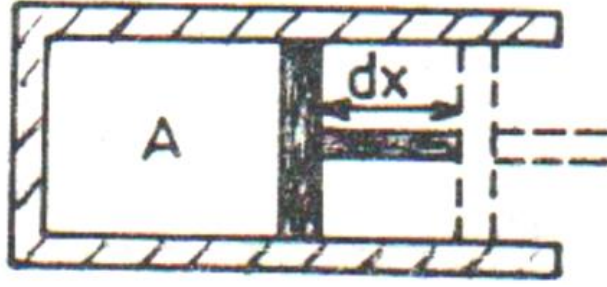
ان الانتروبي هي مقياس لعدم الانتظام (أي مقياس للفوضى). ان العلاقة التي تربط بين مقدار التغير في الانتروبي (ΔS) , وكمية الحرارة $(Q \Delta)$ التي تنتقل الى النظام عند درجة حرارته المطلقة T تعطى بالعلاقة الآتية:

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T} \dots\dots\dots (34)$$

ΔS تكون موجبة اذا كانت الحرارة تنتقل الى النظام (اذ انه يكتسب انتروبيا), أي تزداد الفوضى والعشوائية في حركة ذراته وجزيئاته.

الشغل المنجز بواسطة الغاز

لو أخذنا كتلة معينة من غاز محصورة في وعاء اسطواني مجهز بمكبس ذي مساحة مقطع عرضي مقدارها (A) كما في الشكل (7).



الشكل (7) الشغل المنجز بواسطة الغاز

ان الحرارة يمكن ان تنتقل من والى الغاز خلال جدران الاسطوانة. فإذا كان الجهاز والغاز الذي بداخله في حالة توازن حراري مع المحيط, وكان للغاز حجم ابتدائي مقدارها V_i وضغط ابتدائي مقداره P_i . يمكن انجاز شغل على الغاز عن طريق ضغطه بواسطة المكبس, كما يمكن انجاز شغل من قبل الغاز عن طريق تمدده ودفعه للمكبس الى الخارج. فإذا وصل الجهاز الى حالة توازن حراري نهائية وكان حجمه النهائي V_f وضغطه النهائي P_f . فان الشغل الذي ينجزه الغاز يتمدد ضد المكبس ويحركه مسافة مقدارها dx هو:

$$dW = F \cdot dx \quad \dots\dots\dots (35)$$

بما ان

$$F = PA$$

فان

$$dW = PA \cdot dx \quad \dots\dots\dots (36)$$

بما ان

$$A dx = dV$$

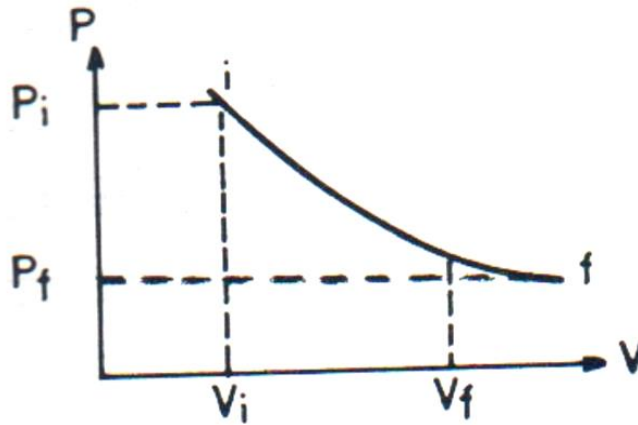
فان

$$dW = P dV \quad \dots\dots\dots (37)$$

اذ تمثل (dV) الزيادة التفاضلية في الحجم. ومن تكامل العلاقة في أعلاه يمكن الحصول على الشغل الكلي المنجز, أي ان:

$$W = \int_{V_i}^{V_f} PdV \quad \dots\dots\dots (38)$$

ولأجل إجراء هذا التكامل يجب معرفة كيفية تغير الضغط مع الحجم. لان الشغل المنجز لا يعتمد فقط على الحالة الابتدائية والحالة النهائية للجهاز وإنما يعتمد ايضاً على الحالات المتوسطة بينهما, أي على المسار. انظر الى الشكل (8)



الشكل (8) الشغل وعلاقته بالمسار

ضغط الغاز المثالي The Ideal Gas Pressure

ان تصادم جزيئات الغاز مع جدران الوعاء الذي يحتويه يولد ما يعرف بضغط الغاز, وذلك نتيجة لقوة الناتجة عن هذا التصادم, ونظراً لوجود بلايين التصادمات خلال الثانية الواحدة فان القوة الناتجة عن هذه التصادمات ستكون:

1- ثابتة تقريباً.

