

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 الواطنة وكيفية الحصول عليها.

درجة الحرارة

يعد مفهوم درجة الحرارة من المفاهيم الأساسية في الفيزياء، شأنه شأن المفاهيم الأساسية الأخرى كالقوى مثلاً. وعلى الرغم من أن الجميع يملك فكرة واضحة أو تصوراً معيناً عن معنى هذا المفهوم وذلك بدلالة أحاسيسه، إلا أن مفهوم درجة الحرارة ليس سهل التعريف والتحديد بدقة. ومن المفاهيم البسيطة والأولية هو أن درجة الحرارة هي ذلك الشيء المسؤول عن إحساسنا بالسخونة والبرودة. وتُعدُّ حاسة اللمس أبسط طريقة لتمييز سخونة وبرودة الأجسام، إذ نستطيع القول أن 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 أن 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. وتعرف 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 الكلفنية (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 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:

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

إذ إن 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 إن 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 مدى درجات الحرارة، 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 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 يهيئ 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 .

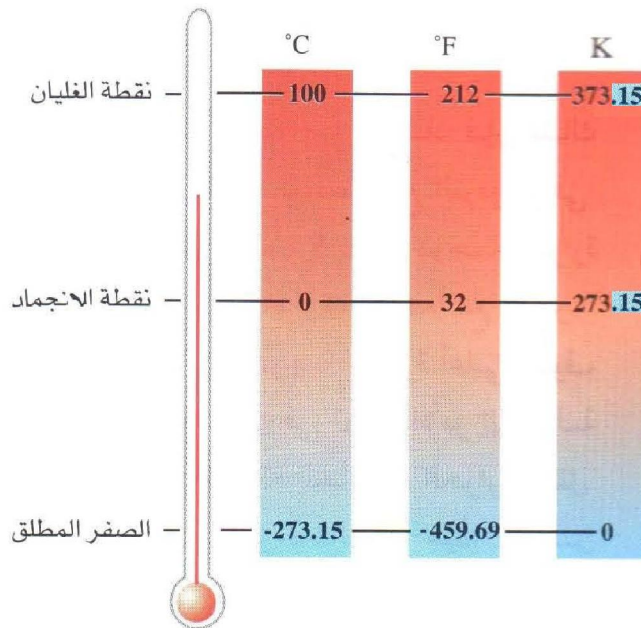
المقياس الفهرنهايتي (°F) The Fahrenheit Scale

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 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 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 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 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 حرارتهما 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 (الخرسانة)	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 الآتية:

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

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 الانبلي	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

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

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 حجمه 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.

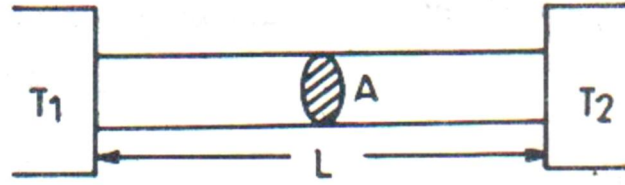
طريقة التوصيل Conduction Method

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 بواسطة 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

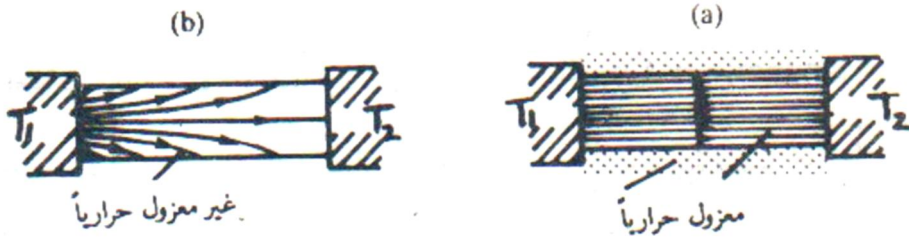
الكثرونات التكافؤ تتحرك بحرية تامة تقريباً خلال المعدن حاملة معها الحرارة إلى أجزاء المعدن المختلفة.

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).

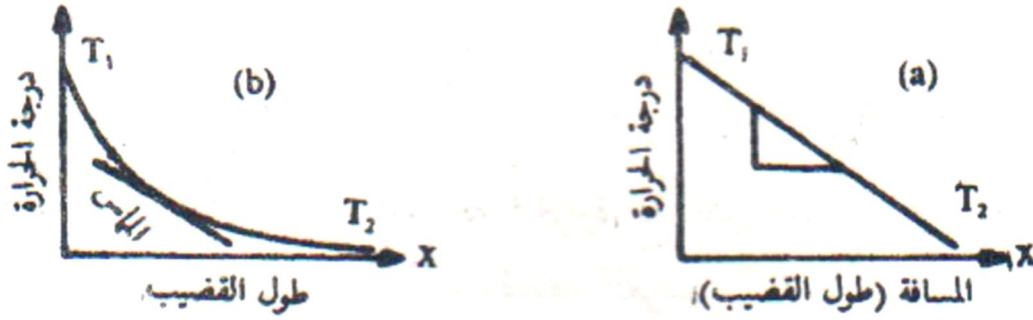


الشكل (5) الميل الحراري



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 سواءً 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 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 امبستوس	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. إن 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.

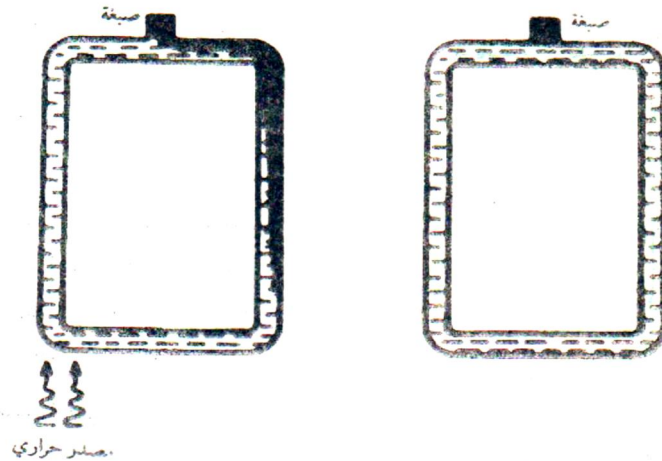
وتعد طريقة الحمل من الطرق الفعالة لانتقال الحرارة وتشكيل تيارات الحمل الهوائية في المناطق الساحلية والجبلية وعند خط الاستواء والقطبين وفي المناطق المدارية.

إن دراسة الحمل بطريقة المعادلات الرياضية ليس شيئاً سهلاً وذلك يرجع إلى أن 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 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

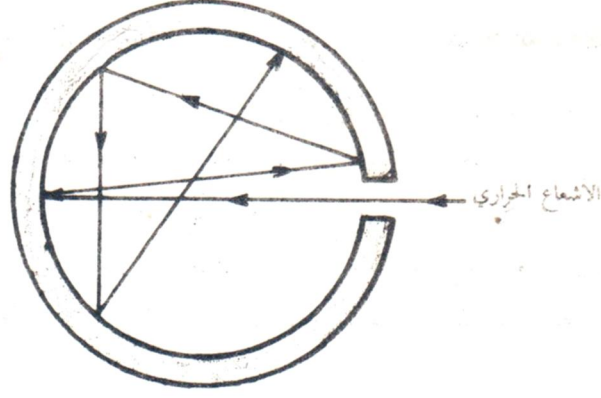
$$a + r = 1 \quad \dots\dots\dots (24)$$

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 (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 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:

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

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:

$$\Delta Q = \sigma A (T_1^4 - T_0^4) t \quad \dots\dots\dots (28)$$

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 الثلجات 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 وتسايط الضغط) جرى تسهيل غازات الأكسجين والنيتروجين والهيدروجين والهيليوم. يملك غاز الهيليوم أقل درجة تسهيل من بين جميع الغازات. ان درجة حرارة غليان سائل الهيليوم تحت الضغط الجوي الاعتيادي تساوي 4.2K . الجدول (6) يبين درجة حرارة غليان بعض سوائل الغازات بالدرجات السيليزية والكلفنية، وكما يبين أيضا درجة حرارة انجماد سوائل الغازات المذكورة.

وغالباً ما يستعان بسائل الغاز ذي درجة حرارة الغليان العالية في تبريد الغاز ذي درجة حرارة الغليان الأقل أولاً ثم القيام بعملية تسيله 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

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 الآتية

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

جد قيم الثوابت a 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 وغليان الماء في المعادلة أعلاه فنحصل على:

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

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

بطرح 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 0.08 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 أن معامل التمدد الطولي لمادة النحاس

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

الحل :

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

بما ان

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

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

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

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

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

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

مقدار الزيادة في الطول

س6 : جد مقدار التمدد الطولي لسطح من الخرسانة طوله 20 m عندما تغيرت درجة حرارة الجو من 0°F الى 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:

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

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

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

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 بأن 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 فإن كلا من الوعاء الزجاجي والماء سوف يتمددان. ان مقدار الماء الذي ينسكب سيكون مساوياً الى الفرق بين حجمي الماء والوعاء الزجاجي الذي يحتويه.

وعليه فإن التغير في درجة الحرارة يساوي : $\Delta T = 65^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C} = 40^\circ\text{C}$
أما التغير في حجم الوعاء الزجاجي فإنه يساوي:

$$\begin{aligned}\Delta V_g &= \gamma_g V_o \Delta T \\ &= 0.09 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \times 250 \text{ cm}^3 \times 40^\circ\text{C} \\ &= 0.09 \text{ cm}^3\end{aligned}$$

التغير في حجم الماء ΔV_w سيكون مساوياً الى :

$$\begin{aligned}\Delta V_w &= \gamma_w V_o \Delta T \\ &= 2.1 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \times 250 \text{ cm}^3 \times 40^\circ\text{C} \\ &= 2.1 \text{ cm}^3\end{aligned}$$

وعليه فإن حجم الماء المسكوب سيكون مساوياً الى:

$$\begin{aligned}\Delta V_w - \Delta V_g &= 2.1 - 0.09 \\ &= 2.01 \text{ cm}^3\end{aligned}$$

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 بأن الموصلية الحرارية تساوي $0.2 \text{ cal/cm.s.}^\circ\text{C}$.

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:

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

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

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

الإشارة السالبة تعني ان درجة الحرارة تقل كلما ازدادت المسافة.

الفصل الثاني : الحرارة والقانون الأول للثرموداينمك

Heat and First Law of Thermodynamics

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 Heat and Its Effects

إن عملية رفع درجة حرارة المادة يعني تزويدها بالطاقة الحرارية، أما عملية خفض درجة الحرارة للمادة فتعني سحب مقدار من الطاقة الحرارية. إن 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، فإن كمية من الطاقة الحرارية سوف تمتص من دون أن تسبب أية زيادة في درجة حرارة المادة. وفي حالة عمليات التكاثف والانجماد فإن 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) Quantity Heat

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:

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

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 Mechanical Equivalent

Heat(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 أن تتحول إلى 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) Specific Heat of Materials

يطلق على السعة الحرارية النوعية بالحرارة النوعية وهي كمية الحرارة
التي يجب أن تنساب إلى أو من وحدة الكتلة من المادة لتغير 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، وعليه
يجب ذكر درجة الحرارة عند إعطاء قيمة الحرارة النوعية لمادة ما. حيث
إن الحرارة النوعية للماء عند درجة حرارة الغرفة تساوي تقريباً
($4.2 \times 10^3 \text{ J / Kg.K}$).

تتناقص السعة الحرارية والحرارة النوعية لجميع المواد بانخفاض
درجة الحرارة وتصل إلى 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:

$$Q = mC (T_2 - T_1) \quad \text{..... (5)}$$

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 Specific Heat Measurement

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

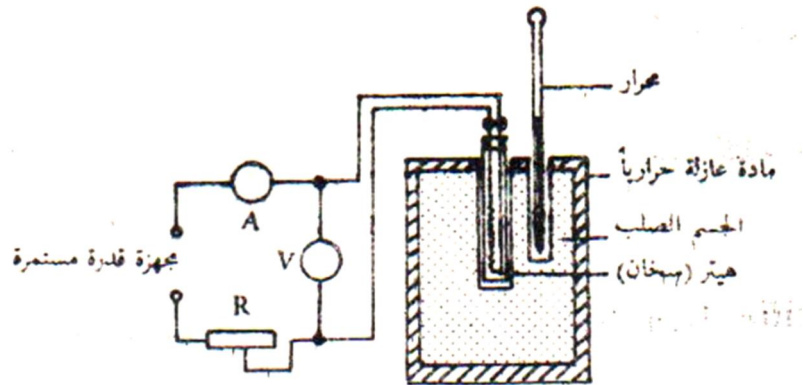
تستخدم هذه الطريقة لقياس الحرارة النوعية للمواد الصلبة الجيدة التوصيل للحرارة كالنحاس والألمنيوم. إذ تؤخذ قطعة منتظمة الشكل تحتوي على ثقب يثبت فيه سخان كهربائي (هيتز) ومجس حراري (ثرموميتر). تقاس كتلة المادة ودرجة حرارتها الابتدائية، ثم تحاط القطعة المعدنية بمادة عازلة كالصوف الطبيعي أو الاصطناعي أو البولستيرين 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، فان
 الطاقة الكهربائية التي يزود بها السخان = الطاقة الحرارية التي
 تزود بها القطعة المعدنية

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

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

فإذا كانت قيمة التيار بالأمبير والفولتية بالفولت والزمن بالثانية
 ودرجة الحرارة بالدرجة الكلفنية والكتلة بالغرام فان وحدة الحرارة
 النوعية هي الجول لكل غرام لكل درجة كلفنية. 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 (T_1) والنهائية (T_2) وقيم الفولتية (V) والتيار (I) والزمن (t). وهنا يجب ان تكون قيمة الحرارة النوعية للمسعر والمحرك معلومة، ويمكن استخدام المعادلة الآتية:

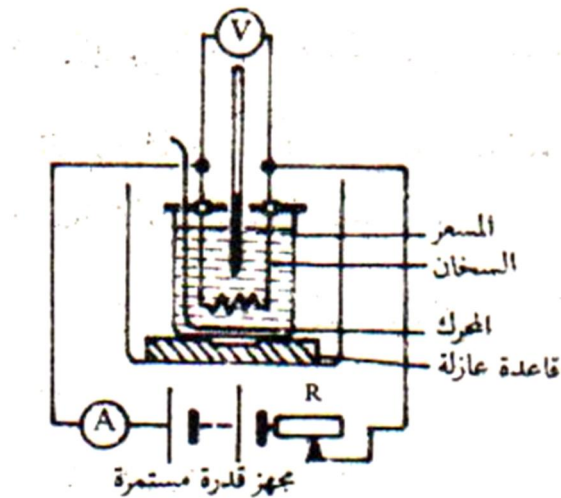
الطاقة التي يزود بها السخان = الطاقة التي اكتسبها السائل + الطاقة التي اكتسبها المسعر والمحرك

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

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

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

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

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{كمية الحرارة التي اكتسبها} \\ \text{الماء خلال رفع درجة} \\ \text{الصلب خلال انخفاض درجة} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{كمية الحرارة التي فقدتها الجسم} \\ \text{أكتسبها} \end{array} \right\}$$

رفع

$$\text{حرارته من } T_1 \text{ الى } T_2 \quad \text{حرارته من } T_1 \text{ الى } T_2 \quad \text{حرارته من } T_3 \text{ الى } T_2$$

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

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

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

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

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.

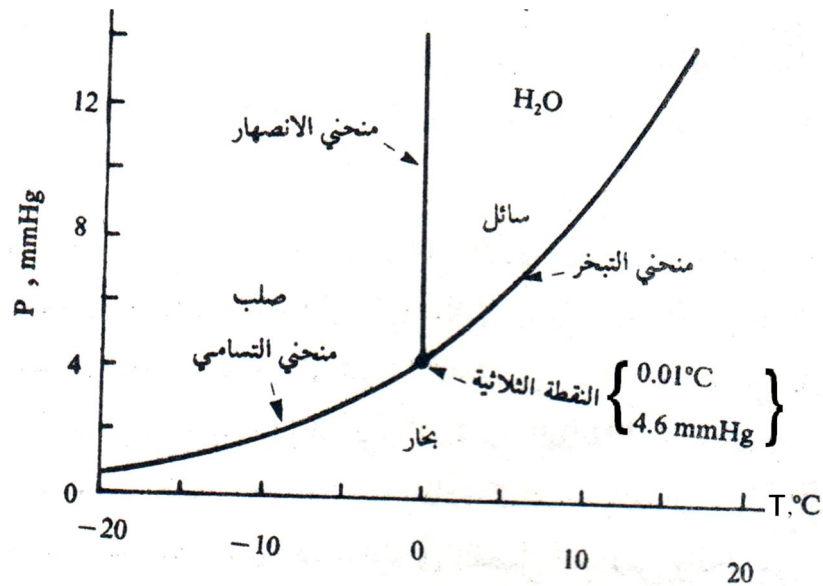
وهناك طرق اخرى لقياس الحرارة النوعية للمواد مثل طريقة الجريان المستمر والطريقة الميكانيكية وطريقة التبريد.

Triple Point النقطة الثلاثية للمادة

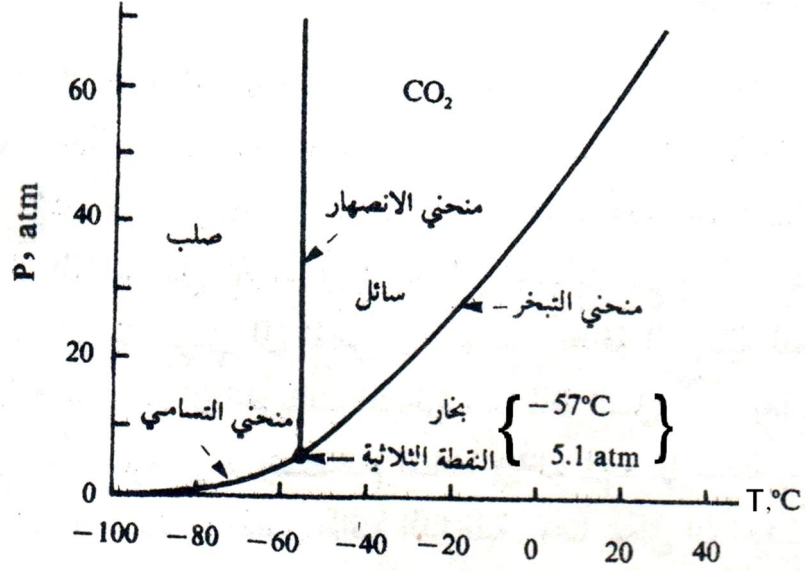
يؤثر الضغط المسلط على تغيرات حالات المادة عندما تتغير درجة حرارتها. فنجد ان درجة حرارة غليان الماء تزداد بزيادة الضغط المسلط عليها الى ان تصل قيمة حرجة لها، بحيث لا يمكن فوقها ان تبقى المادة في حالة السيولة مهما ازداد الضغط المسلط عليه. إن تغير درجة غليان المادة مع الضغط المسلط عليها يسمى بمنحني التبخر.

