

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة الموصل

الحرارة و خواص المادة

تأليف

الدكتور كاظم احمد محمد

استاذ مساعد

قسم الفيزياء

كلية التربية - جامعة الموصل

الفصل الأول

درجة الحرارة

Temperature

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 الى انتقال الحرارة والآليات المختلفة لانتقالها. وأخيراً تم توضيح درجات الحرارة الواطنة وكيفية الحصول عليها.

Temperature

1-1 درجة الحرارة

يعد مفهوم درجة الحرارة من المفاهيم الأساس في الفيزياء شأنه شأن المفاهيم الأساس الأخرى كالقوة 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. وتعد حاسة اللمس أبسط طريقة تمييز سخونة وبرودة الأجسام، إذ نستطيع القول أن الجسم X أشد سخونة من الجسم Y، والجسم Y أشد أو أقل 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 وإذا 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 انواع الطاقة) قد انساب من الجسم الساخن الى داخل الجسم البارد. وهذا المثال مشابه الى ربط وعائين يحتويان على الماء بمستويات مختلفة ، يانبوب ، اذ نجد أن الماء سينساب خلال الانبوب من الوعاء الذي يحتوي على سائل ذات مستوى اعلى الى الوعاء الحاوي على السائل بمستوى اقل .

ومن هذا يتضح لنا بأن درجة حرارة الجسم (أو النظام) تأخذ القيمة نفسها التي تؤول اليها قيم درجات الحرارة المختلفة لتلك الأجسام (أو الانظمة) ، اذا وضعت هذه الأجسام (أو الانظمة) سوية وياتصال حراري مباشر. ان هذا الشرح أو التفسير يتطابق مع فكرة ان درجة الحرارة هي مقياس لسخونة أو برودة الأجسام (أو الانظمة) ، فضلاً عن انه بقود أيضاً الى معنى أساس آخر لدرجة الحرارة هو انها خاصية مالمادة تؤول الى 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 انها مقياس للطاقة الحركية (أو الاهتزازية) لذرات أو جزيئات المادة. ويعبر عن درجة الحرارة بالدرجة السيليزية (أو المثوية) ، $^{\circ}\text{C}$ أو بالدرجة الفهرنهايتية ، $^{\circ}\text{F}$ أو بالدرجة الكلفينية (أو المطلقة) ، K .

2-1 أسس قياس درجة الحرارة Principles of Temperature Measurement

تعتمد الخواص الفيزيائية للمادة على درجة الحرارة ، وتغير هذه الخواص مع تغير درجة الحرارة. ⁽¹⁾ ~~تتغير الخواص~~ ^{تتغير الخواص} حجم المادة ، مقاومة السلك الكهربائي ، طول 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 اسماً على الاختيارات الآتية:

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

ان استحضار النقاط الآتية الذكر مهم جداً عند بناء اي مقياس لدرجات الحرارة .
 فيمكن ان تكون صفة محورية مناسبة لمدى معين من درجة الحرارة من دون غيرها .
 فلو فرضنا ان العلاقة بين الخاصية الفيزيائية الحرارية المختارة X ، ودرجة الحرارة المطلقة T يمكن كتابتها بالعلاقة الخطية الآتية .

$$T = aX \dots\dots (1.1)$$

اذ ان a تمثل كمية ثابتة ، بالامكان تحديد قيمتها عند القيام ببناء اي محرار لقياس درجة الحرارة . ان المعادلة (1.1) تشير الى نقطتين مهمتين هما :

1- ان الفروق المتساوية في درجة حرارة المادة يتج عنها تغيرات متساوية المقدار في قيمة الخاصية الفيزيائية الحرارية المختارة X .

2- ان النسبة بين اية درجتين حراريتين تساوي النسبة بين قيمتي الخاصية الفيزيائية عند تلكما الدرجتين الحراريتين ، وبتعبير آخر فإن

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{X_1}{X_2} \dots\dots (1.2)$$

5 من ملاحظاتهم الملاحظات التي يجب أخذها بعين الاعتبار
 اذ ان X_1 و X_2 تمثلان مقدار خاصية المادة الفيزيائية عند الدرجتين الحراريتين T_1 و T_2 عند
 على التعاقب . اما قيمة الثابت a فإنها تملك نفس القيمة عند T_1 و T_2 ، ولذلك فإنها
 لا تظهر في المعادلة (1.2) .
 ان استخدام العلاقات السابقة يحتم علينا ملاحظة النقاط المهمة الآتية :
 1- ان قيم درجات الحرارة المتأينة من اختيارنا لمقياس معين يعتمد على مادة معينة
 وخاصية محورية معينة ليس بالضرورة ان تكون متطابقة مع قيم درجات الحرارة
 المتأينة من مقياس آخر يعتمد على مادة أخرى وخاصية محورية أخرى .
 2- اذا حدث تطابق بين قيم درجات الحرارة المتأينة من مقياسين مختلفين في مدى
 معين من درجات الحرارة فإنه ليس من الضروري انه يحدث التطابق في مدى آخر
 لدرجات الحرارة .
 3- ان العلاقة الخطية في (1.2) لا تنصح لجميع مديات درجات الحرارة ، وهذا يعني ان
 قيمة الثابت a لا تكون نفسها عند جميع درجات الحرارة .

ويمكن إعادة كتابة المعادلة (1.2) على النحو الآتي :

$$T_1 = T_2 \frac{X_1}{X_2} \quad \text{..... (1.3)}$$

فإذا فرضنا ان قيمة خاصية المادة X_2 عند النقطة الثلاثية للماء T_2 والمساوية الى 273.16 K فإن المعادلة (1.3) يمكن تبسيطها الى الصيغة الآتية : 0.006 bar 652 11.6 10^{-6}

$$T_1 = 273.16 \frac{X_1}{X_2} \quad \text{..... (1.4)}$$

ان العلاقة الأخيرة يمكن تعميمها على اي نوع من المحارير يراد استخدامه ، وكما يأتي :
للمحارير السائلة

$$T(L) = 273.16 \frac{L}{L_0}$$

للمحارير الغازية ذات الحجم الثابت .

$$T(P) = 273.16 \frac{P}{P_0}$$

للمحارير الغازية ذات الضغط الثابت .

$$T(V) = 273.16 \frac{V}{V_0}$$

ومحارير المقاومة الكهربائية .

$$T(R) = 273.16 \frac{R}{R_0}$$

ومحارير المزدوجات الحرارية .

$$T(E) = 273.16 \frac{E}{E_0}$$

وهكذا لأي نوع من المحارير .

حيث ان $\epsilon_0, R_0, V_0, P_0, L_0$ 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 درجات الحرارة الواقعة بين 1 K الى 300 K . فيستخدم محرار مقاومة البلاتين في مدى درجات الحرارة 200 K - الى 1000 K ويستخدم محرار مقاومة شبه الموصل لمدى درجة الحرارة بين 2 K الى 20 K . كذلك يستخدم محرار مقاومة الكاربون في مدى درجات مختلفة لدرجات الحرارة ، مثلاً بين 0.1 K الى 20 K . أما لدرجات الحرارة الأقل من 1 K فغالباً ما تستخدم صفة

التأثيرية المغناطيسية لأحد الأملاح البارامغناطيسية كمحارار 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 محارار المزدوج الحراري. أما لدرجات الحرارة الأعلى من 1000 K فعالياً ما يستخدم المحارار البارومتري (Pyrometer).

3-1 مقاييس درجة الحرارة The Temperature Scales

قبل البدء بشرح عملية بناء المحارار يجب تعيين مقياس درجة الحرارة المناسب وتعيين الطريقة المناسبة لتدريج هذا المحارار. وبصورة عامة هناك ثلاثة مقاييس رئيسة لدرجة الحرارة، وهي كما يأتي:

1-3-1 المقياس السيليزي The Celsius (Centigrade) Scale (C)

يتم تدريج هذا المقياس وذلك بتعريف نقطة انجماد الماء على أنها تساوي صفر درجة سيليزية، 0°C تحت الضغط الجوي الاعتيادي ونقطة غليان الماء على أنها تساوي، 100°C تحت الضغط الجوي الاعتيادي، والطريقة المستخدمة لتدريج المحارار الزئبقي وفق هذا المقياس هي بوضع المحارار الزئبقي في خليط الثلج والماء وتركه مدة كافية حتى يستقر مستوى الزئبق. ويؤشر مستوى الزئبق على أنه 0°C . ثم يملأ خليط البخار والماء ويوضع المحارار 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 الى 100 جزء متساو كل جزء سيمثل تغيراً في درجة الحرارة مقداره درجة سيليزية واحدة 1°C ويمكن توسيع مدى المحارار 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 .

2-3-1 المقياس الفهرنهايتي The Fahrenheit Scale (F)

بعد المقياس الفهرنهايتي من مقاييس درجة الحرارة المعروفة. ان مسافة درجة الحرارة الفهرنهايتية على المقياس تساوي خمسة انصاف : $(\frac{5}{9})$ مسافة درجة الحرارة السيليزية. ان درجة انجماد الماء في هذا المقياس تساوي 32 درجة فهرنهايتية (32°F) ، ودرجة غليان الماء تساوي 212°F . وتقسم المسافة بين النقطتين الى (180) جزءاً متساوياً. وان طريقة تدريجه هي طريقة تدريج المقياس السيليزي نفسها.

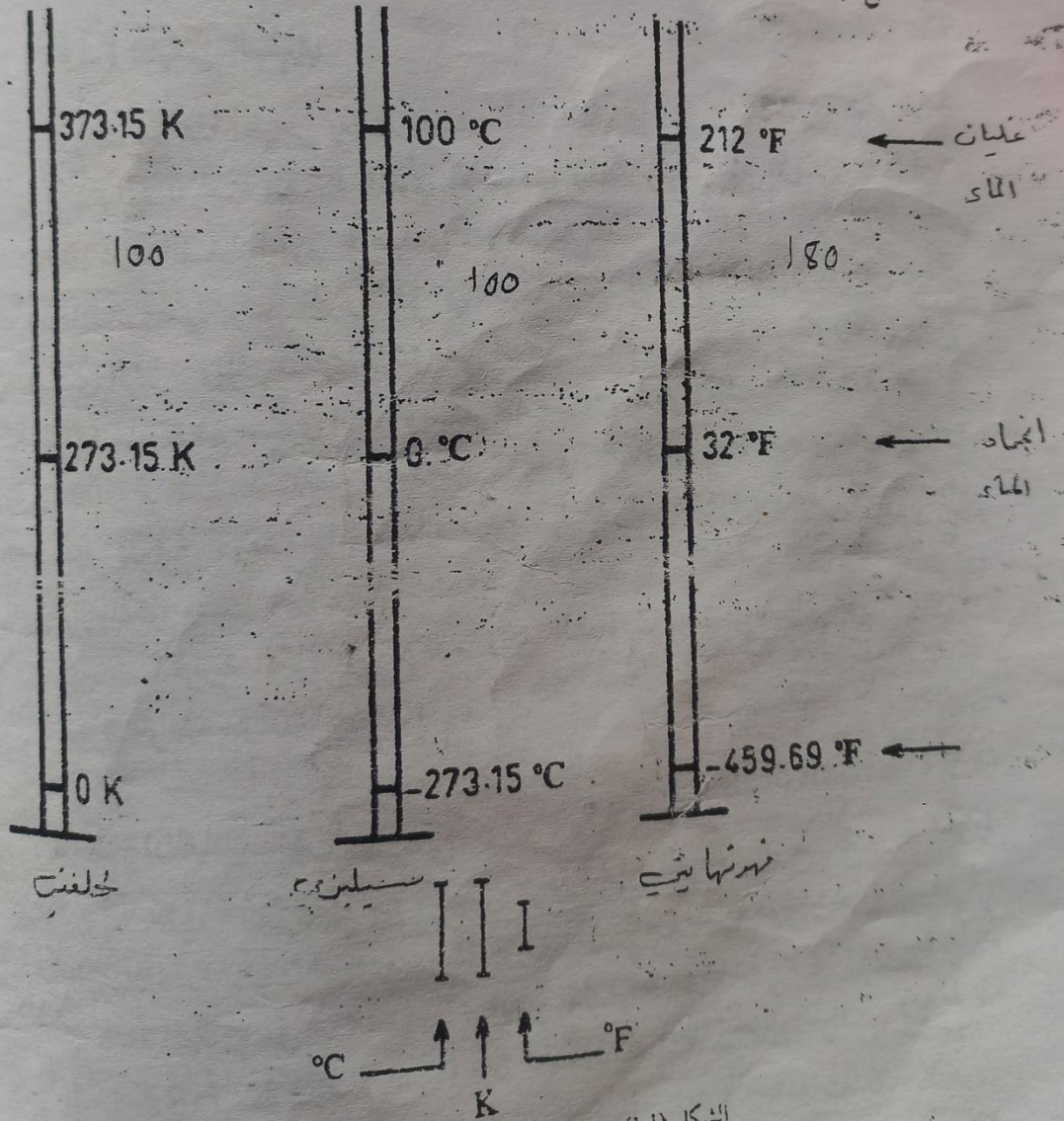
The Kelvin Scale (K)

3-3-1 المقياس الكلفي

يعد المقياس الكلفي المقياس العلمي الاساس للدرجة الحرارة والذي على اساسه يتم تعريف المقياس السليزي.

يشبه المقياس الكلفي في تقسيماته المقياس السليزي ، ان درجة انجماد الماء في هذا المقياس تساوي 273.15 درجة كلفنه ، وغالباً ما تأخذ على انها مساوية الى 273 K ، اما درجة حرارة غليان الماء فانها تساوي 373 K درجة كلفنية تحت الضغط الجوي الاعتيادي.

من هذا يتبين ان المسافة بين النقطتين مقسمة الى (100) جزء متساو، كما هي الحالة في المقياس السليزي ، فضلاً عن تساوي الدرجة الكلفنية مع الدرجة السليزية. يوضح الشكل (1.1) هذه المقاييس الثلاثة والدرجات الحرارية المهمة فيها.



Conversion of Scales

4-3-1 التحويل من مقياس الى آخر

يمكن تحويل درجة الحرارة من مقياس الى آخر وكما يأتي :

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

$$^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5} ^{\circ}\text{C} + 32 \quad \text{..... (1.5)}$$

أو

$$^{\circ}\text{C} = \frac{5}{9} (^{\circ}\text{F} - 32) \quad \text{..... (1.6)}$$

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

$$\text{K} = 273 + ^{\circ}\text{C} \quad \text{..... (1.7)}$$

أو

$$^{\circ}\text{C} = \text{K} - 273 \quad \text{..... (1.8)}$$

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

$$^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5} (\text{K} - 273) + 32 \quad \text{..... (1.9)}$$

أو

$$\text{K} = 273 + \frac{5}{9} (^{\circ}\text{F} - 32) \quad \text{..... (1.10)}$$

Types of Thermometers

4-1 أنواع المحارير

ولأجل قياس درجة الحرارة فقد تم استخدام عدة أنواع من المحارير، إذ إن لكل نوع من هذه المحارير يعتمد على إحدى خواص المادة وعلاقتها بدرجة الحرارة. ومن أمثلة هذه المحارير: المحرار الزئبقي ومحرار المزدوج الحراري والمحرار الغازي ذو الحجم الثابت ومحرار المقاومة الكهربائية والمحرار الغازي ذو الضغط الثابت وغيرها. والجدول (1.1) يوضح نوع المحرار والخاصية المستخدمة لأجل قياس درجة الحرارة.

الجدول (1.1) : انواع المحارير

نوع الخاصية المعتمدة	اسم المحرار
طول عمود الزئبق (L)	المحرار الزئبقي
القوة الدافعة الكهربائية (E)	المزدوج الحراري
ضغط الغاز (P)	المحرار الغازي ذو الحجم الثابت
المقاومة الكهربائية (R)	المقاومة الكهربائية
حجم الغاز (V)	المحرار الغازي ذو الضغط الثابت

Calibration of Thermometers

1-4-1 تدرج المحارير

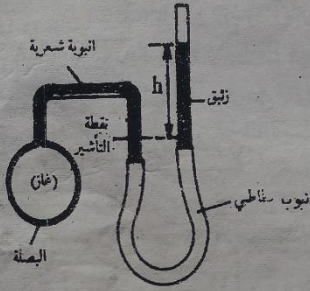
ان عملية تدرج المحارير تعني تعيين قيمة الثابت (a) لأي نوع منها. وهذه العملية تتطلب اختيار نقطة اساس (قياسية) ثابتة لدرجة الحرارة ، وتم الاتفاق على اختيار النقطة الثلاثية للماء لهذا الغرض. وتعرف النقطة الثلاثية للماء على انها : درجة الحرارة التي يتواجد عندها الجليد (صلب) والماء (سائل) والبخار (غاز) معاً في آن واحد وفي حالة توازن حراري تحت ضغط ثابت يعادل (4.6 mmHg). وقد اتفق على انه تكون درجة الحرارة (273.16K) هي الدرجة الحرارية التي تمثل النقطة الثلاثية للماء.

وتجب ملاحظة ان قراءة جميع انواع المحارير لدرجة الحرارة عند النقطة الثلاثية للماء يجب ان تكون نفسها. وتم تعريف الدرجة الكلفينية والتي تمثل وحدة قياس درجة الحرارة الترموديناميكية على انها تمثل الذكر (1/273.15) من درجة حرارة النقطة الثلاثية للماء (The Triple Point of water) والمساوية تقريباً الى (0.01°C).

1-4-2 المحرار الغازي ذو الحجم الثابت The Constant Volume Gas Thermometer

يتكون المحرار الغازي ذو الحجم الثابت من وعاء زجاجي او معدني يسمى احباً بالبصلة (البصلة). يتصل بأنبوبة زجاجية - يمكن ان تكون انبوبة شعيرية - الى المانومتر (مقياس زئبقي). تحتوي البصلة على الغاز أو الهواء ، وتوضع البصلة في وعاء خارجي يمثل الوسط المحيط المراد قياس درجة حرارته ، انظر الشكل (1.2). يتم استخدام هذا المحرار وذلك بجعل مستوى الزئبق في جهتي المانومتر متساوية ويتم تأشيرها بيني النقطتين. وفي هذه الحالة سيكون الضغط المسلط على الغاز المحصور في البصلة مساوياً للضغط الجوي. ثم نغمر

البصلة في المحيط المراد قياس درجة حرارته. فإذا كان المحيط ساخنًا أدى إلى تمدد الغاز المحصور في البصلة، الذي سيقوم بدفع الزئبق مؤدياً إلى انخفاض مستواه في الجهة اليسرى من المانومتر، وبالعكس إذا كان الوسط بارداً أدى إلى تقلص الغاز في البصلة وإلى ارتفاع مستوى الزئبق في الجهة اليسرى من المانومتر. وبعد حصول التوازن الحراري يرفع أو ينخفض مستوى الزئبق (وذلك بخفض أو رفع الجهة اليمنى من المانومتر) إلى أن يصل مستوى الزئبق في الجهة اليسرى إلى النقطة المؤشرة قبل ضم البصلة في المحيط. تسجل قراءة (ارتفاع) مستوى الزئبق في الجهة اليمنى من المانومتر. ويقصد بالارتفاع هنا الفرق بين مستويي الزئبق في جهتي المانومتر وتكن (h).



الشكل (1.2): الحراري الغازي ذو الحجم الثابت

أن الضغط المسلط على الغاز في هذه الحالة سيكون مساوياً إلى الضغط الجوي. وإذا ضغط عمود الزئبق والذي يساوي $h\rho g$ ، حيث ρ تمثل كثافة الزئبق و g التعجيل الأرضي. هناك أسباب تؤدي إلى عدم دقة قراءة درجة الحرارة باستخدام هذا الحراري ومن أهمها:

- 1- تمدد أو تقلص البصلة الذي يسبب تغير في حجم الغاز المحصور بداخلها. إذ غالباً ما يتم إهمال هذا التغير في حجم الغاز أو البصلة.
 - 2- الاختلاف الحاصل بين درجتي حرارة الغاز المحصور في البصلة والغاز المحصور في الأنبوبة الموصلة إلى المانومتر.
- ولأجل إيجاد قيمة درجة الحرارة باستخدام هذا الحراري تستخدم المعادلة الآتية:

$$T_m = 273.16 \frac{P}{P_0}$$

وتكون القراءة بالدرجة الكلفينية ، كما ان الحجم (V) يبقى ثابتاً .
وقد وجد عملياً بان المحارير الغازية المختلفة التي تستخدم غازات مختلفة تسجل
قراءات مختلفة لنفس الدرجة الحرارية نفسها ويستثنى من هذه ، الحالة التي يصبح فيها
الضغط Po مساوياً أو مقارباً للصفر .

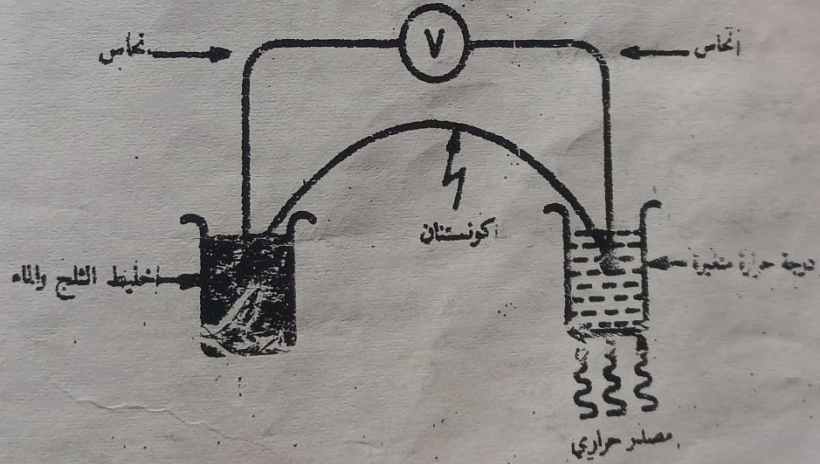
The Thermocouple Thermometer

1-4-3 محرار المزدوج الحراري

يتكون محرار المزدوج الحراري من سلكين مصنوعين من مادتين مختلفتين كالنحاس
والكونستانان أو النحاس والحديد أو البلاتين والروديوم أو الكروميل والالوميل وغيرها .
يتصل السلكان اتصالاً جيداً في نهايتهما فقط انظر الشكل (1.3) : إن اساس عمل هذا
المحرار يعتمد على توليد القوة الدافعة الكهربائية نتيجة لاختلاف درجتي حرارة النهايتين
الموصلتين . ان قيمة القوة الدافعة الكهربائية المتولدة تعتمد على عدة عوامل منها :

1- مقدار الفرق بين درجتي حرارة نهايتي المزدوج الحراري .

2- نوع المواد المصنوع منها المزدوج الحراري .



الشكل (1.3) : محرار المزدوج الحراري

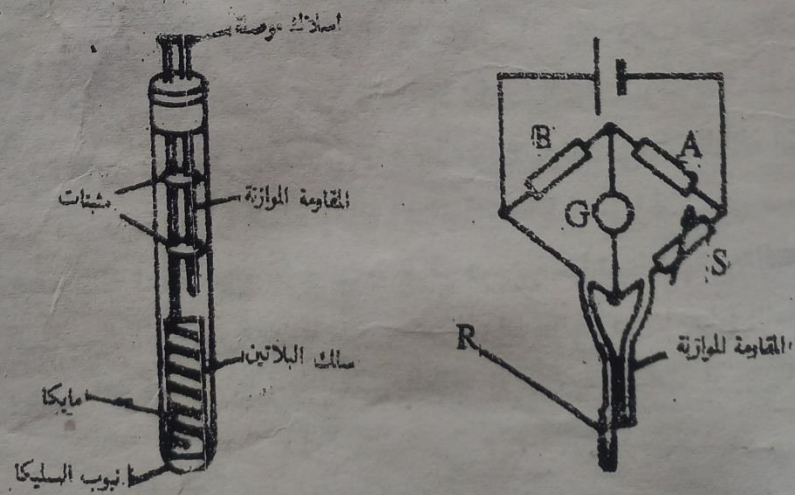
يتم تدريب محرار المزدوج الحراري بوضع احدي نقطتي الاتصال في خليط الجليد والماء
وتبقى ثابتة ثم تغير درجة حرارة النقطة الثانية ونقرأ قيمة القوة الدافعة الكهربائية المتولدة عند
كل درجة حرارة بواسطة المجهاد (الفولتميتر) . ان العلاقة بين قيمة القوة الدافعة الكهربائية
المتولدة ودرجة الحرارة علاقة غير خطية . ويرسم قيم القوة الدافعة الكهربائية ضد درجة
الحرارة يمكن الحصول على منحنى تدريب محرار المزدوج الحراري . كما ويمكن عمل جداول
بتلك القيم .

ومن مميزات محرار المزدوج الحراري ما يأتي :-

- 1- سرعة وصوله الى حالة التوازن الحراري مع الجسم المراد قياس درجة حرارته وذلك لانخفاض سعته الحرارية.
- 2- المدى الواسع لدرجات الحرارة التي يمكن قياسها (من -250°C الى حوالي 1500°C) بشرط استخدام المواد المناسبة لكل مدى.
- 3- صغر حجمه ودقته العالية نسبياً.
- 4- يستخدم كثيراً في الصناعة وفي المجالات التي تتطلب تحديد موضع (نقطي) لدرجة الحرارة وتعاني تغيراً سريعاً في درجات الحرارة.

1-4-4 محرار المقاومة الكهربائية The Electrical Resistance Thermometer

يتكون محرار المقاومة الكهربائية من سلك من مادة البلاتين ملفوف بصورة مزدوجة حول مادة عازلة كهربائياً، يوضع في انبوبة مصنعة من مادة جيدة التوصيل الحراري كالفضة او النحاس للمحافظة عليه من التأثيرات الخارجية. اما محرار المقاومة الكهربائية المستخدم لاغراض العرض التجريبي فيتكون من سلك من النحاس ملفوف حول مادة عازلة من المايكا موضوع داخل انبوبة اختبار مملوءة بمادة الزيت، ويستخدم هذا الترمومتر لاغراض تدريب الطلبة على كيفية تدرج محرار المقاومة. تستخدم مقاومة السلك الكهربائي كخاصية حرارية يتم قياسها والاستدلال بها على درجة الحرارة. وقد وجد ان العلاقة بين المقاومة الكهربائية للسلك المعدني ودرجة الحرارة علاقة غير خطية في مدى درجات الحرارة المختلفة. لأجل قياس قيمة المقاومة يربط طرفا السلك الى نقطة وتسمى، اذ تربط الدائرة الكهربائية كما في الشكل (1.4).



الشكل (1.4) : محرار المقاومة الكهربائية

تختار المقاومتان A و B متساويتين ويجري تغيير قيمة المقاومة S حتى تصل الدائرة الكهربائية الى حالة الأثران (قراءة الكلفانومتر تؤثر صفر) ، وعندها تكون قيمة المقاومة S مساوية الى قيمة مقاومة المحرار R . وتستخدم قيمة R لأجل الحصول على درجة الحرارة . ان استخدام قنطرة وتسنون يفيد في تعيين قيمة مقاومة المحرار بدقة عالية والتي بدورها تؤدي الى تحديد دقيق لدرجة الحرارة . يستخدم هذا النوع من المحارر في درجات الحرارة الواطئة . ومن (مميزات محرار المقاومة) ما يأتي :

- ١- يستخدم لمديات واسعة من درجات الحرارة (من 200°C - الى اكثر من 1000°C).
- ٢- دقيق جداً ، ويفيد في التغيرات البطيئة لدرجات الحرارة .

ولكنه (لا يكون كفوءاً في قياس تغيرات درجات الحرارة السريعة) وذلك لحاجته الى وقت كاف للوصول الى حالة التوازن الحراري ، لم بسبب منعته الحرارية العالية (حرارة النوعية كبيرة) .

5-1 تأثير تغير درجة الحرارة على حالات المادة Effect of Temperature Changes

تكون الذرات والجزيئات المكونة للمادة في حالة تذبذب مستمر حول مواقع استقرارها ، اذ تتحرك ذهاباً واياباً فتتجاذب او تتنافر فيما بينها بصورة مستمرة . ان الطاقة الكلية لهذه الذرات او الجزيئات تسمى بالطاقة الداخلية Internal energy . تمثل الطاقة الداخلية جميع انواع الطاقات التي تملكها الذرات او الجزيئات المكونة للمادة ، كالطاقة الحركية والدورانية والكيميائية والنوية وغيرها ، وما يخص درجة الحرارة هو الطاقة الحركية (الاهتزازية) للذرات او الجزيئات ، والتي تعتمد بصورة مباشرة على درجة حرارة المادة . فعند تلامس مادتين متشابهتين ولكنهما مختلفتان في درجة حرارتهما ، فان ذرات او جزيئات المادة ذات درجة الحرارة العالية تفقد كمية من طاقتها اذ تكتسبها ذرات او جزيئات المادة ذات درجة الحرارة الاوطأ ، اي ان المادة الاولى تبرد والمادة الثانية تسخن . ان الطاقة التي تنتقل من الجسم ذي درجة الحرارة العالية (طاقة اهتزاز ذراته اكبر) الى الجسم ذي درجة الحرارة المنخفضة (طاقة اهتزاز ذراته اقل) نتيجة لفرق درجتي حرارتهما تسمى بالطاقة الحرارية . ان انسياب الطاقة الحرارية بين المادتين يستمر الى ان تصبح درجتا حرارة المادتين متساويتين . وتعبير آخر الى ان يتساوى معدل الطاقة الاهتزازية للذرات او جزيئات المادتين .

6-1 التمدد الحراري

Thermal Expansion

ان تغير درجة حرارة المادة يؤدي الى تغيرات في الخواص الاخرى للمادة ومن ابرز هذه التغيرات هو تغير ابعاد المادة او تغير حالتها. ان رفع درجة حرارة المادة يؤدي الى زيادة الطاقة الاهتزازية للذرات او جزيئاتها وعندها تزداد سعة اهتزاز تلك الجسيمات ، وهذا معناه زيادة معدل او متوسط المسافة بين الذرات او الجزيئات ، اي ان جميع ابعاد المادة سوف تتغير ، تزداد باارتفاع درجة حرارتها وتنكش بانخفاض درجة حرارتها (عدا بعض الاستثناءات مثل الماء الذي يتقلص حجمه عند رفع درجة حرارته من 0°C الى 4°C).
 ١- وتسمى ظاهرة تغير ابعاد المادة نتيجة لتغير درجة حرارتها بالتمدد الحراري/ولأجل تفادي الغشاك التي يسببها التمدد الحراري نترك فواصل بين قضبان السكك الحديدية وخرسانة الطرق السريعة.