2- ويكون متوسط القوة عمودياً على السطح.

وان القوة العمودية المؤثرة على وحدة المساحة من جدران الوعاء تسمى بضغط الغاز وان وحدات الضغط هي $(Pa = N/m^2)$. إن متوسط الضغط على جدران الوعاء الحاوي على الغاز تعطى بالمعادلة الآتية:

$$P = \frac{F}{A} = \frac{1}{3} (n_o) m \bar{v}^2 = \frac{2}{3} (n_o) \left(\frac{1}{2} m \bar{v}^2\right) \dots\dots\dots(39)$$

حيث أن (n_o) تمثل عدد الجزيئات في وحدة الحجم و V سرعة جزيئات الغاز و m كتلة الجزيئة. وبما ان (n_o) تمثل عدد الجزيئات في وحدة الحجم فان الضغط يساوي ثلثي متوسط الطاقة الحركية لجزيئات الغاز في وحدة الحجم.

وبمقارنة النتيجة السابقة مع معادلة الغاز المثالي $(PV = nRT)$ فإننا سنجد ان :

$$\frac{1}{3} (n_o) m \bar{v}^2 = \frac{nRT}{V} \dots\dots\dots (40)$$

وبإعادة ترتيب هذه المعادلة يمكن الحصول على درجة الحرارة (T) , أي ان

$$T = \frac{(n_o V) m \bar{v}^2}{3nR} \dots\dots\dots (41)$$

إن $(n_o V)$ يمثل العدد الكلي للجزيئات في الحجم (V) و n تمثل عدد الجزيئات الغرامية (المولات) في الحجم نفسه و (nN_A) تمثل ايضاً العدد الكلي للجزيئات في الحجم (V) , أي ان:

$$n_o V = n N_A \dots\dots\dots (42)$$

فنحصل على

$$T = \frac{2N_A}{3R} \left(\frac{1}{2} m \bar{v}^2 \right) \dots\dots\dots (43)$$

وكذلك

$$\frac{R}{N_A} = K_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K} \dots\dots\dots (44)$$

يمكن التعبير عن درجة الحرارة المطلقة للغاز المثالي بما يأتي :

$$T = \left(\frac{1}{2} m \bar{v}^2 \right) \left(\frac{2N_A}{3R} \right) = \left(\frac{1}{2} m \bar{v}^2 \right) \left(\frac{2}{3K_B} \right) \dots\dots\dots (45)$$

وهذا يعني انه امكن التعبير عن درجة الحرارة المطلقة بدلالة الطاقة الحركية الانتقالية لجزيئات الغاز.

مسائل الفصل الثالث

س1: جد الحجم الذي يشغله جزيء كيلو غرامي واحد من غاز النيتروجين (N_2) تحت الظروف القياسية من ضغط ودرجة حرارة. علماً ان الكتلة الجزيئية للنيتروجين تساوي (28).

الحل:

ان الظروف القياسية من ضغط ودرجة حرارة هي

$$P = 1.01 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

$$T = 273 \text{ K}$$

وباستخدام قانون الغاز المثالي

$$PV = nRT$$

ولإيجاد الحجم

$$V = \frac{nRT}{P}$$

وبما أن

$$n = 1 \text{ Kmol} , R = 8314 \text{ J/Kmol.K}$$

$$V = \frac{1 \text{ Kmol} \times 8314 \text{ J/Kmol.K} \times 273 \text{ K}}{1.013 \times 10^5 \text{ N/m}^2}$$

$$V = 22.4 \text{ m}^3$$

س2: جد قيمة متوسط سرعة جزيئات الأوكسجين في الهواء في الظروف العيارية من ضغط ودرجة حرارة