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 منحنيا الانصهار والتبخر للماء عند درجة حرارة 0.01°C وتحت ضغط 4.6 mmHg 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 مباشرة 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

State Transformation المادة تحولات حالة

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 حرجية. 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

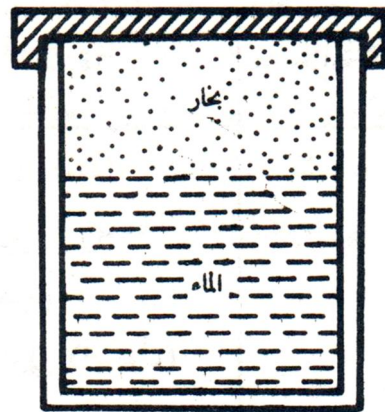
المادة	حرارة التبخر cal/g
الماء	539
النيتروجين	48
الأكسجين	51
كحول ايثيلي (ايثانول)	204
الزئبق	71
الزنك	475
الرصاص	175
حامض الكبريتيك	122

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

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

إذا وضع سائل في وعاء مغلق مفرغ من الهواء، فإن جزيئات السائل سوف تتبخر إلى الفراغ الموجود فوق سطح السائل، كما وتعود بعض جزيئات البخار وتصطدم بسطح السائل وتعود إليه، وتستمر هذه العملية إلى أن تحصل حالة التوازن، وهي الحالة التي تتساوى فيها عدد الجزيئات التي تترك السائل في زمن معين مع الجزيئات التي تعود إليه من البخار في نفس الزمن. وهذا يعني أن عدد جزيئات البخار ستبقى ثابتة عند حد معين بشرط عدم تغير درجة حرارة النظام، ويقال عندئذٍ بأن 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 1 ملم زئبق يساوي 1 تور (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.

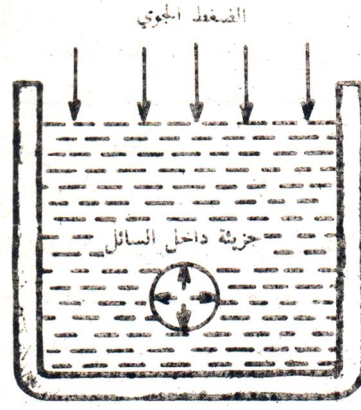
ان وحدة قياس الحرارة الكامنة للانصهار هي cal/g . اما في نظام (SI) فانها تساوي (J/Kg) . ان الحرارة الكامنة لانصهار الجليد في درجة حرارة 0°C هي 80 cal/g تحت الضغط الجوي الاعتيادي. ان الطاقة المجهزة للجسم الصلب تعمل على مساعدة الجزيئات على التغلب على القوى التي تربطها مع الجزيئات الأخرى في التركيب الصلب 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 الترموداينمك

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

$$\Delta U = \Delta Q - \Delta W \quad \text{..... (9)}$$

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 Q Δ و ΔW يكون ثابتاً. وهذا هو جوهر القانون الأول للثرموداينمك. 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 صفراً في حالة التمدد الحر للغاز الذي يكون فيه ΔQ و ΔW تساويان صفراً. 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 للثرموداينمك 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

الشغل المبذول + الحرارة المفقودة = 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.

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

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

$$W = P(V_f - V_i) \quad \text{..... (10)}$$

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 اسطوانى 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:

$$Q = mL$$

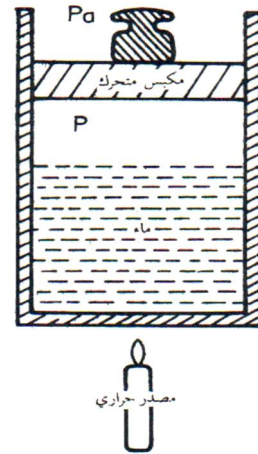
حيث أن L تمثل الحرارة الكامنة للتبخر.

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_2 و U_1 تمثلان الطاقة الداخلية للسائل والبخار على التوالي. وعند تطبيق القانون الأول للترموداينمك 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 تدخل 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 أو 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 الأدياباتية كثيرة فانضغاط مزيج البنزين والهواء في آلة الاحتراق الداخلي (في شوط الانضغاط) هو عملية أدياباتية. وفي هذه الحالة ترتفع درجة حرارة النظام (مزيج البنزين والهواء). كذلك تمدد نواتج الاحتراق (في شوط القوة) هو عملية أدياباتية، 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 صفراً، لان الحجم لم يتغير وبذلك فإن القانون الأول للثرموداينمك يكون بالشكل التالي:

$$\Delta U = \Delta Q \quad \text{..... (14)}$$

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 أدياباتيكية، وبذلك فإن $(Q = 0 \Delta)$. وحيث ان جدران الوعاء صلبة فأنة 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 الفصل الثاني

س1: إذا كان معدل انسياب سائل خلال مسعر الانسياب المستمر تساوي 15g/s، وان السخان الكهربائي يقوم بتزويد قدرة مقدارها W 200 . 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 :

$$1W = J/s1$$

الطاقة الكهربائية للحالة الأولى = 200 J/s

الطاقة الكهربائية للحالة الثانية = 200 J/s

كمية الحرارة المكتسبة بواسطة الماء في الثانية الواحدة = $T \Delta m C$

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

نفرض أن معدل فقدان الحرارة إلى المحيط خلال الثانية الواحدة = H

كمية الحرارة المكتسبة = 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

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

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

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

بالتعويض عن C في الحالة الأولى أو الثانية نجد أن

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

$$200 \text{ J/s} = 180 \text{ J/s} + H$$

$$H = 200 \text{ J/s} - 180 \text{ J/s}$$

$$H = 20 \text{ J/s}$$

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 :

نفرض أن 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 $T \Delta m C =$

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

$$(100 - T_2)$$

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

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

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

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

كمية الحرارة المكتسبة = كمية الحرارة المفقودة

$$50 \times 10^{-3} \times 4 \times 10^2 (T_2 - 10) = 200 \times 10^{-3} \times 4.2 \times 10^3 (T_2 - 10)$$
$$100 \times 10^{-3} \times 4 \times 10^2 (100 - T_2) = +$$

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

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

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

$$12600 = 900 T_2$$

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

س4 : 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 1 cm^3 من الماء المقطر يشغل 167 cm^3 في حالة البخار تحت نفس الضغط. وان الحرارة الكامنة للتبخر تساوي 40 cal/g

الحل :

$$Q = mL$$

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

$$Q = 540 \text{ cal}$$

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

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

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

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

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

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.

الغاز المثالي The Ideal Gases

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

الغاز الحقيقي The Real Gases

هو الغاز الذي تكون جزيئاته صغيرة ومتباعدة بعضها عن بعض. وعند الظروف الاعتيادية من

ضغط ودرجة حرارة تقترب خواص الغازات الخفيفة من خواص الغاز درجة الحرارة المثالي يتشبه من درجة تكثف تسيل الغاز.

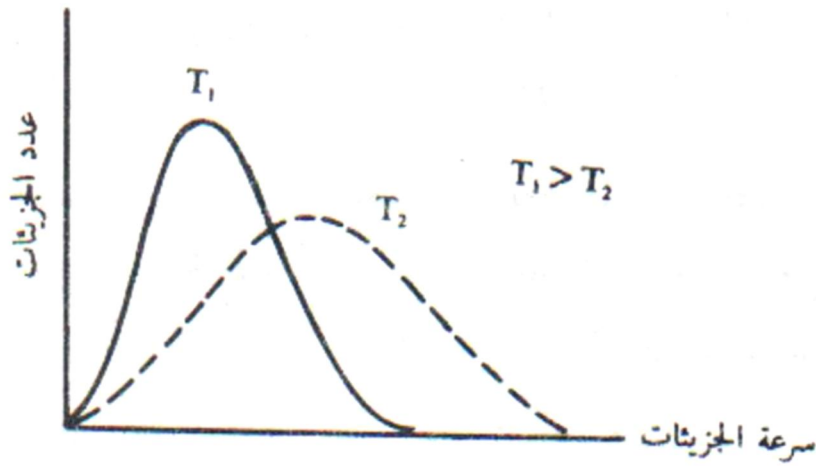
النظرية الحركية للغازات The Kinetic Theory of Gases

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:

$$\frac{1}{2}m_1v_1^2 = \frac{1}{2}m_2v_2^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

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)

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 والشئ 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 الكيلو غرام الواحد يساوي 1000 غرام، فان

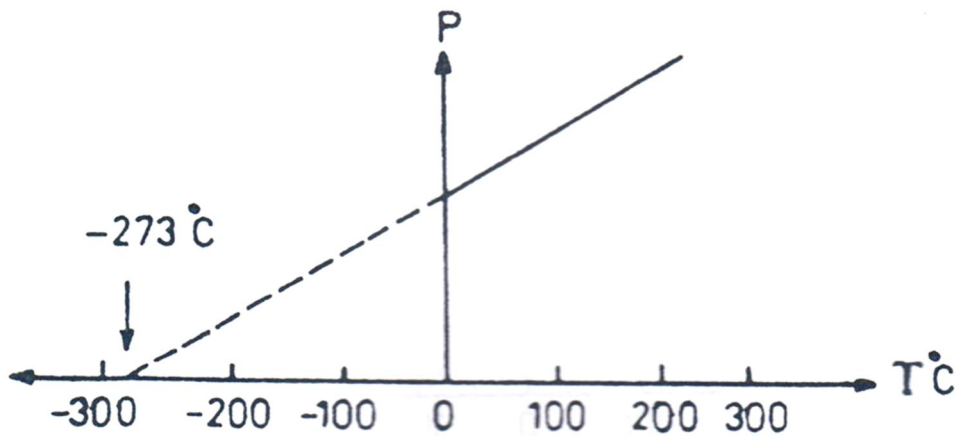
$$N_A = 6.022 \times 10^{23} \text{ particles / g.mol}$$

و غالباً 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

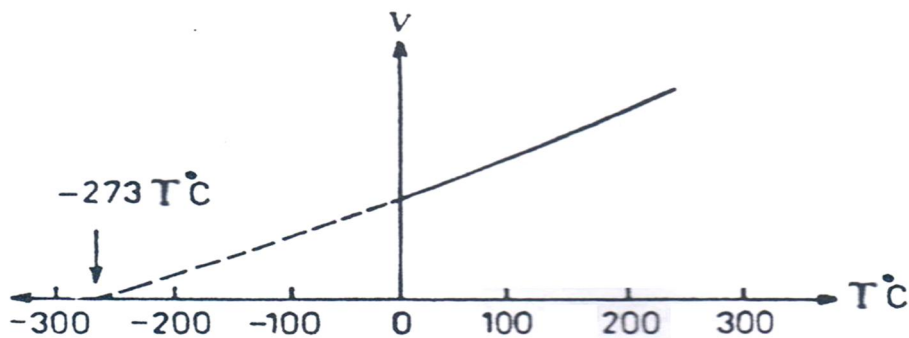
$$V \propto T$$

عند ثبوت الضغط المسلط على الغاز

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

يمكن إعادة صياغة العلاقتين السابقتين بعلاقة واحدة وهي

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



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 بعينيين عن قيم شروط اسالته.

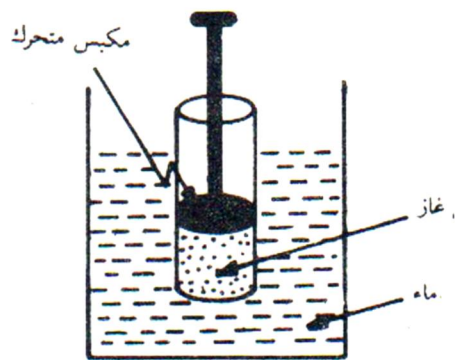
إن قانون الغاز المثالي ينطوي على قانونين ثانويين وهما:

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:

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



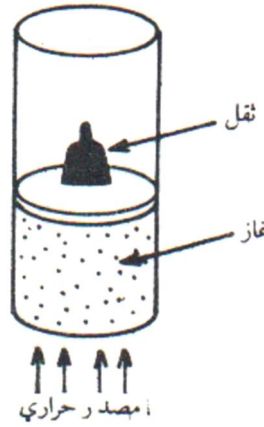
الشكل (4) التحقق من قانون بويل

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:

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

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 The Gas Constant (R)

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 ، أما R فتتمثل 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:

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

وغالباً 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 الكلفنية.

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

(مهماً) مقارنة بالحجم الذي يشغله الغاز.

5- يجب ان يكون الغاز بعيدا 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 جداً 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 والكربتون 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

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

وبجب 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، فإن 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 .

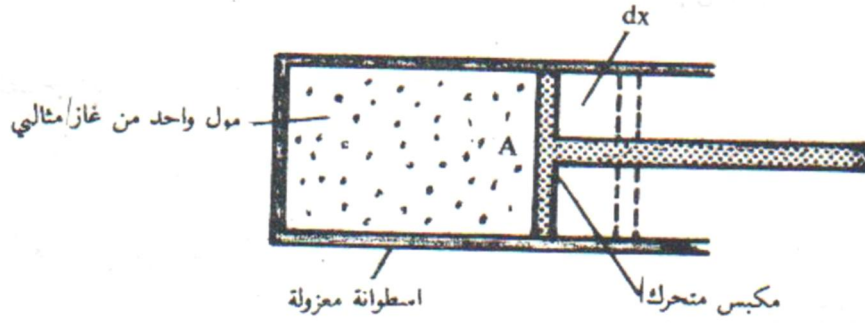
2- الحرارة النوعية عند الحجم الثابت C_v .

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:

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

إن كمية الحرارة (dQ) ستؤدي إلى رفع درجة حرارة مول واحد من الغاز درجة حرارية واحدة، ومن تعريف الحرارة النوعية المولية عند الضغط الثابت C_p فإن

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 فإنها ستؤدي إلى رفع طاقته الداخلية (dU) ، ومن تعريف الحرارة النوعية المولية عند الحجم الثابت C_v نجد أن

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

وباستخدام القانون الأول للثرموداينمك والذي ينص على أن

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

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 (8.314 J/mol.K) أو تقريبا (2 cal/ mol.K) . وهكذا نجد ان C_P اكبر من C_V بحوالي (2 cal / mol.K) .

ان العلاقة السابقة تصح بصورة تقريبية لجميع الغازات الحقيقية.

حساب Cp و CV 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
الاوكسجين (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

الانتروبي The Entropy

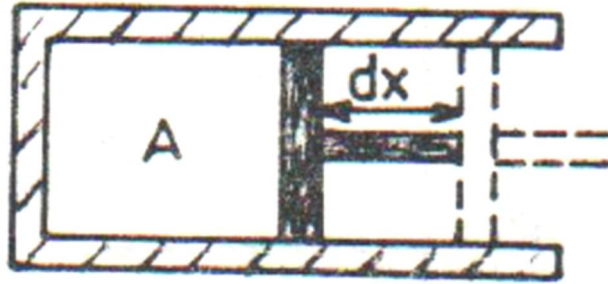
ان الانتروبي هي مقياس لعدم الانتظام (أي مقياس للفوضى). ان العلاقة التي تربط بين مقدار التغير في الانتروبي (ΔS) ، وكمية الحرارة (Q) التي تنتقل الى النظام عند درجة حرارته المطلقة T تعطى بالعلاقة الآتية:

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

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

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 ضغطة بوساطة 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 ويحرك 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

$$A dx = dV$$

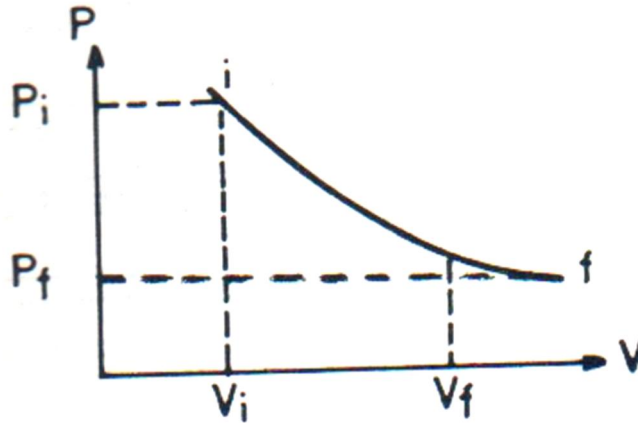
فان

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

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

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

ولأجل إجراء هذا التكامل يجب معرفة كيفية تغير الضغط مع الحجم. لأن الشغل المنجز لا يعتمد فقط على الحالة الابتدائية والحالة النهائية للجهاز وإنما يعتمد أيضاً 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 ($\text{Pa} = \text{N/m}^2$). إن متوسط الضغط على جدران الوعاء الحاوي على الغاز تعطى بالمعادلة الآتية:

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

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

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

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

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

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

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:

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

فنحصل على

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

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 كيلوغرامى 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 المثالى

$$PV = nRT$$

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:

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

$$v^2 = \frac{3 \times 8314 \times 273}{32} = 212786.4375 \text{ m}^2 / \text{s}^2$$

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

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 1000 cm^3 موضوع داخل اسطوانة ذات مكبس متحرك، اذا تمدد الغاز الى حجم نهائي يساوي 2000 cm^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

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

وباستخدام قانون الغاز المثالي

$$PV = n R T$$

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

$$C_p = 20.785 + R$$

$$C_p = 20.785 + 8.314$$

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

الفصل الرابع : السوائل

تتميز الحالة السائلة للمادة عن الحالة الصلبة والغازية بامتلاكها حجم ثابت وشكل المتغير، إذ تأخذ شكل الوعاء الذي توضع فيه وتكون قوى الترابط بين ذرات وجزيئات السائل أقل كثيراً مما هي عليه في الحالة الصلبة، وبناء على ذلك فإن السوائل لا تظهر مقاومة للاجهاد المسلط عليها.

الكثافة (ρ)

تعرف الكثافة الكتلية على انها كتلة وحدة الحجم.

ان كثافة مادة ما كتلتها (m) وحجمها (V) تعرف بالمعادلة الآتية:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ووحدة الكثافة الكتلية في النظام العالمي (SI) هي (Kg / m^3) او (g / cm^3). ان كثافة الماء الكتلية عند درجة حرارة 4°C هي Kg / m^3 او $10^3 \text{ g} / \text{cm}^3$ وكثافة الزئبق عند درجة حرارة الغرفة تساوي Kg / m^3 او $13.6 \times 10^3 \text{ g} / \text{cm}^3$.