Expansion of Solids

7-1 تمدد الاجسام الصلبة

Linear Expansion (α)

7-1-1 التمدد الطولي

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

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

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T \quad (1.11)$$

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 حرارة واحدة. ويمكن إعادة كتابة المعادلة (1.11) بالصيغة الآتية:

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

$$\Delta L = L_T - L_0$$

حيث L_T الطول الجديد عند درجة حرارة T تساوي

$$L_0 (1 + \alpha \Delta T)$$

(1.12)

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

ان قيمة معامل التمدد الطولي تعتمد على نوع الماد المستخدمة ، وان قيمتها ليست ثابتة تماماً ، ولكنها تتغير بصورة بطيئة مع تغير درجة الحرارة. ان قيم (α) التي نجدها في الجدول 1 تمثل معدل القيم لمدي معين من درجات الحرارة ، أو تمثل قيمة واحدة عند درجة حرارة معينة. وللأغراض العملية الاعتيادية يمكن اعتبار قيمة (α) ثابتة لمدي محدود من درجات الحرارة للمواد التي لاتعاني تغيراً في الطور ضمن ذلك المدي.

الجدول (1.2) : 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
الالنيوم	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

2-7-1 التمدد السطحي

Surface Expansion (β)

ان تغير مساحة السطح 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 حرارة واحدة. ان قيمة β تعطى بالمعادلة الآتية:

$$\beta = \frac{\Delta A / A_0}{\Delta T}$$

(1.13)

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

$$A = A_0 (1 + \beta \Delta T) \quad (1.14)$$

حيث تمثل A_0 و A المساحة الأصلية والمساحة الجديدة عند درجتا الحرارة T_0 و T على التوالي. β هي لكل درجة حرارة، أي $^{\circ}K^{-1}$ أو $^{\circ}C^{-1}$ أو $^{\circ}F^{-1}$ ، وذلك لاختصار وحلتي المساحة. ويمكن البرهنة على أن معامل التمدد السطحي يساوي تقريباً ضعف معامل التمدد الطولي للمادة نفسها أي أن:

$$\beta \approx 2\alpha \quad (1.15)$$

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

Volume Expansion (γ)

3-7-1 التمدد الحجمي

أن حجم المادة يتغير إذا تغيرت درجة حرارة المادة بنفس طريقتي التمدد الطولي والتمدد السطحي ويعرف معامل التمدد الحجمي على أنه التغير النسبي في حجم المادة الصلبة نتيجة لتغير درجة حرارتها درجة واحدة. أن معامل التمدد الحجمي يعطى بالمعادلة الآتية:-

$$\gamma = \frac{\Delta V / V_0}{\Delta T} \quad (1.16)$$

أن حجم المادة الجديد V يمكن الحصول عليه من المعادلة الآتية:

$$V = V_0 (1 + \gamma \Delta T) \quad (1.17)$$

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

$$\gamma \approx 3\alpha \quad (1.18)$$

ويعود ذلك إلى أن الجسم المتجانس يتمدد في أبعاده الثلاثة بالمقادير نفسها أي أنه يتمدد باتجاه الطول والعرض والارتفاع. ومن المعروف أنه 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 (3-1) قيم معامل التمدد الحجمي لبعض المواد المعروفة.

الجدول (1.3) : 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 الايثيلي	11
الكلسرين	5.1
الزجاج (الاعتيادي)	0.2
الزجاج (البيركس)	0.09

Expansion of Liquids

8 - 1 تمدد السوائل تمدد حسي

من المعروف ان السوائل (الموائع بصورة عامة) لا تملك 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

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

..... (1.19)

اذ ان V_0 تمثل حجم السائل الاصيل و ΔV تمثل مقدار التغير في حجم السائل الناتج عن تغير في درجة حرارته مقداره ΔT . ان وحدة قياس Ψ هي لكل درجة حرارة وذلك لاختصار وحدات الحجم . ان قيمة Ψ لا تتأثر كثيراً بتغير درجة الحرارة .

يزداد حجم السوائل بصورة عامة اذا ارتفعت درجة حرارتها ، ويشذ عن هذه القاعدة بعض السوائل مثل الماء الذي يقل حجمه (ينكش) اذا ارتفعت درجة حرارته من 0°C الى 4°C . اما بعد هذه الدرجة الحرارية فان الماء يسلك سلوكاً طبيعياً تتبعية السوائل ، اي يزداد حجمه بزيادة درجة حرارته .

9-1 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 :

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

اذ ان V_0 تمثل حجم كتلة معينة من غاز عند درجة حرارة 0°C . ان الإشارة الى حجم الغاز عند درجة حرارة 0°C ضروري جداً لان معامل التمدد الحجمي للغاز كبير جداً . اذا كان V_1 و V_2 تمثلان حجم الغاز عند درجتى الحرارة T_1 و T_2 على الترتيب ، فانه لا يصح تطبيق المعادلة الآتية :

$$V_2 = V_1 [1 + \phi(T_2 - T_1)]$$

بل يجب ان يشار الى القيم V_1 و V_2 نسبة الى 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 الاولى على الثانية نحصل على المعادلة الآتية :

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1 + \phi T_2}{1 + \phi T_1} \left(\frac{1}{273} \times V_0 \right)$$

وقد وجد عملياً ان معامل التمدد الحجمي للغاز يكافئ تقريباً $(1/273)$. وهو ما يعرف ^{بـ} القانون جارس الذي ينص على : ان حجم كتلة معينة من غاز محفوظ تحت ضغط ثابت ، ^{الوطنة} يزداد بنسبة ثابتة تعادل $(1/273)$ من حجمه عند درجة حرارة 0°C لكل زيادة في درجة حرارته مقدارها درجة حرارية واحدة .

ان هذا القانون يعني ان حجم الغاز سيصبح صفرأ عند درجة حرارة -273°C . الا ان جميع الغازات تتحول الى الحالة السائلة لما قبل الوصول الى درجة حرارة -273°C (اي درجة حرارة الصفر المطلق) . وهذا يعني ان قانون جارس لا يصح تطبيقه عند درجات الحرارة الواطئة .

Mechanism of Heat Transfer

10-1 آليات انتقال الحرارة

تنتقل الحرارة من مكان الى آخر بأحد الطرق الرئيسية الثلاثة :

- 1- طريقة التوصيل . (الحرارة الصلبة)
- 2- طريقة الحمل . (سائل ، غاز)
- 3- طريقة الاشعاع .

تنتقل الحرارة بالتوصيل من الاجزاء الساخنة الى الاجزاء الباردة من الوسط المادي ، دون حركة موضعية للوسط . اما في طريقة الحمل فان الحرارة تنتقل بحركة الاجزاء الساخنة للوسط المادي (سائل او غاز) ، ولا تحدث ظاهرة الحمل في المواد الصلبة . تنتقل الحرارة بوساطة الاشعاع الكهرومغناطيسي من مكان الى آخر من دون الحاجة الى وسط مادي من دون ان تسخن (ترفع) درجة حرارة الفضاء الذي تمر خلاله . ومن المقيّد ان نذكر ان مصطلح الاشعاع الحراري يقصد به (في الغالب) الاشعة تحت الحمراء ، إذ انها تحمل الجزء الاكبر من الطاقة التي تصل الى الارض من الشمس . واذا مر الاشعاع الكهرومغناطيسي في الفضاء الحاووي على مادة ما فان جزءاً من الطاقة المشعة سيمتص وسيعمل على رفع درجة حرارة المادة ، كما يحدث عند مرور الاشعة الكهرومغناطيسية خلال جو الارض .

وستتطرق الى طرق انتقال الحرارة بشيء من التفصيل في الفقرات اللاحقة .

10-1-1 طريقة التوصيل

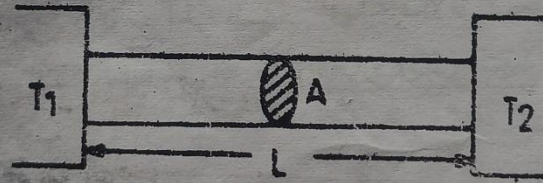
Conduction method

من المألوف اننا اذا تلامس جسمان فان الحرارة تنتقل من الجسم الساخن الى الجسم الاقل سخونة ، وبشبه آخر تنتقل الحرارة من الجسم ذي درجة الحرارة المرتفعة الى الجسم ذي درجة الحرارة الأقل ، ويتوقف انتقال الحرارة بين الجسمين عندما تتساوى درجتا حرارتهما ويتحقق التوازن الحراري . ان انتقال الحرارة بين الاجسام يعني انتقال الطاقة الحرارية من الجزء الساخن الى الجزء البارد . فاذا عرفنا ان الحركة الاهتزازية لجسيمات المادة تمثل معظم الطاقة الحرارية في المادة ، فان جسيمات الجزء الساخن تكون ذات سعة اهتزازية اكبر من جسيمات الجزء البارد ، ونتيجة التصادم بين هذه الجسيمات والجسيمات المجاورة تنقل اليها جزءاً من طاقتها الحرارية ، اي تزداد سعة اهتزازها وهذه بدورها تعمل على نقل الطاقة الحرارية بالتصادم الى الجسيمات المجاورة ، وهكذا تستمر العملية الى ان تكتسب جميع الجسيمات نفس معدل الطاقة الحرارية ، وعندما يتوقف انتقال الحرارة .

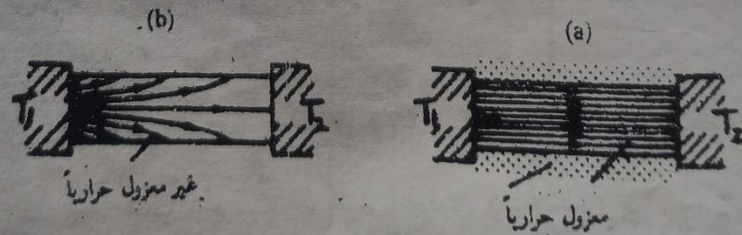
ان انتقال الحرارة في الاجسام الصلبة يتم بواسطة التصادمات الجزيئية ، وتسمى هذه الطريقة لانتقال الحرارة في الاجسام الصلبة بالتوصيل . وتكون المعادن جيدة التوصيل الحراري ، وبصورة عامة تكون الموصلات الجيدة التوصيلية الكهربائية موصلات حرارية جيدة لان الالكترونات التكافؤ تتحرك بحرية تامة تقريباً خلال المعدن حاملة معها الحرارة الى اجزاء المعدن المختلفة .

وضع كيميائي كدرج الحرارة على طول
1-10-2 الميل الحراري $\text{Temperature gradient}$ وظيفته معدني

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 بمجهزين (خزانين) درجتا حرارتهما T_1 و T_2 (افرض ان $T_2 < T_1$) كما هو موضح في الشكل (1.5) ، وكما هو معلوم بأن الحرارة تنساب من الطرف الساخن الى الطرف البارد ، الا ان شكل خطوط انتقال الحرارة خلال المادة يعتمد اساساً على طريقة العزل الحراري للمادة .
فعندما يغلف القضيب بمادة عازلة للحرارة ، نرى ان خطوط انتقال الحرارة تكون بصورة مستقيمة ومنظمة وكما هو مبين في الشكل (1.6a) . أما في حالة عدم عزل القضيب حرارياً فان خطوط انتقال الحرارة تسلك مسارات غير منتظمة وكما هو مبين في الشكل (1.6b) .



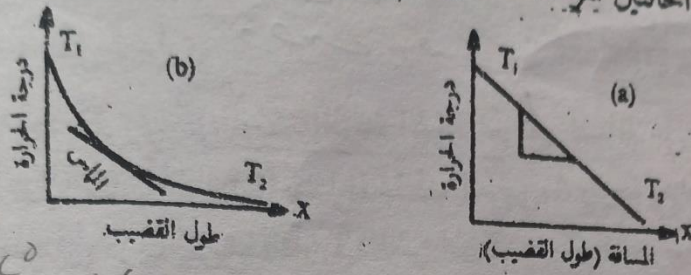
الشكل (1.5) : توضيح الميل الحراري



الشكل (1.6) : خطوط انتقال الحرارة في المادة الصلبة

$$\text{الميل الحراري} = \frac{-\Delta T}{\Delta x}$$

ففي الحالتين كليهما، وبعد مرور فترة زمنية كافية تستقر درجة حرارة الاجزاء المختلفة من المعدن عند قيم ثابتة لا تتغير، وهذه الحالة تسمى الحالة الثابتة (أو المستقرة) steady state. يبين الشكل (1.7) العلاقة بين درجات الحرارة المقاسة عند مسافات مختلفة على القضيب في الحالتين سوية كان معزولاً أم غير معزول.



الشكل (1.7) : العلاقة بين درجة الحرارة والمسافة

ان ميل الخط المستقيم في شكل (1.7a) وميل المماس في شكل (1.7b) يمثلان تدرج درجة الحرارة Temperature gradient الذي عرفناه سابقاً على انه تغير درجة الحرارة مع المسافة على طول المادة عند اية نقطة من نقاطها وعند اية لحظة زمنية، ويرمز لها عادة بـ $\frac{dT}{dx}$ ووحدته درجة حرارة لكل سم او متر $^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ أو $^{\circ}\text{C}/\text{m}$.

تنتقل الحرارة دائماً من الجزء الساخن الى الجزء الاقل سخونة (البارد)، ويعرف التيار الحراري Heat Current على انه كمية الحرارة (dQ) المنتقلة او العابرة لمقطع في المادة خلال فترة زمنية dt، اي ان

$$H = \frac{dQ}{dt}$$

(1.20)

ووحدته هي جول او سرعة لكل ثانية J/sec او cal/sec .

1-10-3 معامل التوصيل الحراري (K_L) Thermal Conductivity Coefficient

لقد وجد عملياً (تقريباً) أن التيار الحراري $\left(\frac{dQ}{dt}\right)$ يتناسب طردياً مع مساحة المقطع العرضي وتدرج درجة الحرارة $\left(\frac{dT}{dx}\right)$ ، اي ان

$$\frac{dQ}{dt} \propto A \frac{dT}{dx}$$

أو

(1.21)

$$\frac{dQ}{dt} = -K_L A \frac{dT}{dx}$$

اذ ان (K_L) تمثل ثابت التناسب وتسمى بمعامل التوصيل الحراري او الموصلية الحرارية Thermal Conductivity. تعني الاشارة السالبة ان انسياب الحرارة يكون باتجاه درجة الحرارة الاقل ، اي انه كلما زادت المسافة (x) من المصدر الحراري قلت معها درجة الحرارة (T) وهذا يجعل الكمية $(\frac{dT}{dx})$ سالبة الاشارة. ان اضافة الاشارة السالبة في المعادلة في اعلاه يفيد في جعل الكيتين $(\frac{dQ}{dt})$ و K_L كميتين موجبتين. وتعرف (K_L) الموصلية الحرارية على انها المعدل الزمني لانسياب الحرارة خلال المادة لوحدة المساحة لكل وحدة تدرج حراري. ومن الصيغ الاخرى للمعادلة (1.21) الصيغة الاتية :

$$Q = K_L \frac{(T_1 - T_2)}{L} A t \quad (1.22)$$

ويسمى هذا القانون احيانا بقانون فوريير (Fouriers Law)

ان وحدة K_L هي الجول لكل ثانية ولكل متر ولكل درجة كلفنية اي $J/sec.m.K$ أو الواط لكل متر لكل درجة كلفنية $W/m.K$.

ان الجدول (1.4) يحتوي على قيم الموصلية الحرارية لبعض المواد

جدول (1.4) : قيم الموصلية الحرارية لبعض المواد

$K_L (cal/cm.sec.^{\circ}C)$	المادة	$K (cal/cm.sec.^{\circ}C)$	المادة
0.0005	المطاط	1.006	الفضة
0.0005	ورق امبيستوس	0.918	النحاس
0.004	الجليد	0.50	الالنيوم
0.0001	الفلين	0.25	البرونز (النحاس الاصفر)
0.00006	الهواء	0.0025	الزجاج
0.00004	الازكون	0.12	الفولاذ (الكهر)
0.000034	الصليوم	0.0013	الماء

Convection method

4-10-1 طريقة الحمل

يعرف (الحمل) على أنه 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 جزيئي إلى آخر بالتصادم. ومن الأمثلة على انتقال الحرارة بطريقة الحمل تدفئة الغرف في الشتاء بواسطة المدفئات أو جهاز تسخين الماء، إذ تتمسك جزيئات الهواء أو السائل كمية من الحرارة من الجزء الساخن فيتمدد الهواء أو السائل أي تقل كثافته فينتقل إلى الجهة الأخرى (إلى الأعلى) فتخرج 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 الحرارية العالية إلى المنطقة ذات الدرجة الحرارية الواطئة (الأقل) يولد تياراً يسمى تيار الحمل الحراري (Convection Current) الذي يعرف على أنه 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:

١ - تيار الحمل الطبيعي Natural Convection Current إذا كان ناتجاً عن تغير كثافة الوسط.

٢ - تيار الحمل الاصطناعي 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.

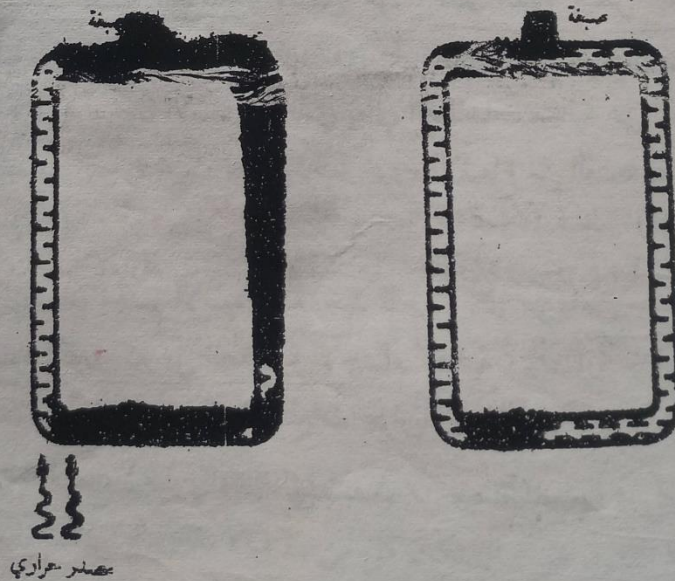
إن دراسة الحمل بطريقة المعادلات الرياضية ليس شيئاً سهلاً وذلك يرجع إلى أن فقدان واكتساب الحرارة من الأجسام الملامسة للمائع (غاز أو سائل) عملية معقدة رياضياً وتعتمد على كثير من العوامل مثل شكل السطح وكثافة المائع ولزوجته وعلى عوامل أخرى. ويتم أحياناً تعريف معامل الحمل الحراري Convection Coefficient (h) حسب المعادلة الآتية:

$$h = \frac{H_c}{A \Delta T}$$

..... (1.23)

إذا تمثل H_c تيار الحمل الحراري و A المساحة و ΔT الفرق بين درجة حرارة السطح والمائع. ان المعادلة في اعلاه تدل على ان (h) تعتمد على الفرق بين درجات الحرارة، وعليه يجب تعيين قيمتها لكل حالة من الحالات.

يمكن اجراء تجربة بسيطة توضح ظاهرة الحمل، فلو أخذ الانبويان الموضحان في الشكل (1.8) وملأناهما بالماء ووضعت قليل من الصبغة قرب نهايتهما عند الفتحين. عند تسخين احد الانبويتين بالطريقة المبينة في الشكل (1.8) نجد ان السائل سيبدأ بالانسياب والدوران داخل الانبوبة، حاملاً معه الصبغة، وبعد فترة من الزمن نجد ان الصبغة قد انتشرت في جميع انحاء السائل، مما يدل على انتقال جزيئات السائل خلال الانبوبة ودورانها خلالها. ان سبب هذه الحركة يعود الى تمدد السائل (تقل كثافته) عند التسخين فيصبح اخف من باقي السائل، ولهذا فانه يحدث اختلال توازن الضغط بين العمودين الايسر والايمن، فيرتفع السائل في الطرف الساخن وينخفض السائل في الطرف الاقل حرارة مؤدياً الى انسياب السائل ودورانه وبذلك تنتقل الحرارة خلال حركة السائل الى الاماكن البعيدة من المصدر الحراري، والشئ نفسه يحدث في انتقال الحرارة خلال الغاز او الهواء. واعتماداً على طريقة انتقال الحرارة بالحمل تُصمم الاجهزة في أنظمة التدفئة بحيث تسمح بالهواء البارد او السائل البارد بالعودة الى المصدر الحراري لاكمال الدورة.



الشكل (1.8): يوضح ظاهرة الحمل في السوائل

يتم انتقال الحرارة خلال الفضاء بطريقة الاشعاع. ويقصد بالاشعاع ايضاً الانبعاث المتواصل للطاقة من سطوح الاجسام المختلفة الى الاجسام الاخرى الاقل درجة حرارة ويجب ملاحظة ان الاشعاع الحراري ماهو الا طاقة كهرومغناطيسية تنبعث من الاجسام الساخنة وتنتقل بسرعة الضوء خلال الفضاء. فيعكس جزء من هذه الطاقة ويمتص الجزء الآخر من قبل الاجسام التي تسقط عليها. ان امتصاص الاشعة الكهرومغناطيسية يؤدي الى تحويلها الى طاقة حرارية وارتفاع حرارة الجسم. ان الحرارة التي تصل الى الارض والكواكب الاخرى من الشمس بوساطة الاشعاع الذي ينتقل خلال الفراغ الشاسع ودونما الحاجة الى وسط مادي لتصل الى الارض. لو فرضنا ان جزء الطاقة التي تمتص من قبل الجسم تساوي (a) والجزء الذي ينعكس يساوي (r) فان

$$a + r = 1 \quad \dots (1.24)$$

وفي حالة التوازن الحراري التي تبقى درجة حرارة الجسم عندها ثابتة ، فان الجسم يبعث كمية من الطاقة الحرارية مساوية الى الكمية التي يمتصها ، اي ان قابليته الاشعاعية (emissivity) (e) تساوي قابليته الامتصاصية (a) في حالة التوازن الحراري يكون :

$$a = e \quad \dots (1.25)$$

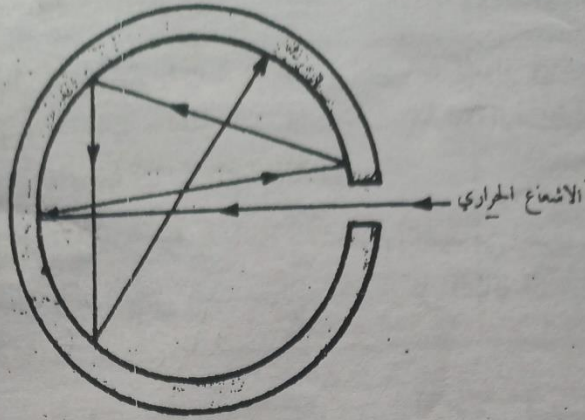
وتعتمد كل من (القابلية الاشعاعية والقابلية الامتصاصية) على طبيعة الجسم وعلى طول الموجة الكهرومغناطيسية الساقطة. ويطلق على الجسم الذي يمتص جميع الاشعاع الساقط عليه بالجسم الاسود (Black Body). ويمثل هذا الجسم بفتحة مغزولة حرارياً ذات فتحة صغيرة لدخول الاشعاع الذي يعاين انعكاسات متتالية عن السطح الداخلي للفتحة ، وتصمم الفتحة بحيث تصبح فرصة خروج الاشعاع من الفتحة ضئيلة جداً ، كما في الشكل (1.9).

ومن المؤكد ان الجسم الاسود مشبع جيد للحرارة مثلاً هو ماص جيد لها. واشعاعية الجسم الاسود تكون اكبر من انعكاسية الاجسام العادية ، وبصورة عامة تكون الاجسام ذات الامتصاصية الحرارية الجيدة مشعات حرارية جيدة.

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

$$\dots (1.26)$$

$$R = \sigma T^4$$



الشكل (1.9) : يوضح الجسم الاسود

اذ تمثل T درجة حرارة الجسم المشع بالدرجات الكلفينية و σ تمثل كمية ثابتة، قيمتها تساوي

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

أو

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

ويطلق على العلاقة (1.26) بقانون ستيفان-بولتزمان Stefan - Boltzmann Law.

يمكن اعادة كتابة قانون ستيفان-بولتزمان للجسم غير الاسود بالصيغة الآتية :

$$R = e\sigma T^4 \dots\dots\dots (1.27)$$

بـاذ تمثل (e) القابلية الاشعاعية للجسم المذكور.

اما كمية الحرارة المنبعثة (ΔQ) من الجسم الساخن الى الاجسام الاخرى الاقل درجة حرارة، فانه يمكن كتابتها كما في الصيغة الآتية :

$$\Delta Q = \sigma A (T_1^4 - T_0^4) t \dots\dots\dots (1.28)$$

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

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 100K).

يمكن الحصول على درجات حرارة 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 التلاجات ومكيفات الهواء هي استخدام الضغط في درجة الحرارة الاعتيادية فقط، حيث تكبس غازات مثل الامونيا والفرين بمكبس، فيؤدي ذلك الى رفع درجة حرارتها (أي تسخن فوق درجة حرارة المحيط) ثم يتم تبريدها الى درجة حرارة المحيط، وبما ان هذا الغاز واقع تحت ضغط فيؤدي الى تحويله الى سائل. ثم يُسمح لهذا السائل ان يتمدد ويتبخر فتتخفض درجة حرارته مما يؤدي الى سحب حرارة من المنطقة المحيطة به مؤدياً الى خفض درجة حرارتها، ومن ثم يعاد الغاز الى المكبس ثانية لاكمال الدورة. وهذه الطريقة يقوم الغاز بنقل الحرارة من الجزء المراد خفض درجة حرارته الى المحيط الخارجي.

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

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

يجب تبريد الغاز المراد تحويله الى سائل الى درجة حرارة اقل من الدرجة الحرارية الحرجة له. وتعرف (الدرجة الحرارية الحرجة للغاز) بأنها الدرجة الحرارية التي لا يمكن تسليط للغاز فوقها مهما بلغ الضغط المسلط عليه. كما ويعرف (الضغط الحرج) على انه اقل قيمة للضغط اللازم تسليطه على الغاز المراد تسليطه عند درجة حرارته الحرجة. وكلما انخفضت درجة حرارة الغاز المراد تسليطه الى ما دون درجة حرارته الحرجة سهل تسليطه وقلت قيمة الضغط الذي يجب تسليطه لاجل تحويل الغاز الى سائل. الجدول (1.5) يوضح قيم درجة الحرارة الحرجة والضغط الحرج لعدد من الغازات.

يُشار إليها على ٥١ فر

الجدول (1.5): درجات الحرارة الحرجة والضغط الحرج لعدد من الغازات

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

وباستخدام هذه الطريقة (التبريد وتسييل الضغط) جرى تسييل غازات الأكسجين والنيتروجين والهيدروجين والهيليوم. يملك غاز الهيليوم أقل درجة تسييل من بين جميع الغازات. ان درجة حرارة غليان سائل الهيليوم تحت الضغط الجوي الاعتيادي تساوي 4.2 K درجة كلفينية. الجدول (1.6) يبين درجة حرارة غليان بعض سوائل الغازات بالدرجات السيليزية والكلفينية، وكما يبين أيضاً درجة حرارة انجماد سوائل الغازات المذكورة.

الجدول (1.6): 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 (77 K)	-210
الهيدروجين	-253 (20.4 K)	-259
الأكسجين	-183 (90 K)	-218

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

ان استخدام سوائل الغازات تحت الضغط الجوي الاعتيادي يضمن تبريد
درجة حرارة غليان السائل المستخدم. ومن الطرق المستخدمة في الحصول على درجاة
حرارية اقل من درجة حرارة غليان سوائل الغازات هي:

1- طريقة جعل سوائل الغاز يغلي من دون تزويده بالطاقة الحرارية

تم هذه الطريقة وذلك بخفض الضغط المسلط على السائل مما يؤدي الى خفض
درجة حرارة غليانه ، ويبدأ بالغليان فيعمل على سحب الحرارة من السائل نفسه فتتخفف
درجة حرارته. وبذلك نحصل على درجة حرارة اقل من درجة حرارة غليان السائل تحت
الضغط الجوي الاعتيادي. ان قيمة درجة الحرارة المنخفضة التي يمكن الحصول عليها
بهذه الطريقة تحددها عدة عوامل منها: قيمة الضغط المنخفض الذي يمكن الوصول اليه
بهذه الطريقة وكذلك نوع سائل الغاز الذي يتم تبريده بهذه الطريقة ، وامكانية تحويله من
الحالة السائلة الى الحالة الصلبة.

وهذا يعني ان هناك حدوداً ودرجات حرارية لا يمكن تجاوزها باستخدام هذه الطريقة.
فعلى سبيل المثال ، امكن الحصول على المذبات الحرارية الاتية:

من	0.3 K	الى	3.2 K	لسائل الهيليوم نوع He^3
من	0.9 K	الى	4.2 K	لسائل الهيليوم نوع He^4
من	14 K	الى	20.4 K	لسائل الهيدروجين (H_2)
من	63 K	الى	77 K	لسائل النيتروجين (N_2)

وهذا يعني انه باستخدام سوائل غاز معين لا يمكن الحصول على جميع درجات الحرارة
المنخفضة. اذ سرعان ما يتجمد سائل الغاز وتتوقف (تقريباً) عملية التبريد.

2- طريقة الحصول على درجات حرارية من 1 K الى 1 mK

يتم استخدام طريقة تبريد مختلفة تماماً عن الطريقة الاولى ، والتي تسمى بالطريقة
المناطيسية في التبريد ومن الجدير بالذكر ان هذه الطريقة تكمل الطريقة الاولى ، اذ يتم
تبريد سوائل الهيليوم من 4.2 K الى 1 K عن طريق خفض الضغط المسلط عليه ، ومن هنا
تبدأ الطريقة الثانية في الحصول على الدرجات الحرارية الاقل من 1 K. ان تفاصيل
الطريقة الثانية تقع خارج مضامين هذا الكتاب.

إن أكثر الغازات استخداماً في الحصول على درجات الحرارة الواطئة هي غازي أستروجين (77 K) والهيليوم (4.2 K) : لأن استخدام كل من الهيدروجين والأكسجين ينطوي على مخاطر إضافية عديدة. ومن أهم مزايا سائل الهيليوم عن بقية سوائل الغازات لا تترك بقاؤه سائلاً تحت ضغط بخاره المشبع حتى لو انخفضت درجة حرارته إلى الصفر المطلق انظر الجدول (1.6). وإن أقل درجة حرارة يمكن الحصول عليها من خلال خفض الضغط المسلط عليه تحددها سرعة سحب الغاز من فوق السائل وليس نقطة انجماد سائله، على خلاف سوائل بقية الغازات.

12-1 أمثلة محلولة

✓ مثال 1

حول الدرجات الحرارية الآتية إلى ما يقابلها :

1- 70°C إلى قيمتها الفهرنهايتية والكلفنية.

2- 150 K إلى قيمتها السيليزية والفهرنهايتية.