الحل:

إن الظروف القياسية (العيارية) من ضغط ودرجة حرارة هي

$$P = 1.01 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

$$T = 273 \text{ K}$$

وباستخدام المعادلة (43) لإيجاد قيمة (v^2) نجد ان

$$v^2 = \frac{3RT}{N_A m}$$

يمكن إيجاد قيمة (m) لجزيئات الأوكسجين باستخدام الكتلة الجزيئية لغاز الأوكسجين المساوية الى (32), أي ان:

$$m = \frac{32}{N_A}$$

أي أن

$$m N_A = 32$$

وبالتعويض في المعادلة السابقة:

$$v^2 = \frac{3RT}{32}$$

$$v^2 = \frac{3 \times 8314 \times 273}{32} = 2127864375 \text{ m}^2 / \text{s}^2$$

$$v = 461.2878 \text{ m/s}$$

س3: جد مقدار التغير في الانتروبي عند انصهار مكعب من الثلج كتلته (20 g) في درجة حرارة (0°C).

الحل:

يمكن إيجاد كمية الحرارة اللازمة لصهر الجليد من العلاقة الآتية:

$$Q = m L$$

L : تمثل الحرارة الكامنة لانصهار الجليد في درجة 0°C وتساوي 80 cal/g

$$Q = 20g \times 80 \text{ cal/g}$$

$$Q = 1600 \text{ cal}$$

$$Q = 1600 \text{ cal} \times 4.186 \text{ J/cal} = 6697.6 \text{ J}$$

يمكن إيجاد مقدار التغير في الانتروبي عند درجة حرارة 0°C من العلاقة الآتية:

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T} = \frac{Q}{T}$$

$$\Delta S = \frac{6697.6 \text{ J}}{273\text{K}}$$

$$\Delta S = 24.53 \text{ J/K}$$

حيث تم التعويض عن 0°C بـ 273K

س4: جد مقدار التغير في الانتروبي لمول واحد من غاز حجمه الابتدائي يساوي cm^3 1000 موضوع داخل اسطوانة ذات مكبس متحرك, اذا تمدد الغاز الى حجم نهائي يساوي 2000cm^3 مع ثبوت درجة الحرارة.

الحل:

باستخدام المعادلة الآتية

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta W$$

إذا كان التغير في درجة الحرارة يساوي صفر فان $\Delta U = 0$, أي ان

$$\Delta Q = \Delta W = P\Delta V$$

وبما أن

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$$

فان

$$\Delta S = \int \frac{\Delta Q}{T} = \int_{V_i}^{V_f} \frac{PdV}{T}$$

وباستخدام قانون الغاز المثالي

$$PV = nRT$$

وبما أن

$$n = 1$$

$$\frac{P}{T} = \frac{R}{V}$$

وعليه فان

$$\Delta S = \int_{V_i}^{V_f} R \frac{dV}{V} = R \ln V \Big|_{V_i}^{V_f}$$

$$\Delta S = R \ln \frac{V_f}{V_i}$$

$$\Delta S = 8.314 \text{ J/K} \ln \frac{2000 \text{ cm}^3}{1000 \text{ cm}^3}$$

$$\Delta S = 5.76 \text{ J/K}$$

ويساوي مقدار التغير في الانتروبي

س5 : جد قيمة كل من C_p و C_v لغاز الأوكسجين عند الظروف القياسية, اذا علمت ان نسبة C_p الى C_v تساوي 1.40.

الحل:

للغاز المثالي تكون

$$C_p - C_v = 8.314 \dots\dots\dots (1)$$

ولكن

$$\frac{C_p}{C_v} = 1.4$$

$$C_p = 1.4 C_v \dots\dots\dots (2)$$

وبالتعويض عن (2) في (1) نحصل على

$$1.4C_v - C_v = 8.314$$

$$0.4 C_v = 8.314$$

$$C_v = \frac{8.314}{0.4}$$

$$C_v = 20.785 \text{ J/mol.K}$$

وعليه فان C_p تساوي

$$C_p = 20.785 + R$$

$$C_p = 20.785 + 8.314$$

$$C_p = 29.099 \text{ J/mol.K}$$