تتغير كثافة المادة بتغير درجة حرارتها. ويعود السبب في ذلك الى ان جزيئات المادة تهتز بمسافات اكبر عندما تزداد درجة حرارة المادة، لذا فان معدل المسافة بين الجزيئات سوف يزداد، أي ان كتلة المادة ستحتل حجماً اكبر مما يؤدي الى تغير الكثافة بتغير درجة الحرارة. وبصورة عامة تقل كثافة المواد بارتفاع درجة حرارتها (ما عدا بعض الاستثناءات التي تزداد فيها الكثافة بارتفاع درجة الحرارة ضمن مدى معين من درجات الحرارة، ومن الأمثلة المعروفة الماء الذي تزداد كثافته عندما ترتفع درجة الحرارة من 0°C الى 4°C). والجدول (1) يبين كثافة بعض السوائل المعروفة، كذلك يبين الجدول (2) اعتماد كثافة الماء على درجة الحرارة.

الجدول (1) كثافة بعض السوائل المعروفة

المادة	الكثافة الكتلية g / cm ³
الماء	0.998
البنزين	0.879
الزئبق	13.6
ماء البحر	1.025

الجدول (2) كثافة الماء ودرجة الحرارة

المادة	الكثافة الكتلية g / cm ³
الماء عند 0°C	0.9998
الماء عند 4°C	1.000
الماء عند 20°C	0.9982
الماء عند 100°C	0.9584
ماء البحر عند 15°C	1.025

تعتمد كثافة المادة على عاملين رئيسيين وهما:

- 1- كتلة الذرات او الجزيئات.
 - 2- المسافة البينية بين الذرات والجزيئات.
- مثال ذلك الحديد والألمنيوم ، اذ نجد ان نسبة كثافة الحديد g / cm^3 7.9 الى كثافة الألمنيوم $2.7 g/cm^3$ هي (2.9) بينما نجد ان نسبة العدد الذري للحديد (56) الى العدد الذري للألمنيوم (27) هي أكثر من (2) بقليل . فإذا كانت المسافة بين الذرات هي نفسها للمادتين فستكون نسبة كثافة الحديد الى الألمنيوم هي الضعف وهذا يدل على ان ذرات الحديد تكون متقاربة أكثر مما تكون عليه ذرات الألمنيوم.

الوزن النوعي Specific Gravity

الوزن النوعي (SG) خاصية مرتبطة ارتباطاً وثيقاً بالكثافة، وتعرف بالنسبة بين كثافة المادة وكثافة الماء عند 4°C .

$$SG = \frac{\rho}{\rho_{H_2O}} \dots\dots\dots (2)$$

حيث أن الوزن النوعي نسبة لا أبعاد لها، فإن له نفس القيمة في كل نظم الوحدات.

الخاصية الشعرية Capillarity

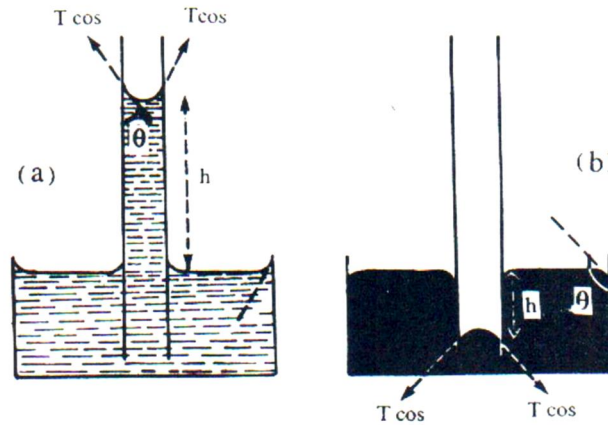
عند وضع انبوب شعري مفتوح الطرفين في سائل، فإن تأثير الشد السطحي للسائل سيؤدي الى إحدى الحالتين الاتيتين:-

1- ارتفاع السائل في الانبوب الشعري، في حالة صنع السائل زاوية حادة (اقل من 90°) مع سطح الانبوب الشعري. مثال ذلك الماء الذي يرتفع داخل الانبوب الشعري الى ارتفاع معين فوق سطحه الخارجي. كما في الشكل (1a).

2- انخفاض السائل في الانبوب الشعري، في حالة صنع السائل زاوية منفرجة (اكثر من 90°) مع السطح الداخلي للانبوب الشعري. مثال ذلك الزئبق الذي ينخفض داخل الانبوب الشعري الى مستوى معين تحت سطحه الخارجي . كما في الشكل (1b).

إن ارتفاع السائل او انخفاضه داخل الانابيب الشعرية يعتمد على محصلة القوة بين قوى التماسك وقوى التلاصق بين جزيئات السائل وجزيئات سطح الانبوب الشعري فيعزى ارتفاع الماء الى داخل الانابيب الشعرية الى تغلب قوى التلاصق على قوى التماسك ، أي ان محصلة القوى ستكون نحو الأعلى فتؤدي الى ارتفاع جزيئات السائل داخل الانبوب الشعري كما ويعزى انخفاض الزئبق داخل الانابيب

الشعرية الى تغلب قوى التماسك على قوى التلاصق مما يسبب ان تكون محصلة القوى نحو الاسفل فتؤدي الى انخفاض سطح الزئبق داخل الانبوب الشعري عن مستواه خارج الانبوبة . تستمر عملية ارتفاع جزيئات الماء داخل الانبوبة الشعرية الى ان يحصل التوازن بين مركبة محصلة القوى المتجهة نحو الأعلى (ولتكن F) مع وزن عمود السائل (وليكن W) (والذي ارتفاعه h)، والمتجه بصورة عمودية نحو الأسفل .



الشكل (1) الخاصية الشعرية للماء والزئبق

الشّد السطحي Surface Tension

من خواص السوائل المهمة ميل سطحها للتقلص من أجل الحصول على أقل مساحة سطحية ممكنة، ونظراً لامتلاك الكرة أقل مساحة سطحية لاي حجم معين من المادة، لذلك تكون قطرات المطر الساقطة خلال الهواء كروية الشكل تقريباً. والسبب نفسه تمتلك فقاعات الهواء في الماء وقطرات الزئبق الصغيرة شكلاً كروياً ايضاً. ان عدم امتلاك القطرات الكبيرة للماء والزئبق شكلاً كروياً تاماً (بل شكلاً مفلطحاً) يرجع الى تأثير وزن المادة فيها. وفضلاً عما تقدم فان هناك كثيراً من الظواهر المألوفة في السوائل منها تحذب سطح الماء في دورق صغير مملوء بالماء بأكثر من سعته قليلاً وعدم انسكابه وطفو بعض القطع المعدنية كالابرة وشفرة الحلاقة الجافتين على سطح الماء الساكن ووقوف او سير بعض الحشرات على

سطح الماء من دون ان تغطس في الماء على الرغم من ان كثافة هذه الاجسام تفوق كثيراً كثافة الماء. وهناك ايضاً ظاهرة ارتفاع الماء في الانابيب الشعرية وانخفاض الزئبق فيها عن المستوى الخارجي لهما. كل هذه الظواهر وغيرها يعزى الى وجود ظاهرة الشد السطحي في السوائل. ويعرف الشد السطحي على انه القوة المؤثرة لكل وحدة طول من سطح السائل. ووحدة الشد السطحي هي N/m او $dyne/cm$.

تتوقف قيمة الشد السطحي لسائل ما على نوع السائل ودرجة حرارته، اذ تقل قيمة الشد السطحي للسائل كلما ارتفعت درجة حرارته. وهذا يفسر لماذا يستخدم الماء الحار والصابون لازالة البقع الدهنية، اذ يقل الشد السطحي للبقع الدهنية بتأثير الحرارة وتنفذ تلك البقع. ان وجود الشد السطحي يدل على ان الجزيئات القريبة من السطح تكون متباعدة عن بعضها البعض اكثر من الجزيئات الواقعة داخل السائل. الجدول (3) يبين قيم الشد السطحي لبعض السوائل.

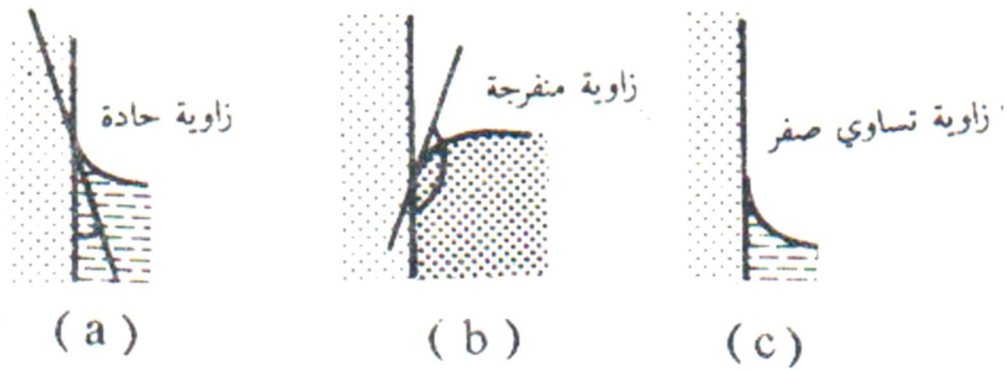
الجدول (3) الشد السطحي لبعض السوائل.

المادة	الشد السطحي $(N/m) \cdot 10^{-3}$
الزئبق	465
الماء عند $4^{\circ}C$	73
زيت الزيتون	32
البنزين	29

زاوية الاتصال (زاوية التماس) (θ) Angle of Contact

وتعرف على انها الزاوية المحصورة بين السطح الصلب والسطح المماس لسطح السائل، وتقاس داخل السائل. وتعتمد قيمة هذه الزاوية على نوع السائل ونوع السطح الصلب. وبصورة عامة يمكن تشخيص ثلاث حالات لهذه الزاوية وهي كما يأتي:

- 1- يصنع السائل زاوية حادة مع السطح الصلب، كما في الشكل (2a). وهي الحالة التي تنطبق على الماء وسطح الزجاج.
 - 2- يصنع السائل زاوية منفرجة مع السطح الصلب. كما في الشكل (2b). وهي الحالة التي تنطبق على الزئبق وسطح الزجاج.
 - 3- تصنع بعض السوائل زاوية مقدارها صفراً مع بعض السطوح الملساء والنظيفة جداً، كما في الشكل (2c). وهي حالة تنطبق على الماء وبعض السوائل العضوية عند تلامسها مع سطح زجاجي نظيف جداً.
- في الحالة الأولى تكون قوة التلاصق اكبر من قوة التماسك مما يؤدي الى انتشار جزيئات السائل والتصاقها بالسطح الصلب.

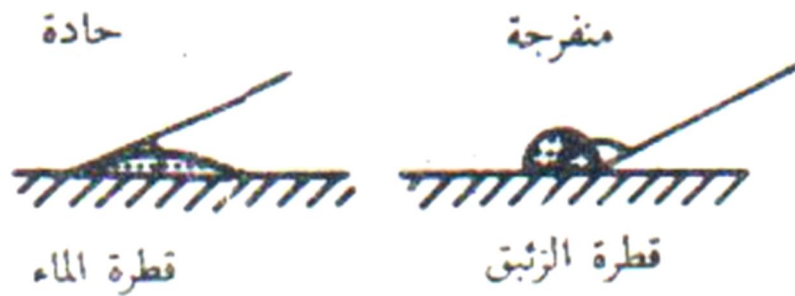


الشكل (2) يوضح زاوية التصاق السائل مع السطح المجاور

وفي الحالة الثانية يحدث العكس اذ تكون قوة التلاصق اصغر من قوة التماسك مما يؤدي الى تكوين السطح المحدب وتجمع الجزيئات وابتعادها عن السطح الصلب بدلاً من الانتشار والالتصاق به.

اما في الحالة الثالثة فتكون قوة التلاصق كبيرة جداً عند مقارنتها مع قوة التماسك مما يؤدي الى انتشار السائل وتكوين غشاء رقيق من الجزيئات مواز تقريباً الى السطح الصلب في نقطة التماس.

يوضح الشكل (3) قطرتين احدهما من الماء والاخرى من الزئبق على سطح أملس، اذ نجد ان قطرة الماء تتفطح وتحاول الانتشار على السطح الصلب، بينما قطرة الزئبق تحاول التجمع وعدم الانتشار على السطح الصلب. فالسوائل التي تصنع زاوية حادة مع السطح الصلب يقال بأنها تبلل السطح، بينما السوائل التي تصنع زاوية منفرجة يقال بأنها لا تبلل السطح المذكور.



الشكل (3) يوضح قطرة الماء والزئبق على السطح الاملس

أما قيم زاوية التماس، فيصنع الماء مع السطح الزجاجي زاوية مقدارها حوالي 10° مما يسبب له الانتشار وتكوين غشاء رقيق من الماء. بينما تكون قيمة الزاوية التي يصنعها الزئبق مع سطح الزجاج مساوية الى 140° مما يؤدي الى تكوين قطرات الزئبق بدلاً من الانتشار على السطح المذكور.

عند وضع الانبوب الشعري في السائل نجد ان انحناء السطح (الشكل 4) يجعل الضغط عند النقطة 4 أقل من الضغط الجوي عند النقطة 5 ، مما يدفع السائل الى الارتفاع في الانبوبة الشعري لأجل معادلة الضغط عند النقطتين. أفرض ان الضغط عند النقاط 1 و 2 و 3 و 4 و 5 يساوي P_1 و P_2 و P_3 و P_4 و P_5 على التوالي (الشكل 4) عند تحقيق تعادل الضغط يكون:

$$P_1 = P_2 \dots\dots\dots (3)$$

لأن فرق الضغط عبر السطح الأفقي يساوي صفراً، كما ويكون:

$$P_1 = P_2 = P_3 \dots\dots\dots (4)$$

أي ان :

$$P_1 = P_4 + \rho g h \dots\dots\dots (5)$$

حيث أن ρ تمثل كثافة السائل و h ارتفاعه خلال الانبوبة الشعرية. فضلاً عما تقدم

$$P_5 = P_4 + \frac{2\gamma}{r} \dots\dots\dots (6)$$

حيث أن γ تمثل الشد السطحي و r تمثل نصف قطر الانبوبة الشعرية.
ولكن قيمة الضغط عن النقطتين 1 و 5 متساويتان لانهما يمثلان الضغط الجوي، أي ان

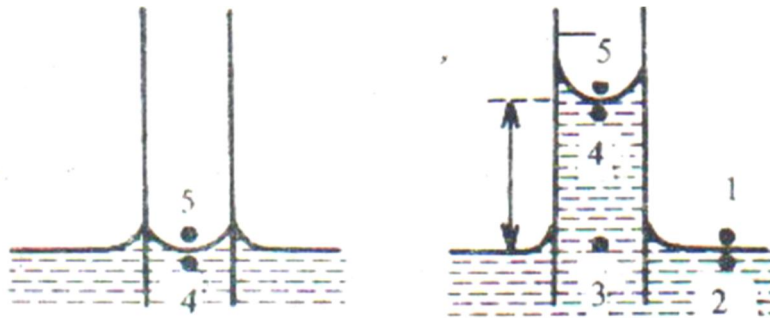
$$P_1 = P_5 \dots\dots\dots (7)$$

$$P_4 + \rho gh = p_4 + \frac{2\gamma}{r}$$

$$\gamma = \frac{\rho g h r}{2} \dots\dots\dots (8)$$

أو

$$h = \frac{2\gamma}{\rho g r} \dots\dots\dots (9)$$



الشكل (4) الشد السطحي

الضغط في السوائل (P) Pressure in Liquids

يؤثر السائل بقوة على الجدران الجانبية وقاعدة الوعاء الذي يحتويه، وتكون القوة عمودية على جميع نقاط السطح الذي تؤثر عليه. ويعرف الضغط على انه القوة المؤثرة لوحدة المساحة، أي ان

$$P = \frac{F}{A} \dots\dots\dots (10)$$

ووحدة الضغط في النظام العالمي للوحدات (SI) هي (N/m^2) ، ويطلق على هذه الوحدة أحياناً Pascal واختصاراً يرمز لها بـ (Pa). ويقاس الضغط أيضاً بدلالة الجو atmosphere ويرمز لها بـ (atm)، اذ ان

$$1 \text{ atm} = 1.013 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

كما يرمز للضغط بارتفاع عمود الزئبق الذي كثافته (13.6 g/cm^3) ، ويكافيء الضغط الجوي عند سطح البحر 76 cm Hg . أما الضغط الواطيء فيقاس بوحدات مثل mm Hg والتي تسمى أحياناً بالـ (torr). حيث ان

$$1 \text{ mm Hg} = 1 \text{ torr}$$

$$\frac{1}{760} \text{ atm} = 1 \text{ mm Hg}$$

وتستخدم أيضاً وحدة البار (bar) أو الملي بار mbar ، اذ ان

$$1 \text{ bar} = 10^6 \text{ dyne/cm}^2$$

$$1 \text{ mbar} = 10^2 \text{ N/m}^2 = 0.750 \text{ mm Hg}$$

يتناسب الضغط الذي يسلطه السائل نتيجة لوزنه عند اية نقطة داخل السائل مع كثافة السائل ومع عمق تلك النقطة عن سطح السائل.