الحل

أولاً : باستخدام المعادلة الآتية :

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

نحصل على

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

وباستخدام المعادلة الآتية :

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

نحصل على

$$\begin{aligned} &= 70 + 273 \\ &= 343\text{ K} \end{aligned}$$

ثانياً : باستخدام المعادلة الآتية

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

نحصل على

$$= 150 - 273$$

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

وباستخدام المعادلة الآتية :

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

نحصل على :

$$= \frac{9}{5} (150 - 273) + 32$$

$$= \frac{9}{5} \times (-123) + 32$$

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

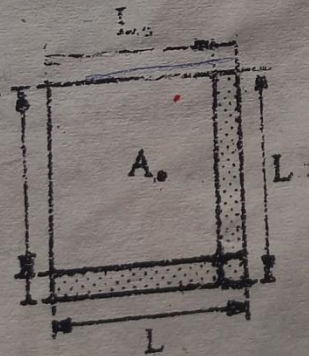
مثال ٢ ✓

برهن على أن معامل التمدد السطحي (B) يساوي تقريباً ضعف معامل التمدد الطولي

$$B = 2\alpha \quad (a)$$

الحل : نأخذ قطعة مربعة سريعة الشكل طول ضلعها (L_0) ، كما هو موضح في الشكل

(1.10)



الشكل (1.10) : ظاهرة التمدد السطحي

مساحة المربع A_0 تساوي L_0^2

$$(A_0) = L_0^2$$

ان ارتفاع في درجة حرارة القطعة المعدنية مقداره ΔT يؤدي الى تغير الطول من L_0 الى L ان قيمة L تعطى بالمعادلة الآتية :

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

فاذا كانت المادة متجانسة فان المساحة سوف تتغير من A_0 الى A عندما تتغير درجة حرارة المادة بمقدار ΔT اي ان المساحة الجديدة تكون مساوية الى :

$$\begin{aligned} A &= L^2 \\ &= L_0^2 (1 + \alpha \Delta T)^2 \end{aligned}$$

يمكن تبسيط المعادلة اعلاه الى الصيغة الآتية :

$$A = L_0^2 [1 + 2\alpha \Delta T + \alpha^2 (\Delta T)^2]$$

عند مقارنة قيم الحدين الثاني والثالث نجد ان قيمة الحد الثالث $[\alpha^2 (\Delta T)^2]$ تكون صغيرة جداً عند مقارنتها بقيمة الحد $(2\alpha \Delta T)$ وهكذا يمكن اعادة كتابة المعادلة اعلاه كما يأتي :

وعليه يمكن اهمال هذا الحد

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

وعند مقارنة هذه المعادلة بالمعادلة (1.12) نجد ان $(\beta \equiv 2\alpha)$

وبالطريقة نفسها يمكن ان نبرهن على ان معامل التمدد الحجمي (γ) يساوي تقريباً ثلاثة أمثاله معامل التمدد الطولي (α) ، اي $(\gamma \equiv 3\alpha)$

✓ مثال 3

يمكن التعبير عن العلاقة بين الدرجة السيلزية 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 أن

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

حيث أن a و b كميتان ثابتتان يراد تحديد قيمهما.
نعوض عن درجة انجماد وغليان الماء في المعادلة في أعلاه فنحصل على:

$$0 = 32a + b \dots (1)$$

درجة انجماد الماء

$$100 = 212a + b \dots (2)$$

درجة غليان الماء

ونطرح المعادلة (1) من (2) نحصل على

$$100 = 180a$$

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

وبالتعويض عن قيمة a في المعادلة (1) نحصل على قيمة $b = -\frac{5}{9}$ (32)
وبالتعويض عن قيم كل من a و b في المعادلة العامة نحصل على

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

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

✓ مثال 4

جد قيمة درجة الحرارة التي تساوي عندها الدرجة السليزية مع الدرجة الفهرنهايتية.

الحل

باستخدام المعادلة الآتية :

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

وبما أن $F = C$ فإن :

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

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

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

وعليه فإن ديجي حرارة (-40°C) و -40°F متكافئتان.

21. $\alpha = 1.7 \times 10^{-4}$

✓ مثال 5

جد مقدار التغير في طول قضيب من النحاس طوله (2) متر إذا تغيرت درجة حرارته

من 20°C إلى 30°C $\alpha = 1.7 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$

الحل

$$K = 273 + 30$$

$$K = 273 + 20$$

$$L_0 = 2\text{m}$$

$$\Delta T = 30 - 20 = 10^{\circ}\text{C} = 10\text{K}$$

$$\alpha = 1.7 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$$

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

$$= (2\text{m}) (1.7 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}) (10\text{K})$$

$$= 34 \times 10^{-4} \text{ m}$$

$$= 3.4 \text{ mm}$$

بما أن

نصف

✓ مثال 6

جد مقدار التمدد الطولي لسطح من الخرسانة طوله (20) متر عندما تغيرت درجة

حرارة الجو من صفر فهرنهايت إلى 113°F $\alpha = 12 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

الخرسانة

$$\Delta T = 113^{\circ}\text{F} - 0^{\circ}\text{F} = 113^{\circ}\text{F}$$

يجب تحويل الدرجات الفهرنهايتية إلى درجات سيليزية ، واستخدام المعادلة الآتية :

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

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

وكذلك

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

$$= -17.8^{\circ}\text{C} = T_1$$

$$\therefore \Delta T = T_2 - T_1 = 45 - (-17.8) = 62.8^{\circ}\text{C}'$$

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

من الجدول (1.2) نجد ان قيمة (α) للخرسانة تساوي $12 \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$ وعليه فان :

$$\Delta L = 12 \times 10^{-6} \text{C}^{-1} \times 20\text{m} \times 62.8^{\circ}\text{C}$$

$$= 1.507 \times 10^{-2}\text{m}$$

$$\Delta L = 1.507 \text{ cm}$$

مثال 7 :

جد كمية الماء التي ستسكب من وعاء زجاجي سعته 250 cm^3 مملوء تماماً بالماء اذا تغيرت درجة حرارته من (25°C) الى (65°C) .

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

$$\Delta T = 65^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C} \text{ التغير في درجة الحرارة}$$

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

اما التغير في حجم الوعاء الزجاجي فانه يساوي :

$$\Delta V_g = \gamma_g V_0 \Delta T$$

$$= 9 \times 10^{-6} \times 250 \times 40 = 0.09 \text{ cm}^3$$

التغير في حجم الماء ΔV_w سيكون مساوياً الى :

$$\Delta V_w = \gamma_w V_0 \Delta T = 21 \times 10^{-6} \times 250 \times 40 = 2.1 \text{ cm}^3$$

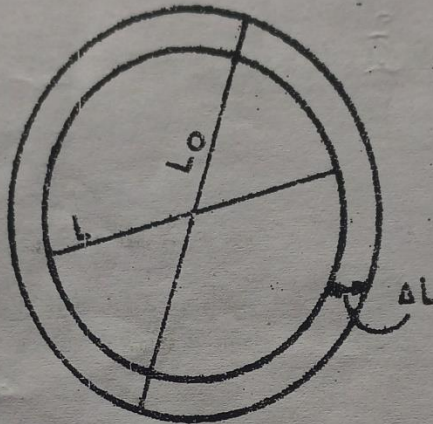
وعليه فان حجم الماء المسكوب سيكون مساوياً الى :

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

مثال 8

سدادة معدنية قطرها 5.00 cm عند درجة حرارة 40°C ، جد قيمة الدرجة الحرارية التي عندها سيتم سد فتحة ذات قطر ثابت قيمته 4.09 cm ؟ علماً بان معامل التمدد الطولي للمعدن يساوي $11 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. انظر الشكل (1.11).

4.999 cm



الشكل (1.11): فتحة ذات قطر ثابت

الحل: L يمثل هنا القطر ويساوي 5 cm

L0 يمثل القطر عند الدرجة الحرارية الجديدة ويساوي 4.09 cm

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

$$(5.00 - 4.09) \text{ cm} = 11 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1} \times 5.00 \text{ cm} \times \Delta T$$

$$+ 0.01 \text{ cm} = 55 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1} \text{ cm} \Delta T$$

$$\Delta T = \frac{0.01 \text{ cm}}{55 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1} \text{ cm}} = -18.2^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = T_1 - T_0$$

$$T_0 = T_1 - \Delta T = 40 - 18.2 = 21.8^\circ\text{C}$$

✓ مثال 9 قضيب معدني طوله ($L = 1.5 \text{ m}$) ومساحة مقطعه العرضي ($A = 2.0 \text{ cm}^2$)
 وضع احد طرفيه في ماء مغلي ووضع الطرف الآخر في خليط الثلج والماء. جد كمية الحرارة
 المتقلة خلال القضيب، خلال زمن مقداره (10 min) عشرة دقائق؟ عندما بان التوصيلية
 الحرارية للمعدن تساوي $0.2 \text{ cal/cm, sec, } ^\circ\text{C}$

الحل: بالتعويض في المعادلة الآتية

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

$$Q = 0.20 \frac{(100 - 0) 20 \times 10 \times 60}{150}$$

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

مثال 10

جد مقدار الميل الحراري والتيار الحراري خلال القضيب المعدني في المثال

السابق؟

الحل: يمكن إيجاد الانحدار الحراري من المعادلة الآتية:

$$\frac{dT}{dx} = - \frac{T_2 - T_1}{L} = - \frac{100}{150}$$

$$\frac{dT}{dx} = - 0.667 \text{ } ^\circ\text{C/cm}$$

الاشارة السالبة تعني ان درجة الحرارة تقل كلما ازدادت المسافة.
 كما ويمكن إيجاد التيار الحراري خلال القضيب في الحالة الثانية

$$H = \frac{dQ}{dt} = - K_L \frac{(T_2 - T_1) A}{L}$$

$$= 0.2 \times \frac{100 \times 2}{150} = 0.27 \text{ cal/sec}$$

مثال 11 قضيب من انحاس طول (25 cm) ومساحة مقطعه العرضي 5 cm² وضع احد طرفيه في حجرة بخار الماء ووضع الطرف الآخر في خليط الثلج والماء. فاذا كان القضيب مغلقا بعازل جيد بحيث يمكن اهمال الحرارة المتسربة. جد كتلة الثلج التي ستصهر في زمن مقداره 10 دقائق.

الحل : كمية التيار الحراري خلال القضيب المعدني تعطى بالمعادلة الآتية

$$H = -\frac{KLA}{L} \frac{T_2 - T_1}{L}$$

: معامل التوصيل الحراري للنحاس يساوي

$$K = 365 \text{ w/m.k}$$

$$A = 5 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$T_2 - T_1 = 100^\circ\text{C}$$

$$L = 0.25 \text{ m}$$

$$\therefore H = 365 \times 5 \times 10^{-4} \times \frac{100}{0.25}$$

$$= 73 \text{ Watt}$$

وتساوي كمية الحرارة المنتقلة خلال الثانية الواحدة

كمية الحرارة المنتقلة خلال عشرة دقائق تساوي

$$= 73 \times 600$$

$$= 4.38 \times 10^4 \text{ J}$$

كمية الحرارة اللازمة لتحويل غرام واحد من الثلج في 0°C الى ماء في 0°C يحتاج الى

335 جول تقريبا.

: كتلة الثلج (m) التي ستصهر خلال مدة 10 دقائق تساوي :

$$m = \frac{4.38 \times 10^4 \text{ J}}{335 \text{ J/g}}$$

$$\approx 131 \text{ g}$$

✓ مثال 12 جد مقدار التغير في طول قطعة نحاس على شكل قضيب طوله 2.5 متر اذا ارتفعت درجة حرارتها من 15°C الى 25°C . اذا علمت ان معامل التمدد الطولي لمادة النحاس تساوي $\alpha = 1.7 \times 10^{-5} \text{K}^{-1}$

الحل .
معامل التمدد الطولي للنحاس α يعرف على انه

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

$$\Delta L = L - L_0$$

ومنا

$$\Delta T = 25 - 15 = 10 \text{ K}$$

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

$$L = L_0 + \Delta L$$

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_0 (T_2 - T_1)}$$

$$\Delta L = L - L_0 = \alpha L_0 (T_2 - T_1)$$

$$= (1.7 \times 10^{-5} \text{K}^{-1}) (2.5 \text{ m}) (10 \text{ K})$$

$$= 4.25 \times 10^{-4} \text{ m}$$

$$= 0.425 \text{ mm}$$

مقدار الزيادة في الطول

جسم كروي ممتلئ أسود نصف قطره 5cm ودرجة حرارته 100°C وضع في صندوق مفرغ من الهواء درجة حرارة جدرانه 75°C . جـ. المعدل الذي يجب ان تزود به الطاقة للجسم الكروي بحيث يبقى محافظاً على درجة حرارته.

الحل

كمية الطاقة الحرارية التي يشعها الجسم الكروي خلال الثانية الواحدة تساوي W_1 ،

إذا ان

$$W_1 = AR_1$$

$$= A \sigma T_1^4$$

إذا ان A تمثل مساحة الكرة والمساوية الى $4\pi r^2$

$$A = 4\pi 5^2 = 100\pi \text{ cm}^2$$

$$T_1 = 100 + 273 = 373 \text{ K}$$

$$T_2 = 75 + 273 = 348 \text{ K}$$

$$\therefore W_1 = 100\pi \sigma (373)^4 \text{ watt} \rightarrow 5/\text{sec}$$

أما كمية الطاقة التي تمتصها الجسم الكروي والمشعة من قبل الصندوق خلال الثانية الواحدة تساوي W_2 ، إذا ان

$$W_2 = AR_2 = A \sigma T_2^4$$

$$= 100\pi \sigma (348)^4 \text{ watt}$$

ان معدل الطاقة الحرارية التي يزود بها الجسم الكروي تكون مساوية الى الفرق بين

$$W_1 - W_2 = 100\pi \sigma (373^4 - 348^4)$$

W_1 و W_2 أي ان

$$= 100 \times 3.14 \times 5.57 \times 10^{-8} \times (4.6906 \times 10^9) \\ = 8.204 \times 10^4 \text{ J/sec.}$$

13 - مسائل الفصل الاول

- 1 - افسر ما يأتي :
 - 1 - نترك فواصل في الطرقات الكونكريتية ونخلوط السكك الحديدية.
 - 2 - احتواء انابيب النفط على امتدادات جانبية بشكل حرف U.
 - 3 - تكسر لوحة الزجاج اذا تم تسخينها عند نقطة واحدة.
 - 4 - وضع قنية الزجاج المحيطة الغلق في الماء الساخن لتسهيل عملية فتحها.
 - 5 - اسكاب السائل من الاناء المملوء تماماً عند تسخينه.

(2) تم تغليف خزان للماء الساخن بمادة عازلة سمكها 2.5 cm وتوصلتها الحرارة $5 \times 10^{-4} \text{ cal/cm. sec. } ^\circ\text{C}$. فاذا كانت درجتا حرارة سطحي المادة العازلة مساويتين الى 20°C و 60°C . جد كمية الحرارة التي يفقدها الخزان لكل متر مربع خلال الساعة الواحدة.

(3) يبلغ سمك انبوب معدني لمرور البخار 0.9 cm ومساحة مكشوفة مقدارها $3 \times 10^4 \text{ cm}^2$. فاذا كانت درجتا حرارة السطح الداخلي والسطح الخارجي للانبوب مساويتين الى 100°C و 30°C على التوالي. جد كمية الحرارة التي يفقدها الانبوب خلال الدقيقة الواحدة.

(4) قضيب من الحديد طوله 75 cm مغلف بمادة عازلة ويوصل الحرارة بمعدل 75 J/sec من خزان حراري درجة حرارته 350°C الى خزان حراري آخر درجة حرارته 100°C . جد قطر القضيب.

(5) شبك زجاجي ابعاده مساوية الى $40 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ عند درجة حرارة 15°C . جد مقدار الزيادة في مساحة الشبك اذا ارتفعت درجة حرارة الشبك الى 35°C .

(6) جد طول الفاصلة التي يجب تركها بين قضبان السلك الحديد التي طولها 12 m وتم تثبيتها عند درجة حرارة 0°C من اجل تفادي اعوجاج السكك الحديد اذا ارتفعت درجة الحرارة خلال فصل الصيف الى 48°C .

(7) ثقب دائري في صفيحة من الالمنيوم قطره 2.54 cm عند درجة حرارة 0°C . جد قطر الثقب اذا ارتفعت درجة حرارة صفيحة الالمنيوم الى 100°C .

(8) قضيب طوله 2.5 m تمدد طولياً بمقدار 1.25 mm عندما تغيرت درجة حرارته من 10°C الى 75°C . جد قيمة معامل التمدد الطولي للمادة المصنوع منها القضيب.

(9) اشرح باختصار كيفية الحصول على درجات الحرارة الواطة.

- (10) — ماهي أهم طريقة لانتقال الحرارة في درجات الحرارة الواطئة .
- (11) — عرف درجة الحرارة الحرجة والضغط الحرج . وبين مدى تأثير كل منها على الآخر .
- (12) — كيف يمكن تبريد السائل الى اقل من درجة غليانه .
- (13) — حرار مقاومة يملك مقاومة مقدارها 89.25 أوم عندما وضع في نهايته في النقطة الثلاثية للماء جد قيمة درجة الحرارة اذا وضعت نهايته في محيط وكانت قيمة مقاومته تساوي 97.56 أوم .
- (14) — عدد أهم الاسس الواجب اتباعها عند بناء مقياس لدرجة الحرارة .
- (15) — ماهي أهم الملاحظات التي يجب اخذها بنظر الاعتبار عند اختيارنا لخاصيتين مختلفتين لبناء محرارين لقياس درجات الحرارة .
- (16) — عدد اعم طرق انتقال الحرارة . ثم قارن بينها .
- (17) — اشرح تجربة توضح فيها طريقة انتقال الحرارة بالحمل .
- (18) — قارن بين مقاييس درجات الحرارة المختلفة من حيث درجات حرارية ثابتة مثل درجة حرارة انجماد الماء ودرجة حرارة غليان الماء .
- (19) — حول الدرجات الحرارية السليزية الآتية الى الدرجات الفهرنهايتية .
0°C, 20°C, 40°C, 75°C, 115°C
- (20) — حول الدرجات الحرارية الفهرنهايتية الآتية الى الدرجات السليزية والكلفنية
-40 F, 0F, 40F, 180F, 200F
- (21) — حول الدرجات الحرارية الكلفنية الآتية الى الدرجات السليزية والفهرنهايتية
10K, 200K, 300K, 273K, 500K
- (22) — اشرح طريقة التدرج حراري عقابية كمرئاة بين الدرجات الحرارية 0°C و 100°C .
- (23) — وضع كيفية تدرج الحرارة على طول قضيب معدني في حالة كونه معزول او غير معزول موضحاً أجابتك بالرسم .
- (24) — قارن بين تمدد الحالات الثلاثة الصلبة والسائلة والغازية .
- (25) — عرف درجة الحرارة - التيار الحراري - قانون هتيفان - معامل التوصيل الحراري - التدرج الحراري .

الفصل الثاني

الحرارة وتغيرات الطور

Heat and Phase Changes

المقدمة

يتناول هذا الفصل دراسة كيفية إيجاد كمية الحرارة التي تفقدها أو تكتسبها المادة خلال عمليات التسخين أو التبريد أو خلال عمليات التحول في حالة المادة أو خلال حالات التغير في الطور. ويضم هذا الفصل دراسة الحرارة النوعية للمواد وطرائق قياسها. كما سيتم التعرف فيه على بعض أساسيات تحولات حالات المادة أو تغيرات الطور التي تحدث للمواد وعلى علاقة هذه التحولات بتغيرات الطاقة الحرة ودرجة الحرارة.

Heat and its Effects

1-2 الحرارة وتأثيراتها

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

1- كمية 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 ومنها:

أولاً: تقوم الطاقة الحرارية المزودة للمادة بزيادة الطاقة الحركية أو الاهتزازية للذرات، أو جزيئات المادة مما يؤدي إلى رفع درجة حرارتها، بينما يحدث العكس عند سحب كمية من الطاقة الحرارية من المادة، حيث تقل الطاقة الاهتزازية أو النذبذبية للذرات أو جزيئاتها مما يؤدي إلى خفض درجة حرارتها. مع ملاحظة أن المادة تبقى محافظة على حالتها سواء أكانت صلبة أم سائلة أم غازية.

ثانياً: إن امتصاص أو تحرير الطاقة الحرارية خلال عمليات الغليان والانصهار والتسامي والتكاثف والانحجام لا يؤدي إلى زيادة أو خفض درجة حرارة المادة، بل إن درجة حرارة المادة تبقى ثابتة طيلة فترة عملية التحول في حالة المادة. إن 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، حيث تقوم المادة بتحرير طاقة حرارية يجب سحبها وتخليص المادة منها، مع بقاء درجة حرارة المادة ثابتة خلال عمليات تكسر أو بناء الأواصر بين الذرات والجزيئات.

Quantity of Heat (Q)

2-2 كمية الحرارة

يمكن تحديد كمية الحرارة (Q) التي نكتسبها أو تفقدها المادة خلال عمليات التسخين أو التبريد أو عمليات التحول في حالة المادة وعمليات التبادل الحراري، باستخدام قانون حفظ الطاقة وذلك باستخدام العلاقة الآتية:

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

وعندك 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

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

$$Q = mC \Delta T \dots (2-1)$$

إذ أن C تمثل الحرارة النوعية للمادة و ΔT مقدار التغير في درجة حرارتها و m تمثل كتلة المادة.

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 التي يجب سحبها من المادة خلال عمليات الانجماد أو التكاثف من دون ان تسبب زيادة أو نقصان في درجة حرارة المادة ، تعطى بالعلاقة الآتية

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

اذ ان L تمثل الحرارة الكامنة للانجماد أو الانصهار أو الغليان 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. ان عملية حساب كمية الحرارة المتحررة أو المكتسبة خلال العمليات المذكورة يقع خارج نطاق اهداف هذا الكتاب .

2-3 المكافئ الميكانيكي للحرارة (J) The Mechanical Equivalent of Heat

عرفنا ان الحرارة تمثل شكلاً من اشكال الطاقة ، عليه يمكن تحويلها الى طاقة ميكانيكية ، وبالعكس ومن تطبيقات تحويل الحرارة الى شغل الماكينة البخارية . ان عملية تحويل الشغل الى حرارة واضحة في آية عملية تتضمن احتكاكاً . وبما ان الحرارة شكل من اشكال الطاقة ، وان وحدة قياسها هي السعرة الحرارية أو الكيلو - سعرة ، عليه يمكن تحويل وحدتها الى وحدة الطاقة الجول . ان عامل التحويل بين الطاقة الحرارية والطاقة الميكانيكية يسمى المكافئ الميكانيكي للحرارة The mechanical equivalent of heat (J). ومن التجارب المشهورة في قياس هذه الكمية تجربة العالم جول الذي أوجد العلاقة بين الشغل (W) والطاقة الحرارية وحسب المعادلة الآتية :

$$W = JQ$$

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

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

$$1 \text{ Kcalori} = 4186 \text{ Joule.}$$

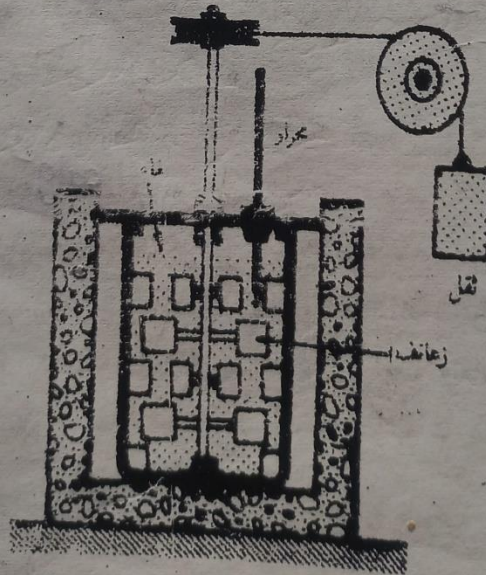
استخدم العالم جول جهازاً مشابهاً للجهاز المبين في الشكل (1-2). وفيه يقوم ثقل معلوم بتدوير زعانف داخل وعاء معزول حرارياً جيداً، (يحتوي الوعاء على كمية من الماء). ان تدوير الزعانف تجابه مقاومة لزوجة السائل، مما ينتج عنه ارتفاع درجة حرارة الماء، التي يمكن قياسها. ثم يحسب الشغل المبذول وذلك من تحديد قيمة الانتقال الساقطة والارتفاع الذي تسقط منه، ان الطاقة الكامنة Potential energy للثقل عند ارتفاع m على ارتفاع h تعطى بالعلاقة الآتية

$$P.E. = mgh \dots\dots\dots (2-3)$$

واذا فرضنا ان جميع هذه الطاقة ستظهر على شكل حرارة، فإنه يمكن ايجاد كمية الحرارة من العلاقة الآتية (2.1)

$$Q = mc \Delta T \dots\dots\dots$$

حيث تمثل ΔT مقدار الارتفاع في درجة حرارة الماء، ان الكمية Q والتي تقاس بالسرعة الحرارية يمكن تحويلها الى وحدات الجول، وذلك بمجرد ضربها بمكافئ جول (J). وحدة مكافئ جول هي الجول لكل سرعة (J/cal).



الشكل (2.1) : توضيح تجربة جول

Specific Heat of Materials (C)

2-4 الحرارة النوعية للمواد

لأجل رفع درجة حرارة مادة ما يجب أن تزداد طاقتها الداخلية ، وبالعكس ، إذا أريد خفض درجة حرارة المادة يجب خفض طاقتها الداخلية . أن عملية رفع أو خفض الطاقة الداخلية لجزيئات المادة يتم بالسماح للطاقة الحرارية بالانتساب إلى أو من المادة على التوالي . تعرف السعة الحرارية النوعية للمادة بأنها كمية الحرارة التي يجب أن تنساب إلى أو من وحدة الكتلة من المادة لتغير درجة حرارتها بمقدار درجة واحدة . وغالباً ما يرمز للسعة الحرارية النوعية (اختصاراً تسمى 'الحرارة النوعية') بـ C . أن التعريف في أعلاه يمكن وضعه بصيغة معادلة رياضية وهي

$$C = \frac{\Delta Q}{m \Delta T}$$

(2.4)

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

أن وحدة قياس الحرارة النوعية هي الجول / كغم . درجة كلفينية $(JKg^{-1}K^{-1})$ ، أو جول / غم . درجة كلفينية $(Jg^{-1}K^{-1})$ أو جول / مول . درجة كلفينية $(Imole^{-1}K^{-1})$ أو السعرة / غم . درجة كلفينية $(calg^{-1}K^{-1})$. تعتمد الحرارة النوعية اعتماداً كبيراً على درجة الحرارة ، وعليه يجب ذكر درجة الحرارة عند إعطاء قيمة الحرارة النوعية لمادة ما . أن الحرارة النوعية للماء عند درجة حرارة الغرفة تساوي تقريباً $(4.2 \times 10^3 JKg^{-1}K^{-1})$ أو 4.2 $calg^{-1}K^{-1}$ ، $10^3 JKg^{-1}K^{-1}$ ، $1 calg^{-1}K^{-1}$.

تتناقص السعة الحرارية والحرارة النوعية لجميع المواد بانخفاض درجة الحرارة وتصل إلى قيمة الصفر عند درجة حرارة الصفر المطلق وتعرف السعة الحرارية على أنها كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة مادة ما درجة حرارية واحدة وتقاس بوحدة الجول / درجة كلفينية ، وترتبط السعة الحرارية للمادة مع الحرارة النوعية لها بالعلاقة الآتية :

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

ومن العلاقات الرياضية المهمة التي غالباً ما تستخدم فيها الحرارة النوعية ، هي المعادلة التي تستخدم لإيجاد قيم كمية الحرارة التي يزود بها جسم ذات كتلة مقدارها (m) وحرارة نوعية (C) لأجل رفع درجة حرارتها من T_1 إلى T_2 وكما يأتي

$$\text{كمية الحرارة} = \text{الكتلة} \times \text{الحرارة النوعية} \times \text{التغير في درجة الحرارة}$$

يكون إلى حد ما صافياً ومرتبطاً بدرجة الحرارة ومن ثم قدرتها على توصيل الحرارة. يُحسب ذرات الحديد متراففة لكل نظام بلوري وعند تسخينه تنتقل بسرعة وبسهولة وتزداد اهتزاز الذرات (2.5).....

$$Q = m C (T_2 - T_1)$$

نستخدم هذه المعادلة أيضاً لإيجاد كمية الحرارة التي يحررها جسم كتلته m وحرارته النوعية C عندما تنخفض درجة حرارته من T_2 إلى T_1 .

The Specific Heat Measurement

2-5 قياس الحرارة النوعية

تستخدم العديد من الطرق في قياس الحرارة النوعية. تختلف هذه الطرق باختلاف مديات درجات الحرارة، إذ نجد أن طرقاً وتقنيات معينة تستخدم في درجة حرارة الغرفة تختلف عن تلك الطرق والتقنيات المستخدمة في مديات درجات الحرارة الواطئة أو العالية جداً. ومن أبسط هذه الطرق ما يأتي:

2-5-1 الطريقة الكهربائية لقياس الحرارة النوعية للمواد الصلبة

تفيد هذه الطريقة للمواد الصلبة الجيدة التوصيل للحرارة كالنحاس والألمنيوم. إذ يؤخذ قطعة منتظمة الشكل تحتوي على ثقب يشب فيه سخان كهربائي (هيمتر) ومحس حراري (تومومتر) تقاس كتلة المادة ودرجة حرارتها الابتدائية، ثم تحاط القطعة المعدنية بمادة عازلة كالصوف الطبيعي أو الاصطناعي أو الهولستيرين ويمرر خلال السخان تيار كهربائي مناسب وتحسب مدة مروره باستخدام ساعة توقيت وتسجل أيضاً قراءات الفولتميتر (V) والأميتر (I) عندما ترتفع درجة الحرارة بمقدار مناسب عشر درجات مثلاً يوقف مرور التيار لحظة التوقيت في الوقت نفسه وتسجل أيضاً قراءة يصلها المحرار. فإذا فرضنا أن الطاقة الحرارية المتسربة إلى المحيط تساوي صفراً، فإن

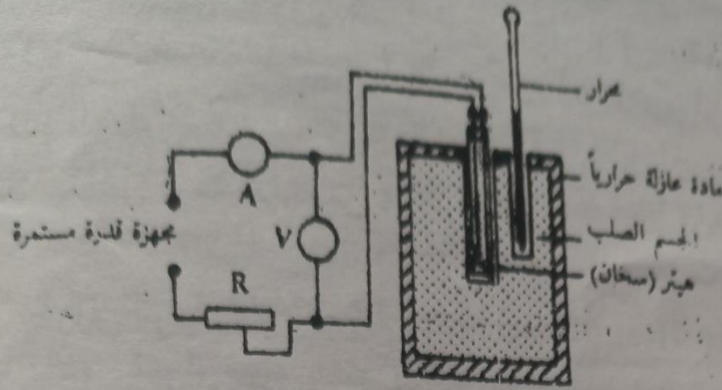
الطاقة الكهربائية التي يزود بها السخان = الطاقة الحرارية التي تزود بها القطعة المعدنية

$$(T_2 - T_1) C m = V I t$$

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

(2.6).....

فإذا كانت قيمة التيار بالأمبير والفولتية بالفولت والوزن بالثانية ودرجات الحرارة بالدرجة الكلفينية والكتلة بالغرام فإن وحدة الحرارة النوعية هي الجول لكل غرام لكل درجة كلفينية. الشكل (2.2) يوضح الطريقة الكهربائية لقياس الحرارة النوعية للمواد الصلبة.



الشكل (2.2) يبين الطريقة الكهربائية لقياس الحرارة النوعية للمواد الصلبة.

2-5-2 الطريقة الكهربائية لقياس الحرارة النوعية للمواد السائلة

إن الطريقة الكهربائية لقياس الحرارة النوعية للمواد السائلة تشبه إلى حد كبير طريقة قياس الحرارة النوعية للمواد الصلبة (الطريقة السابقة) حيث يستخدم وعاء معدني كمسعر حراري يوضع فيه السائل والسخان الكهربائي والمجس الحراري، يحرك فيه السائل باستمرار خلال فترة مرور التيار الكهربائي. إذ يتم إيجاد قيم كتلة السائل (m) وكتلة المسعر والمحرك m_c ودرجة الحرارة الابتدائية T_1 والنهائية T_2 وقيم الفولتية (V) والتيار (I) والزمن (t). وهنا يجب أن تكون قيمة الحرارة النوعية للمسعر والمحرك معلومة، ويمكن استخدام المعادلة الآتية:

الطاقة التي يبردها السخان = الطاقة التي اكتسبها السائل + الطاقة التي اكتسبها المسعر والمحرك

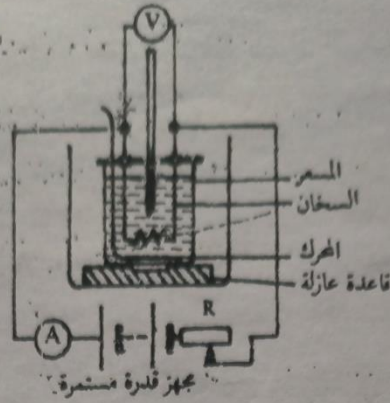
$$IVt = m C (T_2 - T_1) + m_c C_c (T_2 - T_1)$$

$$m C (T_2 - T_1) = IVt - m_c C_c (T_2 - T_1)$$

$$C = \frac{IVt - m_c C_c (T_2 - T_1)}{m (T_2 - T_1)}$$

..... (2.7)

وهي كما موضحة في الشكل (2.3).



الشكل (2:3) يوضح الطريقة الكهربائية لقياس الحرارة النوعية للمواد الصلبة.

3-5-2 طريقة الخلط لإيجاد الحرارة النوعية للمواد الصلبة

في هذه الطريقة يتم إيجاد كتلة الجسم الصلب المراد إيجاد حرارته النوعية، ثم يعلق بـخيط ويوضع في ماء يغلي لمدة معينة (عشر دقائق مثلاً)، اذ تصبح درجة حرارته T_3 مساوية الى (100°C) ، وبعدها ينقل بسرعة الى مسعر حراري ثم مسبقاً إيجاد كتلته (m) يحتوي على كمية من الماء كتلتها (m_w) ودرجة حرارتها T_1 ثم يثبت الماء وتسجل اعلى درجة حرارة يصلها المحرار (T_2) . فاذا فرضنا ان كمية الحرارة التي يفقدها الجسم الصلب خلال نقله الى المسعر تساوي صفراً، فان

$$\begin{aligned} & \text{كمية الحرارة التي يفقدها الجسم} = \text{كمية الحرارة التي اكتسبها} + \text{كمية الحرارة التي اكتسبها} \\ & \text{الصلب خلال انخفاض درجة} = \text{الماء خلال رفع درجة} + \text{المسر الحراري خلال رفع} \\ & \text{حرارته من } T_2 \text{ الى } T_3 = \text{حرارته من } T_1 \text{ الى } T_2 + \text{درجة حرارته من } T_1 \text{ الى } T_2 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} mC(T_3 - T_2) &= m_w C_w (T_2 - T_1) + m_c C_c (T_2 - T_1) \\ &= (m_w C_w + m_c C_c) (T_2 - T_1) \end{aligned}$$

$$C = \frac{(m_w C_w + m_c C_c) (T_2 - T_1)}{m (T_3 - T_2)} \quad (2.8)$$

4-5-2 طريقة الخلط لإيجاد الحرارة النوعية للمواد السائلة

وهي الطريقة السابقة نفسها إذ يتم اختيار الجسم الصلب بحيث تكون قيمة حرارة النوعية معروفة ، وتستخدم المعادلات السابقة نفسها لإيجاد الحرارة النوعية للسائل.

هناك طرق أخرى لقياس الحرارة النوعية للمواد مثل طريقة الجريان المستمر والطريقة الميكانيكية وطريقة التبريد.

الجدول (2.1) يبين قيم الحرارة النوعية لبعض المواد المعروفة في درجة حرارة الغرفة.

الجدول رقم (2-1) يبين قيم الحرارة النوعية لبعض المواد في درجة الحرارة الاعتيادية

الحرارة النوعية cal / g.k	الحرارة النوعية J/kg.K $\times 10^2$	المادة
0.093	3.9	النحاس
0.21	9.1	الالمنيوم
0.1-0.2	6.7	الزجاج (الاعتيادي)
0.11	4.7	الحديد
0.033	1.4	الزئبق
0.031	1.2	الاصااص
1.000	42	الماء
0.50	21	الثلج
0.51	21	البارافين
0.42	17	الخشب
0.030	1.3	الذهب
0.056	2.3	الفضة
0.48	20	البخار
0.092	3.9	الزنك

تعتمد الحرارة النوعية على تركيب المادة فضلاً عن اعتمادها على درجة الحرارة.

The Concept of Phase

6-2 مفهوم الطور

هناك عادة طريقتان لتعريف الطور، إحداهما الطريقة الترموديناميكية التي تعرف الطور على أنه ذلك الجزء أو القسم المتجانس من النظام المعين والمفصول عن بقية الأجزاء بمحدود واضحة بصفاتها الترموديناميكية وتختلف الأطوار عن بعضها باختلاف طريقة تركيب جزيئاتها. يكون الطور منفصلاً عن الأجزاء الأخرى للنظام بواسطة سطوح فاصلة ومحددة. ويعرف النظام المتجانس بأنه النظام الذي تتماثل خواصه في أي جزء منه أو تتغير بصورة مستمرة من دون ظهور انقطاعات أو تغيرات فجائية في النظام. وهناك ثلاثة أطوار مميزة للمادة هي الطور الصلب والسائل والغازي يتميز الطور الصلب البلوري للمادة بالترتيب الطويل المدى Long range order للذرات وجزيئاتها في الأبعاد الثلاثة. إذ يمتد هذا الترتيب إلى مسافات أكبر بآلاف أو مئات المرات من قطر الجزيئة. أما الطور السائل للمادة فإنه يتميز بعدم وجود الترتيب البلوري المميز للطور الصلب البلوري. يمتلك الطور السائل الترتيب قصير المدى Short range order، إذ نجد نوعاً من الترتيب بين الجزيئات المجاورة للجزء المحدود الذي تشغله الجزيئة، وسرعان ما ينعدم هذا الترتيب إذا ابتعدنا عن الجزيئة. تشترك الغازات وخاصة حول الدرجات الحرارية الحرجة لها مع السوائل في خاصية الترتيب القصير المدى للجزيئات. يوجد في المواد الصلبة الطور الزجاجي (الابلوري) الذي يشبه الحالة السائلة من حيث الترتيب القصير المدى لجزيئاته والذي غالباً ما يوصف بالسائل الذي تجمد فجأة. لا يختلف الطوران البلوري والابلوري كثيراً في كيفية حركة جزيئاتهما ودرجة حشو تلك الجزيئات (أي الكثافة).

The Phase Transformation

7-2 تحولات الطور

تنتقل المادة من طور إلى آخر وغالباً ما تتغير حالتها وينطوي هذا التحول على تغيرات في الترتيب المشترك للذرات أو الجزيئات وكذلك في الخواص الترموديناميكية. وهناك نوعان أو صنفان لهذه التحولات:

الصنف الأول (ذو الرتبة الأولى): حيث يكون التحول مصحوباً بامتصاص أو تحرير قدر من الطاقة الحرارية وتغير في الحجم والطاقة الداخلية مع ثبوت الضغط ودرجة الحرارة. ومن أمثلة هذا التحول عمليات الانجذاب والانصهار والتبخير والتسامي.

الصنف الثاني (ذو الرتبة الثانية): ويتضمن التحولات التي يصاحبها تغير طفيف في الحجم والطاقة الداخلية ويكون مصحوباً أيضاً بامتصاص أو تحرير الطاقة الحرارية ومن أمثلة هذه التحولات تحول الحديد من الحالة الفيررومغناطيسية الى الحالة البارامغناطيسية وبالعكس عند درجة حرارة كوري.

ان طاقة جيبس الحرة Gibbs Free Energy (G) للنظام هي التي تعين استقراره النسبي وتحدد الاتجاه الذي يمكن ان يتغير به النظام. وتعرف طاقة جيبس الحرة بالعلاقة الآتية:

$$G = H - TS$$

اذ ان S تمثل الانتروبي Entropy و T درجة الحرارة المطلقة و H الانثالبي Enthalpy ولحدوث أي عملية أو تحول يجب ان يكون هناك تغير في طاقة جيبس.

$$G = G_2 - G_1$$

اذ G_1 تمثل الطاقة المطلقة الابتدائية و G_2 تمثل الطاقة المطلقة النهائية لحالة النظام ان مقياس التغير في طاقة جيبس الحرة يمكن ان يكون اما:

- 1- موجباً: عندما يكون التحول نتيجة لمؤثر آخر.
- 2- صفراً: عندما تكون الحالتان الابتدائية والنهائية للنظام او الطوران في حالة تعادل او اتزان.
- 3- سالباً: عندما يحدث التحول بصورة تلقائية.

يمكن التنبؤ بمقدار التغير في الطاقة الحرة للنظام من تطبيق المعادلة (2.9) وكما يأتي:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

اذ ان ΔS و ΔH و ΔG تمثل التغير في الانتروبي والانثالبي وطاقة جيبس الحرة على الترتيب. والتي تحدث عند الانتقال من الحالة الابتدائية الى الحالة النهائية للنظام او الطور. ان التغير في الانثالبي يصاحبه تغير في الطاقة الداخلية ΔE للنظام وتغير في الحجم ΔV وحسب المعادلة الآتية:

$$\Delta H = \Delta E + P\Delta V$$

إذا ان P تمثل الضغط الذي يبقى ثابتاً. وعند التعريف عن قيمة ΔH في المعادلة (2.11) نحصل على:

$$\Delta G = \Delta E + P \Delta V - T \Delta S \quad \dots\dots\dots (2.13)$$

وفي حالتي التحول بين الطور الصلب - صلب أو التحول في الطور الصلب - سائل، يكون مقدار التغير في الحجم صغيراً بحيث يمكن إهماله واعتبار التحولات واقعة عند حجم ثابت، أي أن $\Delta V = 0$ عندها تأخذ المعادلة (2.13) الصيغة الآتية:

$$\Delta G = \Delta E - T \Delta S \quad \dots\dots\dots (2.14)$$

وعند أخذ تفاضل المعادلة (2.13) نسبة إلى الضغط وثبت درجة الحرارة نحصل على:

$$\left(\frac{\partial \Delta G}{\partial P} \right)_T = \Delta V \quad \dots\dots\dots (2.15)$$

وتفاضل المعادلة (2.13) نسبة إلى درجة الحرارة وثبت الضغط وإعادة ترتيب حدودها نحصل على:

$$\left(\frac{\partial \Delta G}{\partial T} \right)_P = - \Delta S \quad \dots\dots\dots (2.16)$$

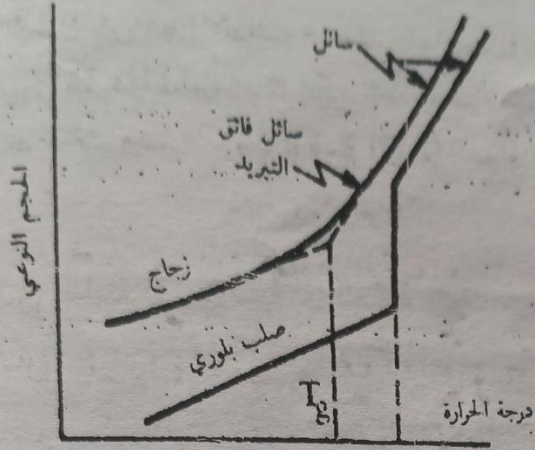
نبين المعادلتان (2.15) و (2.16) أن التفاعل أو التحول الذي يحدث عند حالة ما يمكن أن يحدث عند حالة أخرى وذلك بتغير درجة الحرارة أو الضغط.

Glass Formation

8-2 تكوين الزجاج

عندما يبرد منصهر مادة متحولة كالمبائنك مثلاً، فإن التبلور لا يتم في الحال (بصورة فجائية)، بل يحدث تدريجياً على مدى من الدرجات الحرارية، حيث يظهر منصهر المادة زيادة في لزوجه عند انخفاض درجة حرارته وباستمرار التبريد يتحول منصهر المادة من مادة لزجة سائلة إلى مادة صلبة عند درجة حرارة معينة، كما موضحاً في الشكل (2.4). أن هذه الظاهرة قد لاتصح دائماً لجميع المواد. ففي حالة الزجاج مثلاً نجد أن منحنى التبريد يتبع مساراً آخر يوضحه الشكل (2.4) والذي تستمر فيه المادة المنصهرة بصورة تدريجية من دون تحول فجائي إلى أن يتساوى ميله مع ميل منحنى التبريد للمادة البلورية، حيث يتحول فيه المنصهر إلى مادة زجاجية. يطلق على الدرجة الحرارية التي يحدث عندها تحول

Glass Temperature, T_g المنصهر السائل الى مادة زجاجية بدرجة التحول الزجاجي تتميز المادة الزجاجية الناتجة بحالتها الصلبة تحت درجة حرارة التحول الزجاجي وبخالتها السائلة فوق الدفعة الحرارية المذكورة او بحالتها الصلبة ذات التركيب الجديد.



الشكل (2.4): توضيح لظاهرة تحول سائل - صلب للحالة اللابلورية

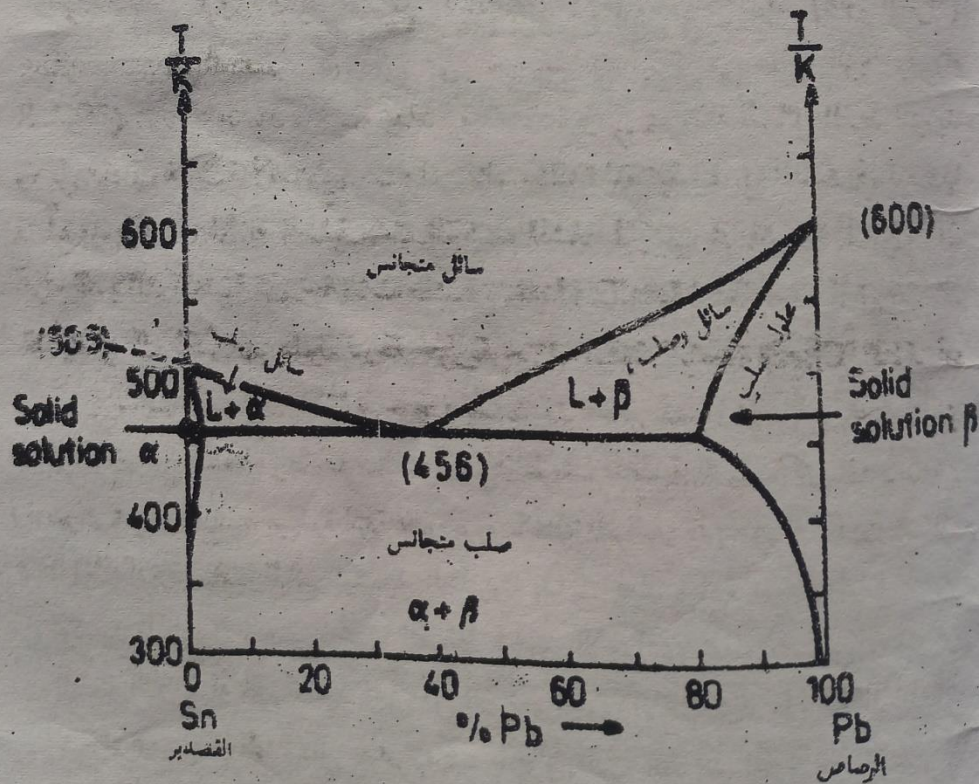
وتستخدم طرق التبريد السريع (Quenching) او التبريد المفرط (فائق السرعة) Supercooling للحصول على كثير من السبائك والمركبات في حالتها الزجاجية (او العشوائية) amorphous، حيث تزداد لزوجة المادة وهي في حالة السائل المفرط التبريد وتصل الى قيمة عالية لا يستطيع عندها جزيئات المادة ان تتبلور، بل تتجمد في اماكنها فجأة متحولة الى الحالة الصلبة ذات التركيب المشابه لتركيب السائل (العشوائي). ان تحول السبائك المعدنية الى زجاجيات معدنية Metallic glasses يتطلب معدل تبريد عال قد يصل الى اكثر من مليون درجة مئوية في الثانية الواحدة (10⁶ °C/sec). ان ترتيب جزيئات المادة في حالتها الزجاجية يعتمد كثيراً على معدل التبريد، وعليه يمكن القول ان خواص المادة الزجاجية تعتمد على التاريخ الحراري للمادة وقد تمكن الباحثون من الحصول على زجاج بعض المعادن الخالصة باستخدام معدلات تبريد قد تصل الى 10¹⁰ °C/sec وبكميات قليلة.

9-2 المخطط الطوري

The Phase Diagram

يمكن تعريف المخطط الطوري على انه شرح تخطيطي للاطوار التي يمكن ان تتواجد في حالة توازن (تعاادل) عند العديد من كميات ارتباط متغيرات التركيب والضغط ودرجة الحرارة. اذ انها تزودنا بمعرفة التركيب الكيميائي والاستقرار الطوري عند تغير درجة الحرارة او الضغط او تركيز المواد المكونة للاطوار

ومن أبسط أنواع المخططات الطورية مخطط يبين تركيب مادة نقية متجانسة كدالة للضغط ودرجة الحرارة. ومن أمثلة هذا المخطط مخطط الضغط ودرجة الحرارة للماء. يلي ذلك المخطط الطوري لنظام يتكون من مادتين والذي يمتلك، متغيرات الضغط ودرجة الحرارة وتركيز المواد المكونة له. تكون هذه المتغيرات الثلاثة غير معتمدة (مستقلة) على بعضها البعض. وغالباً ما يثبت أحد هذه المتغيرات (كالضغط مثلاً) ويترك عاملاً التركيز ودرجة الحرارة متغيرين. ومن أمثلة هذا المخطط الطوري مخطط سبيكة الرصاص والقصدير الذي يوضحه الشكل رقم (2-5). والذي تم تثبيت قيمة الضغط عند 1 جو. يمتلك هذا النظام الطور المتجانس الصلب عند درجات الحرارة الواطئة. والطور المتجانس السائل عند درجات الحرارة العالية. فضلاً عن عدم تكون أي مركب آخر عند أية درجة حرارية أو تركيز آخر. يمثل الطور السائل لهذا المخطط محلولاً سائلاً يمتزج فيه ذرات الرصاص والقصدير بصورة متجانسة. ومن المخاليل المشابهة في التجانس محلول السكر في الشاي، والماء المخاوي على المادة المانعة للإنجذاب وغيرها. كما ويمثل الطور الصلب محلولاً صلباً يمتزج فيه ذرات الذهب والفضة بصورة متجانسة أيضاً.



الشكل (2-5): المخطط الطوري لسبيكة الرصاص - القصدير

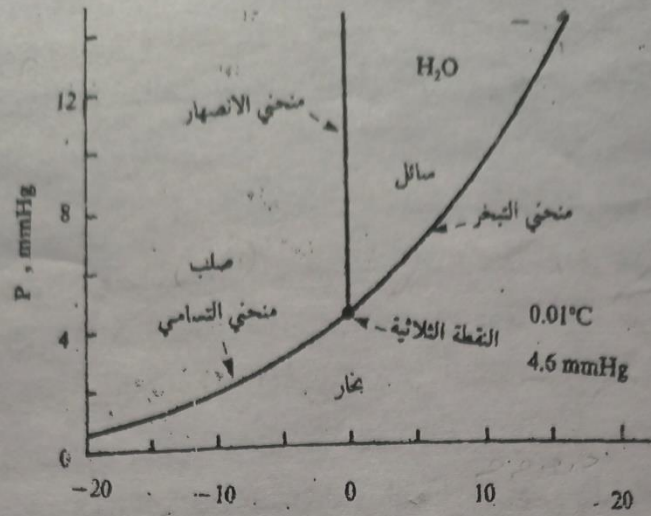
The Triple Point

7 - 2-10 النقطة الثلاثية للمادة

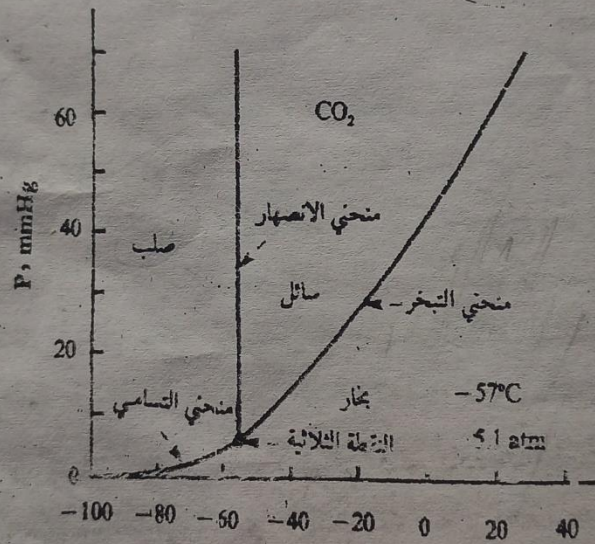
يؤثر الضغط المسلط على تغيرات حالة المادة عندما تتغير درجة حرارتها. فنجد ان درجة حرارة غليان الماء تزداد بزيادة الضغط المسلط عليه الى ان تصل الى قيمة حرجية لها، بحيث لا يمكن فوقها ان يبقى الماء في حالة السيولة معها ازداد الضغط المسلط عليه. ان قيمة درجة الحرارة الحرجة لغليان الماء تساوي 374°C تحت ضغط يساوي 218 جو وان قيمة درجة الحرارة الحرجة لسائل الهيليوم هي -268°C . وما ينطبق على الماء ينطبق على معظم سوائل المواد الاخرى. ان تغير درجة غليان المادة مع الضغط المسلط عليها يسمى (منحني التبخر).

تعتمد درجة حرارة انصهار المواد الصلبة على الضغط المسلط عليها (ولكن بدرجة أقل مما هي عليه الحالة لدرجة حرارة الغليان). ان تغير درجة حرارة انصهار الثلج مع الضغط المسلط عليه يسمى (منحني الانصهار) وقد وجد بان درجة حرارة انصهار الثلج تقل بزيادة الضغط المسلط عليه، على عكس معظم المواد الاخرى والتي تزداد درجة حرارة انصهارها بزيادة الضغط المسلط عليه. وهذا يعني انه يمكن صهر الثلج بطريقتين: بزيادة الضغط المسلط عليه او بتسخينه. وقد استقلت هذه الخاصية للثلج في عمليات التزلج عليه، اذ تكون طبقة من الماء بسبب ضغط المتزلج تساعد على التزلج على الجليد.

بتقاطع منحني الانصهار والتبخر للماء عند درجة حرارة 0.01°C وتحت ضغط 4.6mmHg ان نقطة التقاطع تسمى بالنقطة الثلاثية والتي يتواجد فيها الماء في حالات الثلاث الصلبة والسائلة والغازية. الشكل رقم (2.6) يوضح النقطة الثلاثية للماء وعند ضغط أقل من ضغط النقطة الثلاثية لا يمكن ان توجد المادة في حالتها السائلة. ان منحني الضغط ودرجة الحرارة الذي يفصل بين الحالة الصلبة والحالة الغازية (البخار) للمادة يسمى منحني التسامي والذي يمثل الظروف المطلوبة للصلب كي يتحول الى بخار او البخار الى صلب مباشرة من دون المرور بالحالة السائلة. الشكل (2.7) يوضح منحني النقطة الثلاثية لمادة ثنائي اوكسيد الكربون CO_2 . فعند زيادة درجة الحرارة فان (ثنائي اوكسيد الكربون الصلب تحت الضغط الجوي الاعتيادي يجعله يتسامى/ وذلك لوقوع 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 لوقوع النقطة الثلاثية للماء عند ضغط أقل بكثير من الضغط الجوي الاعتيادي.



الشكل (2.6) : النقطة الثلاثية للماء



الشكل (2.7) : النقطة الثلاثية لثاني أكسيد الكربون

The State Transformation

11-2 تحولات حالة المادة

بمطلق 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 وتحويله إلى الحالة الغازية (طور البخار). ولكي يحدث التغير في الطور يجب إضافة الحرارة، ولكن على الرغم من إضافة الحرارة إلى المادة فإن درجة حرارتها لا ترتفع وهذا يعني أن الطاقة الداخلية للمادة هي التي تتغير عندما تتحول المادة من طور إلى طور آخر. ومثال على

ذلك فان 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 ، تتكثف وتصبح ماء سائلاً .

وهناك تحولات من نوع آخر تحدث داخل المادة وتغير من خواصها الفيزيائية او الكيميائية كالتحولات المغناطيسية والكهربائية وتحولات تركيب المادة. يحدث هذا النوع من تغيرات الطور نتيجة لتسخين او تبريد المادة الى درجة حرارة حرجية. ان هذه التحولات تكون مصحوبة بانتفاخ او انحراف كمية من الطاقة الحرارية فضلاً عن تغيرات خواص المادة. ستناول بعض حالات تغير المادة كالتبخير والتغليان والانصهار والانجماد وغيرها. اما تغيرات الطور المغناطيسي فستتناول في الفصل السادس (الخواص المغناطيسية والكهربائية للمواد).

The Evaporation

8-12-2 التبخر

اذا وضع سائل في وعاء فانه يتبخر ، اي تتحول بعض جزيئاته من الحالة السائلة الى الحالة الغازية ، وذلك لان طاقة جميع جزيئاته ليست متساوية ، وتكون طاقة بعض الجزيئات اكبر كثيراً من المتوسط ، فاذا صادف ان كانت هذه الجزيئات قريبة من سطح السائل فان لها القابلية على الهرب وترك السائل. وبذلك تم عملية التبخر. ان عملية هروب جزيئات السائل تؤدي الى نقص في متوسط الطاقة الداخلية للجزيئات الباقية والسبب في ذلك يعود الى ان الجزيئات المتباعدة تملك طاقة السائل. وهذا يعني ان عملية التبخر ماهي الا عملية تبريد. يستخدم أساساً في معظم أجهزة التبريد. اذا تدرج الى خفض درجة حرارة السائل وخفض طاقته الداخلية. وهنا يمكن ان تعرف (الحرارة الكامنة للتبخير) 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 ، اي عندما تتحول جزيئات الغاز (البخار) من طور البخار (الغاز) الى طور السيولة.

اما من ناحية علاقة الحرارة الكامنة للتبخير مع درجة الحرارة فان الحرارة الكامنة تتغير عكسياً مع تغير درجة الحرارة ، اي 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. مثال ذلك الحرارة اللازمة لتبخير الماء عند درجة حرارة 100°C تساوي 539 سعرة لكل غرام بينما تساوي 590 سعرة لكل غرام عند درجة حرارة 10°C . وغالباً ما تعطى الحرارة الكامنة للتبخير عند درجة غليان السائل العادية ، والجدول الآتي يبين بعض قيم الحرارة النوعية للتبخير لبعض المواد.

الجدول (2.2) : الحرارة الكامنة لتبخير بعض السوائل

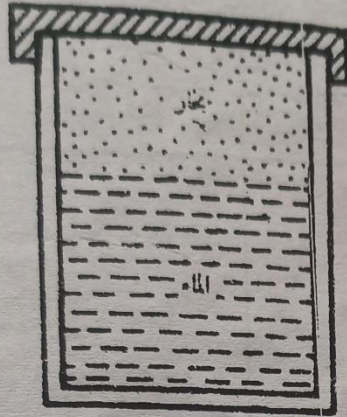
المادة	حرارة التبخير cal/g
الماء	539
النيتروجين	48
الأكسجين	51
كحول ايثيلي (إيثانول)	204
الزئبق	71
الزنك	475
الرصاص	175
حامض الكبريتيك	122

* ان معظم الحرارة الكامنة للتبخير تصرف للتغلب على قوة التجاذب الكبيرة لجزيئات المادة في حالة السيولة ويصرف جزء قليل منها كمشغل خلال عملية التمدد عند الضغط السلبي على السائل (تأثير ضغط الجزيئات).

* اما وحدات قياس الحرارة الكامنة للتبخير فهي السعرة لكل غرام (cal/g) او الجلول لكل غرام (J/g). وفي نظام الوحدات العالمي (SI) فيستخدم وحدة الجلول لكل كيلو غرام (J/kg) من المادة.

اذا وضع سائل في وعاء مغلق مفرغ من الهواء ، فان جزيئات السائل سوف تبخر الى الفراغ الموجود فوق سطح السائل ، كما وتعود بعض جزيئات البخار وتضغط بسطح السائل وتعود اليه ، وتستمر هذه العملية الى ان نحصل حالة التوازن ، وهي الحالة التي تساوي فيها عدد الجزيئات التي تترك السائل في زمن معين مع الجزيئات التي تعود اليه من البخار في نفس الزمن. وهذا يعني ان عدد جزيئات البخار ستبقى ثابتة عند حد معين بشرط عدم تغير درجة حرارة النظام ، ويقال عندئذ بان البخار مشبعاً تحت هذه الظروف. وبطلق على ضغط الجزيئات في البخار تحت هذه الشروط بضغط البخار للسائل ، الذي

درجة الحرارة ويقل بانخفاضها. مثال ذلك يكون ضغط بخار الماء 10 و 60 و 100 درجة سيليزية على التوالي
و 760 ملم زئبق عند درجة حرارة 10 و 60 و 100 درجة سيليزية على التوالي
ملاحظة 1 ملم زئبق يساوي 1 تور (1mmHg = 1Torr). الشكل (2.8) يوضح حالة
البخار المشبع.



الشكل (2.8): يوضح حالة البخار المشبع

The Melting

13-2 الانصهار

تعرف الحرارة الكامنة للانصهار على أنها كمية الحرارة اللازمة لتحويل وحدة الكتلة من المادة من الحالة الصلبة إلى الحالة السائلة تحت درجة حرارة ثابتة وضغط ثابت. ونعم (2.3) يبين قيم الحرارة الكامنة لانصهار بعض المواد الصلبة. وبما أن الطاقة الداخلية للمادة في حالتها السائلة أعلى بكثير من طاقتها الداخلية في حالتها الصلبة، فإن المادة تحتاج تحويلها من الحالة الصلبة إلى الحالة السائلة تحتاج إلى تزويدها بالطاقة الحرارية مثلاً.