فإذا أخذت نقطة على عمق h cm في سائل كثافته ρ g/cm³. إن القوة التي يؤثر بها السائل على مساحة مقدارها A عند تلك النقطة تساوي

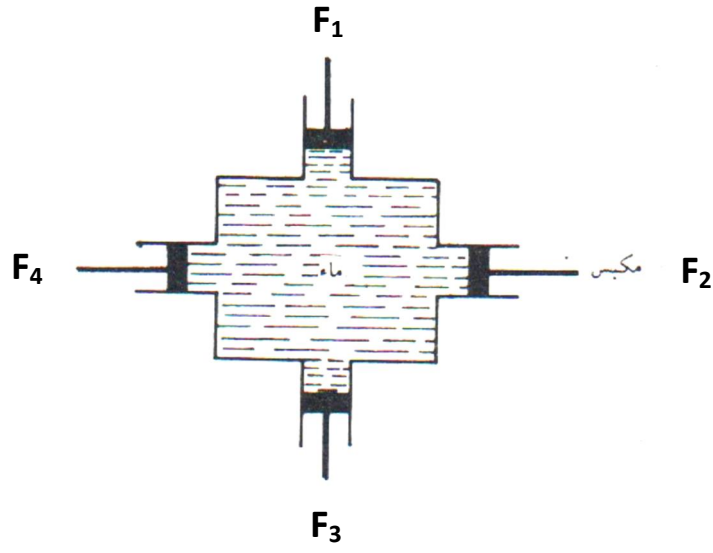
$$F = A \rho g h \quad \text{dyne}$$

ويكون الضغط (أو القوة لوحدة المساحة) تساوي:

$$P = \frac{F}{A} = \rho g h \quad \text{dyne/cm}^2$$

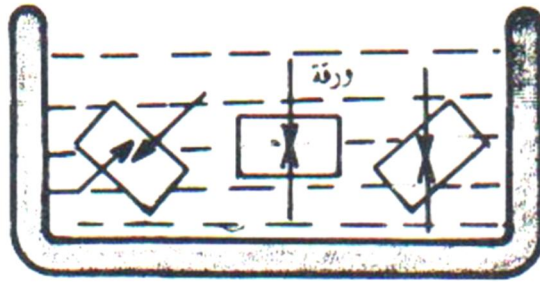
ينتقل الضغط المسلط على سائل محصور في وعاء مغلق الى جميع انحاء السائل بالتساوي. ويمكن إثبات هذه الحقيقة تجريباً، وذلك اذا أخذنا وعاء مغلقاً يحتوي على عدد من المكابس مملوء بالماء كما في الشكل رقم (4) فإذا كانت مساحة هذه المكابس متساوية وواقعة على نفس العمق. وسلطت قوة على احد هذه المكابس، فان قوى متساوية يجب ان تسلط على المكابس الأخرى من أجل المحافظة عليها في نفس اماكنها، أي ان

$$F_1 = F_2 = F_3 = F_4$$



الشكل (5) انتقال الضغط في السوائل

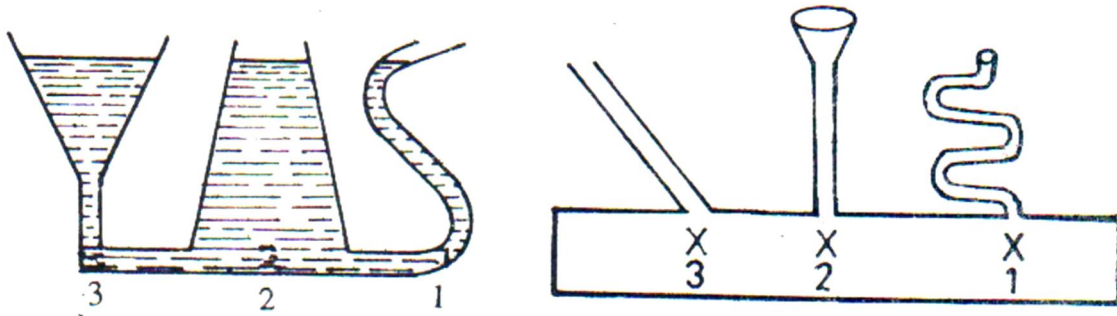
وكمثال آخر على حقيقة الضغط يؤثر في جميع الاتجاهات داخل السائل، نأخذ قطعة من الورق ونضعها في حوض ماء، سنجد ان قطعة الورق لا تتحرك بدرجات محسوسة وغير اعتيادية ولا تنطوي أو تنكسر نتيجة الضغط الذي يسلطه السائل. وهذا يدل على ان الضغط الذي يسلطه الماء على احد وجهي الورقة يقابله ضغط مساو له في المقدار ومعاكس له في الاتجاه يؤثر على الوجه المقابل لكي يحدث التوازن. وينطبق الشيء نفسه مهما كان وضع او اتجاه الورقة داخل السائل انظر الشكل (6)، وعليه فان ضغط السائل في نقطة معينة يجب ان يكون متساوياً في جميع الاتجاهات.



الشكل (6) تأثير الضغط في جميع الاتجاهات داخل السائل

يكون الضغط واحداً عند جميع النقاط الواقعة على عمق معين للسطح، وهذا الضغط يؤثر على اية نقطة واي سطح على هذا العمق مهما كان اتجاهه. ومثال على ذلك تكون النقاط 1 و 2 و 3 تحت نفس الضغط

شكل رقم (7). ان الاختلال في الضغط بين نقطة واخرى يؤدي الى انسياب السائل في اتجاه مناسب أو آخر الى ان يأخذ سطح السائل شكلاً أفقياً.



الشكل (7) تساوى الضغط عند العمق الواحد

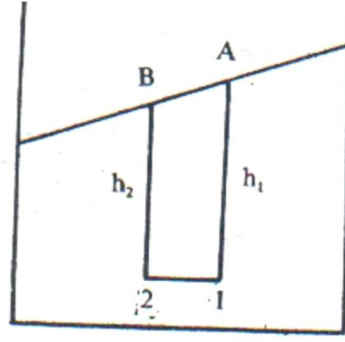
افرض ان سطح السائل ليس أفقياً كما في الشكل (8) ولتكن النقطتان 1 و 2 في داخل السائل عند المستوى الأفقي نفسه فإذا كانت h_1 و h_2 تمثلان ارتفاع السائل فوق النقطتين (1) و (2) على التوالي، فان الضغط المسلط على النقطة (1) والنقطة (2) سيكون مساوياً الى $\rho g h_1$ و $\rho g h_2$ على التوالي. وهذان الضغطان يجب ان يكونا متساويين والا فان السائل سوف ينساب من النقطة (1) الى النقطة (2) وعليه فان:

$$\rho g h_1 = \rho g h_2$$

أو

$$h_1 = h_2$$

وعليه فان السطح (AB) من السائل يجب ان يكون أفقياً.



الشكل (8) سطح السائل الأفقي

مسائل الفصل الرابع

س1: ما هو الحجم الذي تشغله كمية من الزئبق مقدارها 300 g ؟ كثافة الزئبق 13600 Kg/m^3 .

الحل

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$V = \frac{m}{\rho}$$

$$V = \frac{300 \times 10^{-3} \text{ Kg}}{13600 \text{ Kg/m}^3}$$

$$V = 2.2 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

س2 : ما هي كتله لتر واحد من زيت بذرة القطن. اذا كانت كثافته 926 Kg/m^3 ؟ وما مقدار وزنه.

الحل

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$m = \rho V$$

$$m = 926 \text{ Kg/m}^3 \times 1000 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$m = 0.926 \text{ Kg}$$

$$\text{weight} = mg$$

$$\text{weight} = 0.926 \text{ Kg} \times 9.8 \text{ m/s}^2$$

$$\text{weight} = 0.9074 \text{ N}$$

س3 : الوزن النوعي للحديد هو 7.8 . احسب كثافته وكتلة 60 cm^3 منه.

الحل

$$SG = \frac{\rho}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}}$$

$$\rho = SG \times \rho_{\text{H}_2\text{O}}$$

$$\rho = 7.8 \times 1000 \text{ Kg/m}^3$$

$$\rho = 7800 \text{ Kg/m}^3$$

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$m = \rho V$$

$$m = 7800 \text{ Kg/m}^3 \times 60 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$m = 0.468 \text{ Kg}$$

س4 : قارورة مدرجة كتلتها 30 g وهي فارغة، و 81 g وهي مملوءة بالماء، و 68 g وهي مملوءة بالزيت. احسب كثافة الزيت.

الحل

نوجد أولاً حجم القارورة من العلاقة $\rho = \frac{m}{V}$ باستخدام بيانات الماء

$$V = \frac{m}{\rho}$$

$$V = \frac{(81-30) \times 10^{-3} \text{ Kg}}{1000 \text{ Kg/m}^3}$$

$$V = 51 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

إذن بالنسبة للزيت يكون:

$$\rho_{\text{oil}} = \frac{m_{\text{oil}}}{V}$$

$$\rho_{\text{oil}} = \frac{(68-30) \times 10^{-3} \text{ Kg}}{51 \times 10^{-6} \text{ m}^3}$$

$$\rho_{\text{oil}} = 745 \text{ Kg/m}^3$$

س5 : احسب قيمة الضغط عند عمق 76 cm في وجود مائع ساكن اذا كان هذا المائع

(أ) ماء ($\rho_w = 1000 \text{ Kg/m}^3$).

(ب) زئبق ($\rho = 13600 \text{ Kg/m}^3$).

الحل

$$P = \rho_w g h \quad (\text{أ})$$

$$P = 1000 \text{ Kg/m}^3 \times 9.8 \text{ m/s}^2 \times 76 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$P = 7448 \text{ N/m}^2 = 7.448 \text{ Kpa}$$

(ب)

$$P = \rho g h$$

$$P = 13600 \text{ Kg/m}^3 \times 9.8 \text{ m/s}^2 \times 76 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$P = 101292.8 \text{ N/m}^2$$

س6 : مكعب من اليورانيوم ($\rho_u = 18.68 \text{ Kg/m}^3$) طول كل من

اضلاعة 2 cm

(أ) أوجد كتلته.

(ب) ما طول ضلع مكعب من الثلج ($\rho_i = 920 \text{ Kg/m}^3$) له نفس الكتله؟

س7 : احسب الكثافة والوزن النوعي للكازولين، اذا كان 51 g منه يشغل 75 cm^3 .

س8 : شريحة رقيقة من رقاقة ذهب مساحتها 3.12 cm^2 وكتلتها 6.5 mg . احسب سمك الشريحة. كثافة الذهب هي $\rho = 19300 \text{ Kg/m}^3$.

س9: ما كثافة مادة نواة ذرة الهيدروجين؟ يمكن اعتبار النواة كأنها كرة نصف قطرها $1.2 \times 10^{-15} \text{ m}$ ، وكتلتها $1.67 \times 10^{-27} \text{ Kg}$.

الفصل الخامس: الخواص الميكانيكية للمواد

يختص هذا الفصل بدراسة سلوك المواد الواقعة تحت تأثير قوى خارجية. ان استجابة المواد للقوى المؤثرة عليها يعتمد على عوامل عديدة منها ترتيب الذرات والجزيئات المكونة للمادة ونوع الترابط بين هذه الذرات والجزيئات كما تعتمد على انواع واعداد عيوب التركيب في المواد الصلبة، وعليه فان الخواص الميكانيكية تكون ذات اهمية في تحديد صفات المادة ومدى ملائمتها للاستخدام في التطبيقات الصناعية.

يهتم المهندسون كثيراً بالخواص الميكانيكية للمواد المتوفرة لديهم عند اقدمهم لتنفيذ أي عمل هندسي من بناء الجسور والمركبات والحاسبات الالكترونية الى بناء المركبات الفضائية. سيقدم هذا الفصل اساسيات الخواص الميكانيكية كالاجهاد والانفعال وانواعهما وعلاقتها للمواد المتجانسة والتي تمتلك الخواص نفسها في جميع الاتجاهات (Isotropic)، وسوف تستثنى المواد التي تعتمد خواصها على الاتجاه داخل المادة (Anisotropic).

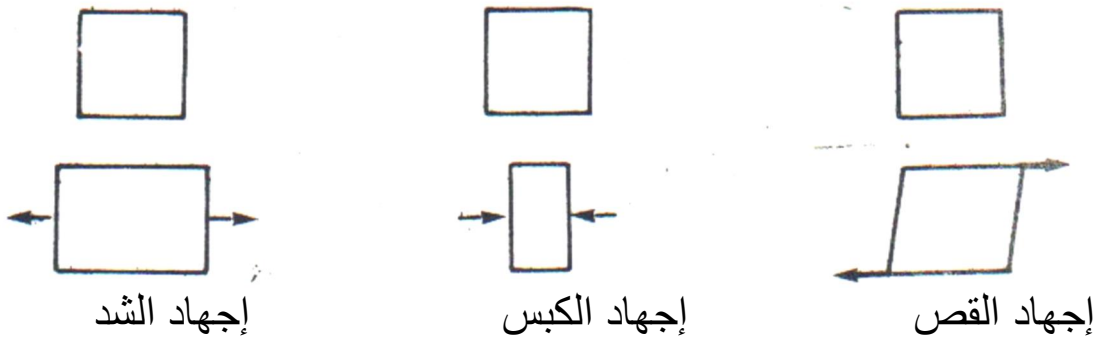
قبل الخوض في مفردات هذا الفصل يجب التذكر دائماً ان جميع المواد الصلبة الحقيقية تستجيب الى حدٍ ما عند تسليط قوى خارجية عليها، حيث لا يوجد جسم تام الصلادة. يعرف الجسم التام الصلادة (rigid) على انه ذلك الجسم الذي تبقى فيه المسافة بين اية نقطتين منه ثابتة لا تتغير مهما كان مقدار القوى المسلطة عليه.

الاجهاد Stress (S)

يُعرف بأنه القوة المسلطة على وحدة المساحات من السطح الذي تطبق عليه القوة. ووحدة الاجهاد (N/m^2) او ($dyne/cm^2$) او (lb/in^2) او (lb/ft^2). فإذا رمزنا للقوة بـ (F) والمساحة (A) فان:

$$S = \frac{F}{A} \dots\dots\dots (1)$$

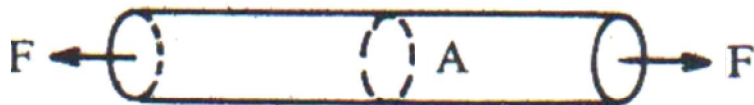
ويمكن أن نقسم الإجهاد إلى ثلاثة أنواع هي الشد والكبس والقص كما في الشكل (1)



الشكل (1) أنواع الإجهاد

الإجهاد التوترى (إجهاد الشد) (S_r) Tensile Stress

وفيه تؤثر قوتان متساويتان في المقدار متعاكستان في الاتجاه على نهايتي الجسم وعلى نفس خط التأثير، وعليه فان تأثير القوتين يؤدي الى استطالة الجسم. كما في الشكل (2).



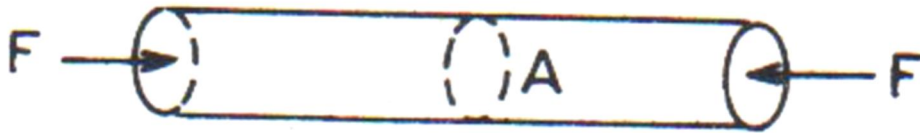
الشكل (2) إجهاد الشد

تتوزع القوة بالتساوي على جميع المساحة A (ما عدا نهايتي الجسم)

$$S_T = \frac{F}{A} \dots\dots\dots (2)$$

إجهاد الكبس (S_c) Compressive Stress

وفيه تؤثر قوتان متساويتان في المقدار متعاكستان في الاتجاه (متقابلتان) على نهايتي الجسم وعلى نفس خط التأثير، وعليه فان تأثير القوتين يؤدي الى ضغط الجسم وتقصير طوله كما في الشكل (3).

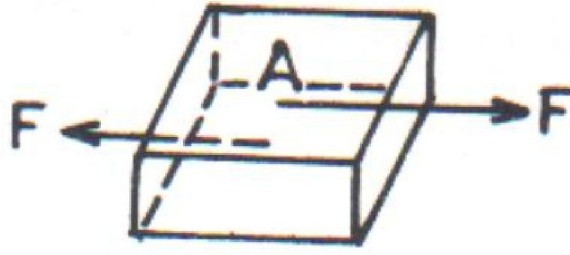


الشكل (3) إجهاد الكبس

$$S_c = \frac{F}{A} \dots\dots\dots (3)$$

إجهاد القص (S_c) Shear Stress

وفيه تؤثر قوتان متساويتان في المقدار متعاكستان في الاتجاه (مبتعدتان) على نهايتي الجسم وعلى خطوط تأثير مختلفة كما في الشكل (4)، وعليه فان تأثير القوتين يؤدي الى تغير شكل الجسم دون تغير حجمه.



الشكل (4) إجهاد القص

$$S_s = \frac{F}{A} \dots\dots\dots (4)$$

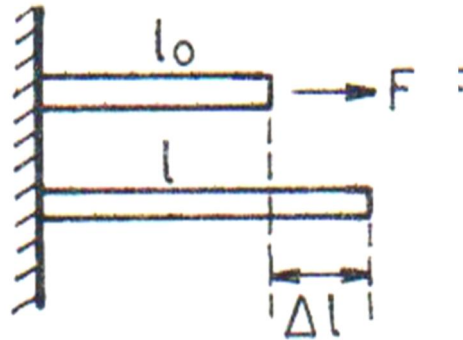
الانفعال (المطاوعة) (N) Strain

يُعرف انفعال أو مطاوعة مادة بأنها تشوه تلك المادة. كما ويعرف أيضاً على أنه التغير النسبي الذي يسببه الاجهاد لابعاد الجسم أو شكله أو حجمه. وبما أن هناك عدة انواع للاجهاد فسيكون هناك عدة انواع للمطاوعة (الانفعال) تبعاً لذلك وهي مطاوعة الشد (التوتر) ومطاوعة الكبس ومطاوعة القص. ان المطاوعة بجميع انواعها نسبة مجرد من الوحدات.

مطاوعة التوتر (N_t) Tensile Strain

ويعبر عن مطاوعة التوتر بأنه نسبة الاستطالة الى الطول الأصلي، وتساوي (الاستطالة/الطول الاصلي)، أي ان:

$$N_t = \frac{\Delta L}{L_o} \dots\dots\dots (5)$$

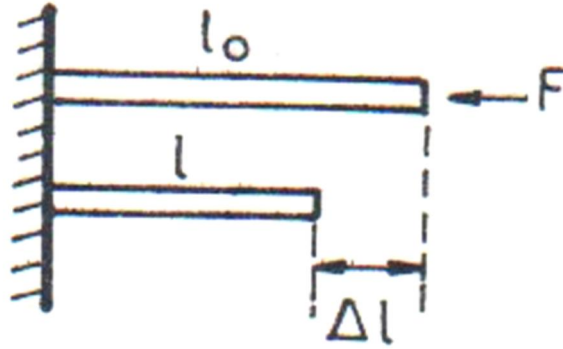


الشكل (5) مطاوعة التوتر

مطاوعة الكبس (N_c) Compressive Strain

ويعبر عن مطاوعة الكبس بأنه نسبة الانكماش (التقلص) الى الطول الاصلي، وتساوي (الانكماش/الطول الاصلي) أي ان:

$$N_c = \frac{\Delta L}{L_o} \dots\dots\dots (6)$$

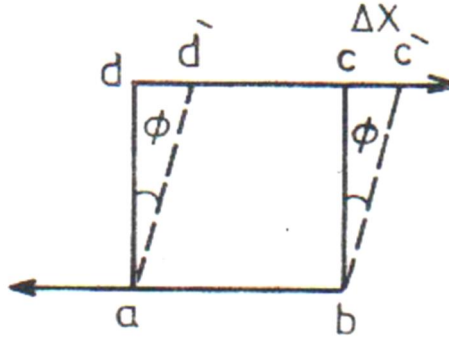


الشكل (6) مطاوعة الكبس

مطاوعة قصية (N_s) Shear Strain

ويعبر عن المطاوعة القصية بمقدار الإزاحة الجانبية للطول مثلاً الى الطول الأصلي، وتساوي

$$N_s = \frac{\Delta X}{L_o} = \tan \phi \cong \phi \dots\dots\dots (7)$$



الشكل (7) يوضح مطاوعة القص

كما ويعبر عن النسب المذكورة في أعلاه بدلالة النسبة المئوية نسبة الى الطول الأصلي.