* إن وحدة قياس الحرارة الكامنة للانصهار هي السعرة لكل غرام. أما في نظام SI) فإنها تساوي جول لكل كيلو غرام (J/Kg). (أن الحرارة الكامنة لانصهار الجليد في درجة حرارة الصفر السيليزي هي 80 سعرة/ غم تحت الضغط الجوي الاعتيادي) إن الطاقة المجهزة للجسم الصلب تعمل على مساعدة الجزيئات على التغلب على القوى التي تربطها مع الجزيئات الأخرى في التركيب الصلب وجعلها تتحرك بحرية أكبر. المادة انصلبة عند تسخينها بالانصهار عند درجة حرارة معينة. وعند تسخين خليط المادة الصلبة مع السائل تبقى درجة حرارة الخليط ثابتة إلى أن يكتمل انصهار المادة الصلبة. ولكل مادة درجة حرارة انصهار معينة. وتحدد نفس الكمية من الحرارة من المادة عند تحويلها

من الحالة السائلة الى الحالة الصلبة عند نفس درجة الحرارة والضغط الجوي. تنصص الحرارة الكامنة لعرق الجسم من الجسم عند التعرق لكي يتبخر العرق وبذلك يتم تبريد الجسم.

جدول (2.3) : الحرارة الكامنة لانصهار بعض المواد الصلبة

الحرارة الكامنة للانصهار cal/g	المادة
80	الثلج (الجليد)
6.1	النيتروجين
3.3	الأكسجين
25	الكحول الايثيلي (اثانول)
5.9	الرصاص
24	الزنك
2.8	الزئبق
5	النحاس
24.5	الفضة
6.4	الرصاص

دقة

The Boiling

كيف تنشأ الغليان

في السائل

كيف 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، فاذا كانت درجة الحرارة أقل من درجة الغليان السائل، فان الضغط الجوي المسلط على السائل يكون أكبر 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 يساوي عندها الضغط الجوي مع ضغط البخار داخل الفقاعة، وعندها سوف تنمو الفقاعة ويزداد حجمها كلما ارتفعت نحو سطح السائل (بدلاً من التلاشي والاختفاء).

وبتكرار ملاحظة هذه الظاهرة في أماكن متفرقة كثيرة داخل السائل تنشأ ظاهرة الغليان وتعرف (درجة الغليان) على أنها الدرجة الحرارية التي يتساوى عندها ضغط بخار السائل داخل الفقاعة مع الضغط الخارجي المسلط على السائل. إن انخفاض الضغط المسلط على السائل يؤدي إلى انخفاض درجة غليان السائل والعكس صحيح. إن عملية مرور بخار السائل يحتاج إلى طاقة عالية تكتسبها من جزيئات السائل الأخرى. إن استمرار الغليان يحتاج إلى امتداد السائل بالحرارة. ولن ترتفع درجة حرارة السائل أعلى من درجة حرارة الغليان مهما كانت كمية الحرارة التي يزود بها السائل خلال عملية الغليان. تشكل الفقاعات بسهولة أكبر إذا كان السائل (يحتوي على الشوائب كفقائق الغبار أو فقاعات الهواء) ومن الممكن أن يسخن السائل النقي إلى أعلى من درجة غليانه من دون تكون الفقاعات، ولكن عندما يبدأ تكوين الفقاعات فإنه يحدث بشدة كبيرة تقرب من الانفجار. تعطينا درجة الغليان (في الغالب) لخصائص السوائل تحت الضغط الجوي القياسي أي 760mmHg أو (1 atm). إن درجة حرارة غليان الماء تساوي 100°C تحت نفس الظروف. أما الحرارة الكامنة لتبخير الماء تحت الظروف السابقة فتساوي 539 سعرا غرام. (إن درجة غليان الماء في المدن الواقعة في الجبال تكون أقل من 100°C) وذلك بسبب أن الضغط الجوي يقل كلما ارتفعنا عن سطح البحر. وهذا يفسر لنا أهمية استخدام قنود الضغط في عمليات الطهو. الجدول (4.2): تبين قيم درجة حرارة الغليان لبعض السوائل.



الشكل (2.9) يوضح ظاهرة الغليان

جدول (2.4) : درجة حرارة غليان بعض السوائل

المادة	درجة حرارة الغليان ($^{\circ}\text{C}$)
الماء	100
الكحول الايثيلي (اثانول)	78
سائل النروجين	196
سائل الاوكسجين	183
سائل الهليوم	268
الرئيق	358
حامض الكبريتيك	326
الرمصاص	1170
الزنك	918
الكلوروفورم	61.5
ايثر	34.6

كماذا
يسمى
غاز ثنائي
اوكسيد
الكاربون
تحت الضغط
الجوي الاعيادي
يسمى
الجليد

The Sublimation

15-2 التسامي

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 يسمى
(بمنحني التسامي) لانه يمثل ظروف 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 وانسبب في ذلك
يعود الى ان ضغط النقطة الثلاثية للماء اقل بكثير من الضغط الجوي الاعتيادي بينما
اضافة الحرارة الى صلب ثنائي اوكسيد الكاربون تسبب حالة التسامي اي الانتقال من
الحالة الصلبة الى الحالة البخارية لان ضغط النقطة الثلاثية لثنائي اوكسيد الكاربون اعلى
بكثير من الضغط الجوي الاعتيادي (انظر الشكل (2.6) والشكل (2.7) .

The First Law of Thermodynamics

16-2 القانون الاول في الترموديناميك

لنصورنا ان حجماً معيناً من غاز (V_1) في درجة حرارة T_1 ونحت ضغط P_1 موجود في
وعاء ذي مكبس ، فاذا ضغط الغاز الى حجم V_2 وانخفضت درجة حرارته الى T_2 فان
الضغط سيزداد الى P_2 . ان الانتقال من الحالة الاولى (P_1, V_1, T_1) الى الحالة الجديدة

$$W = F \cdot \Delta x$$

$$F = P \cdot A$$

$$W = P \cdot A \cdot \Delta x = W = P \Delta V$$

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

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

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

..... (2.18)

وتسمى هذه العملية بالعملية الثابتة الضغط. العملية الثابتة الضغط

يبين الشكل رقم (2.10) عملية ثابتة الضغط وتتكون من كمية من الماء محصورة في وعاء أسطواني مجهز بمكبس حر الحركة وفوقه ثقل معين. يمكن تزويد الماء بالطاقة الحرارية وذلك بتسخينه إلى أن يتحول جزء من الماء إلى بخار ويتمدد النظام (الماء والبخار) ويحرك المكبس، أي ينجز شغلاً ضد المكبس. فإذا تحولت كتلة مقدارها (m) من الماء إلى بخار وازداد حجمها من V_i إلى V_f وكان الضغط ودرجة الحرارة ثابتين فإن الشغل المنجز خلال هذه العملية يعطى بالعلاقة الآتية:

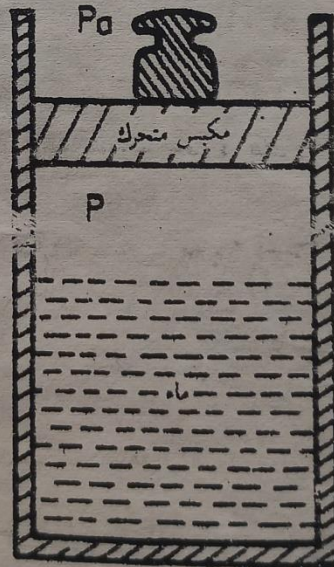
$$W = P(V_f - V_i)$$

رابطه القانون الأول على

+ مضافه (احصيه مترددة) من النظام او تنتقل الى النظام $\Delta Q = +$ كمية الحرارة التي خرجت من النظام او تنتقل الى النظام ΔU التغير في الطاقة الداخلية وهي مجموع كل الطاقات للوسط الكاسه

ΔW الشغل المبذول على (+) النظام - أو من النظام على الوسط وإذا كان النظام عازلاً $\Delta W = P \Delta V$

وحدات ΔW و ΔQ و ΔU هي اي حول اد cal



الشكل (2.10) : يوضح عملية ثابتة الضغط

ان تحول السائل الى بخار يحتاج الى كمية من الحرارة (Q) تعطى بالعلاقة الآتية
 $Q = mL$

حيث ان L تمثل الحرارة الكامنة للتبخير.

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

$$\Delta U = U_2 - U_1$$

..... (2.19)

حيث ان U_1 و U_2 تمثلان الطاقة الداخلية للسائل والبخار على التوالي. وعند تطبيق القانون الاول للترموديناميك على هذه العملية نحصل على الصيغة الآتية :

$$Q = P(V_2 - V_1) + (U_2 - U_1) \Rightarrow \Delta U = Q - W \text{ (2.20)}$$

يمكن إيجاد قيمة التغير في الطاقة الداخلية لنظام يتكون من غرام واحد من الماء المقطر يتحول الى بخار تحت الضغط الجوي الاعتيادي في درجة حرارة 100°C . وكان 1cm^3 الماء المقطر يشغل 1671cm^3 في حالة البخار تحت نفس الضغط. وان الحرارة الكامنة للتبخير تساوي 540cal/g فان $P = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$

$$Q = mL$$

$$= 1 \times 540$$

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

$$W = P(V_2 - V_1)$$

$$= 1.0 \times 10^5 (1671 - 1) \times 10^{-6}$$

$$W = 167 \text{ Joule}$$

$$= 167/4.2$$

$$W \approx 40 \text{ cal}$$

$$1 \text{ cm} = 10^{-2} \text{ m}$$

$$(1 \text{ cm})^3 = 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$W = 167 \text{ J}$$

$$Q = \frac{W}{4.2} = \frac{167}{4.2}$$

وعليه فان الزيادة في الطاقة الداخلية للنظام تكون مساوية الى ΔU ، اي ان

$$\Delta U = U_2 - U_1 = Q - P(V_2 - V_1)$$

$$= 540 - 40$$

$$\approx 500 \text{ cal}$$

وهذا يعني ان 40 سعرة تصرف كشفل منجز ضد الضغط الجوي وان 500 سعرة تقريباً تصرف للتغلب على قوى الترابط بين الجزيئات في الحالة السائلة لاجل فصلها وتحويلها الى بخار.

18-2 امثلة محلولة

مثال (2.1) ترك

اذا كان معدل انسياب سائل خلال مسعر الانسياب المستمر تساوي 15 gs^{-1} . وان السخان الكهربائي يقوم بتزويد قدرة مقدارها 200 واط . تحت هذه الظروف تم الحصول على فرق في درجة الحرارة مقداره 3°C ، ولأجل الحصول على نفس الفرق في درجات الحرارة تحت معدل انسياب مقداره 5 gs^{-1} يجب تبديد قدرة مقدارها 80 واط . جد الحرارة النوعية للسائل ومعدل فقدان الحرارة الى المحيط . افرض ان درجة حرارة المحيط هي نفسها في الحالتين .

الحل

$$1 \text{ واط} = 1 \text{ جول/ثانية}$$

$$\therefore \text{الطاقة الكهربائية للحالة الاولى} = 200 \text{ جول/ثانية}$$

$$\therefore \text{الطاقة الكهربائية للحالة الثانية} = 80 \text{ جول/ثانية}$$

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

$$\text{لان } \Delta T = T_2 - T_1 = 3^\circ\text{C} \text{ حيث ان } \Delta T = \text{الحرارة المتوفرة للموائ}$$

$$\text{نفرض ان معدل فقدان الحرارة الى المحيط خلال الثانية الواحدة} = H$$

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

في الحالة الاولى

$$200 \text{ Js}^{-1} = (15 \text{ gs}^{-1}) C (3 \text{ K}) + H$$

في الحالة الثانية

$$80 \text{ Js}^{-1} = (5 \text{ gs}^{-1}) C (3 \text{ K}) + H$$

ونطرح الحالة الثانية من الحالة الاولى نجد

$$(200 - 80) \text{ Js}^{-1} = (15 - 5) \text{ gs}^{-1} C \times (3 \text{ K})$$

$$120 \text{ Js}^{-1} = 30 C \text{ gs}^{-1} \text{ K}$$

$$C = \frac{120}{30} \frac{\text{J sec}^{-1}}{\text{g sec K}} = 4 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

الحرارة النوعية للسائل

وبالتعويض عن C في الحالة الأولى أو الثانية نجد أن

$$200 = (15 \text{ g s}^{-1}) (4 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}) (3\text{K}) + H$$

$$200 = 180 + H$$

$$H = (200 - 180) = 20 \text{ J s}^{-1}$$

مقدار الطاقة المتسربة إلى المحيط

مثال (2.2)

سخنت قطعة من النحاس كتلتها 100g إلى درجة حرارة 100°C ، ونقلتها إلى مسعر النحاس جيد العزل كتلته 50g يحتوي على 200g من الماء عند درجة حرارة 10°C جد القيمة النهائية لدرجة حرارة الماء مع العلم أن الحرارة النوعية للنحاس تساوي $4.00 \times 10^2 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ وللماء تساوي $4.2 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$. أهمل أي فقدان في

درجة الحرارة إلى المحيط.

$$\frac{4200 \text{ J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} = \frac{4.2 \text{ J}}{0.001 \text{ kg} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$\frac{390 \text{ J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} = \frac{0.39 \text{ J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$$

نفرض أن درجة الحرارة النهائية = T_2

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

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

كمية الحرارة التي تفقدتها قطعة النحاس = $(100 - T_2) (0.4 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}) (100\text{g})$

$$mC\Delta T =$$

كمية الحرارة التي اكتسبها المسعر النحاسي = $(50) (0.4 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}) (T_2 - 10) =$

$$mC\Delta T =$$

كمية الحرارة التي اكتسبها الماء = $(200\text{g}) (4.2 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}) (T_2 - 10) =$

كمية الحرارة المكتسبة = كمية الحرارة المفقودة

$$(100) \times 0.4 \times (100 - T_2) = 50 \times 0.4 \times (T_2 - 10) + 200 \times 4.2 \times (T_2 - 10)$$

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

$$3900 - 39T_2 = (19.5 + 840)(T_2 - 10) \quad \text{YA}$$

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

$$4000 + 8600 = 860 T_2 + 40 T_2 = 900 T_2$$

$$12600 = 900 T_2$$

$$\therefore T_2 = \frac{12600}{900} = 14.0^\circ\text{C}$$

مثال (2.3)

مر تيار كهربائي مقداره (2) امبير في ملف تسخين ذي مقاومة ثابتة مقدارها (15) أوم
مغمور في (500) جرام من الماء في درجة الصفر السيليزي في مسر زجاجي معزول.
فارتفعت درجة حرارة الماء الى (8) درجة سيليزية بزم من مقداره (5) دقائق. فإذا احتوى هذا
المسر على 250 جراماً من الثلج ومثلها من الماء ماقبلة التيار الكهربائي اذا اريد لهذا
الخليط ان يسخن الى نفس الدرجة خلال الفترة الزمنية نفسها. احسب الفقدان الحراري
الى المحيط.

كمية
الحرارة
المكتسبة
بواسطة
المسر

الحل

كمية الحرارة المكتسبة = كمية الحرارة المفقودة
كمية الحرارة المكتسبة بواسطة المسر الزجاجي المعزول + الطاقة الحرارية المكتسبة بواسطة
الماء = الطاقة الكهربائية المتحررة من مرور التيار الكهربائي
 $P R t =$ جول

الطاقة الكهربائية = (التيار) $\times$ المقاومة $\times$ الزمن

$$(2 \times 15 \times 5) \times 2 = 18000 \text{ جول}$$

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

$$8 \times 4.2 \times 500 = 16800 \text{ جول}$$

كمية الحرارة المكتسبة بواسطة المسر = h

$$18000 = 16800 + h$$

$$\therefore h = (18000 - 16800) \text{ J} = 1200 \text{ J}$$

الطاقة الكهربائية = الحرارة اللازمة لصهر الثلج في درجة 0°C + الحرارة اللازمة
لتسخين الماء الى 8°C + الحرارة المكتسبة بواسطة المسر

طارة مكتبة من المعر + ماء التماس

$$200 \times C_c (37 - 27) + 250 \times 1 \times (37 - 27) = I^2 R t = \text{الطاقة الكهربائية المفقودة}$$

$$(60 \times 5) \times 15 \times I^2 =$$

$$I^2 = 4500 \text{ جول}$$

كمية الحرارة اللازمة لتحويل الثلج الى ماء في درجة 0°C $= 336 \times 250 = 84000 \text{ جول}$

كمية الحرارة اللازمة لتسخين الماء 500 غرام من درجة 0°C الى درجة حرارة 8K تساوي

$$= 8 \times 4.2 \times 500 =$$

الحرارة المكتسبة بواسطة السهم 1200 J

$$I^2 (\Omega \text{ sec}) = 84000 \text{ J} + 16800 \text{ J} + 1200 \text{ J}$$

وعليه فان

$$I^2 = \frac{100 \times 500}{4500} \frac{\text{J}}{\Omega \text{ sec}} = 22.7 \text{ J } \Omega^{-1} \text{ sec}^{-1}$$

$$I = \sqrt{22.3} = 4.76 \text{ A}$$

(ملاحظة الجول = فولت كولوم)

$$\frac{\text{كولوم}}{\text{ثانية}} = \frac{\text{فولت}}{\text{اوم}}$$

امبير امبير = امبير

Q4

$$V \times 1.5 \times 90 = 150 \times 0.4 \times 14 + 100 \times 2 \times 14$$

Q5

الحرارة المكتسبة من قبل المعر + الماء + الثلج = الحرارة المفقودة

$$150 \times 0.4 \times 27 + 100 \times 3.34 \times 10^2 + 100 \times 2 \times 14$$

$$m \times 2.26 \times 10^3 + 200 \times 4.18$$

19-2 مسائل الفصل الثاني

(1) ماذا تقصد بمقياس درجة الحرارة؟ وضع كيف تعرف درجة الحرارة بدلالة خاصية معينة للمادة؟

(2) وضع الخواص الرئيسية لمحررين احدهما يُستخدم لقياس درجات الحرارة في الاوساط سريعة التغير في درجة حرارتها. والآخر لقياس درجة الحرارة بدقة كبيرة لوسط تتغير درجة حرارته بصورة تدريجية.

وضع الاسباب التي دعتك الى هذا الاختيار.

(3) عرف السعة الحرارية النوعية والحرارة النوعية الكامنة للتبخير والانصهار.

(4) تيار كهربائي مستمر مقداره (1.5 A) يمر خلال ملف تسخين مغمر في سائل البارافين ذات الحرارة النوعية ($2 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$) في مسعر نحاسي كتلته (150 g) ذي حرارة نوعية مقدارها ($0.4 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$). ترفع درجة حرارته من (7°C) تحت درجة حرارة الغرفة الى (7°C) فوق درجة حرارة الغرفة في زمن مقداره (90 sec) ثانية جد مقدار قراءة الفولتميتر المربوط عبر ملف التسخين.

(5) مسعر نحاسي مغزول كتلة (150 g) يحتوي على (250 g) من الماء و (100 g) من الثلج في درجة حرارة (0°C). مرر خلاله خليط بخار الماء والماء في درجة حرارة (100°C) حتى ارتفعت درجة حرارة المسعر ومحتوياته الى درجة حرارة (27°C). فاذا كانت الزيادة في كتلة الماء تساوي (20 g). جد نسبة الماء المتكاثف في بخار الماء مع العلم ان معدل الحرارة النوعية للماء تساوي ($4.18 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$) والحرارة النوعية للنحاس تساوي ($0.4 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$) والحرارة الكامنة للذوبان هي (334 J g^{-1}) والحرارة الكامنة لانصهار الجليد في درجة 0°C تساوي $3.34 \times 10^2 \text{ J g}^{-1}$.

(6) قطعة من النحاس الاصفر كتلتها (600 g) سخنت في ماء مغلي لمدة كافية ونقلت بسرعة الى مسعر من النحاس الاصفر كتلته (200 g) يحتوي على (250 g) من الماء عند درجة حرارة (27°C) ونتيجة لذلك ارتفعت درجة حرارة الماء والمسعر الى (37°C). احسب الحرارة النوعية لمادة سبيكة النحاس. اهلل الفقدان في الطاقة الحرارية خلال نقل الجسم الصلب.

(7) بركة ثلج مساحتها 100 m^2 في درجة حرارة 0°C . فاذا كانت تمتص الحرارة من الشمس بمعدل 0.25 سرعة / سم². دقيقة. كم من الثلج سينصهر خلال 12 ساعة.

$$Q = \frac{Q}{A} \cdot A$$

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

$$m = ?$$

(8). جد مقدار الشغل الذي ينتج من مكعب من معدن طول ضلعه 15cm اذا سخن من درجة حرارة 20°C الى 320°C مع العلم ان معامل التمدد الحجمي للمادة $5.6 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$.

(9). جد مقدار التغير في الطاقة الداخلية عندما يتحول 25g من الثلج في درجة 0°C الى ماء في درجة 0°C . ملاحظة: اهل حقيقة ان الماء اكثر كثافة من الثلج. ماذا يحدث لو اخذنا التغير في الحجم بنظر الاعتبار على قيمة التغير في الطاقة الداخلية.

(10). مزود جهاز ب 2000 سرعة وأنجز شغلاً مقداره 3350 جولاً وازدادت طاقته الداخلية بمقدار 5030 جول. جد قيمة مكافئ جول J.

(11). جد مقدار الارتفاع في درجة حرارة الماء الذي تسقط فيه كتلة مقدارها 5 كغم من ارتفاع 40 متر وتقوم بتدوير عجلة ذات زعانف في 1 كغم منه.

(12). محرار كتلته 50 غرام ذات حرارة نوعية مقدارها 0.25 سرعة / غم. سن يقرأ 20°C . غمر المحرار في 0.25 كغم من الماء حتى وصل الى درجة حرارة نهائية مقدارها 40°C . ماهي درجة حرارة الماء قبل غمر المحرار فيه؟ $T_2 = 41^{\circ}\text{C}$.

(13). رصاصة كتلتها 7 غم وسرعتها 150 م/ثا اصطدمت بقطعة ساكنة من الخشب والتصقت بها. جد الارتفاع في درجة حرارة الرصاصة. افرض ان الرصاصة تمتص جميع الحرارة الناتجة عن الاصطدام؟.

14. جد كمية الحرارة اللازمة لتحويل (25g) من الثلج من درجة حرارة (-15°C) الى ماء عند درجة (45°C). 1600 كجم

15. مركبة كتلتها 1500 كجم تسير بسرعة 30 m/sec تسير بسرعة 30 m/sec.

الموقف (الكابح) لغرض توقفها الى جلب سرعتها الى (0 m/sec). جد كمية الحرارة المتولدة نتيجة استخدام الكابح. مع العلم ان لكل واحدة من منظومات الكابح الاربعة كتلة مقدارها (10.5 kg) وحرارتها النوعية تساوي $0.2 \text{ Kcal/Kg}^{\circ}\text{C}$.

16. جد مقدار الارتفاع في درجة حرارة الكابح ، اذا فرضنا ان جميع الحرارة المتولدة في منظومات الكابح ستعمل على رفع درجة حرارتها.

(17). تستخدم محطة طاقة نووية ($4 \times 10^6 \text{ m}^3$) من الماء في اليوم الواحد لغرض التخلص من طاقة حرارية مقدارها (110) ميكاواط. جد مقدار الارتفاع في درجة حرارة الماء الخارج من المحطة اذا كانت درجة حرارة الماء الداخل اليها تساوي (25°C).

18. جد قيمة درجة الحرارة النهائية للماء والرصاص ، الناتجة عن سكب (750) غراماً من الرصاص المنصهر عند درجة (333°C) في (3) لتر من الماء عند درجة حرارة (27°C) ، علماً بأن الحرارة النوعية للرصاص تساوي $3.4 \times 10^{-2} \text{ Kcal/Kg}^\circ\text{C}$.

19. اسقطت قطعة معدنية كتلتها (350 g) درجة حرارتها (25°C) في حاوية سائل غاز النروجين درجة حرارته (-196°C) جد كتلة سائل النروجين الذي سوف يتبخر في عملية تبريد القطعة المعدنية الى نفس درجة السائل . علماً بأن الحرارة النوعية لمادة القطعة المعدنية تساوي $(8.2 \times 10^{-2} \text{ Kcal/g}^\circ\text{C})$. والحرارة الكامنة للتبخير تساوي $[47.8 \text{ Kcal/kg}]$.

20. ماعدد مكعبات الثلج اللازمة لتبريد لتر من الماء المغلي في درجة حرارة (100°C) الى درجة حرارة (37°C) ، علماً بأن كتلة المكعب الواحد من الثلج تساوي (12g) في درجة حرارة 0°C . اهلل فقدان الحرارة بواسطة الماء .

21. جد كمية الطاقة اللازمة لرفع درجة حرارة كل مما يأتي من 20°C الى 75°C .

(1) (3g) الماء (2) (5g) زجاج بيركس (3) (10g) بلاتين

علماً بأن الحرارة النوعية للماء والزجاج البيركس والبلاتين تساوي 4186 J/kgK و $837 \text{ Jkg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ و $134 \text{ Jkg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ على الترتيب .

22. جد كمية الطاقة التي يجب سحبها عند تبريد كل مما يأتي من 100°C الى 27°C

(1) لتر من الماء (2) (2Kg) من الجليد (3) (3Kg) من الاسيستوس

علماً بأن الحرارة النوعية للجليد وللأسيستوس تساوي $1.5 \text{ Jg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ و $0.841 \text{ Jg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ على الترتيب .

23. سخن خزان ماء يحتوي على (170) لتر من درجة حرارة (15°C) الى (80°C) باستعمال

نوع مادة احتراق $(3.4 \times 10^7 \text{ Jkg}^{-1})$. جد كمية الفحم اللازمة اذا انتفع من الطاقة الحرارية بنسبة 60% .

24. جد الحرارة الكامنة لانصهار مادة ما من المعلومات الآتية :

كتلة المسعر 80g .

كتلة المسعر زائد الماء 480g

كتلة المسعر زائد المادة زائد الماء 650g

الحرارة الابتدائية للماء 27°C

الحرارة النهائية للخليط 5°C

الحرارة النوعية للمسعر 423J/kgK

25. جد كمية الحرارة اللازمة لتحويل (10g) من الثلج عند درجة حرارة (-10°C) الى

بخار عند درجة (110°C) افرض ان الحرارة النوعية للثلج والماء والبخار هي نفسها .

الفصل الثالث

الغازات The Gases

المقدمة

تتكون الغازات من جزيئات صغيرة، تكون الجزيئات مستقلة تقريباً بعضها عن البعض، أي لا تؤثر بعضها على البعض الآخر بأي قوى ماعداً في لحظات تصادمها. كما أنها في حركة مستمرة وتنتجول في الفضاء (space) متصادمة مع بعضها من دون أن 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، إذ يقدر معدل المسافة بين الجزيئات بعشرة أمثال قطر الجزيئة تقريباً. تكون سرعة جزيئات الغاز (في الأحوال الاعتيادية) مقاربة لسرعة الصوت في الهواء (أي 300 إلى 400 متر في الثانية)، وبناء على ذلك يكون المعدل الزمني لعدد التصادمات بين جزيئات الغاز محدود 10^9 تصادم لكل ثانية. وتؤدي التصادمات بين جزيئات الغاز وجدران الوعاء الذي يحتويه إلى تكوين الضغط المؤثر على هذه الجدران. إن تباعد جزيئات الغاز عن بعضها البعض بمسافات أكبر من أقطار هذه الجزيئات أدى إلى انعدام الاحتكاك الداخلي بينها، وإلى هذا السبب أيضاً تعزى قابلية الغازات على الانكماش لكونها لا تمتلك سداً محددًا ولا حجماً ثابتاً، إذ تملأ جزيئات الغاز كل انحاء الوعاء الذي توضع فيه.

إن التغيرات التي تطرأ (إثناء عملية تصادم الجزيئات) على قيمة واتجاه سرعة أحد الجزيئات يقابله تغير معاكس (مضاد) في قيمة سرعة الجزيئة الثانية واتجاهها، إذ يكون معدل التغير في القيمة والاتجاه لسرع الجزيئات المختلفة مساوياً للصفر، وعلى هذا الأساس يكون للكتلة المعينة المترنة من الغاز وعند درجة الحرارة الثابتة ما يأتي :-

- ١- تكون اتجاهات حركة الجزيئات موزعة بالتساوي على جميع الاتجاهات.
- ٢- كما ويكون معدل الطاقة الحركية لجميع جزيئات الغاز عند درجة الحرارة

The Ideal and Real Gases

1-3 الغاز المثالي والغاز الحقيقي

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

نُصِّفُ اما الغاز الحقيقي فتكون جزيئاته صغيرة ومتباعدة بعضها عن بعض. وعند الظروف
الاعتيادية من ضغط ودرجة حرارة تقترب خواص الغازات الخفيفة من خواص الغاز
المثالي، بشرط ان تكون درجة الحرارة اعلى بكثير من درجة حرارة تسيل الغاز.

The Kinetic Theory of Gases

2-3 النظرية الحركية للغازات

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

- 1- تكون الغازات من جزيئات متناهية في الصغر (كتلة نقطية)، اي انها تملك كتلة
ولا تملك حجماً.
- 2- اهمال القوى المؤثرة بين جزيئات الغاز، ماعدا لحظة التصادم.
- 3- تكون حركة الجزيئات عشوائية ومستمرة ومخطوطة مستقيمة بين التصادمات.
- 4- تكون جزيئات الغاز تامة المرونة، كما ويكون التصادم بين هذه الجزيئات مرناً
أي ان تملك 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 جزيي معين تتغير باستمرار نتيجة للتصادم مع الجزيئات الأخرى أو مع
جدران الوعاء الذي يحتويها، كما وتختلف قيم سرعة الجزيئات بعضها عن بعض عند
لحظة من الزمن، وتبعاً لذلك ستختلف طاقاتها الحركية. وهذا يعني ان هناك مدى وامتداد
جداً لسرع الجزيئات عند اية درجة حرارية. ان توزيع سرع الجزيئات وبالتالي طاقا

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

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

$$dQ = C_p dT \quad \text{.....(3.24)}$$

اما الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة مول واحد من الغاز درجة حرارة واحدة عند ثبوت الحجم فانها متؤدي الى رفع طاقته الداخلية (dU)، ومن تعريف الحرارة النوعية المولية عند الحجم الثابت C_v نجد ان

$$dU = C_v dT \quad \text{.....(3.25)}$$

وباستخدام القانون الاول للثرموداينمك والذي ينص على ان

$$dQ = dU + dW \quad \text{.....(3.26)}$$

وبالتعويض عن قيم dU و dW بما يساويها من المعادلتين (3.23) و (3.25) نجد ان:

$$C_p dT = C_v dT + p dV \quad \text{.....(3.27)}$$

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

$$PV = RT$$

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

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

وباطرح نجد ان

$$\text{.....(3.28)}$$

$$P dV = R dT$$

وبالتعويض في المعادلة (3.27) نجد ان

$$\text{.....(3.29)}$$

$$C_p dT = C_v dT + R dT$$

اي ان

$$\text{.....(3.30)}$$

$$C_p - C_v = R$$

والتي تساوي (8.31 J/K, mole) أو تقريباً تساوي 2 cal/K, mole . وهكذا نجد ان C_p اكبر من C_v بحوالي (2 cal / K, mole)

ان العلاقة السابقة تصبح بصورة تقريبية لجميع الغازات الحقيقية.