إذا زال الانفعال بصورة تامة ومباشرة بعد ازالة الاجهاد الذي سببه، سمي الجسم الصلب بأنه تام المرونة **Perfectly elastic**. أما إذا اكتسب الجسم شكلاً وحجماً جديدين بعد ازالة الاجهاد المسبب لهما، سمي الجسم تام اللدونة **Perfectly Plastic**. وفي الحقيقة لا يوجد جسم تام المرونة، كذلك لا يوجد جسم تام اللدونة.

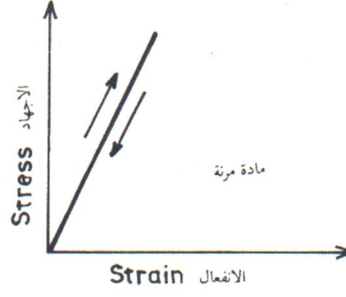
انواع الانفعال Kinds of Strain

وكذلك تكون المطاوعة (الانفعال) على نوعين هما:

- 1- الانفعال المرن.
- 2- الانفعال اللدن.

الانفعال المرن Elastic Strain

وهو انفعال عكسي، اذ يتلاشى الانفعال بعد ازالة الاجهاد المسلط، ان قيمة الانفعال المرن تتناسب طردياً مع مقدار الاجهاد المسلط، كما هو موضح في الشكل (8).

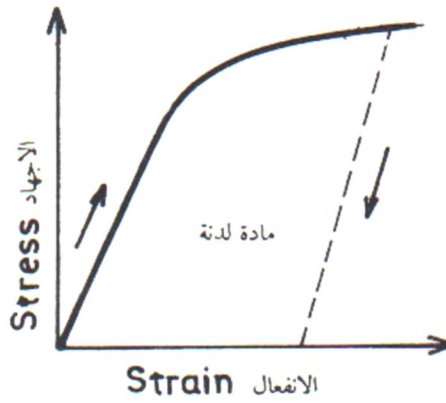


الشكل (8) علاقة الانفعال – الاجهاد للجسم المرن

ومن أمثلة هذه المواد المرنة، الياق الكواتز Quartz Fiber ، التي تقترب مرونتها من المرونة التامة.

الانفعال اللدن Plastic Strain

وهو انفعال غير عكسي، اذ لا يتلاشى الانفعال بعد ازالة الاجهاد المسلط، ويكون ذلك بفعل الاجهاد الذي يتجاوز حدود المرونة، ويحدث الانفعال اللدن نتيجة الازاحة الدائمة للذرات داخل المادة، على عكس الانفعال المرن الذي لا يحدث ازاحات دائمية للذرات ويبقى لكل ذرة نفس الذرات المجاورة لها قبل وبعد تسليط الاجهاد. الشكل (9) يوضح الانفعال اللدن.



الشكل (9) علاقة الانفعال – الإجهاد للجسم اللدن

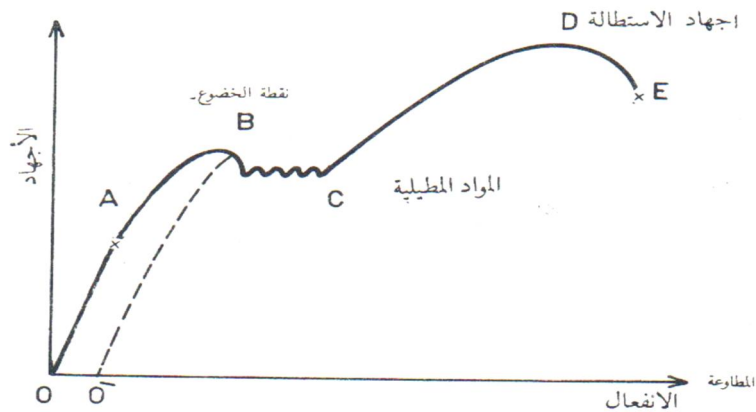
منحنى الإجهاد – الانفعال Stress – Strain Curve

ان العلاقة بين الاجهاد المسلط على جسم ما والانفعال الناتج عنه، علاقة معقدة تعتمد على عوامل عدة، منها قوى الترابط بين ذرات وجزيئات المادة، وكيفية ترتيب هذه الذرات والجزيئات والعيوب البلورية التي تحتويها المادة، فضلاً عن طريقة تحضير هذه المادة وتاريخها الحراري. وسنقتصر على شرح منحنى الاجهاد – الانفعال لسلك من الفولاذ.

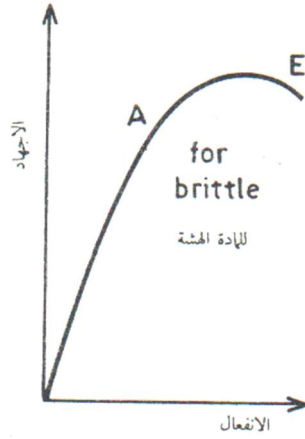
لو أخذنا سلكاً من الفولاذ وعرضناه الى جهد متزايد (ثقل) ورسمنا العلاقة بين الاجهاد والانفعال. ان منحنى الاجهاد – الانفعال يوضحه الشكل (10)، والذي يبين ان الجزء OA يمثل خطأ مستقيماً وهي المنطقة التي يطبق فيها قانون هوك (أي ان الانفعال يتناسب طردياً مع الاجهاد المسلط عليه) وفيها النقطة A التي تمثل نهاية المنطقة المستقيمة. وبعد النقطة A نجد ان الخط البياني ينحني، ويزداد الانفعال بصورة اكبر مما هو متوقع من قانون هوك. وتستمر هذه المنطقة الى النقطة B. ان الاستطالة في هذه المنطقة تكون خليطاً من الاستطالة المرنة والاستطالة اللدنة. اما المنطقة المحصورة بين B و C والتي تكون موازية تقريباً لأحداثي الانفعال فيكون تغير المنحنى فيها غير منتظم وان الانفعال يزداد بشكل كبير دون زيادة محسوسة في الاجهاد المسلط. ان نقطة بداية المنطقة BC، تسمى بنقطة الخضوع (yield point). وفي المنطقة الواقعة بعد النقطة C والتي يحدث فيها انزلاقات في مادة السلك باتجاه المستويات ذات الاجهاد الكبير، سوف تتغير الخواص المرنة للمعدن، وان الاستطالة في هذه المنطقة تكون نتيجة للاجهاد القصي وليس نتيجة اجهاد الاستطالة. ومن الملاحظ ان النقطة C تقع تحت النقطة B. ويزداد الانفعال تبعاً لزيادة الاجهاد بصورة مطردة الى ان نصل الى نقطة تبدأ فيها حالة عدم الاستقرار، ويصبح السلك اكثر نحافة عند احدى نهايتيه، ويظهر ظاهرة التخصر (necking) وهذه المرحلة تمثلها النقطة D. والتي بعدها يبدأ الاجهاد بالانخفاض تلقائياً ونحصل على المنطقة DE. ويحدث الانقطاع عند النقطة E. يطلق احياناً على قيمة الاجهاد عند النقطة D ب اجهاد الكسر (القطع) أو المتانة القصوى أو متانة السحب.

بعض الملاحظات المهمة:

- 1- ان نقصان مساحة المقطع العرضي للسلك يتناسب طردياً مع الانفعال بعد النقطة المرنة، بحيث يبقى حجم السلك ثابتاً.
 - 2- اذا ازداد الاجهاد الى حد لم يتجاوز فيه حد المرونة فان المنحني سيكون نفسه عند تناقص الاجهاد وان الانفعال سيصل الى قيمة الصفر عند ازالة الاجهاد.
 - 3- اما اذا ازداد الاجهاد الى حد يتجاوز فيه حد المرونة، فان منحنيًا جديدًا سوف يظهر (المنحني المنقط BO' في الشكل (10)). وان الانفعال لا يرجع الى قيمة الصفر عند ازالة الاجهاد.
 - 4- ان فشل تطابق منحني تناقص الاجهاد مع منحني زيادته يعرف بـ الهسترة المرنة، المشابهة للهسترة المغناطيسية.
 - 5- ان المادة التي تكون فيها المنطقة CE طويلة نسبياً، تكون قادرة على تحمل زيادة في الطول قبل القطع تسمى بالمادة المطيلية (Ductile). اما المادة التي تكون فيها المنطقة CE قصيرة نسبياً وسوف تنقطع عند تعرضها الى زيادة ولو بسيطة في طولها تعرف بالمادة الهشة (Brittle)، انظر شكل (11).
- يأخذ المهندسون بنظر الاعتبار عدم تجاوز الاجهاد الاعظم لجزء محدد من اجهاد الكسر ويعرف هذا الجزء أو الكسر باجهاد العمل (Working Stress) وان نسبة اجهاد الكسر الى اجهاد العمل تعرف بعامل السلامة (Factor of Safety).



الشكل (10) منحني الانفعال - الاجهاد لسلك الفولاذ



الشكل (11) منحنى الانفعال - الإجهاد للمادة الهشة

المطيلية Ductility

وتعرف على انها مقدار التشوه اللدن الذي تعانيه المادة عند نقطة الكسر أو القطع. ويمكن التعبير عن المطيلية باستطالة المادة. ويقدر مقدار المطيلية باستخدام معايير قياسية متعددة، اذ يجب ذكر طول المعيار عند قياس قيمة المطيلية، اذا ان هذه القيمة ستختلف باختلاف المعيار.

اما الطريقة الثانية فهي استخدام نسبة النقصان في مساحة مقطع المادة عند نقطة التمزق، وحسب المعادلة الآتية:

$$\text{نسبة النقصان في مساحة المقطع العرضي} = \frac{\text{المساحة الأصلية} - \text{المساحة النهائية}}{100} \times 100$$

الصلادة Hardness

وتعرف على انها مقاومة المادة لاختراق سطحها. وتستخدم طرق مختلفة لتقدير الصلادة. يعتمد قسم من هذه الطرق على ايجاد مساحة الثلم الذي يحدثه اختراق مثلث تحت ثقل قياسي، ومنها ما يعتمد على قياس عمق الاختراق لسطح المادة والذي يحدثه مثلث قياسي.

المتانة Toughness

ويعرف على انه الطاقة اللازمة لكسر (لتمزيق) المادة. ويمكن ايجاد الطاقة من حاصل ضرب القوة \times المسافة، ولها علاقة قوية مع المساحة الموجودة تحت منحنى الاجهاد والانفعال.

معامل المرونة Modulus of Elasticity

تعرف المرونة على انها قابلية المادة على استعادة شكلها الأصلي بعد ازالة القوة المؤثرة والمسببة للتشوه. هناك أنواع مختلفة من المعاملات، يعتمد نوع المعامل على نوع التشوه الذي تتعرض له المادة. كالاستطالة والانحناء وغيرها. وتمثل جميع المعاملات بإيجاد نسبة الاجهاد الى الانفعال.

ان وحدات المعامل هي وحدات الاجهاد نفسه لان الانفعال لا وحدات له. وعندما يكون الاجهاد ضمن حدود المرونة. فان نسبة الاجهاد الى المطاوعة ستكون مقداراً ثابتاً، ويسمى هذا الثابت بمعامل المرونة Modulus of elasticity، أي أن:

$$\text{Modulus of Elasticity} = \frac{\text{Stress}}{\text{Strain}} \dots\dots\dots (8)$$

يعرف الحد المرن على انه أقل قيمة للاجهاد المسبب لانفعال (مطاوعة) ثابت في المادة. وضمن حدود المرونة تكون العلاقة خطية بين الاجهاد والانفعال ولا يعتمد على الزمن، وهذا ما يعرف بقانون هوك (Hooks Law). الذي ينطبق على معظم المواد المرنة في حالة حصول الانفعالات الصغيرة.

ان العلاقة بين معامل المرونة ودرجة الحرارة علاقة عكسية، اذ يقل معامل المرونة بارتفاع درجة الحرارة، والسبب في ذلك يعود الى ان ارتفاع درجة الحرارة يزيد الطاقة الحركية للذرات او الجزيئات والتي تؤدي الى التغلب على قوى الترابط بينها وبالتالي زيادة حجمها.

معامل يونك (Young's Modulus (Y)

يعرف معامل يونك بأنه نسبة الاجهاد الى المطاوعة في حالتها الاستطالة والانكماش الطولي أي ان

$$\text{معامل يونك} = \frac{\text{الاجهاد الطولي}}{\text{الانفعال الطولي}}$$

$$Y = \frac{F/A}{\Delta L/L}$$

$$Y = \frac{F L}{A \Delta L} \quad \dots\dots\dots (9)$$

إن وحدة معامل يونك هي وحدة الاجهاد نفسه أي N/m^2 أو $dyne/cm^2$ أو lb/in^2 . يعتمد معامل يونك على نوع المادة وليس على ابعادها.

معامل القص (معامل الجساءة) (Shear Modulus(S)

يعرف معامل القص على انه نسبة اجهاد القص الى انفعال القص، أي ان:

$$S = \frac{F/A}{\phi} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$S = \frac{F/A}{\Delta x/d} \quad \dots\dots\dots (11)$$

ووحدة (S) هي N/m^2 أو $dyne/cm^2$ أو lb/in^2 .

يكون معامل القص أقل قيمة وأقل اهمية من معامل يونك وذلك لانه من السهل جعل ذرات المادة الصلبة تنزلق على بعضها، بينما تلاقي عمليتنا

تقريب او تفريق الذرات من بعضها صعوبات كبيرة. اكبر بكثير مما هي عليه في حالة انزلاق الذرات. ان قيم معامل القص تكون واقعة بين $\frac{1}{2}$ إلى $\frac{1}{3}$ من قيم معامل يونك.

معامل تغير الحجم (B) Bulk Modulus

ويسمى أيضا بالمعامل الحجمي ويعرف على انه النسبة بين الاجهاد في الموائع (أي التغير في الضغط المسلط عليها) الى الانفعال المناظر له (أي التغير النسبي في حجم المائع)، أي ان:

$$B = \frac{-\Delta P}{\Delta V/V} \dots\dots\dots (12)$$

ليس باستطاعتنا ايجاد قيم معاملات يونك ومعامل القص للموائع، لان الموائع تستطيع فقط مقاومة الانكسار. الاشارة السالبة تعني ان زيادة (او نقصان) الضغط المسلط على المائع يولد نقصاناً (او زيادة) في حجم المائع. اما وحدة المعامل الحجمي فهي وحدة الضغط.

معامل الانضغاطية (K) Compressibility

_____ ويعرف على انه مقلوب معامل تغير الحجم، أي ان:

$$K = \frac{1}{B} \dots\dots\dots (13)$$

الجدول (1) يحتوي على قيم معاملات يونك ومعامل القص ومعامل تغير الحجم لبعض المواد المعروفة.

الجدول (1) قيم معاملات يونك ومعامل القص ومعامل تغير الحجم لبعض

المادة	معامل يونك ($\times 10^{10} \text{ N/m}^2$)	معامل القص $\times 10^{10} \text{ N/m}^2$	معامل تغير الحجم $\times 10^{10} \text{ N/m}^2$
الالنيوم	7.1	2.4	7.7
النحاس	12	4.5	14
الزجاج	~5.5	2.3	5
الرصاص	1.8	0.8	4.3
النكل	21	7.6	18
بوليستيرين	~0.14		
حديد الصلب	20		
حديد مطاوع	19		
تكستن	35		

أما الجدول (2) فيبين قيم معامل تغير الحجم لبعض السوائل عند درجة حرارة (20°C).

الجدول (2) قيم معامل تغير الحجم لبعض السوائل

السائل	معامل تغير الحجم
الكحول الايثيلي	0.9
النيترين	1.05
الكيروسين	1.3
الماء	2.3
الزئبق	26

نسبة بواسون (σ) Poisson's Ratio

عندما يتعرض جسم الى تأثير قوتين متساويتين في المقدار ومتعاكستين في الاتجاه (قوى سحب) فانه يستطيل (أي يزداد طوله) باتجاه قوى السحب وينكمش او يتقلص بالاتجاه العمودي أي يقل عرضه او سمكه،

والعكس صحيح. ان النسبة بين التغير الجانبي الى التغير الطولي يعبر عنه بـ نسبة بواسون. وهي ثابت مرونة مهم، وتكون خالية من الوحدات.

ان الانفعال الناتج باتجاه قوى السحب او الكبس يسمى بالانفعال الطولي Longitudinal Strain اما الانفعال الناتج باتجاه عمودي على اتجاه القوى المسلطة فيسمى بالانفعال الجانبي او العرضي Lateral Strain. والانفعالان كلاهما يعتمدان على الاجهاد المسلط ونوع مادة الجسم. تكون النسبة بين المطاوعة الجانبية والمطاوعة الطولية لمادة ما ثابتة ويطلق عليها اسم نسبة بواسون، أي ان:

$$\sigma = \frac{-\Delta \omega / \omega_0}{\Delta L / L_0} \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$\Delta \omega = \omega - \omega_0$$

$$\Delta L = L - L_0$$

تشير الاشارة السالبة الى حقيقة ان الزيادة الحاصلة في طول الجسم نتيجة قوى السحب يصاحبها دائماً نقصان في عرض او سمك الجسم والعكس صحيح. ان وجود الاشارة السالبة يضمن الحصول على القيم الموجبة لنسبة بواسون وتكون القيمة العددية لنسبة بواسون لمعظم المواد حوالي (0.3). الجدول (3) يوضح قيم نسبة بواسون لعدد من المواد المعروفة.

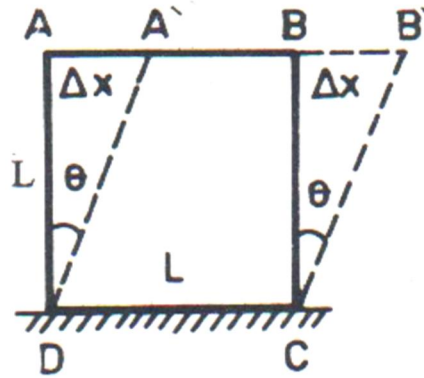
الجدول (3) قيم نسبة بواسون لعدد من المواد المعروفة

المادة	نسبة بواسون
الالمنيوم	0.33
النحاس	0.36
الرصاص	0.40
الزجاج العادي	0.23
الفولاذ (اللتين)	0.26
المطاط الصلب	0.43

معامل الصلابة (n) Modulus of Rigidity

يعرف معامل الصلابة على انه نسبة القوة المماسية المسلطة على جسم لوحدة المساحة الى التشوه الزاوي الذي سببته تلك القوة.

لو اخذنا المكعب المبين في الشكل (12) ABCD .