11-3 حساب C_p و C_v للغاز المثالي (احادي الذرة) Evaluation of C_p and C_v

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

$$dU = C_v dT \quad \text{..... (3.31) /}$$

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

$$dU = \frac{3}{2} R dT \quad \text{..... (3.32) /}$$

ومقارنة المعادلتين (3.31) و (3.32) نجد ان

$$C_v = \frac{3}{2} R \quad \text{..... (3.33)}$$

وبما ان R تساوي 8.31 جول لكل مول لكل درجة كلفينية نجد ان

$$C_v = 12.5 \text{ J/mole. K} \quad \text{..... (3.34)}$$

وبما ان

$$C_p = R + C_v \quad \text{..... (3.35)}$$

اذن

$$C_p = R + \frac{3}{2} R = \frac{5}{2} R \quad \text{..... (3.36)}$$

أو

$$C_p = 20.8 \text{ J/mole. K.} \quad \text{..... (3.37)}$$

وللغاز المثالي ثنائي الذرة نجد ان

$$C_v = \frac{5}{2} R = 20.77 \quad \text{..... (3.38)}$$

$$C_p = \frac{7}{2} R = 29.083 \quad \text{..... (3.39)}$$

الجدول (3.1) يبين قيم C_p و C_v لبعض الغازات المعروفة بوحدة Cal/mole.K عند الظروف الاعتيادية من ضغط ودرجة حرارة

الغاز	C_p	C_v	$(C_p - C_v)$
الهيليوم (H_2)	4.98	3.00	1.98
الاركون (A_r)	5.00	3.00	2.00
الأكسجين (O_2)	6.95	4.96	1.99
النيتروجين (N_2)	6.95	4.96	1.99
اول اوكسيد الكربون CO	6.95	4.93	2.02
ثاني اوكسيد الكربون CO_2	8.75	6.74	2.01
الميثان CH_4	8.49	6.48	2.01

هبط

ان نسبة C_p الى C_v يرمز لها بـ (γ) ، اي ان

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \quad \text{..... (3.40)}$$

ان هذه النسبة تظهر في معادلة حساب سرعة الصوت في الغاز وفي معادلات التغيرات الترموديناميكية. كما يمكن ان تفيد هذه النسبة في اعطائها معلومات عن عدد ذرات جزيئة الغاز. الجدول (3.2) يبين بعض قيم (γ) التجريبية التقريبية والتي غالبا ما نقل قيمتها بارتفاع درجة الحرارة.

الجدول (3.2)

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

12-3 الانتروبي

The Entropy (S)

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

..... (3.41) ✓

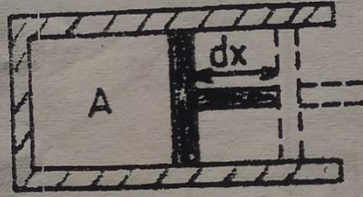
$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T_k}$$

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

The Work done by The Gas

13-3 الشغل المنجز بواسطة الغاز

لو اخذنا كتلة معينة من غاز محصورة في وعاء اسطواني مجهز بمكبس ذي مساحة مقطع عرضي مقدارها (A) كما في الشكل (3.7).



الشكل (3.7): الشغل المنجز بواسطة الغاز

ان الحرارة يمكن ان تنتقل من وإلى الغاز خلال جدران الاسطوانة. فاذا كان الجهاز والغاز الذي بداخله في حالة توازن حراري مع المحيط ، وكان الغاز حجم ابتدائي مقدار V_i وضغط ابتدائي مقداره P_i . يمكن انجاز شغل على الغاز عن طريق ضغطه بواسطة المكبس ، كما يمكن انجاز شغل من قبل الغاز عن طريق تمدده ودفعه المكبس الى الخارج. فاذا وصل الجهاز الى حالة توازن حراري نهائية وكان حجمه النهائي V_f وضغطه النهائي P_f .

ان الشغل الذي ينجزه الغاز عندما يتمدد ضد المكبس ويحركه مسافة مقدارها dx

هو:

$$dW = F \cdot dx$$

$$F = PA$$

$$dW = PA \cdot dx$$

..... (3.42)

بما ان

فان

(3.43)

$$Adx = dV$$

$$dW = PdV$$

بما ان

فان

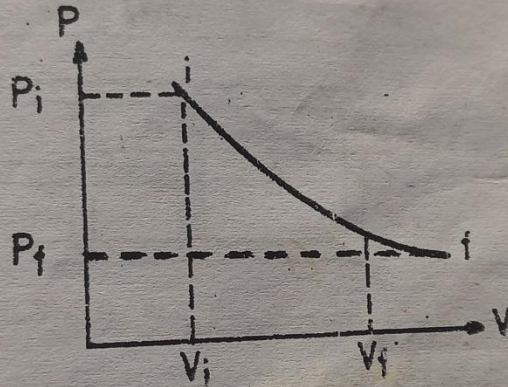
$$(3.44)$$

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

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

$$(3.45)$$

ولاجل اجراء هذا التكامل يجب معرفة كيفية تغير الضغط مع الحجم . لان الشغل المنجز لا يعتمد فقط على الحالة الابتدائية والحالة النهائية للجهاز وانما يعتمد ايضا على الحالات المتوسطة بينها ، اي على المسار . انظر الشكل (3.8) .



الشكل (3.8) : الشغل وعلاقته بالضغط والحجم

3-14 ضغط الغاز المثالي

The ideal gas pressure

ان تصادم جزيئات الغاز مع جدران الوعاء الذي يحتويه يولد ما يعرف بضغط الغاز وذلك نتيجة للقوة 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 جدار الوعاء تسمى بضغط الغاز وان وحدات الضغط هي النيوتن لكل متر مربع . ان متوسط الضغط على جدران الوعاء الحاوي على الغاز تعطى بالمعادلة الآتية :

$$P = \frac{F}{A} = \frac{1}{3} (n_0) (m \bar{v}^2) = \frac{2}{3} (n_0) \left(\frac{1}{2} m \bar{v}^2 \right) \quad (3.46)$$

حيث أن $(m \bar{v}^2)$ تمثل عماد الجزيئات في وحدة الحجم و v سرعة جزيئات الغاز و m كتلة الجزيئة. وبما أن n_0 تمثل عدد الجزيئات في وحدة الحجم فإن الضغط يساوي ثلثي متوسط الطاقة الحركية لجزيئات الغاز في وحدة الحجم.

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

$$\left(\frac{1}{3} \right) n_0 m \bar{v}^2 = \frac{n RT}{V} \quad (3.47)$$

وباعادة ترتيب هذه المعادلة يمكن الحصول على درجة الحرارة (T) ، اي ان

$$T = \frac{(n_0 V) m \bar{v}^2}{3 n R} \quad (3.48)$$

ان $(n_0 V)$ يمثل العدد الكلي للجزيئات في الحجم (V) و n تمثل عدد الجزيئات القرامية (المولات) في الحجم نفسه و $(n N_A)$ تمثل ايضا العدد الكلي للجزيئات في الحجم (V) ، اي ان :

$$n_0 V = n N_A \quad (3.49)$$

فتحصل على

$$T = \frac{2 N_A}{3 R} \left(\frac{1}{2} m \bar{v}^2 \right) \quad (3.50)$$

وبذلك

$$\frac{R}{N_A} = K_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K} \quad (3.51)$$

K_B : يمثل ثابت بولتزمان ، Boltzmann Constant
يمكن التعبير عن درجة الحرارة المطلقة للغاز المثالي بما يأتي :

$$T = \left(\frac{1}{2} m \bar{v}^2 \right) \times \frac{2 N_A}{3 R} = \left(\frac{1}{2} m \bar{v}^2 \right) \left(\frac{2}{3 K_B} \right) \quad (3.52)$$

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

14-3 امثلة محلولة

✓ مثال 1: جد الحجم الذي يشغله جزيي كيلوغراممي واحد من غاز النيتروجين (N_2) تحت الظروف القياسية من ضغط ودرجة حرارة. علماً أن الكتلة الجزيئية للنيتروجين تساوي (28).

الحل:

أن الظروف القياسية من ضغط ودرجة حرارة هي

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

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

وباستخدام قانون الغاز المثالي

$$PV = nRT$$

ولإيجاد الحجم

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

بما أن

$$n = 1 \text{ و } R = 8314$$

$$\therefore V = \frac{8314 \times 273}{1.013 \times 10^5}$$

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

وللجزيي الغراممي (المول) نجد أن

$$V = 0.0224 \text{ m}^3$$

✓ مثال 2: جد قيمة الثابت العام للغازات (R)

الحل:

من قانون الغاز المثالي نجد أن

$$R = \frac{PV}{nT}$$

وبالتعويض عن قيم P و V و T و n الموجودة في المثال السابق نجد ان .

$$R = \frac{1.013 \times 10^5 \times 0.0224}{1 \times 273} = 8.314 \text{ J/mole. K}$$

✓ مثال 3: جد قيمة متوسط سرعة جزيئات الاوكسجين في الهواء في الظروف العيانية من ضغط ودرجة حرارة

الحل

ان الظروف القياسية (العيانية) هي

$$T = 273.15 \text{ K}$$

و

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

وباستخدام المعادلة لاييجاد قيمة (v^2) نجد ان

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

يمكن ايجاد قيمة m لجزيئات الاوكسجين باستخدام الكتلة الجزيئية لغاز الاوكسجين
المساوية الى (32)، اي ان :

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

اي ان

$$m N_A = 32$$

وبالتعويض في المعادلة السابقة :-

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

$$v^2 = \frac{3 \times 8314 \times 273}{32}$$

$$v^2 = 212786.44$$

✓ مثال 4: جد كتلة ذرة الكلور، اذا كانت الوزن الذرية للكلور تساوي (Kg/Kgmole) 35.5

الحل:

$$\frac{\text{الكتلة الذرية}}{\text{عدد افوكادرو}} = \text{الكتلة لكل ذرة كلور}$$

$$\begin{aligned} & \frac{35.5 \text{ Kg/kg mol.}}{6.02 \times 10^{26} \text{ atoms/kg mol.}} \\ &= 5.897 \times 10^{-26} \text{ kg/atom} \\ &= 5.897 \times 10^{-23} \text{ g/atom} \end{aligned}$$

كتلة ذرة الكلور

✓ مثال 5: جد مقدار التغير في الانتروبي عند انصهار مكعب من الثلج كتلته (20g)

درجة حرارة (0°C) ، $\Delta H_{\text{fusion}} = 80 \frac{\text{cal}}{\text{g}}$ ، $\Delta S = ?$

الحل:

يمكن إيجاد كمية الحرارة اللازمة لاصهار الجليد من العلاقة الآتية:

$$Q = mL$$

L: تمثل الحرارة الكامنة لانصهار الجليد في درجة الصفر السيليزي ونساوي 80 cal/g

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

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

$$= 1600 \text{ cal} \times 4.18 \text{ J/cal}$$

$$= 6688 \text{ J}$$

يمكن إيجاد مقدار التغير في الانتروبي عند درجة حرارة الصفر السيليزي من العلاقة الآتية:

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

$$= \frac{6700 \text{ J}}{273 \text{ K}}$$

$$= 24.54 \text{ J/K}$$

$$\Delta S = 24.5 \text{ J/K}$$

حيث تم التعويض عن 0°C بـ 273 K

مثال 6: 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 الاتية

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

اذا كان التغير في درجة الحرارة يساوي صفر فان $\Delta U = 0$ ، اي ان

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

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

وبما ان

$$\Delta S = \int \frac{dQ}{T} = \int_{v_i}^{v_f} \frac{P dV}{T}$$

فان

وباستخدام قانون الغاز المثالي

$$PV = nRT$$

$$n = 1$$

وبما ان

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

وعليه فان

$$\Delta S = \int_{v_1}^{v_2} R \frac{dV}{V} = R \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$\Delta S = R \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$= 8.315 \text{ J/K} \cdot \ln \left(\frac{2 \times 10^3}{10^3} \right)$$

$$\Delta S = 5.764 \text{ J/K}$$

وبساوي مقدار التغير في الانتروبي.

مثال 7 ✓
جد قيمة كل من R و C_p و C_v لغاز الاوكسجين ، اذا علمت ان نسبة C_p الى C_v تساوي 1.40 وكثافة الاوكسجين عند الظروف القياسية تساوي 1.43 Kg/m^3 وضغط جو واحد $= 1.01 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ والكتلة المولية للاوكسجين تساوي $(32 \times 10^{-3} \text{ kg/mol})$

الحل : قانون الغاز المثالي

$$PV = nRT$$

$$PV = RT$$

ونول واحد

ان الحجم V يساوي الحجم المولاري والذي يساوي

$$V = \frac{\text{الكتلة المولية}}{\text{الكثافة}}$$

$$\therefore R = \frac{PV}{T} = \frac{PM_m}{T_0}$$

$$= \frac{1.01 \times 10^5 \times 32.0 \times 10^{-3} \text{ Nm}^{-2} \text{ kg mol}^{-1}}{273 \times 1.43 \text{ K kg m}^{-3}}$$

$$R = 8.31 \text{ J/mol K}$$

$$C_p - C_v = 8.31$$

$$\frac{C_p}{C_v} = 1.40$$

$$C_p = 1.40 C_v$$

وللغاز المثالي نكون

.....(1)

ولكن

.....(2)

وبالتعويض عن (2) في (1) نحصل على

$$1.40 C_v - C_v = 8.31$$

$$\therefore C_v (1.40 - 1) = 8.31$$

$$0.40 C_v = 8.31$$

$$\therefore C_v = \frac{8.31}{0.40} = 20.8 \text{ J/mol}$$

وعليه فان C_p تساوي

$$C_p = 20.8 + R$$

$$= 20.8 + 8.3 = 29.1 \text{ J/mole. K}$$

15-3 مسائل الفصل الثالث

- 1- جد قيمة كتلة الجزيء الواحد من ثنائي اوكسيد الكربون (CO_2) والاكسجين (O_2) والنروجين (N_2) مع العلم ان الكتلة الذرية للكربون C والاكسجين O والنروجين هي 12 و 16 و 14 على التوالي.
- 2- جد كتلة النروجين التي يحتويها خزان سعته 5 لتر عند درجة حرارة مقدارها (30°C) وضغط مقداره 40 جو؟
- 3- كان ضغط الهواء في اطار سيارة عند درجة حرارة (-5°C) يساوي 32 psi باور لكل إنج مربع ماهي قيمة الضغط اذا ارتفعت درجة حرارة الاطار الى 30°C بقاء حجم الاطار ثابتا.
- 4- تعرض الغاز الموجود في مكبس فجأة عندما كانت درجة حرارته 30°C وضغطه 75 cm الى قيمة نهائية للضغط هي 3900 cmHg ودرجة حرارة نهائية 43°C جد قيمة الحجم النهائي للغاز بدلالة حجمه الابتدائي.
- 5- أغلق وعاء عند درجة حرارة 27°C وضغط جوي ابتدائي مقداره (1 جو). جد قيمة الضغط النهائي اذا ارتفعت درجة حرارة الوعاء الى 100°C .
- 6- في يوم بارد كانت درجة الحرارة (10°C) وكان ضغط اطار مركبة يقرأ 2.5 جو. وبعد رحلة طويلة ارتفعت درجة حرارة الاطارات مما ادى الى ارتفاع الضغط في الاطارات الى 3.5 جو. جد قيمة درجة حرارة الاطارات بعد انتهاء الرحلة.
- 7- جد قيمة كثافة الهواء (Kg/m^3) تحت الظروف القياسية، علماً بأن معدل الكثافة الجزيئية للهواء حوالي 29.0 غرام .مول
- 8- جد جنس معدل مربع سرعة جزيئات غاز النروجين في هواء عند الظروف القياسية
- 9- جد قيمة الطاقة الحركية الحرارية لواحد كيلوغرام (1Kg) من غاز الهيليوم تحت الظروف القياسية.
- 10- عند وضع (10g) من الماء المقطر في كبسولة صلبة جداً حجمها (1 لتر) واطاها باحكام، ثم وضعت الكبسولة في فرن وسخنت الى درجة حرارة (400°C). جد قيمة ضغط بخار الماء داخل الكبسولة.
- 11- يتكون الهواء من غاز النروجين والاكسجين والاركون. اي من جزيئات الغازات تملك اعلى معدل سرعة واي منها يملك اقل معدل سرعة؟
- 12- اذا تضاعفت درجة الحرارة المطلقة لغاز ما. جد مقدار الارتفاع في معدل السرعة لجزيئات هذا الغاز

- 13- عرف ما يأتي :-
 قانون بويل - الغاز المثالي - معادلة فاندر فالز - الغاز الحقيقي - الحرارة النوعية للغاز -
 الانتروبي - الطاقة الداخلية للغاز - عدد أفوگادرو - النظرية الحركية للغازات -
 القانون العام للغازات.

14- اشتق ما يأتي :

- 1- العلاقة بين C_p و C_v .
 $du = c_v dt$
 $du = \frac{3}{2} R dt$
 2- الشغل المنجز بواسطة الغاز.
 3- الطاقة الداخلية للغاز.

$$dw = f \cdot dx$$

- 15- ماهي اهم فرضيات النظرية الحركية للغازات.
 $pv = \frac{1}{3} Nmv^2$ $pv = Nk_B T$
 16- جد وحدات الكميات الفيزيائية الآتية :

الحرارة النوعية - ثابت الغاز - عدد أفوگادرو - الضغط الشغل - الانتروبي -

الحجم - درجة الحرارة.

$$\frac{J}{kg \cdot K}$$

$$\frac{m^3}{cm^3}$$

الفصل الرابع

السوائل

The Liquids

المقدمة

تتميز الحالة السائلة للمادة عن الحالة الصلبة والغازية بامتلاكها للحجم الثابت والشكل المتغير، إذ تأخذ شكل الوعاء الذي توضع فيه. تكون قوى الترابط بين جزيئات السائل أقل كثيراً مما هي عليه في الحالة الصلبة، وبناء على ذلك فإن السوائل لا تظهر مقاومة للأجهاد المسلط عليها.

يتناول هذا الفصل دراسة الخواص الأساسية للسوائل مثل الخاصية الشعرية والسطحي واللزوجة، فضلاً إلى دراسة ميكانيك السوائل الساكنة وميكانيك السوائل حالة الجريان المتظم أو الانسيابي، وبعض القواعد الأساسية مثل قاعدة أرخميدس وقاعدة باسكال وبعض التطبيقات العملية لاستخدام السوائل.

خواص السوائل

1-4 الكثافة

The density (ρ)

الكثافة الكتلية: وتعرف على أنها كتلة وحدة الحجم.

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

4.1

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

ووحدة الكثافة الكتلية في النظام العالمي (SI) هي الكيلوغرام لكل متر مكعب (kg/m^3) أو غرام لكل سنتيمتر مكعب (g/cm^3) أي (كغم/م^3 أو غم/سم^3). ان كثافة الماء عند درجة حرارة 4°C هي 1 غم/سم^3 أو 10^3 كغم/م^3 وكثافة الزئبق عند درجة حرارة الغرفة تساوي 13.6 غرام/سم^3 أو $13.6 \times 10^3 \text{ كغم/م}^3$... (علماً أن $1 \text{ kg/m}^3 = 10^3 \text{ g/cm}^3$) يكون اعتماد الكثافة على الضغط ضعيفاً جداً.

تتغير كثافة المادة بتغير درجة حرارتها. والسبب في ذلك يعود إلى ان جزيئات المادة تتباعد كلما تزداد درجة حرارة المادة، وعليه فان معدل المسافة بين الجزيئات

سوف يزداد، أي أن كتلة المادة ستحتل حجماً أكبر مما يؤدي إلى تغير الكثافة بتغير درجة الحرارة. وبصورة عامة تقل كثافة المواد بارتفاع درجة حرارتها (ماعدا 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 إلى 4°C . انظر الجدول (4.1) الذي يبين كثافة بعض المواد المعروفة كذلك يبين الجدول (4.2) اعتماد كثافة الماء على درجة الحرارة. * ماعدا الماء كلما ارتفع درجة الحرارة تزداد الكثافة.

الجدول (4.1): كثافة بعض السوائل المعروفة

المادة	الكثافة الكتلية غم/سم ³
الماء	0.998
البترين	0.879
الزئبق	13.6
ماء البحر	1.025

الجدول (4.2): كثافة الماء ودرجة الحرارة

المادة	الكثافة الكتلية غم/سم 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
النفط الخام عند 15°C	1.025
النفط الخام عند 15°C	0.875
الكازولين عند 15°C	0.739

على مادة تعتمد كثافة المادة على عاملين رئيسيين وهما:

- 1- كتلة الذرات أو الجزيئات
- 2- المسافة البينية بين الذرات والجزيئات.

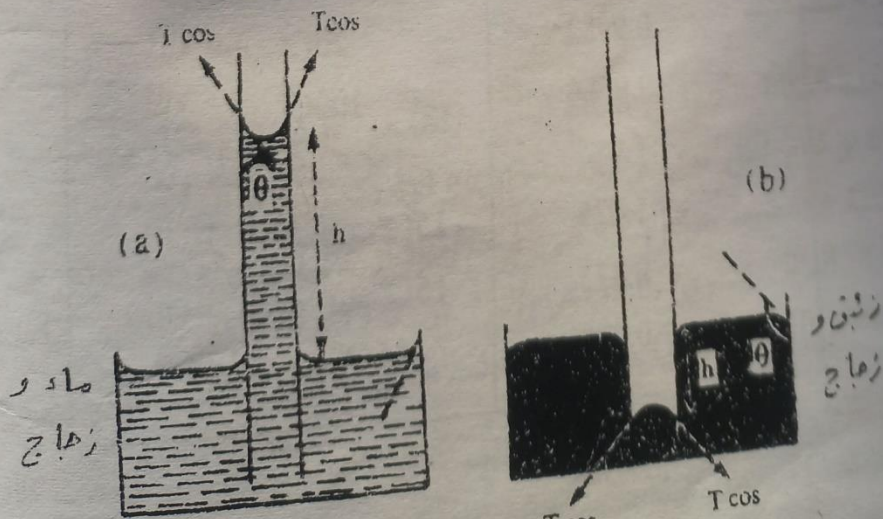
مثال ذلك الحديد والالمنيوم، اذ نجد ان نسبة كثافة الحديد (7.9 غم/سم³) الى كثافة الالمنيوم (2.7 غم/سم³) هي (2.9). بينما نجد ان نسبة العدد الذري للحديد (56) الى العدد الذري للالمنيوم (27) هي أكثر من (2) بقليل. فاذا كانت المسافة بين الذرات هي نفسها للمادتين فستكون نسبة كثافة الحديد الى الالمنيوم هي الضعف وهذا يدل على ان ذرات الحديد تكون متقاربة أكثر مما تكون عليه ذرات الالمنيوم.

The Capillarity

2-4 الخاصية الشعرية

عند وضع انبوب شعري مفتوح الطرفين في سائل، فان تأثير الشد السطحي للسائل سيؤدي الى احدي الحالتين الآتيتين:-

- 1- ارتفاع السائل في الانبوب الشعري، في حالة صنع السائل زاوية جادة (أقل من 90°) مع سطح الانبوب الشعري. مثال ذلك الماء الذي يرتفع داخل الانبوب الشعري الى ارتفاع معين فوق سطحه الخارجي. كما في الشكل (4.1a).
- 2- انخفاض السائل في الانبوب الشعري، في حالة صنع السائل زاوية منفرجة (أكثر من 90°) مع السطح الداخلي للانبوب الشعري. مثال ذلك الزئبق الذي ينخفض داخل الانبوب الشعري الى مستوى معين تحت سطحه الخارجي. كما في الشكل (4.1b).



الشكل (4.1): الخاصية الشعرية للماء والزئبق

ان ارتفاع السائل أو انخفاضه داخل الانابيب الشعرية يعتمد على محصلة القوة بين قوى التماسك بين جزيئات السائل وقوى التلاصق بين جزيئات السائل وجزيئات سطح الأنبوب الشعري فيعزى ارتفاع الماء داخل الانابيب الشعرية الى تغلب قوى التلاصق على قوى التماسك ، اي ان محصلة القوى ستكون نحو الاعلى فتؤدي الى ارتفاع جزيئات السائل داخل الأنبوب 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 الأنبوب الشعري عن مستواه خارج الانبوبة. تستمر عملية ارتفاع جزيئات الماء داخل الانبوبة الشعرية الى ان يحصل التوازن بين مركبة محصلة القوى المتجهة نحو الاعلى (ولتكن F) مع وزن عمود السائل (وليكن w) (والذي ارتفاعه h) ، والمتجه بصورة عمودية نحو الاسفل.

3-4 الشد السطحي (الخاص بارتفاع الحرارة يقل السطح) The Surface Tension

من خواص السوائل المهمة ميل سطحها للتقلص من أجل الحصول على أقل مساحة سطحية ممكنة ، ونظراً لامتلاك الكرة أقل مساحة سطحية لأي حجم معين من المادة ، لذلك تكون قطرات المطر الساقطة خلال الهواء كروية الشكل تقريباً. وللأسف نفسه تمتلك فقاعات الهواء في الماء وقطرات الزئبق الصغيرة شكلاً كروياً أيضاً. ان عدم امتلاك القطرات الكبيرة للماء والزئبق شكلاً كروياً تماماً (بل شكلاً مفلطحاً) يرجع الى تأثير وزن المادة فيها. وفضلاً عما تقدم فان هناك كثيراً من الظواهر المألوفة في السوائل مثل تخطب سطح الماء في دوزق صغير مملوء بالماء بأكثر من سعته قليلاً وعدم انسكابه وطفو بعض القطع المعدنية كالإبرة وشفرة الحلاقة الجاثمين على سطح الماء الساكن وقوف او سباحة بعض الحشرات على سطح الماء من دون ان تغطس في الماء على الرغم من ان كثافة هذه الاجسام تفوق كثيراً كثافة الماء. وهناك أيضاً 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 نيوتن لكل m (N/m) او داين/سم (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 لتبقى الدهنية بتأثير الحرارة وتنفذت

* تلك البقع. (أن وجود الشد السطحي يدل على أن الجزيئات القريبة من السطح تكون متباعدة عن بعضها البعض أكثر من الجزيئات الواقعة داخل السائل). الجدول (4.3) يبين قيم الشد السطحي لبعض السوائل.

الجدول (4.3): الشد السطحي لبعض السوائل

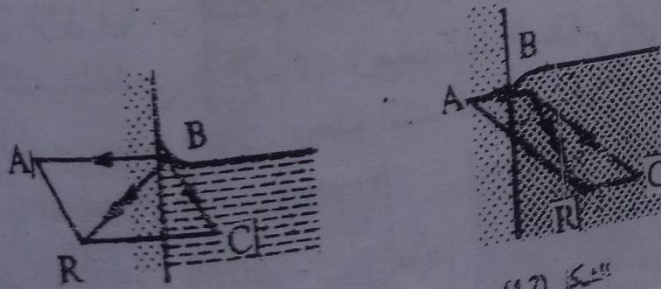
المادة	الشد السطحي (N/m) 10^{-3}
الزئبق	465
الماء عند 4°C	73
زيت الزيتون	32
البترين	29

4-4 سطح السائل

Liquid Surface

يكون سطح السائل الساكن عمودياً على القوة المؤثرة عليه. وخلاف ذلك يعني وجود مركبة لهذه القوة موازية للسطح وتسبب حركة السائل. وبصورة عامة يكون سطح السائل أفقياً، أي يصنع زاوية قائمة مع قوة الجاذبية. بينما ينحني سطح السائل عند اتصاله بسطح الأجسام الصلبة. إذا درسنا الشكل رقم (4.22) الذي يمثل نقطة اتصال السائل بـ سطح صلب. أن الجزيئات عند النقطة (A) تتعرض لثلاث قوى وهي:

- 1- قوى التماسك مع جزيئات السائل نفسها المجاورة لها والتي تحاول أن تشدها إليها.
- 2- قوى التلاصق بين جزيئات السائل وجزيئات السطح الصلب.



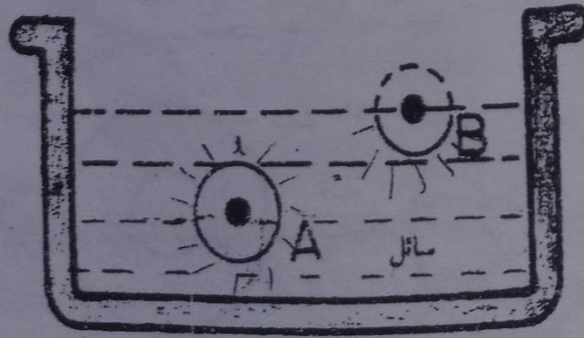
الشكل (4.2): سطح السائل عند جنار الاناء

فإذا كانت قوى التلاصق أكبر من قوى التماسك فإن محصلة القوتين ستؤثر بالاتجاه المؤثر نحو السطح الصلب ، وبما أن سطح السائل عند النقطة (A) يجب أن يكون عمودياً على اتجاه هذه القوة ، إذاً يجب أن يتخذ سطح السائل شكلاً منحنياً نحو الأعلى ويستمر السائل بالصعود إلى أن تتساوى محصلة القوى مع قوى جزيئة تؤثر بالاتجاه المعاكس. أما في النقاط الواقعة بعيداً عن السطح الصلب فإن قوى التلاصق تضعف ومحصلة القوى تكون عمودية تقريباً مما يجعل سطح السائل أفقياً تقريباً.

أما إذا كانت قوى التماسك أكبر من قوى التلاصق فإن محصلة القوى ستؤثر بالاتجاه المين في الشكل (4.2b) وبما أن السطح يجب أن يكون عمودياً على محصلة القوى فإنه سطح السائل سينحني نحو الأسفل مع السطح الصلب كما هي الحالة في الزئبق.

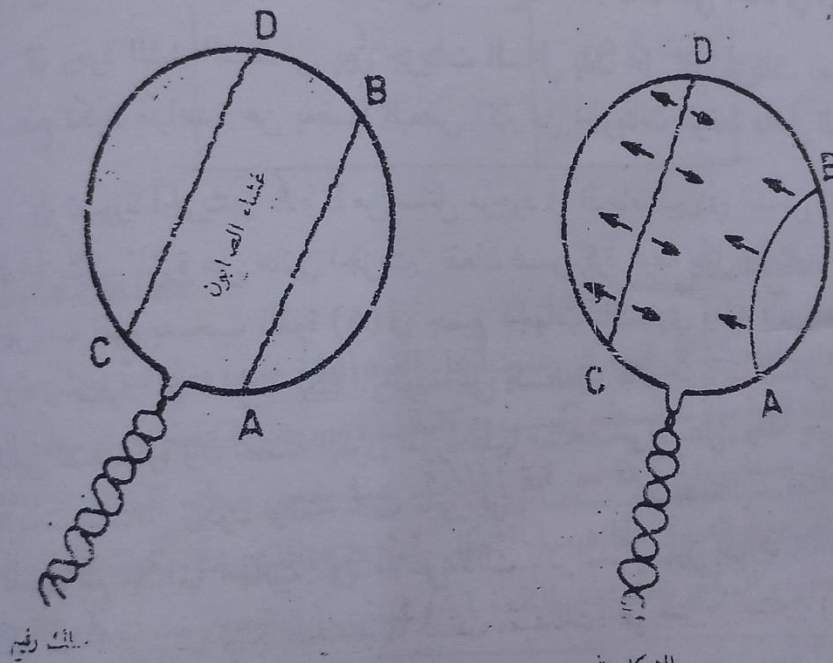
أن وجود الشد السطحي بين جزيئات السائل يدل على أن الجزيئات القريبة من السطح تكون متباعدة عن بعضها البعض أكثر من الجزيئات الواقعة داخل السائل.