الشكل (12) حساب معامل الصلابة

فإذا ثبت الوجه الأسفل للمكعب DC بقوة الى قاعدة ثابتة، وسلطت قوة مماسية مقدارها F على الوجه الأعلى للمكعب AB . فان المكعب ABCD سيعاني تشوهاً وسيأخذ شكل متوازي الأضلاع A'B'CD .

فإذا كان الطول الأصلي لطول ضلع المكعب يساوي L وان Δx تمثل الإزاحة A'A والتي تساوي الإزاحة B'B ، فانه يمكن التعبير عن الانفعال القصي بالمعادلة الآتية:

$$\theta = \frac{\Delta x}{L}$$

أما الإجهاد المماسي فانه يمكن كتابته بالصيغة الآتية:

$$= \frac{F}{L^2}$$

وعليه فان معامل الصلابة سيكون مساوياً إلى:

$$n = \frac{F/L^2}{\theta} \dots\dots\dots (15)$$

$$n = \frac{F/L^2}{\Delta x/L}$$

وبالتعويض في المعادلة عن قيمة n نحصل على قيمة القوة المماسية لوحدة المساحة، أي أن:

$$F/L^2 = \frac{n \Delta x}{L} \dots\dots\dots (16)$$

أما قيمة عزم المزدوج G المسلط على جهتي قطعة اسطوانية طولها L ونصف قطرها r فانه يعطى بالعلاقة الآتية:

$$G = \frac{\pi n r^4}{2L} \theta$$

ثابت الليّ τ Torsional Constant

ويعرف على انه عزم الدوران اللازم لانجاز برم (لي) لاحدى نهايتي المادة بمقدار زاوية نصف قطرية واحدة نسبة الى النهاية الأخرى الثابتة. الشكل (13) يوضح قضيباً او اسطوانة طولها (L) وقطرها (d) تثبت احدى نهايتيها بصورة صلبة، يؤثر على نهايتها الأخرى عزم ليّ مقداره G ، فتدور النهاية السفلى للقضيب خلال زاوية فتل مقدارها (θ). أي ان الخط الشعاعي (AB) سوف يتحرك الى الوضع الجديد الممثل بالخط (AC). تعتمد زاوية الفتل (θ) على طول القضيب وقطره وعلى معامل الجسوة لمادته. يمكن حساب ثابت الليّ في حالة الدوران (التشويه) الصغير من المثلث (ABC). وحسب المعادلة الآتية:

$$G = \tau \theta \quad \dots\dots\dots (17)$$

حيث أن τ تمثل ثابت الليّ للاسطوانة.

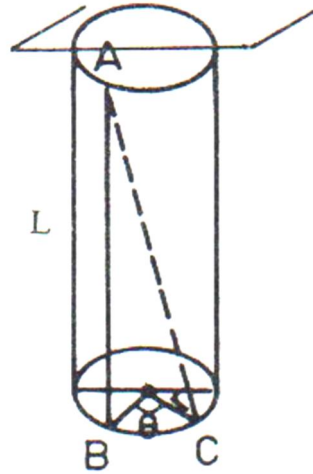
إن لثابت الليّ علاقة بطول الاسطوانة ونصف قطرها وثابت الصلابة لمادة الاسطوانة تعطى بالعلاقة الآتية:

$$\tau = \frac{\pi n r^4}{2L} \quad \dots\dots\dots (18)$$

إن الانفعال القصي في حالة الليّ يساوي ($\frac{BC}{AB}$)، اذ تمثل AB طول القضيب و BC الطول الذي فتل بوساطته القضيب، وهذا الطول يساوي ($r \times \theta$) و r تمثل نصف القطر، وعليه فان الانفعال هنا:

$$N_s = \frac{\theta}{L} r \dots\dots\dots (19)$$

إن الزاوية المستخدمة هنا هي زاوية نصف قطرية.



الشكل (13) حساب ثابت الليّ

مسائل الفصل الخامس

س 1: بين أي من المواد الآتية يتعرض إلى اجهاد اكبر.

- 1- قطعة من الالمنيوم ابعادها 15 cm x 5 cm تحت تأثير ثقل كتله 10Kg.
- 2- قطعة من الفولاذ ابعادها 7 cm x 3 cm تحت تأثير ثقل كتله 15Kg.
- 3- قطعة من النحاس ابعادها 5 cm x 2 cm تحت تأثير ثقل كتله 5Kg.

الحل

يعرف الاجهاد على انه القوة المؤثرة على وحدة المساحة، أي ان

$$S = \frac{F}{A}$$

$$S = \frac{10\text{Kg} \times 9.8\text{m/s}^2}{5 \times 10^{-2}\text{m} \times 15 \times 10^{-2}\text{m}} = \frac{98\text{N}}{75 \times 10^{-4}\text{m}^2} = 1.306 \times 10^4 \text{N/m}^2 \quad \text{للألمنيوم}$$

$$S = \frac{15\text{Kg} \times 9.8\text{m/s}^2}{3 \times 10^{-2}\text{m} \times 7 \times 10^{-2}\text{m}} = \frac{147\text{N}}{21 \times 10^{-4}\text{m}^2} = 7 \times 10^4 \text{N/m}^2 \quad \text{للفولاذ}$$

$$S = \frac{5\text{Kg} \times 9.8\text{m/s}^2}{5 \times 10^{-2}\text{m} \times 2 \times 10^{-2}\text{m}} = \frac{49\text{N}}{10 \times 10^{-4}\text{m}^2} = 4.9 \times 10^4 \text{N/m}^2 \quad \text{للكحاس}$$

من هذا يتبين ان الفولاذ يتعرض إلى الاجهاد الاكبر

س2 : قضيب من النحاس الاصفر معامل مرونته يساوي $1.1 \times 10^{12} \text{ N/m}^2$. جد قطر القضيب الذي طوله 1m ويتعرض الى قوة شد (سحب) مقدارها 22 N وتسبب زيادة في طوله مقدارها 1mm .

الحل

$$Y = \frac{F/A}{\Delta L/L}$$

$$Y = \frac{F L}{A \Delta L}$$

$$A = \frac{F L}{Y \Delta L}$$

$$F = 22 \text{ N} , L = 1 \text{ m} , \Delta L = 1 \text{ mm} = 10^{-3} \text{ m} , Y = 1.1 \times 10^{12} \text{ N/m}^2$$

$$A = \frac{22 \text{ N} \times 1 \text{ m}}{1.1 \times 10^{12} \text{ N/m} \times 10^{-3} \text{ m}}$$

$$A = 2 \times 10^{-8} \text{ m}^2$$

$$A = \pi r^2$$

$$r^2 = \frac{A}{\pi}$$

$$r^2 = \frac{2 \times 10^{-8} \text{ m}^2}{3.14}$$

$$r^2 = 0.6369 \times 10^{-8} \text{ m}^2$$

$$r = 7.9 \times 10^{-5} \text{ m}$$

س 3: سلك معدني طوله 2 m ، مقطعه العرضي مربع طول ضلعه 8 mm . علق به ثقل كتلته 1.2 Kg فاستطال مسافة 3 mm جد قيمة معامل يونك .

الحل

$$Y = \frac{F/A}{\Delta L/L}$$

$$Y = \frac{F L}{A \Delta L}$$

$$Y = \frac{1.2 \text{ Kg} \times 9.8 \text{ m/s}^2 \times 2 \text{ m}}{8 \times 10^{-3} \text{ m} \times 8 \times 10^{-3} \text{ m} \times 3 \times 10^{-3} \text{ m}} = \frac{23.52 \text{ N}}{192 \times 10^{-9} \text{ m}^2}$$

$$Y = 1.225 \times 10^8 \text{ N/m}^2$$

س 4 : قضيب معدني قطره 1 in وطوله 120 in علق به ثقل مقداره 100 lb ، جد الانفعال على امتداد القطر. مع العلم بان معامل يونك يساوي $3 \times 10^6 \text{ lb/in}^2$ ونسبة بواسون تساوي 0.3 .

الحل

بما ان معامل يونك يعطى بالعلاقة الآتية:

$$Y = \frac{F/A}{\Delta L/L}$$

$$Y = \frac{F L}{A \Delta L}$$

إذن الانفعال الطولي يساوي:

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{F}{A Y}$$

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{100 \text{ lb}}{3.14 \times (0.5 \text{ in})^2 \times 3 \times 10^6 \text{ lb/in}^2} = \frac{100}{2.355 \times 10^6}$$

$$\frac{\Delta L}{L} = 0.4246 \times 10^{-4}$$

الانفعال العرضي = نسبة بواسون x الانفعال الطولي

$$= 0.3 \times 0.4246 \times 10^{-4}$$

$$= 0.1273 \times 10^{-4}$$

س 5 : جد اكبر قيمة لطول سلك من الحديد يمكن ان يعلق بصورة عمودية من دون انقطاعه، علماً بان اجهاد القطع (الكسر) يساوي $(7.9 \times 10^4 \text{ dyne/cm}^2)$ وان كثافة مادة السلك تساوي (7.9 g/cm^3) .

الحل

ان اكبر قيمة لطول السلك تحددها كتلة السلك المعلق.

وان كتلة السلك = حجم السلك المعلق \times كثافته الكتلية

نفرض ان مساحة المقطع العرضي للسلك = $A \text{ cm}^2$

اذن الحجم = $A L \text{ cm}^3$

$$m = \rho V$$

$$m = 7.9 \times A L \quad (\text{g})$$

$$S = \frac{F}{A}$$

إن وزن السلك = القوة المؤثرة

$$S = \frac{7.9 \times A \times L \times 980}{A}$$

$$S = 7742 L \quad (\text{dyne/cm}^2)$$

إن اكبر طول يحصل عندما يسقط الكسر، أي ان:

$$7742 L = 7.9 \times 10^4$$

$$L = \frac{7.9 \times 10^4}{7742}$$

$$L = 10.204 \text{ Cm}$$

الفصل السادس : الخواص المغناطيسية للمواد

عرفت المواد المغناطيسية منذ زمن بعيد، واول ما عرف منها حجر المغنايت (Fe_3O_4) في مقاطعة مغنيسيا.

وتم استخدام الصفة المغناطيسية بخيط من قبل البحارة لتحديد الاتجاه، وذلك بتعليقهم قطعة مغناطيسية بخيط في الهواء فنتجه باتجاه القطب الشمالي والقطب الجنوبي للمجال المغناطيسي الارضي.

وتطلق اليوم كلمة المغناطيسية على المواد التي تظهر استجابة واضحة للمجال المغناطيسي الخارجي المسلط عليها. ومن اهم المواد المغناطيسية المعروفة الحديد والنيكل والكوبلت ومادة المغنايت. وقد وجد بان الخاصة المغناطيسية تتأثر كثيراً بدرجات الحرارة.

التأثيرية المغناطيسية

Magnetic Susceptibility(χ)

تعرف التأثيرية المغناطيسية على انها نسبة المغناطيسية او العزم المغناطيسي لوحدة الحجم الى المجال المغناطيسي المؤثر (H)، أي ان

$$\chi = \frac{M}{H} \dots\dots\dots (1)$$

وتعد التأثيرية المغناطيسية مقياساً لمدى استجابة المادة المغناطيسية الى المجال المغناطيسي المسلط عليها. ان العلاقة بين العزم المغناطيسي لوحدة الحجم M والمجال المغناطيسي المؤثر H علاقة غير خطية للكثير من المواد المغناطيسية وعليه فان قيم التأثيرية المغناطيسية لا تعتمد على شدة

المجال المغناطيسي المؤثر فحسب بل تعتمد على عوامل أخرى منها التركيب المغناطيسي للمادة وعلى درجة الحرارة. تتوزع قيم التأثيرية المغناطيسية على مدى واسع يتراوح من 10^{-6} للمواد ضعيفة المغناطيسية الى حوالي 10^6 أو أكثر للمواد ذات المغناطيسية القوية، فضلاً عن ان قيمها تكون سالبة لبعض انواع المواد المغناطيسية.

تصنيف المواد المغناطيسية **Classification of Magnetic Materials**

اعتماداً على قيم التأثيرية المغناطيسية للمواد وعلاقتها بدرجة الحرارة يمكن تصنيف المواد المغناطيسية الى الاصناف الرئيسية الآتية:

- 1- المواد الدايمغناطيسية.
- 2- المواد البارامغناطيسية.
- 3- المواد الفيرومغناطيسية.
- 4- المواد ضديدة الفيرومغناطيسية.
- 5- المواد الأخرى.

المواد الدايمغناطيسية Diamagnetic Materials

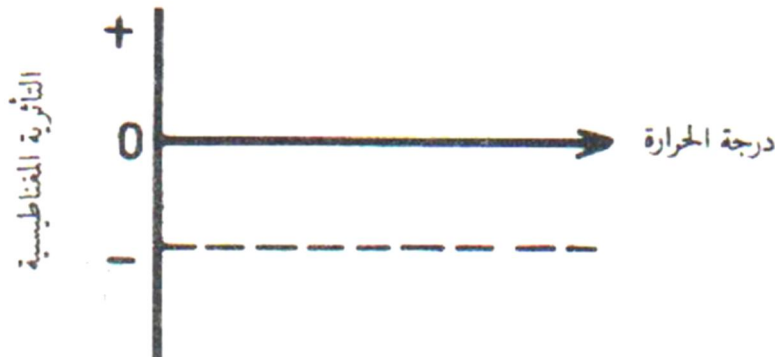
وهي المواد التي تكون تأثيريتها المغناطيسية

1- سالبة

2- قليلة جداً (10^{-5}).

ان أصل الخاصية الدايمغناطيسية هو الحركة المدارية للإلكترونات الاغلفة المشبعة حول النواة والتي تستحدث نتيجة تسليط مجال مغناطيسي مؤثر على المادة. اذ ان المجال المؤثر يحدث تغيراً في حركة الإلكترونات والذي يعني احداث تغير في العزم المغناطيسي لهذه الإلكترونات، وهذا معناه ان ذرات المادة الدايمغناطيسية لا تملك عزم مغناطيسية دائمة، بل تمتلك عزوم مغناطيسية محتثة ضعيفة غير دائمية تزول بزوال تأثير المجال المغناطيسي المسلط على المادة. ان اتجاه العزم المغناطيسي المحتث يكون معاكساً لاتجاه المجال المغناطيسي المسلط. ومن أشهر المواد الدايمغناطيسية الغازات الخاملة والمركبات ذات المدارات

الالكترونية المغلقة ومعظم المواد الصلبة الايونية والجزئية والمركبات العضوية. وان الخاصية الدايمغناطيسية لا تعتمد على اتجاه العزم داخل المادة ولا تعتمد على درجة الحرارة. ان جميع المواد على اختلاف انواعها تمتلك الخاصية الدايمغناطيسية ولكنها قد تكون ضعيفة جداً واقل بكثير من الخواص المغناطيسية الأخرى، فضلاً عن ان جميع المواد تصبح دايمغناطيسية في درجات الحرارة العالية جداً. ان الصفة الدايمغناطيسية صفة مؤقتة تزول بزوال المجال المغناطيسي المؤثر المسلط على المادة، وتظهر مجدداً بوجود المجال المذكور. الشكل (1) يبين علاقة التأثيرية المغناطيسية مع درجة الحرارة للمواد الدايمغناطيسية.



الشكل (1) علاقة التأثيرية المغناطيسية مع درجة الحرارة للمواد الدايمغناطيسية

الجدول (2) قيم التأثيرية المغناطيسية لبعض المواد الدايمغناطيسية

المادة	التأثيرية المغناطيسية $\times 10^{-5}$
البيزموث Bi	- 16
الزئبق Hg	- 2.9
الكالسيوم Ca	- 2.3
النحاس Cu	- 1.0
السليكون Si	- 0.4
الذهب Au	- 3.6
الماء H ₂ O	- 9.0
الهيدروجين H ₂	- 0.2
النيتروجين N ₂	- 5.0

المواد البارامغناطيسية Paramagnetic Materials

وهي المواد التي تتصف تأثريتها المغناطيسية بما يأتي:

1- موجبة.

2- قليلة تتراوح بين 10^{-3} الى 10^{-5} .

تظهر الخاصية البارامغناطيسية في الذرات او الجزيئات التي تمتلك عدداً فردياً من الالكترونات التي تعمل على اعطاء عزم مغناطيسي دائم للذرة او الجزيئة. كما تتصف الذرات والجزيئات الحاوية على مدارات غير مشبعة بالخاصية البارامغناطيسية حتى وان امتلكت لعدد زوجي من الالكترونات. وهذا يعني ان الخاصية البارامغناطيسية صفة متأصلة في المادة ولا تستحدث نتيجة لتأثير المجال المغناطيسي الخارجي المؤثر عليها. وفي حالة وجود المجال المذكور فان معدل اتجاهات العزوم سيأخذ اتجاهاً موزائياً لاتجاه المجال المسلط والمؤثر على المادة. ان المغناطيسية الناتجة عن هذا الاصطفاف للعزوم المغناطيسية تكون ضعيفة، والسبب في ذلك يعود الى ان العزوم المذكورة تكون ضعيفة ومتباعدة عن بعضها البعض. الشكل (2) يوضح ترتيب العزوم المغناطيسية للمادة البارامغناطيسية. ان الاتجاهات المبعثرة للعزوم سيجعل المغناطيسية للمادة مساوية للصفر في حالة عدم وجود المادة داخل المجال المغناطيسي المؤثر. تتناسب التأثيرية المغناطيسية لهذه المواد تناسباً عكسياً مع درجة الحرارة، أي ان:

$$\chi \propto \frac{1}{T}$$



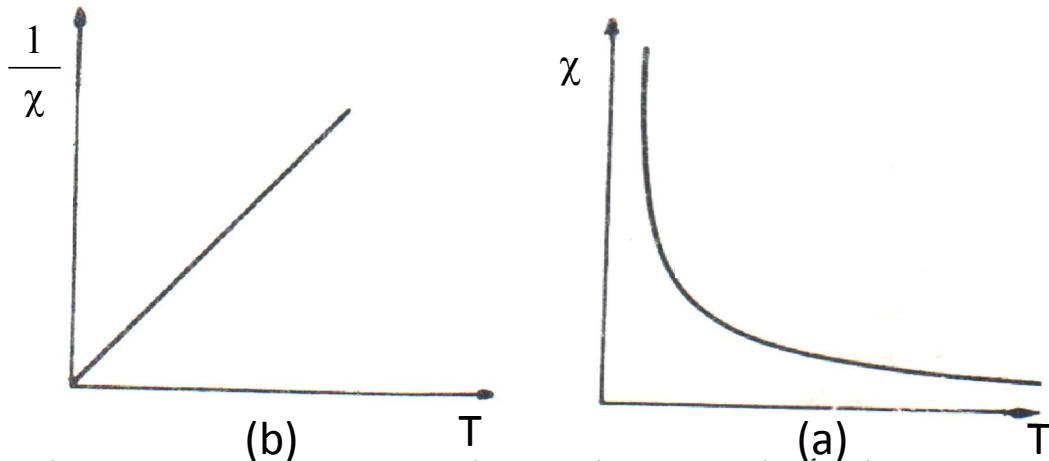
الشكل (2) يوضح ترتيب العزوم في المواد البارامغناطيسية

وفي حالة وجود مجال مغناطيسي ذي قيمة معقولة (ولكنها ضعيفة) فان علاقة التأثيرية المغناطيسية ودرجة الحرارة تكون خطية وكما يأتي:

$$\chi = \frac{C}{T} \dots\dots\dots (2)$$

يعرف هذا القانون بقانون كوري، و C تمثل ثابت التناسب (ثابت كوري).

الشكل (3) يوضح العلاقة بين χ و $\frac{1}{T}$ مع درجة الحرارة للمواد



الشكل (3) علاقة التأثيرية المغناطيسية مع درجة الحرارة في المواد البارامغناطيسية

الجدول (3) يبين قيم التأثيرية المغناطيسية لبعض المواد البارامغناطيسية

المواد	التأثيرية المغناطيسية $\times 10^{-5}$
الكالسيوم Ca	1.9
الليثيوم Li	2.1
الالنيوم Al	2.2
الكروميوم Cr	27
البلاتين Pt	29
الصوديوم Na	0.9
الأكسجين O ₂	0.2
المنغنيز Mn	98
التنكستن W	36

المواد الفيرومغناطيسية Ferromagnetic Materials

ان وجود مواد ذات مغناطيسية دائمية في درجة حرارة الغرفة معروف منذ زمن بعيد، ومن اشهر هذه المواد الحديد وأوكسيده Fe_3O_4 إذ استخدمنا منذ العصور القديمة من قبل البحارة في ايجاد الاتجاه، وذلك لامتلاكه المغناطيسية الدائمة التي تتاثر بالمجال المغناطيسي الارضي. تنشأ الخاصية الفيرومغناطيسية من الالكترونات المنفردة ذات العزم المغناطيسي الدائم، أو من تراصف هذه العزوم وباتجاه واحد تنشأ هذه الخاصية. ومن اهم العناصر الفيرومغناطيسية المعروفة هي الحديد والكوبلت والنيكل والكادولونيوم والدسبروسيوم التي تملك درجات حرارة كوري (Curie Temperature, T_c) 1043K و 1395 و 631 و 289 و 85 درجة كلفنية على الترتيب.

تتحول المواد الفيرومغناطيسية الى مواد بارامغناطيسية. اذا اصبحت درجة حرارتها اكبر من درجة حرارة كوري وعند تبريدها الى اقل من درجة حرارة كوري فانها تتحول مرة ثانية الى الصفة الفيرومغناطيسية. تزداد التأثيرية المغناطيسية كلما اقتربنا من درجة حرارة كوري. ان التأثيرية المغناطيسية للمادة في الدرجات الحرارية الاعلى من درجة حرارة كوري تتغير مع درجة الحرارة بحسب قانون خاص يسمى قانون كوري – وايز Curie – Weiss Law الذي يمكن كتابته كما يأتي :

$$\chi = \frac{C}{T - \theta_c} \dots\dots\dots (3)$$

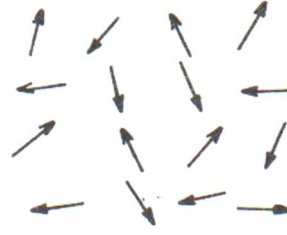
حيث ان θ_c تمثل درجة حرارة موجبة.

تتوافق العزوم المغناطيسية كما في الشكل (4) عندما تكون درجة حرارة المادة اكبر من واقل من درجة حرارة كوري. الجدول (4) يوضح

أهم الـ



$T < T_c$



$T > T_c$

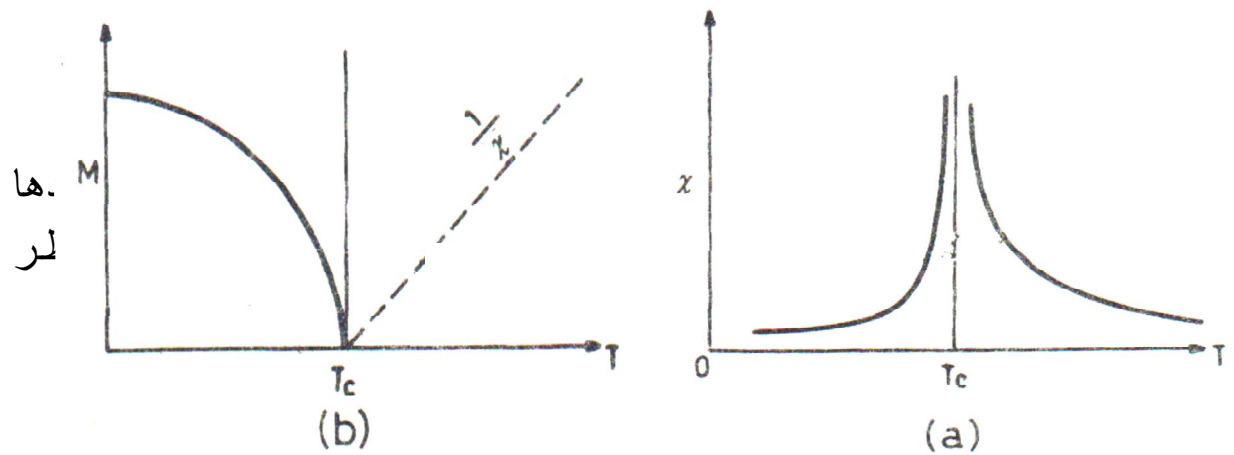
الشكل (4) ترتيب العزوم في المواد الفيرومغناطيسية

الجدول (4) يوضح أشهر العناصر الفيرومغناطيسية ودرجة حرارة كوري لها

العنصر	T_c (K)
Fe	1043
CO	1388
Ni	637
Gd	293
Dy	85

تتغير التأثيرية المغناطيسية للمواد الفيرومغناطيسية مع درجة الحرارة كما في الشكل (5a).

تزداد مغناطيسية المادة كلما انخفضت درجة الحرارة وتصل الى قيمة لها عند درجة الصفر الكلفينية وتقل كلما ارتفعت درجة الحرارة وتصل الى

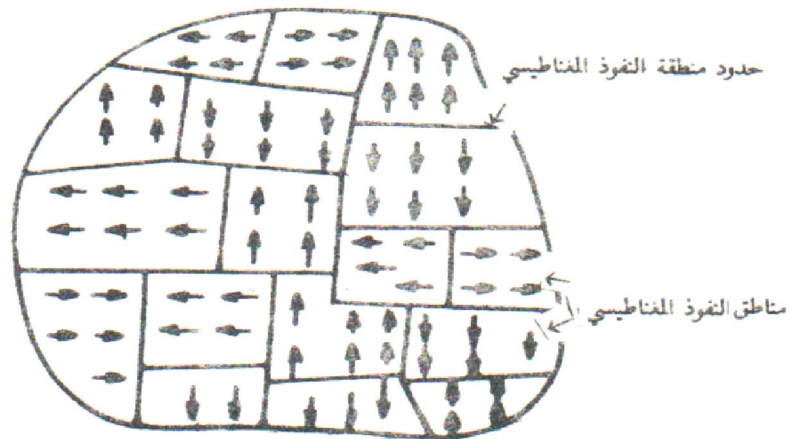


الشكل (5) علاقة التأثيرية المغناطيسية مع درجة الحرارة في المواد الفيرومغناطيسية

أما إذا انخفضت درجة حرارة المادة الى ما دون الدرجة الحرجة T_c فانها تتحول مرة اخرى الى الطور الفيرومغناطيسي، أي حالة انتظام العزوم المغناطيسية باتجاه واحد. وهذا يعني ان المادة تكون ممغنطة ذاتياً من دون التأثير عليها بمجال مغناطيسي خارجي مؤثر. بقيت ظاهرة المغناطيسية الذاتية وبالتالي النظرية الفيرومغناطيسية مبهمة الى ان جاء العالم وايز Weiss الذي افترض (نظرية المجال الجزيئي) (Molecular Field Theory) والذي يتصف بما يأتي:

- 1- انه مجال ذاتي يؤثر في المادة المغناطيسية.
 - 2- له قيمة عالية، اذا انه يستطيع ان يمغنط المادة الى حد الاشباع، حتى في حالة عدم وجود مجال مغناطيسي خارجي مؤثر. وبتأثير هذا المجال تكون المادة ممغنطة حد الاشباع بصورة ذاتية.
- كما استطاع العالم وايز ان يفسر حالة وجود مواد فيرومغناطيسية حديدية في حالة عدم تمغنط في درجة حرارة الغرفة بأفترضه ان المادة مقسمة الى مناطق مغناطيسية تسمى مناطق النفوذ المغناطيسي

Magnetic Domains وهي مناطق مفصولة عن بعضها البعض بحاجز يدعى **Magnetic Domain Wall**. ان كل منطقة من هذه المناطق تكون ممغنطة ذاتياً حد الاشباع ويكون اتجاه العزوم في كل منطقة معاكس لاتجاه المنطقة المجاورة إذ ان المغناطيسية الكلية للمادة تساوي صفراً. ان سبب تحول المادة الى مادة ذات مناطق نفوذ مغناطيسية متعددة، يعود الى ان الطاقة المخزونة في المجال المغناطيسي تكون كبيرة، اما اذا قسمت المادة الى مناطق ممغنطة متعددة وباتجاهات متعاكسة فان الطاقة المخزونة ستكون أقل بكثير مما هي عليه في حالة المنطقة المنفردة. الشكل (6) يوضح مناطق النفوذ المغناطيسي في المواد الفيرومغناطيسية.



الشكل (6) مناطق النفوذ المغناطيسي في المواد الفيرومغناطيسية

المواد ضدية الفيرومغناطيسية Anti - Ferromagnetic Materials

من أشهر العناصر ضدية الفيرومغناطيسية الكروم Cr والسيريوم Ce والمنغنيز α -Mn وتتصف المواد ضدية الفيرومغناطيسية بأن تأثيراتها قليلة ولكنها موجبة لجميع درجات الحرارة. ان العزوم المغناطيسية لذرات

او جزيئات هذه المواد تكون مرتبة بشكل صفوف متوازية ومتشابهة. ولكن اتجاهات العزوم فيها تكون في صفوف متضادة، كما في الشكل (7).

تمتلك هذه المواد درجة حرارة حرجية تسمى درجة حرارة نيل T_N (Neel Temperature) اذ تكون المادة تحت هذه الدرجة مادة ضديدة الفيرومغناطيسية وتترتب العزوم كما في الشكل (7b-). أما إذا كانت المادة عند درجة حرارة اعلى من درجة حرارة نيل فان المادة تتحول الى الطور البارامغناطيسي، الذي تكون فيه العزوم مبعثرة باتجاهات مختلفة كما في الشكل (7a). تكون مغناطيسية هذه المواد ضعيفة (صفر تقريباً) وذلك لتشابه العزوم المتضادة. تقل التأثيرية المغناطيسية للمواد ضديدة الفيرومغناطيسية كلما انخفضت درجة الحرارة في الطور ضديدة الفيرومغناطيسية. الشكل (8) يوضح علاقة التأثيرية المغناطيسية ومقلوبها مع درجة الحرارة.

ينطبق قانون كوري – وايز على التأثيرية المغناطيسية للمواد ضديدة الفيرومغناطيسية في الطور المغناطيسي ويأخذ الصيغة الآتية:

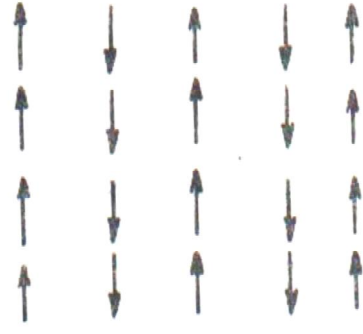
$$\chi = \frac{C}{T - \theta_N} \dots\dots\dots (4)$$

إن قيمة θ_N تكون سالبة.

الجدول (5) يحتوي على اهم المواد ضديدة الفيرومغناطيسية ودرجة حرارة نيل لها.

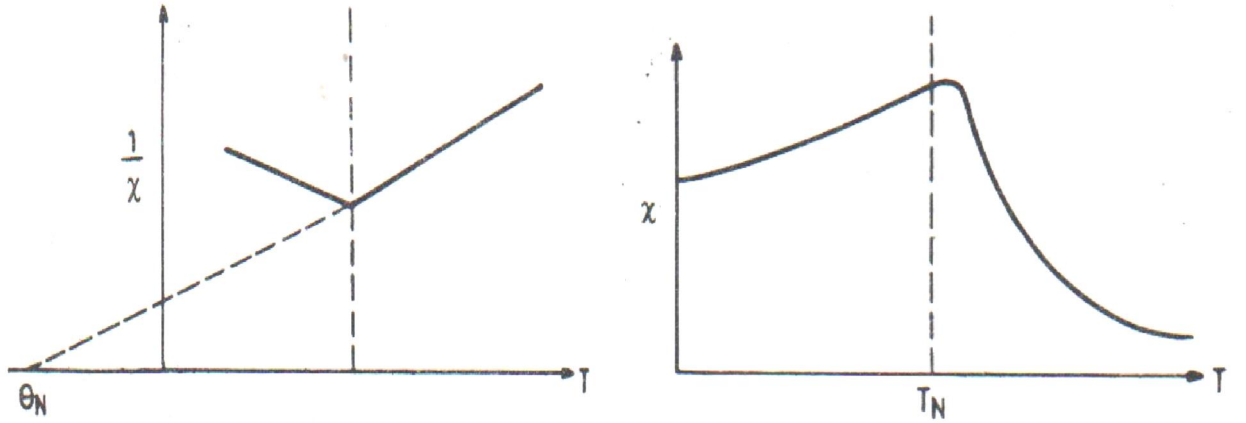


(a)



(b)

الشكل (6) ترتيب العزوم في المواد ضد درجة الحرارة



الشكل (8) علاقة التأثرية المغناطيسية مع درجة الحرارة في المواد ضد درجة الحرارة

الجدول (5) بعض المركبات والعناصر ضديدة الفيرومغناطيسية ودرجة

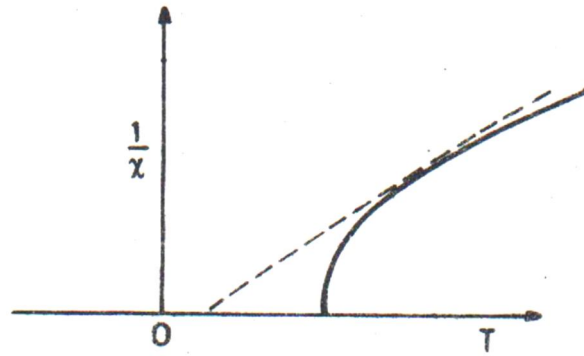
المركب اوالعنصر	درجة حرارة نيل $T_N(K)$
MnO	122
FeO	198
CuO	453
MnF ₂	67
FeF ₂	79
CoF ₂	38
CrCl ₂	40
FeCl ₂	24
$\alpha - Mn$	95
Cr	311

المواد الفيرومغناطيسية Ferrimagnetic Materials

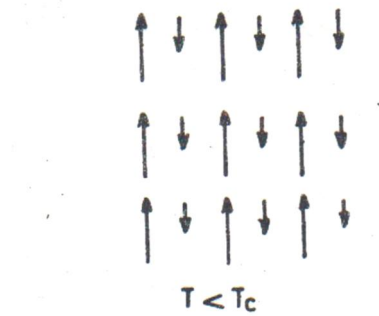
تعد حالة المادة الفيرومغناطيسية حالة خاصة لحالة المواد ضديدة الفيرومغناطيسية. اذ يكون فيها كل صفين متجاورين من العزوم المغناطيسية متعاكسين في الاتجاه، ولكنها تكون غير متساوية في المقدار. وبناء على ذلك ستمتلك المادة الفيرومغناطيسية مغناطيسية ذاتية حتى في حالة عدم وجود المجال المغناطيسي الخارجي على عكس المواد ضديدة الفيرومغناطيسية.

ان تأثيرية هذه المواد تقل كلما ارتفعت درجة الحرارة (فوق درجة حرارة كوري). وان العلاقة بين مقلوب التأثيرية المغناطيسية ودرجة الحرارة لا تكون خطية. الشكل (9) يوضح هذه العلاقة ان امتداد الجزء الواقع في درجات الحرارة العالية البعيدة عن درجة حرارة كوري يقطع احداثي درجة الحرارة في الجزء الموجب. وتمثل مجموعة الفيراييت (Ferrite) أهم المواد الفيرومغناطيسية وتتمثل هذه المجموعة في الصفة الكيميائية $MO.Fe_2O_3$ ، حيث تمثل M ، عناصر مثل الحديد Fe والنيكل Ni والكوبلت Co والنحاس Cu وغيرها من المواد. وللمواد الفيرومغناطيسية تطبيقات واسعة في الصناعة وتستخدم في صناعة لب المواد الحثية ومخازن المعلومات (الذاكرة). الجدول (6) يبين بعض

المواد الفيرومغناطيسية ودرجة حرارة كوري التابعة لها. اما الشكل (10) فيمثل كيفية ترتيب العزوم المغناطيسية في درجات حرارية اقل من درجة حرارة كوري.