ولو تصورنا الجزيئتين A و B من سائل موجود في الوعاء المبين في الشكل (4.3). نجد أن الجزيئات المؤثرة على هاتين الجزيئتين تقعان ضمن كرة محيطة بكل جزيئة ، إذاً هذه الجزيئات تقوم بسحب الذرة (A) في جميع الجهات بالتساوي وعليه فإن محصلة القوى ستكون صفراً. أما الجزيئة (B) الموجودة على السطح ، فإن جزيئات السائل المؤثرة تقع ضمن نصف كرة وأن محصلة القوى المؤثرة عليها مستتجة نحو الأسفل. وهذا يعني أن جميع جزيئات السائل تكون واقعة تحت تأثير قوى سحب نحو الأسفل ، فضلاً عن قوى التماسك مع جاراتها الجانبية. وبناءً على ذلك فإن السائل يميل إلى أن يمتلك أعلى عدد ممكن من الجزيئات في سطحه وبما أن ذلك سيعتلك أقل مساحة سطحية ممكنة.

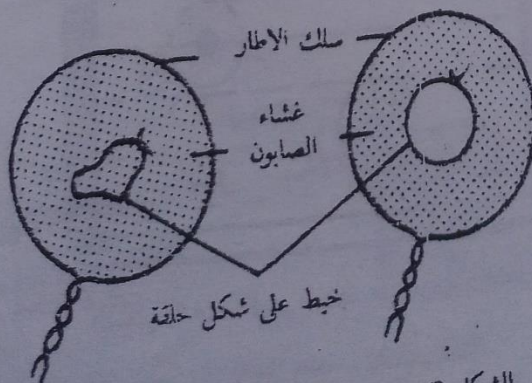


الشكل (4.3): القوى السطحة على جزيئات السائل

ومن الجدير بالذكر ان الشد السطحي يؤثر وبصورة متساوية على جهتي اي خط يقع في سطح السائل ، وان تأثير الشد السطحي يظهر جلياً فقط عندما يزال السائل من احدى جهتي ذلك الخط. فلو أخذنا حلقة من سلك معدني وربطنا خلالها خيطين دقيقين وغمرنا تلك الحلقة في محلول الصابون لغرض تكوين غشاء الصابون خلال الحلقة ، انظر الشكل رقم (4.4). فاذا نُقِبَ الغشاء في إحدى جهات الخيطين ، وانكسر الخيط (AB) ، فان الخيط سيُسحَب بقوة الى الداخل مكوناً جزءاً من الجهة اليمنى من الخيط (AB) ، فان الخيط الآخر (CD) بدون اي تأثير ، ومن دون ان يسقط عليه اي محيط دائرة. بينما يبقى الخيط الآخر (CD) بدون اي تأثير ، ومن دون ان يسقط عليه اي شدة ، لان القوى المسلطة على جهتيه تبقى نفسها متعادلة ومتعاكسة ، اي ان الخيط (AB) قد سُلِطَ عليه قوى من جهة واحدة فقط. وتنطبق القاعدة نفسها على الشكل (4.5).

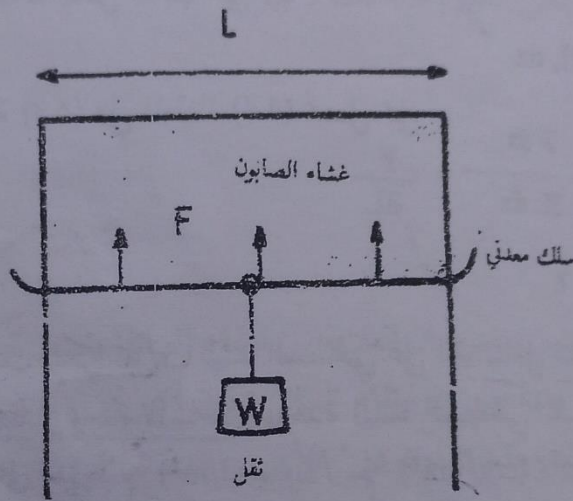


الشكل (4.4): توضيح لظاهرة الشد السطحي



الشكل (4.5): توضيح لظاهرة الشد السطحي

أما إذا أخذنا إطاراً من سلك معدني مستطيل الشكل طوله (L)، صمم أحد أضلاعه بحيث يمكن تحريكه كما في الشكل (4.6)، وغطس هذا الإطار في محلول الصابون لتكوين غشاء الصابون. فإن هذا الغشاء يكون كبيراً مقارنة بالأبعاد الجزيئية للسائل، وعليه يمكن تصور غشاء الصابون وكأنه سائل محصور بين سطحين المسافة بينهما تحتوي على بضعة أبعاد جزيئية، ولذلك فإذا ما تم سحب السلك المتحرك فإن مساحة غشاء الصابون سيزداد في المساحة وسيقل في السمك وذلك بسبب انتقال قسم من جزيئات السائل الداخلية إلى سطحي الغشاء الجديد.



الشكل (4.6): قوة الشد السطحي

أن الطول الذي تؤثر فيه قوة الشد السطحي يساوي ضعف طول الإطار المعدني أي (2L) ولأن قوة الشد السطحي تؤثر بصورة عمودية على السطح المماس لسطح السائل فإنه يمكن تعريف معامل الشد السطحي (γ) على أن:

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

4.2

وتعبير آخر فإن معامل الشد السطحي يمثل القوة المؤثرة عمودياً على وحدة الطول واتجاه تماس لسطح السائل. وبما أن الشد السطحي يؤثر بصورة متساوية على جهتي أي خط في سطح السائل بحيث ينتج عنه شد في السطح، وهذه الحقيقة تبدو واضحة للعيان، عندما يزال غشاء السائل من إحدى جهتي الخط المذكور، وبناءً على ذلك فإن غشاء السائل سوف يسحب السلك المتحرك نحو الأعلى مما يتطلب تسليط ثقل لأجل تثبيت السلك في مكانه.

يمكن دراسة موضوع الشد السطحي من وجهة نظر أخرى. فإذا فرضنا أن القوة المسلطة على السلك تساوي (F)، نستطيع تحريك السلك مسافة مقدارها (dx)، وبذلك تنجز شغلاً مقداره (dW)، أي أن:

$$1. dW = F dx$$

..... 4.3

إذا فرضنا أن كثافة السائل = ρ والشد السطحي γ وزاوية التماس θ ومقدار ارتفاع السائل داخل الأنبوبة الشعرية h ونصف قطر الأنبوبة الشعرية r . أن تحريك السلك مسافة مقدارها (dx) معناه زيادة مساحة الغشاء بمقدار (dA). أن الزيادة في المساحة يمكن كتابتها على أنها:

$$2. dA = 2L dx$$

..... 4.4

وبقسمة المعادلة (4.3) على المعادلة (4.4) نحصل على

$$3. \frac{dW}{dA} = \frac{F dx}{2L dx} = \frac{F}{2L}$$

$$\frac{dw}{dA} = \gamma \quad \text{..... (4.5)}$$

وبناء على ذلك يمكن تعريف الشد السطحي على أنه الشغل اللازم لزيادة مساحة سطح السائل بمقدار وحدة المساحة. ووحدة الشد السطحي بحسب هذا التعريف ستكون مساوية إلى جول / م² (J/m²) أو ارك / سم² (erg/cm²). أن وحدات التعريفين تكون متكافئة.

يمكن إيجاد محصلة قوى الشد السطحي المتجهة نحو الأعلى وذلك كما يأتي :-
أن مركبة قوة الشد السطحي المؤثرة على وحدة الطول، أغشاء السائل الملاصق لجدران الأنبوبة وتنتجها نحو الأعلى عن طريق الشد السطحي (T cos θ) تساوي (T cos θ). أن محصلة القوى الكائنة يمكن إيجادها من حاصل ضرب (T cos θ) في المسافة الكائنة المساوية لمحيط الأنبوبة الداخلي والذي يمثل الطول الكلي لسطح السائل الملاصق للأنبوبة التي نصف قطرها والذي يساوي $2\pi r$ أي أن

..... 4.6

$$F = (T \cos \theta) \times 2\pi r$$

وزن عمود السائل (w) فيمكن إيجادها إذا علمنا بأن حجم السائل الصاعد يساوي $\pi r^2 h$ وأن كثافته تساوي ρ أي أن

..... 4.7

$$w = \rho g \pi r^2 h$$

ولكي نحصل حالة التوازن ويتوقف السائل عن الصعود داخل الأنبوبة الشعرية يجب أن يكون

$$w = F$$

$$\pi r^2 h \rho g = T \cos \theta \quad 2\pi r$$

$$T = \frac{r \rho g h}{2 \cos \theta}$$

اي ان

..... 4.8

وفي حالة الماء المقطر والزجاج النظيف تكون زاوية التماس صفراً (أو قريبة جداً من الصفر) وعليه يمكن اعتبار $\cos \theta = 1$ ، أي ان

$$T = \frac{r \rho g h}{2}$$

..... 4.9

$$h = \frac{2T}{\rho g r}$$

اي ان

والمعادلة الأخيرة تبين بوضوح ان العلاقة بين ارتفاع السائل ونصف قطر الأنبوبة الشعرية علاقة عكسية، وهذا يعني ان ارتفاع السائل تكون أكبر في الأنابيب التي يكون نصف قطرها اصغر. تنطبق هذه المعادلة على الأنابيب الشعرية الدقيقة.

أما الزئبق فإن قوى التماسك بين جزيئاته تفوق قوى التلاصق بين جزيئاته وسطح الزجاج مما يؤدي الى انخفاض الزئبق داخل الأنبوبة عن مستوى خارجها. مما يتيح عنه ان تكون زاوية التماس أكبر من 90 (زاوية منفرجة)، ويكون المقدار $\cos \theta$ سالبا، أي تكون قيمة $\cos \theta$ سالبة.

4-5 زاوية الاتصال (زاوية التماس) (6) The Angle of Contact

نعرف 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- يضع السائل زاوية حادة مع السطح الصلب، كما في الشكل (4.7a). وهي الحالة التي تنطبق على الماء وسطح الزجاج.

2 - يصنع السائل زاوية منفرجة مع السطح الصلب ، كما في الشكل (4.7b).

الحالة التي تنطبق على الزيت و سطح الزجاج .
3 - تصنع بعض السوائل زاوية مفداها صفراً مع بعض السطوح الملساء والنظيفة جداً كما في الشكل (4.7c). وهي حالة تنطبق على الماء وبعض السوائل العضوية تلامسها مع سطح زجاجي نظيف جداً.

في الحالة الأولى تكون قوة التلاصق أكبر من قوة التماسك مما يؤدي إلى انتشار جزئيات السائل والتصاقها بالسطح الصلب.



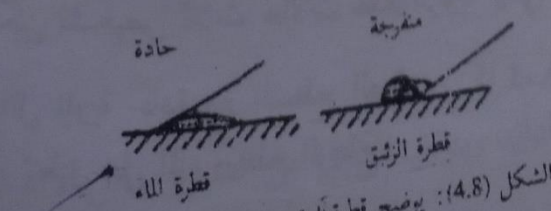
(a) تلامس < تلامس (b) تلامس < تلامس (c) تلامس < تلامس

الشكل (4.7): يوضح زاوية التصاق السائل مع السطح المجاور

وفي الحالة الثانية يحدث العكس إذ تكون قوة التلاصق أصغر من قوة التماسك يؤدي إلى تكوين السطح المحدب وتجمع الجزئيات وابتعادها عن السطح الصلب بدلاً الانتشار والتصاق به.

أما في الحالة الثالثة فتكون قوة التلاصق كبيرة جداً عند مقارنتها مع قوة التماسك يؤدي إلى انتشار السائل وتكوين غشاء رقيق من الجزئيات مواز تقريباً إلى السطح الصلب في هذه الحالة.

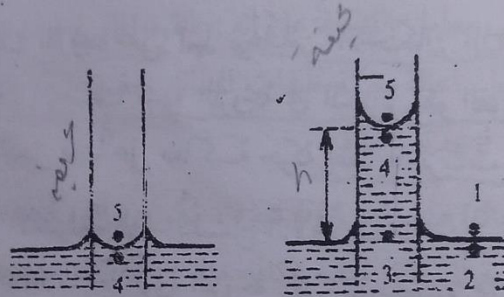
يوضح الشكل (4.8) قطرتين إحداهما من الماء والأخرى من الزيت على سطح أملس إذ نجد أن قطر الماء تقلطع وتحاول الانتشار على السطح الصلب ، بينما قطرة الزيت تحاول التجمع وعدم الانتشار على السطح الصلب . فالسوائل التي تصنع زاوية حادة على السطح الصلب يقال: بأنها تبلل السطح ، بينما السوائل التي تصنع زاوية منفرجة يقال بأنها لا تبلل السطح المذكور.



الشكل (4.8): يوضح قطرة الماء وقطرة الزيت على السطح الأملس

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 إلى 140° مما يؤدي إلى تكوين قطرات الزئبق بدلاً من الانتشار على السطح المذكور.

عند وضع الأنبوب الشعري في السائل نجد أن انحناء السطح (الشكل 4.9) يجعل الضغط عند النقطة 4 أقل من الضغط الجوي عند النقطة 5 ، مما يدفع السائل إلى الارتفاع في الأنبوب الشعري لأجل معادلة الضغط عند النقطتين . أفرض أن 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 4.9) وعند تحقيق تعادل الضغط يكون :



الشكل (4.9) : الشد السطحي

$$P_1 = P_2 \quad \text{4.10} \quad \text{ترك}$$

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

$$P_1 = P_2 = P_3 \quad \text{4.11}$$

أي أن :

$$= P_4 + \rho gh \quad \text{4.12}$$

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

$$P_5 = P_4 + \frac{2\gamma}{r} \quad \gamma = \frac{F}{2L} \Rightarrow P_5 = P_4 + \frac{F}{2r} \quad \text{4.13}$$

حيث أن r تمثل نصف قطر الأنبوبة الشعرية .
ولكن قيمة الضغط عن النقطتين 1 و 5 متساويتان لأن يمثلان الضغط الجوي . أي أن

$$P_3 = P_1$$

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

$$\gamma = \frac{\rho ghr}{2}$$

$$h = \frac{2\gamma}{\rho gr}$$

..... 4.14

..... 4.15

أو

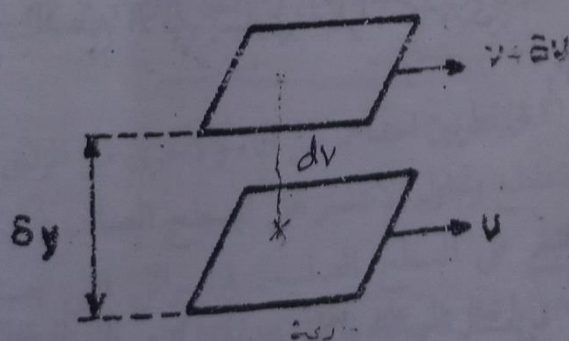
..... 4.16

Viscosity (η)

4-6 اللزوجة

يمكن وصف اللزوجة على أنها نوعاً من الاحتكاك الداخلي التي تظهرها المواد بدرجات متفاوتة. إن سبب نشوء اللزوجة في السوائل هو القوى الداخلية بين جزيئات السائل، والتي تعمل دائماً على معاكسة حركة بعض الجزيئات نسبة إلى البعض الآخر. إن الجريان الانسيابي للمائع يتضمن انزلاق طبقات متوازية من السائل بعضها على بعض بسرعات مختلفة متجهة قوى اللزوجة التي تؤثر بصورة مماسية بين الطبقات مسـ حركتها.

فإذا تصورنا طبقتين مستويتين متوازيتين من سائل تفصلهما مسافة صغيرة (δy) وتحركان بالسرعتين (v) و ($v + \delta v$) كما في الشكل (4.10).



الشكل (4.10): طبقات السائل

إن انحدار السرعة (أي التغير في السرعة نسبة إلى المسافة) في الاتجاه العمودي على السطح يساوي $\left(\frac{dv}{dy}\right)$.

أن أنة طبقة من السائل تسلط قوة مماسية معرقله (retarding) على الطبقة المجاورة الواقعة الى الأعلى منها ، كما وانها في الوقت نفسه تعاني من قوة مماسية معاكسة ومساوية لها في المقدار (F) من قبل الطبقة العليا نفسها .

ان الاجهاد المماسي بين الطبقات يمكن التعبير عنها بـ (F/A) ، اذ تمثل A مساحة التماس بين الطبقات وعليه يمكن التعبير عن معامل اللزوجة (η) بالعلاقة الآتية :

$$\eta = \frac{\text{الاجهاد المماسي}}{\text{انحدار السرعة}} = \frac{F/A}{(\delta v / \delta y)} \quad \dots\dots\dots 4.17$$

وعليه يمكن تعريف معامل اللزوجة على انه : القوة المماسية لوحدة المساحة من المائع والتي تقاوم أو تعمل على اعاقه حركة طبقات السائل بعضها فوق بعض ، عندما يكون انحدار السرعة مساوياً لوحدة واحدة .

عندما تكون (dv/dy) صغيرة و F/A كبيرة ، تكون (η) كبيرة ويكون المائع لزجاً جداً هناك حالات خاصة للسوائل النقية (كالماء مثلاً) والغازات تكون فيها معامل اللزوجة η مستقلاً (غير معتمد) على انحدار السرعة عند درجة حرارة معينة ، اي ان η تكون ثابتة وستتناسب الاجهاد المماسي تناسباً طردياً مع انحدار السرعة . ان الموائع التي يتحقق فيها ما مر سابقاً تسمى الموائع النيوتنية (Newtonian fluids) .

أما النوع الآخر من الموائع مثل الصبغ واللواصق والسمنت السائل فإن معامل اللزوجة لها يتناسب عكسياً مع الاجهاد المماسي ، هذه الموائع تسمى بـ ثنويات (thixotropic) وقد برهنت التجارب العملية على ان معامل لزوجة السائل تقل بصورة فجائية مع ارتفاع درجة الحرارة .

The pressure in liquids (P).

7-4 الضغط في السوائل

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 ، اي ان

$$P = \frac{\Delta F}{\Delta A}$$

..... 4.18

ووحدة الضغط في النظام العالمي للوحدات (SI) هي النيوتن لكل متر مربع (N/m^2). ويطلق على هذه الوحدة أحياناً باسكال Pascal واختصاراً يرمز لها بـ (Pa). ويقاس الضغط أيضاً بدلالة الجو atmosphere ويرمز لها بـ (atm)، إذا أن

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

كما يرمز للضغط بارتفاع عمود الزئبق الذي كثافته (13.6 g/cm^3)، وبكافيء الضغط الجوي عند سطح البحر (76 سم زئبق)، (76 cmHg). أما الضغط الوطني فيقياس بوحدات مثل المليمتر زئبق (mmHg) والتي تسمى أحياناً بالـ (torr). حيث أن

$$1 \text{ mmHg} = 1 \text{ torr}$$

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

وتستخدم أيضاً وحدة البار (bar) أو الملي بار mbar، إذا أن

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

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

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

فإذا أخذت نقطة على عمق h سم في سائل كثافته ρ غم/سم³. أن القوة التي يؤثر بها السائل على مساحة مقدارها (A) تلك النقطة تساوي

$$F = Ah\rho g \quad \text{dyne}$$

ويكون الضغط (أو القوة لوحدة المساحة) تساوي:

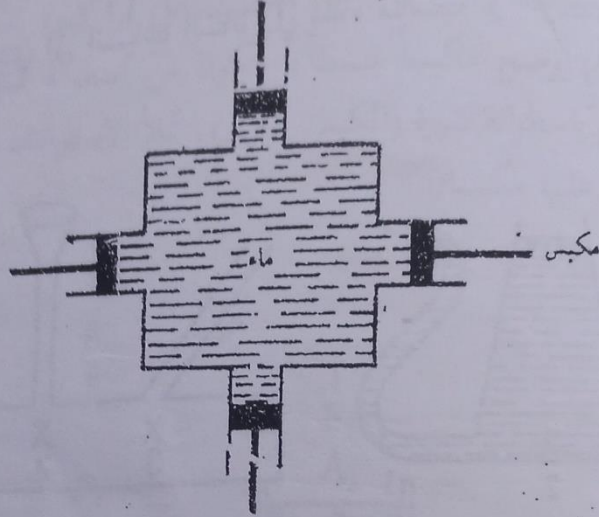
$$P = \frac{F}{A} = \rho gh$$

dyne/cm²

يتقل الضغط المسلط على سائل محصور في وعاء مغلق إلى جميع أنحاء السائل بالتساوي.

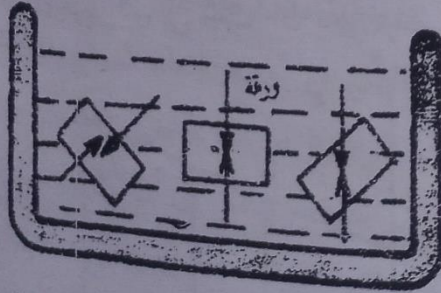
ويمكن إثبات هذه الحقيقة تجريبياً، وذلك إذا أخذنا وعاء مغلقاً يحتوي على عدد من المكابس مملوء بالماء كما في الشكل رقم (4.11). فإذا كانت مساحة هذه المكابس متساوية

ورقاعة على نفخ العمق. وسلطت قوة على احد هذه المكابس ، فإذن قوى متساوية
يجب ان تسلط على المكابس الأخرى من أجل المحافظة عليها في نفس أماكنها ، أي ان
 $F_1 = F_2 = F_3 = F_4$



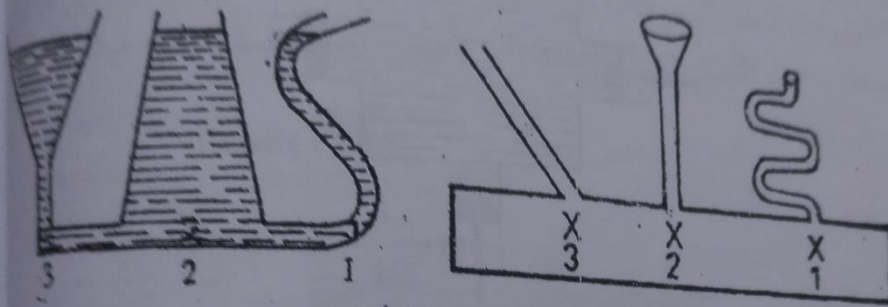
الشكل (4.11) : انتقال الضغط في السوائل

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 ينطوي أو يتكسر 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 أو اتجاه الورقة داخل السائل. انظر الشكل (4.12). وعليه فان ضغط
السائل في نقطة معينة يجب ان يكون متساوياً في جميع الاتجاهات.



الشكل (4.12) : يؤثر الضغط في جميع الاتجاهات داخل السائل

يكون الضغط واحداً عند جميع النقاط الواقعة على عمق معين للسطح ، وهذا الضغط يؤثر على أية نقطة وأي سطح على هذا العمق مهما كان اتجاهه . ومثال على ذلك تكون النقاط 1 و 2 و 3 تحت نفس الضغط شكل رقم (4.13) . ان الاختلال في الضغط بين نقطة وأخرى يؤدي الى انسياب السائل في اتجاه مناسب أو آخر الى ان يأخذ سطح السائل شكلاً أفقياً .



الشكل (4.13) : يتساوى الضغط عند العمق الواحد

افرض ان سطح السائل ليس أفقياً كما في الشكل (4.14) ولتكن النقطتان 1 و 2 داخل السائل عند المستوى الأتقي نفسه فاذا كانت h_1 و h_2 تمثلان ارتفاع السائل في النقطتين (1) و (2) على التوالي ، فان الضغط المسلط على النقطة (1) والنقطة (2) سيكون متساوياً الى pgh_1 و pgh_2 على التوالي . هذان الضغطان يجب ان يكونا متساويين والآلة

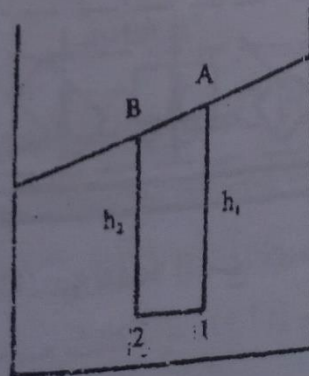
$$p_1 = p_2$$

$$\rho gh_1 = \rho gh_2$$

$$h_1 = h_2$$

أو

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

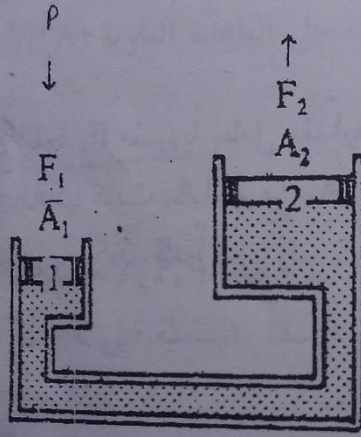


الشكل (4.14) : سطح السائل الأتقي

8-4 قاعدة باسكال

Pascal Principle

يستطيع السائل ان ينقل الضغط الخارجي المسلط عليه الى جميع اجزائه . وقد تم استغلال هذه الخاصية في عمل الاجهزة التي تعمل بالضغط مثل الرافعات والمكابس الهيدروليكية وغيرها ، وذلك من اجل الحصول على قوة كبيرة باستخدام قوة صغيرة . الشكل (4.15) يوضح مكبساً بسيطاً ، يتكون من اسطوانة صغيرة القطر (المكبس الصغير) تتصل باسطوانة كبيرة (المكبس الكبير) . تملأ الاسطوانتان بسائل (غالباً ما يكون الزيت) يثبت عليها مكبسان .



الشكل (4.15) : قاعدة باسكال

فإذا فرضنا ان A_1 و A_2 تمثلان مساحتي مقطع المكبسين . فإذا لم تؤثر على المكبسين اية قوى ، فان سطح السائل في الأنبوبين سيكون عند نفس الارتفاع (بشرط اهمال وزن المكبسين) . وعندما تؤثر قوة خارجية مقدارها F_1 على المكبس 1 فان المكبس 2 سوف يدفع الى الاعلى ما لم تؤثر عليه قوة مقدارها F_2 . ان اية قوة مؤثرة على المكبس 1 يجب ان تعادل بقوة مساوية لها في التأثير في جميع انحاء السائل ، لان عدم تحقيق ذلك سيؤدي الى انسياب السائل . وهذا الموضوع صاغته قاعدة باسكال التي تنص على انه : إذا سلط ضغط على سائل محصور فان الضغط ينتقل الى كل نقاط السائل بصورة متساوية ، بشرط ان يكون السائل ساكناً . اي ان الضغط سيكون متساوياً في جميع نقاط السائل الساكنة (غير المتحركة) . يمكن ايجاد قيمة القوة F_2 اللازمة للاتزان مع القوة F_1 ، وذلك بايجاد الضغط الاضافي في السائل الناتج عن القوة F_1 وكما يأتي :

$$\Delta P = \frac{\Delta F_1}{\Delta A_1}$$

ان هذه الزيادة في الضغط تستعمل الى المكبس 2 ، اي ان

$$\Delta P = \frac{\Delta F_2}{\Delta A_2}$$

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$$

$$F_2 = \frac{A_2}{A_1} \cdot F_1$$

وعذا معناه ان

..... 4.19

..... 4.20

ان القوة F_2 تساوي القوة F_1 مضروباً بعامل مقداره $(\frac{A_2}{A_1})$ اي ان مقدار الربح في القوة تحدده النسبة $(\frac{A_2}{A_1})$ فكلما كانت A_2 اكبر من A_1 امكن الحصول على ضغط اكبر لهذا فان مثل هذا المكبس سيكون قادراً على رفع ثقل اكبر او تسليط ضغط اكبر باستخدام قوة صغيرة.

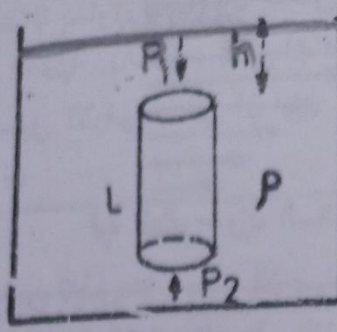
Archimedes principle

9-4 قاعدة أرخميدس

من المعلوم ان الأجسام اذا غطست في السوائل فانها تبدو اقل وزناً في السوائل منها في الفراغ فضلاً عن ان كثير من الأجسام تطفو على السوائل. ان ظواهر الطفو الكلي الجزئي وظاهرة فقدان جزء من الوزن تشكّل حقيقة ان هناك قوة موجهة نحو الأعلى تساعد في حمل الجسم المغمور في السائل. وقد اكتشفت هذه القاعدة من قبل العالم اليوناني ارخميدس وتعرف الآن بقاعدة ارخميدس والتي تنص على ما يأتي :

إذا غمر جسم كلياً أو جزئياً في سائل فانه يفقد من وزنه بمقدار يساوي وزن السائل الذي ازاحه الجسم. ان فقدان في الوزن سببه قوة دفع السائل للجسم الى الاعلى. ان هذه القوة تسمى القوة الطفووية (Buoyant force).

يمكن البرهنة على صحة قاعدة ارخميدس وذلك اذا اخذنا قطعة معدنية اسطوانية الشكل مساحية قاعدتها (A) وطولها (L) وغمرت في سائل كثافته (ρ) وكانت قاعدتها العليا على عمق h من سطح السائل كما في الشكل (4.16). ان قوة الطفو (F) التي ستؤثر على



الشكل (4.16) : يوضح قوة الطفو

القطعة الأسطوانية ستكون مساوية إلى الفرق بين القوة المؤثرة على القاعدة السفلية للأسطوانة ($P_2 A$) والقوة المؤثرة على القاعدة العلوية ($P_1 A$)، أي أن قوة الطفو:

$$B.F. = P_2 A - P_1 A$$

$$B.F. = (P_2 - P_1) A$$

4.21

ملاحظة ستقوم بإهمال الضغط الجوي (P_0) لأنه يؤثر في جميع الحالات. ان قوة دفع الاسطوانة نحو الاسفل المسلطة على قاعدتها العليا سيكون مساوياً إلى ($P_1 A$) والذي يمكن كتابته على أن

$$1 - P_1 A = \rho g h A$$

4.22

كما وتكون قوة دفع الاسطوانة نحو الاعلى المسلطة على قاعدتها السفلى مساوية إلى ($P_2 A$) والتي يمكن كتابتها ايضاً على انها

$$2 - P_2 A = \rho g h A (h+L)$$

4.23

ان الفرق بين القوتين يمثل قوة الطفو التي يؤثر بها السائل على الاسطوانة المذكورة والتي ستكون مساوية الى

$$3 - = \rho g A (h+L) - \rho g A h$$

$$= \rho g L A$$

4.24

وعندما تكون كثافة الجسم مساوية لكثافة السائل فان محصلة القوى المؤثرة على الجسم ستكون مساوية للصفر، وعليه فان الجسم سيبقى في حالة سكون عند اي ارتفاع داخل السائل. يمكن الاستفادة من قاعدة ارخميدس في حساب كثافة اجسام الحيوانات المائية الصغيرة.