الشكل (9) علاقة التأثيرية المغناطيسية مع درجة الحرارة في المواد الفيرومغناطيسية



الشكل (10) ترتيب العزوم المغناطيسية في المواد الفيرومغناطيسية

الجدول (6) بعض المركبات الفيرومغناطيسية ودرجة حرارة كوري

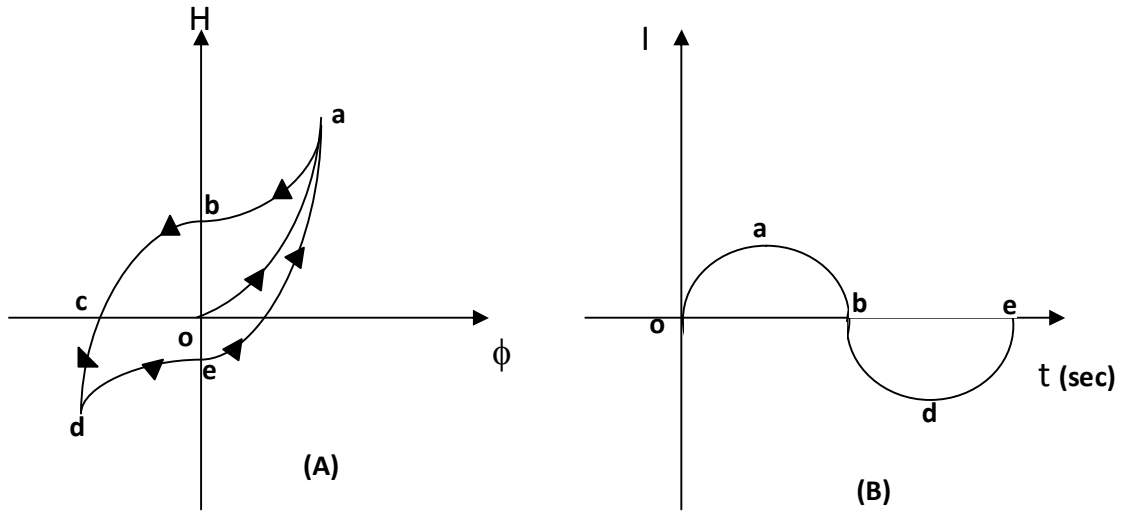
درجة حرارة كوري (K)	المادة الفيرومغناطيسية
858	Fe_3O_4
793	CoFe_2O_4
728	CuFe_2O_4
858	NiFe_2O_4
573	MnFe_2O_4
564	$3 \text{ Gd}_2\text{O}_3 \cdot 5 \text{ Fe}_2\text{O}_3$
556	$3 \text{ Er}_2\text{O}_3 \cdot 5 \text{ Fe}_2\text{O}_3$

المواد المغناطيسية الأخرى Other Magnetic Materials

هناك أنواع أخرى من المواد المغناطيسية غير ما ذكر. وهي على الأغلب حالات خاصة لما سبق، يكون فيها ترتيب العزوم المغناطيسية معقداً كما في الترتيب الحلزوني لبعض العناصر المغناطيسية النادرة ومركباتها. وكذلك ترتيب العزوم المغناطيسية في الزجاجيات المغناطيسية المعدنية البلورية واللابلورية.

الهسترة المغناطيسية

تعرف الهسترة المغناطيسية بأنها ظاهرة تخلف المغناطيسية في المواد الواقعة تحت تأثير مجال مغناطيسي خارجي. تعد هذه الظاهرة سلبية لأنها تسبب ضياع بالطاقة الكهربائية على شكل حرارة، ويمكن توضيح حلقة الهسترة بالمخطط التالي (A)، ويمثل المخطط (B) ذنبية كاملة للتيار.



حيث عند زيادة التيار ووصوله الى أعظم قيمة (a) في الاتجاه الموجب تزداد شدة المجال المغناطيسي (B) الخارجي (المحيط بقلب المحولة) وكذلك يزداد المجال المتولد داخل القلب (H) ووصولهما الى أعلى قيمة عند (a)، وعند هبوط التيار الى الصفر في نقطة (b) نلاحظ هبوط (B) الى الصفر ولكن تبقى كمية من المجال المغناطيسي (H) مخزونة داخل القلب (من $0 \leftarrow b$) باتجاه معين وعند انعكاس التيار سوف ينشأ مجال مغناطيسي (B) باتجاه آخر ليصل الى أعلى قيمة عند النقطة (d) ثم ينخفض

للصفر عند النقطة (e) ولكن تبقى كمية من المجال مخزونة في القلب مقدارها (من $e \leftarrow 0$) .. وهكذا فتظهر حلقة الهسترة، حيث ان مساحتها تشير الى مدى الخسائر في الطاقة. لا يمكن التخلص من هذه الظاهرة ولكن يمكن التقليل منها باستخدام مواد فيرمغناطيسية ذات مساحة حلقة هسترة قليلة.

إن سبب الخسائر في الطاقة هو أن اتجاه المجال المتخلف في القلب الحديدي (H) في النصف الاول من الذبذبة سوف يعاكس المجال (ϕ) الناشئ في النصف الثاني من الذبذبة.

Introduction to composite materials: الفصل السابع

Composite materials

A composite material is made by combining two or more materials – often ones that have very different properties. The two materials work together to give the composite unique properties. However, within the composite you can easily tell the different materials part as they do not dissolve or blend into each other.

Natural composites

Natural composites exist in both animals and plants. Wood is a composite – it is made from long cellulose fibres (a polymer) held together by a much weaker substance called lignin. Cellulose is also found in cotton, but without the lignin to bind it together it is much weaker. The two weak substances – lignin and cellulose – together form a much stronger one. The bone in your body is also a composite. It is made from a hard but brittle material called hydroxyapatite (which is mainly calcium phosphate) and a soft and flexible material called collagen (which is a protein). Collagen is also found in hair and finger nails. On its own it would not be much use in the skeleton but it can combine with hydroxyapatite to give bone the properties that are needed to support the body.

Early composites

People have been making composites for many thousands of years. One early example is mud bricks. Mud can be dried out into a brick shape to give a building material. It is strong if you try to squash it (it has good compressive strength) but it breaks quite easily if you try to bend it (it has poor tensile strength). Straw seems very strong if you try to stretch it, but you can crumple it up easily. By mixing mud and straw together it is possible to make bricks that are resistant to both squeezing and tearing and make excellent building blocks. Another ancient composite is concrete. Concrete is a mix of aggregate (small stones or gravel), cement and sand. It has good compressive strength (it resists squashing). In more recent times it has been found that adding metal rods or wires to the concrete can increase its tensile (bending) strength. Concrete containing such rods or wires is called reinforced concrete.

Making composites

Most composites are made of just two materials. One is the matrix or binder. It surrounds and binds together fibres or fragments of the other material, which is called the reinforcement.

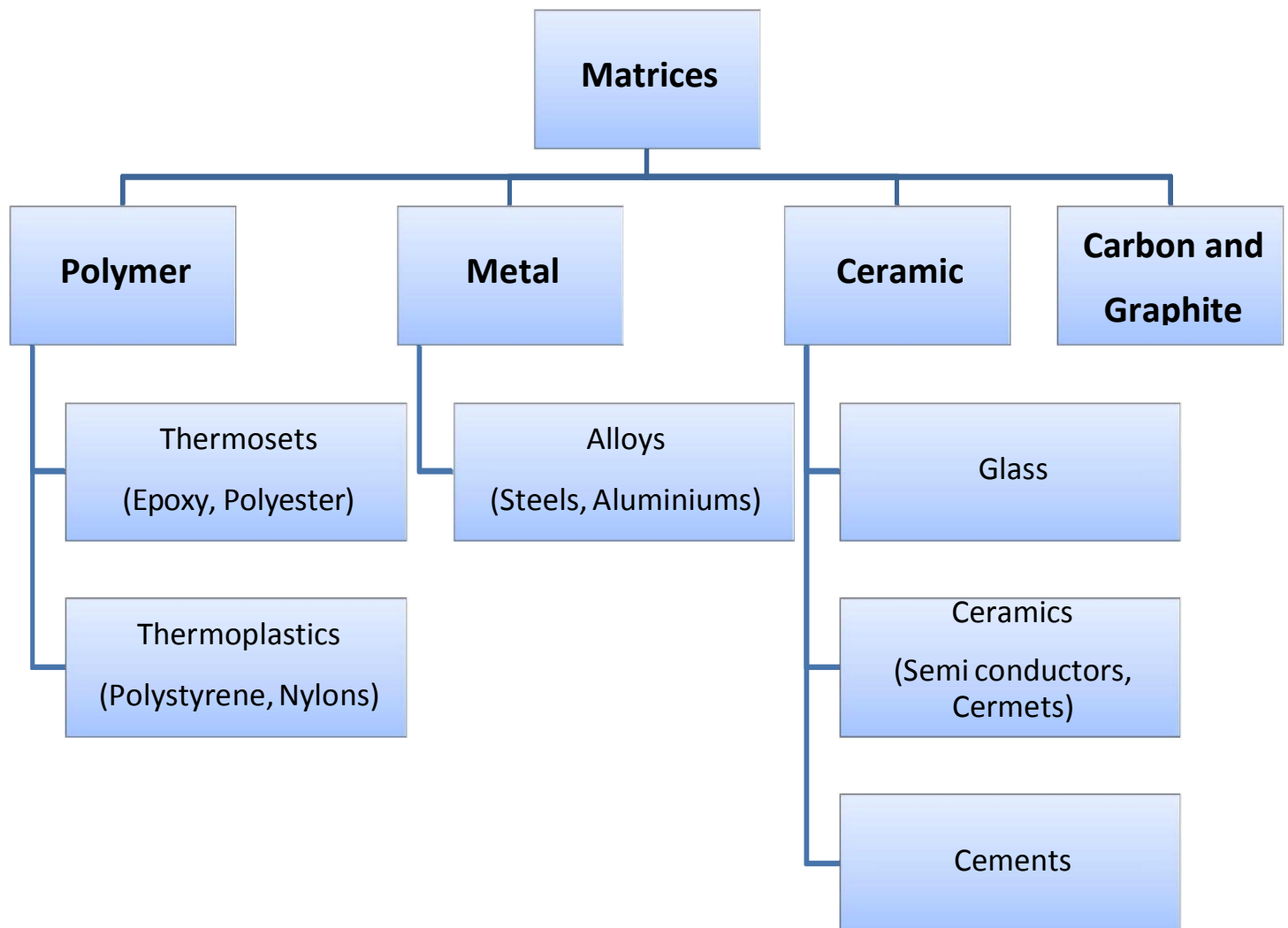
Modern examples

The first modern composite material was fibreglass. It is still widely used today for boat hulls, sports equipment, building panels and many car bodies. The matrix is a plastic and the reinforcement is glass that has been made into fine threads and often woven into a sort of cloth. On its own the glass is very strong but brittle and it will break if bent sharply. The plastic matrix holds the glass fibres together and also protects them from damage by sharing out the forces acting on them. Some advanced composites are now made using carbon fibres instead of glass. These materials are lighter and stronger than fibreglass but more expensive to produce. They are used in aircraft structures and expensive sports equipment such as golf clubs. Carbon nanotubes have also been used successfully to make new composites. These are even lighter and stronger than composites made with ordinary carbon fibres but they are still extremely

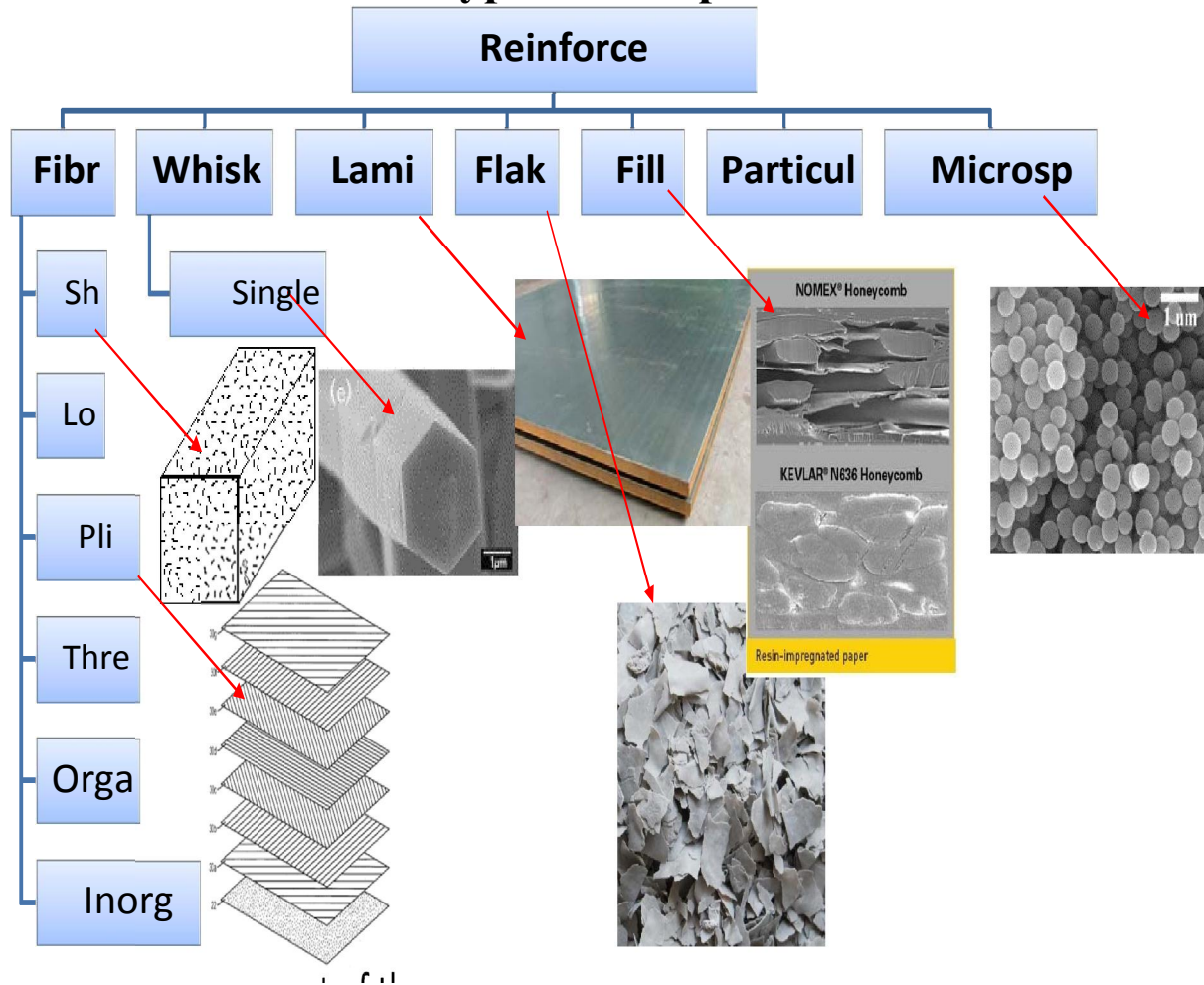
Why use composites?

The biggest advantage of modern composite materials is that they are light as well as strong. By choosing an appropriate combination of matrix and reinforcement material, a new material can be made that exactly meets the requirements of a particular application. Composites also provide design flexibility because many of them can be moulded into complex shapes. The downside is often the cost. Although the resulting product is more efficient, the raw materials are often expensive.

What are the various types of composites materials?

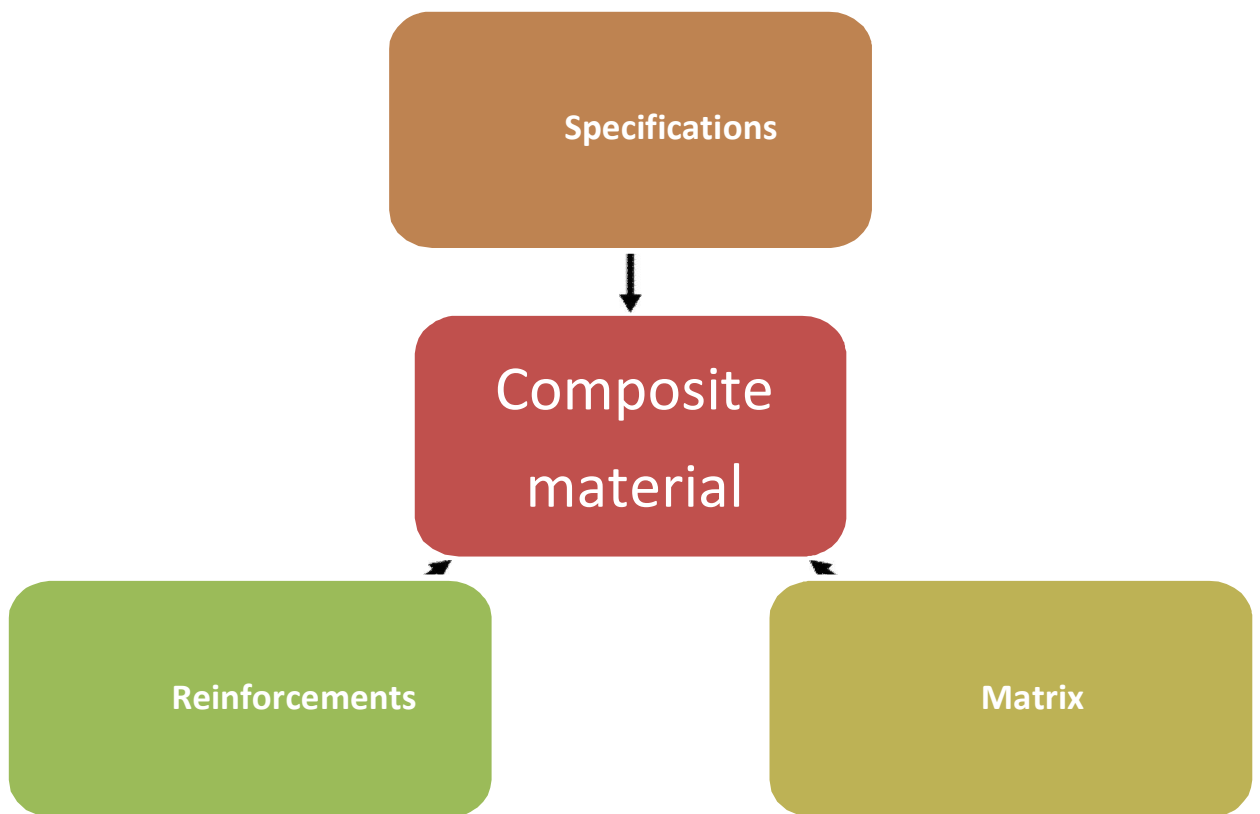


What are the various types of composites materials?



How are composites materials designed?

By comparing, and trying to combine the Properties of the various engineered materials to meet the specifications of the usage planned for the composite.



Classification of composites:

• Matrices:

Organic Matrix Composites (OMCs)
Polymer Matrix Composites (PMCs)
carbon-carbon composites
Metal Matrix Composites (MMCs)
Ceramic Matrix Composites (CMCs)

• Reinforcements:

Fibres reinforced composites
Laminar composites
Particulate composites

Advantages

- Lower density (20 to 40%)
- Higher directional mechanical properties (specific tensile strength (ratio of material strength to density) 4 times greater than that of steel and aluminium.
- Higher Fatigue endurance .
- Higher toughness than ceramics and glasses.
- Versatility and tailoring by design.
- Easy to machine.
- Can combine other properties (damping, corrosion).
- Cost

Disadvantages

- Not often environmentally friendly.
- Low recyclability.
- Cost can fluctuate.
- Can be damaged.
- Anisotropic properties.
- Matrix degrades.
- Low reusability.

Questions

1. What is a composite?
2. On its own, collagen would not be much use in the skeleton. Explain why not.
3. Why are composites important in nature?
4. What is the matrix and what is the reinforcement in:
 - a. mud bricks?
 - b. concrete?

5. List four modern composites and give a use for each. Try to include some which are not mentioned in the information above.

6. Why are composites so important in the design of the Airbus A380?

7. How can composite materials help to protect the environment and reduce carbon dioxide emissions in the future?