ان حجم الاسطوانة يساوي (LA) وان حاصل ضرب الحجم في كثافة السائل يتركز
 كتلة السائل التي تم ازاحتها (pLA). يمكن إيجاد وزن السائل المزاح من خلال ضرب
 كتلته في قيمة التسجيل الأرضي، أي ان وزن السائل المزاح سيكون مساوياً لـ
 (pLA) أي ان

قوة الطفو = وزن السائل المزاح

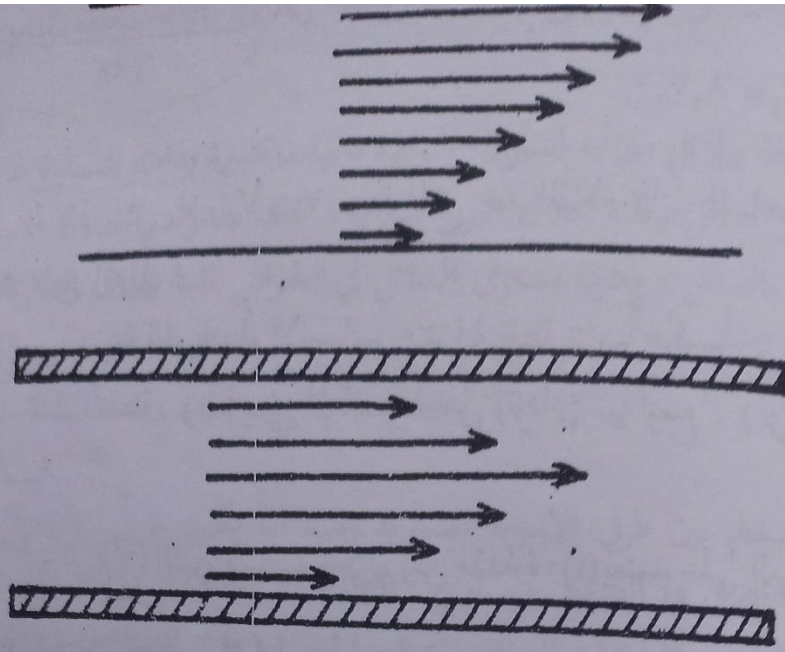
ان قاعدة ارخميدس تنطبق على جميع الاجسام الطافية والمغمورة مهما كان شكلها
 ويجب ملاحظة النقاط المهمة الآتية حول هذه القاعدة المهمة :

- ١- تنطبق قاعدة ارخميدس على جميع الاجسام الطافية والمغمورة جزئياً أو كلياً مهما
 شكلها.
- ٢- ان قاعدة ارخميدس تمكننا فقط من إيجاد قيمة قوة الطفو، ولاتمكننا من إيجاد
 محصلة القوى المؤثرة على الجسم.
- وبناءً على النقطة الأخيرة فان الجسم سيعطس اذا كان وزنه اكبر من قوة الطفو
 سيقفو الجسم اذا كان وزنه اقل من قوة دفع السائل له الى الاعلى.

10-4 الجريان المنتظم (الانسبائي) The Steady Flow

يوضح الشكل (4.17) خطوط جريان السائل في نهر واسع وانبوب ذي مقطع دائري
 على التوالى اذ ان هذه الخطوط تكون موازية الى سطح السائل في النهر بينما تكون موازية
 الى محور الانبوب. وبفضلها تقدم فان هذه الخطوط تمثل سرعة انسياب السائل
 وتكون مساوية الى الصفر عند قعر النهر وعند جدران الانبوب. يحدث (الجريان
 الانسبائي للسائل) عندما تكون قيمة سرعة الجريان اقل من السرعة الحرجة للسائل (اذا
 تكون واطنة أو معتدلة). وعند الجريان الانسبائي تتحقق النقاط الآتية :

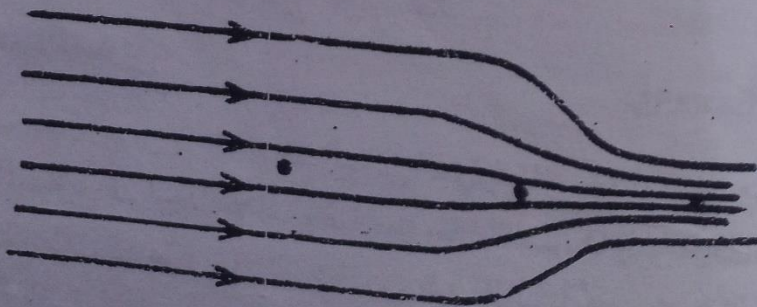
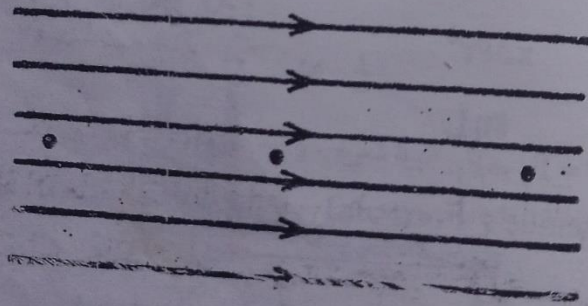
- ١- تكون سرعة المائع عند أية نقطة معينة ثابتة مع الزمن ، ولكنها قد تختلف من نقطة
 الى أخرى. وهذه الحقائق يوضحها الشكل (4.18) ، اذ تكون سرعة السائل
 عند النقاط أ و ب، و ج ثابتة مع الزمن ومتساوية القيمة في النقاط الثلاث ،
 تكون ثابتة مع الزمن في النقاط د و هـ و ز ولكنها غير متساوية.
- ٢- تكون الخطوط متوازية في الاوعية ذات المقاطع المنتظمة ولاتتقاطع فيما بينها.



الشكل (4.17): يوضح جريان السائل

(a) في منبر

(b) في انبوب استوائي



الشكل (4.18): يوضح سرعة جريان المائع

٣- يكون معدل جريان أو تدفق السائل في أي مقطع من مقاطع الوعاء ثابتاً، أي أن

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 = A_3 V_3$$

4.25.....

اذ تمثل V_1 و V_2 و V_3 سرعة المائع عند المقاطع ذات المساحات A_1 و A_2 و A_3 على التوالي.

٤- تتناسب سرعة الجريان أو الانسياب عند أية نقطة تناسباً عكسياً مع مساحة المقطع عند تلك النقطة. وهذا يعني أن السرعة تقل (تزداد) كلما توسع (قل) مقطع وعاء الانسياب.

ان حجم السائل ($\bar{V}$) الذي ينساب خلال زمن مقدارة t يعتمد على العوامل الآتية:

١- معامل لزوجة السائل (η)

٢- مقطع الوعاء أو الأنبوب A

٣- انحدار الضغط (أي الضغط لوحدة الطول $\Delta P/L$ الذي يسبب الجريان أو الانسياب

اذ أن ΔP تمثل الفرق في الضغط عند نهايتي الأنبوب و L تمثل طول الأنبوب.

٤- الزمن t .

ولايجاد قيمة V نستخدم العلاقة الآتية:

$$V = \frac{\pi \Delta P r^4}{8 \eta L} t$$

.....(4.26)

$$\Delta P = P_2 - P_1$$

وهذه العلاقة تسمى بعلاقة بوازيل (Poiseuille's Formula) وتصح لجريان السوائل الانسيابية التي تتحرك في أنابيب مستقيمة.

وتستخدم هذه المعادلة لايجاد لزوجة السوائل عملياً وذلك باستخدام الانابيب الشعرية بطريقة تعرف بطريقة بوازيل.

11-4 معادلة بوازيل

Poiseuille's Law

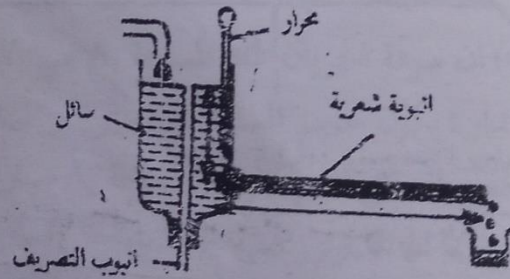
يعرف معدل التدفق Q بأنه حجم السائل الذي ينساب خلال انبوبة في وحدة الزمن. وكان العالم بوازيل قد اوجد علاقة رياضية بين معدل التدفق Q ولزوجة السائل η وطول الانبوبة L ونصف قطرها r وفرق الضغط بين طرفي الانبوبة ΔP وتمثل هذه العلاقة في الصيغة الرياضية الآتية:

$$Q = \frac{\pi^4 (P_1 - P_2)}{8\eta L}$$

(4.27)

تعد طريقة بوازيل ملائمة للسوائل المتوافرة بكميات كبيرة وذات انسيابية عالية ، كما :
مثلاً ، اذ يمر السائل ببطء خلال انبوبة شعيرية ، غالباً ما توضع بصورة أفقية ، وتتصل
بحوض يملأ بالسائل ، يكون مستوى السائل في الحوض ثابتاً خلال التجربة
اذ يجمع حجم معين من السائل V خلال زمن مقداره t . عند مروره خلال الانبوبة
الشعرية .

ان فرق الضغط بين طرفي الانبوبة الشعرية يجب ان يكون ثابتاً . والشكل (4.19)
يفضن هذا الفرق في الضغط ويساوي (ρgh) ، اذ تمثل ρ كثافة السائل و g
التعجيل الأرض و h ارتفاع السائل . يمكن الحصول على عدة قيم من فرق الضغط
وذلك بتغيير مستوى السائل في الحوض ، ومنه يمكن الحصول على عدة قيم من معدل
الجريان أو الانسياب . يمكن رسم علاقة بين حجم السائل (V) الذي تم الحصول عليه
خلال الثانية الواحدة وفرق الضغط (P) . ان هذه العلاقة ستكون خطاً مستقيماً الى ان
نصل الى الحد الذي لا يمكن تطبيق معادلة بوازيل عليه .



الشكل (4.19) : بوازيل لقياس لزوجة السائل

Bernoulli's equation

12-4 معادلة برنولي

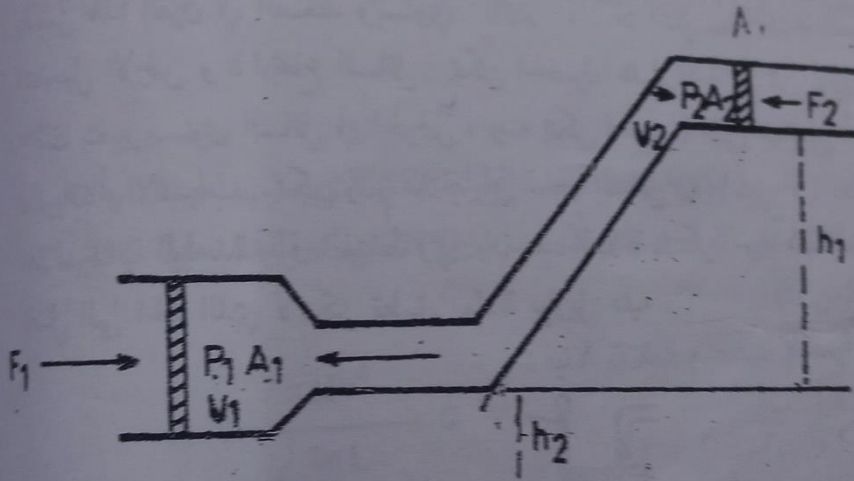
عندما تتحرك السوائل الحقيقية ، تؤثر فيها القوى الأحتكاكية (قوى اللزوجة) ،
وتعمل هذه القوة على مقاومة الطاقة الميكانيكية ، مما يتطلب بذل شغل كبير لدفع
السوائل في الأنابيب . ويمكن العالم برنولي من ايجاد معادلة للضغط في السوائل ذات
القوى الأحتكاكية القليلة ، والتي يمكن اهمالها ، وهذه المعادلة تنص على ان : مجموع
كثافة الطاقة الحركية وكثافة الطاقة الكامنة والضغط تكون ثابتة لعمليات جريان السوائل .

ولجريان سائل في انبوب يتكون من قطعتين مختلفتي المقطع العرضي يكون

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2 = \text{Const.} \quad (4.28)$$

حيث ان P_1 و P_2 يمثلان الضغط في القطعتين الاولى والثانية على التوالي
 v_1 و v_2 تمثلان سرعة الجريان في القطعتين الاولى والثانية على التوالي
 h_1 و h_2 تمثلان ارتفاع القطعتين.

الشكل (4.20) يوضح هذه العلاقة.

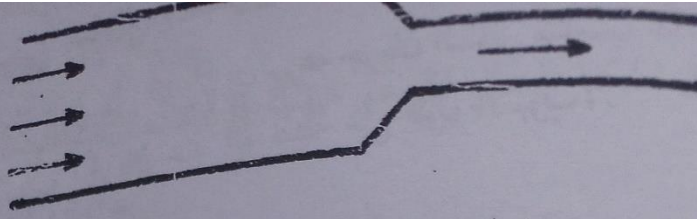


الشكل (4.20) : يوضح معادلة برنولي.

ان سرعة السائل تكون أكبر في نقاط الانابيب ذات القطر الأقل ، وعكس ذلك يكون الضغط في تلك النقاط أقل منه عند النقاط ذات القطر الأكبر.

وهذا يقودنا الى حقيقة ان سرعة جريان السائل تكون كبيرة عندما يكون الضغط منخفضاً. ولأجل أخذ فكرة عن علاقة سرعة الجريان بالضغط ، دعنا نجري الحسابات الآتية لإيجاد الفرق في الضغط بين النقطتين A و B. للمثال الآتي :

مثال : اذا كانت سرعة الجريان عند النقطتين A و B تساوي 0.5 m/sec و 2 m/sec فابداً بين قيم الضغط عند النقطتين انظر الشكل (4.21) افرض ان كثافة الماء = 1000 Kg/m³



الشكل (4.21): يوضح معادلة برنولي

الحل: باستخدام معادلة برنولي ($h_2 = h_1$) نجد ان

$$P_A + \frac{1}{2} \rho v_A^2 = P_B + \frac{1}{2} \rho v_B^2$$

$$P_A - P_B = \frac{1}{2} \rho (v_B^2 - v_A^2)$$

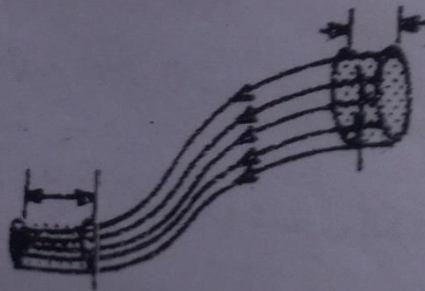
$$\Delta P = \frac{1}{2} \times 1000 (0.5^2 - 2.0^2)$$

$$\Delta P = -1875 \text{ N/m}^2$$

يوضح الشكل (4.22) ان سرعة الجريان عند المساحة A_1 هي V_1 وعند المساحة A_2 هي V_2 . وخلال زمن مقدار t يكون حجم السائل الذي يمر عبر المساحة A_1 مساوياً الى $A_1 V_1 \Delta t$ ، كما ويكون حجم السائل الذي يمر عبر المساحة A_2 مساوياً الى $A_2 V_2 \Delta t$. ان كمية السائل الداخلة يجب ان تساوي كمية السائل الخارجة ، وعليه فان :

$$A_1 V_1 \Delta t = A_2 V_2 \Delta t$$

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \dots (1)$$

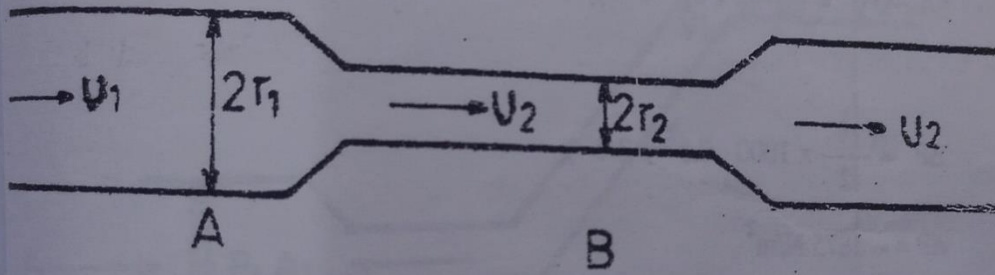


وهذه المعادلة تسمى بمعادلة الاستمرارية Continuity equation
 ان هذه المعادلة تبين على الدوام ان سرعة جريان السائل تتناسب عكسياً مع مساحة المقطع العرضي لانبوب الجريان عند اية نقطة على طول الانبوب.

Flowmeters

① 13-4 مقاييس الجريان يستخدم لقياس معدل سريان السائل

الشكل (4.23) يوضح انبوباً ذا تضييق عند النقطة (B) ينساب فيه سائل كثافته ρ وكان نصف قطر الانبوب عند النقطة (A) مساوياً الى (r_1) وسرعة جريانه u_1 ، وكان نصف قطر الانبوبة عند النقطة (B) مساوياً الى (r_2) وسرعة جريانه u_2 في منطقة التضييق.



الشكل (4.23) : عمل مقاييس الجريان

ان حجم السائل الذي يمر خلال الانبوب عند النقطة (A) خلال الثانية الواحدة

$$\rho u_1 \pi r_1^2 =$$

ان حجم السائل الذي يمر خلال الانبوب عند النقطة (B) خلال الثانية الواحدة

$$\rho u_2 \pi r_2^2 =$$

ان كتلة السائل الذي يمر خلال الانبوب عند النقطة (A) خلال الثانية الواحدة

$$\rho u_1 \pi r_1^2 =$$

ان كتلة السائل الذي يمر خلال الانبوب عند النقطة (B) خلال الثانية الواحدة

$$\rho u_2 \pi r_2^2 =$$

وعندما تتحقق حالة الاتزان (الاستقرار) تتساوى الكتلتان وعليه فان :

$$\dots\dots\dots (4.29)$$

$$\rho u_1 \pi r_1^2 = \rho u_2 \pi r_2^2$$

$$\dots\dots\dots (4.30)$$

كذلك تكون الطاقة الحركية للسائل المار عبر النقطة A خلال الثانية الواحدة

$$\frac{1}{2} (\rho v_1 \pi r_1^2) v_1^2 =$$

وتكون الطاقة الحركية للسائل المار عبر النقطة B خلال الثانية الواحدة

$$\frac{1}{2} (\rho v_2 \pi r_2^2) v_2^2 =$$

هناك زيادة في الطاقة الحركية بين النقطتين A و B ، وبناء على ذلك سيبدل شغل على السائل ، وعليه فسيكون هناك قوة محصلة تؤثر على السائل بالاتجاه (AB). وهذا يعني ان الضغط P_2 عند النقطة (B) يجب ان يكون اقل من الضغط P_1 عند النقطة A. ان هذا الترتيب هو نتيجة طبيعية للقاعدة التي تنص: ان ضغط السائل المار خلال انبوب ذي مقطع عرضي متغير يكون دائماً اقل عند النقاط التي تكون عندها سرعة الجريان عالية.

ويترتب على ذلك ان يكون

الشغل المنجز خلال الثانية الواحدة = فرق الضغط $\times$ حجم السائل المار خلال الثانية الواحدة

وهذا ايضاً = الزيادة في الطاقة الحركية خلال الثانية الواحدة

وعليه فان

$$(P_1 - P_2)(v_1 \pi r_1^2) = \frac{1}{2} (\rho v_2 \pi r_2^2) v_2^2 - \frac{1}{2} (\rho v_1 \pi r_1^2) v_1^2$$

$$v_1 r_1^2 = v_2 r_2^2$$

وبما ان

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2)$$

..... 4.31

$$v_2 = v_1 \frac{r_1^2}{r_2^2}$$

$$v_2^2 = v_1^2 \frac{r_1^4}{r_2^4}$$

..... 4.32

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho \left[v_1^2 \frac{r_1^4}{r_2^4} - v_1^2 \right]$$

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho v_1^2 \left[\frac{r_1^4 - r_2^4}{r_2^4} \right]$$

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho v_1^2 \left[\frac{r_1^4}{r_2^4} - 1 \right]$$

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho v_1^2 \left[\frac{A_1^2}{A_2^2} - 1 \right]$$

..... (4.33)

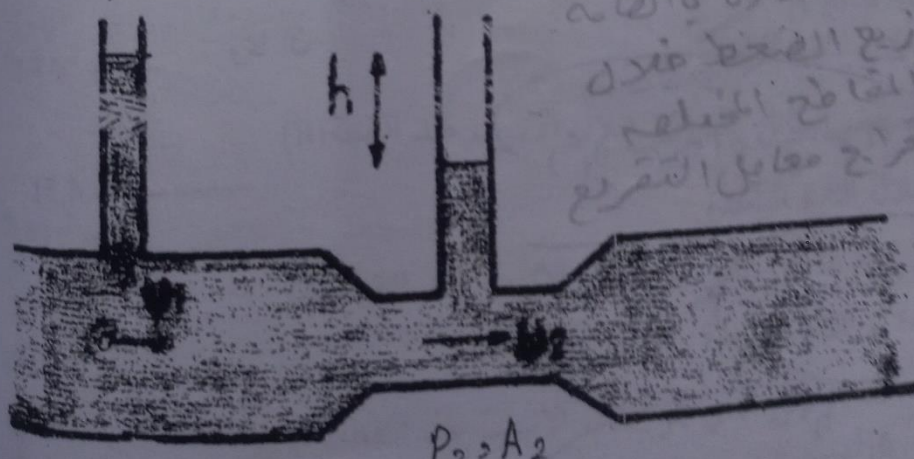
ان نظرية مرور الغاز خلال انبوب ذي تخرج تكون معقدة كثيراً ، والسبب في ذلك هو ان كثافة الغاز (ρ) تكون معتمدة على الضغط وتغير بتغيره حيث تكون قيمة الضغط اقل ما يمكن في التخرج ، والذي يكون فيه معدل الجريان اعلى ما يمكن .

يمكن إيجاد قيمة v_1 اذا علمت قيم كل من r_1 و r_2 ، أو A_1 و A_2 وكذلك ($P_1 - P_2$) ويمكن إيجاد معدل الجريان المساوية الى ($A_1 v_1$) .

Venturi meter

14-4 مقياس فتوري

بعد مقياس فتوري تطبيقاً مباشراً لمعادلة برنولي ، ويتكون من انبوبة افقية تحتوي على تخرج كما في الشكل (4.24) .



الشكل (4.24) : مقياس فتوري 1 2

والانبوتان الشاقوليان تقيسان فرق الضغط بين المقطعين . يجب ان يكون الانبوتان متساويين في المقطع . وعند تماثل المقطعين يكون الفرق في الضغط مساوياً للصفر .

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) \quad \dots\dots\dots (4.34)$$

فإذا كان فرق مستوى السائل بين الأنبوبين الشاقوليين مساوياً الى (h) فإن فرق الضغط سيكون أيضاً مساوياً الى (ρ gh)

$$P_1 - P_2 = \rho g h \quad \dots\dots\dots (4.35) \quad \text{أي أن}$$

ان الاستعانة بهذه المعادلات ومعادلة الاستمرارية يمكن الحصول على قيم سرعة الجريان في أي من المقطعين ومن ثم سرعة التدفق.

Pitot tube

$$h_1 = h_2 \quad \text{② 4.15 أنبوبة بيتوت}$$

نستخدم أنبوبة بيتوت لقياس سرعة الغاز الذي يمر في الأنبوبة كما يستخدم لقياس سرعة الرياح وقياس سرعة الطائرة بالنسبة للهواء. يتكون هذا الجهاز من أنبوتين أحدهما واسعة المقطع يجري فيها الغاز بسرعة (v) والأنبوبة الأخرى ذات مقطع صغير في نهايتها وتتصل الأنبوتان بمضغاط سائلي (مانوميتر). الشكل (4.25) يوضح مخططاً لهذا الجهاز. فعندما يضطدم الغاز بالنهاية المدببة للأنبوبة الرقيقة فإن سرعته تصبح صفراً. فعند تطبيق قاعدة برنولي على المقطعين (1) و (2) نحصل على

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

وبما أن $v_2 = 0$ صفراً

$$P_2 - P_1 = \frac{1}{2} \rho v_1^2$$

$$\dots\dots\dots (4.36)$$

يطلق على P_1 و P_2 بالضغط السكوني والحركي على التوالي. فإذا كانت كثافة السائل في المقياس تساوي (ρ_o)، نجد ان

$$P_2 - P_1 = \rho_o g h$$

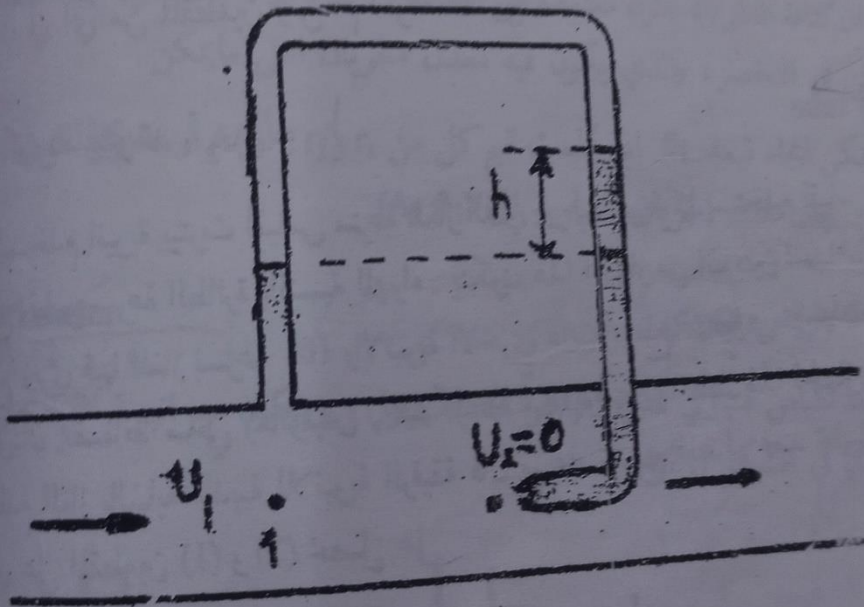
$$\rho \theta_1^2 = \rho_0 g h$$

$$1 = 2 \frac{\rho_0}{\rho} g h$$

$$1 = \sqrt{\frac{2 \rho_0 g h}{\rho}}$$

(4.37) سرعة الحار

وعند قراءة قيمة الفرق في الارتفاع (h) في المانومتر يمكن إيجاد θ_1 المساوية لـ الغاز.



الشكل (4.25): أنبوبة بيتوت

(3) 4-16 معادلة تورشلي

Torricellis equation

بين الشكل (4.26) وعاءاً يحتوي على سائل يتدفق من فتحة في العواء الذي يحترق وعلى عمق (h) من سطح السائل. فإذا أخذنا النقطتين 1 و 2 تقع النقطة الأولى في وسط الفتحة والنقطة الثانية في سطح السائل. إن قيمة الضغط المسلط على النقطتين يساوي الضغط الجوي (P_0)، والسبب في ذلك أنها معرضتان للضغط الجوي. فإذا كان مقطع العواء كبيراً مقارنة بمقطع الفتحة، فإن سرعة تدفق الماء من الفتحة تكون كبيرة مقارنة بسرعة انخفاض سطح السائل. داخل السائل.

معدل تسريع

$$P_a + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_a + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2 \quad (4.37)$$

وعند اكمال v_2 نسبة الى v_1 ويطرح P_a من الطرفين نحصل على

$$\frac{1}{2} \rho v_1^2 = \rho g h_2 - \rho g h_1 \quad (4.38)$$

وبما ان $h_2 - h_1 = h$

$$v_1^2 = 2 g (h_2 - h_1)$$

$$v_1 = \sqrt{2 g h} \quad (4.39)$$

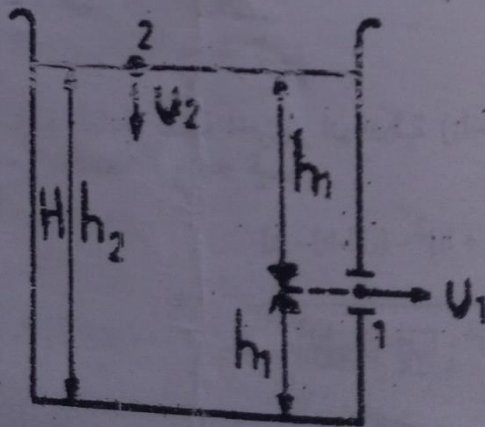
وهذه النتيجة تعني ان سرعة تدفق السائل تساوي السرعة التي يكتسبها جسم ساقط بصورة حرة من السكون ومن ارتفاع مقدار h

وتسمى هذه النتيجة احيانا بمعادلة تورشلي.

يمكن ايجاد معدل التفريغ (Q) وذلك من معرفة مساحة المقطع العرضي (A) والسرعة

v_1 ، اي ان

$$Q = A v_1 = A \sqrt{2 g h} \quad (4.40)$$



الشكل (4.26) : ايجاد معدل التفريغ

عندما يخرج السائل من الفتحة الصغيرة الجانبية ، فإنه يسلك مساراً منحنياً . يمكن إيجاد المسافة الأفقية التي يصلها السائل قبل اصطدامه بالأرض ، والتي تسمى أحياناً بالمدى الأفقي . إن الزمن الذي يستغرقه السائل للسقوط خلال المسافة العمودية $(H-h)$ قبل اصطدامه بالأرض يمكن إيجاده من العلاقة الآتية (افرض ان $h_2 = H$) :

$$H - h = \frac{1}{2} g t^2 \quad \text{.....(4.41)}$$

$$t = \sqrt{\frac{2(H-h)}{g}}$$

أو

وعليه فإن المسافة الأفقية التي تقطع خلال هذا الزمن ، تعطى بالعلاقة الآتية :

$$R = v t$$

وإذا عوضنا عن قيم كل من v و t بما يساويها نجد ان :

$$R = \sqrt{2gh} \cdot \sqrt{\frac{2(H-h)}{g}}$$

أو

$$R = 2 \sqrt{h(H-h)}$$

(4.42)

$$R = \sqrt{4Hh - 4h^2}$$

ويمكن إعادة كتابة هذه المعادلة بصفة أخرى . ان الكمية $(4Hh - 4h^2)$ تساوي

$$4Hh - 4h^2 = [(H-h) + h]^2 - [(H-h) - h]^2$$

$$R = \sqrt{[(H-h) + h]^2 - [(H-h) - h]^2}$$

ان قيمة المدى R تكون اعظم مايمكن عندما يكون

$$H-h = h$$

أو

17- 4 امثلة محلولة

مثال (4.1)

استخدم مزيج من البترين والكلوروفورم بنسبة 80% و 20% حجماً على التوالي لحساب معدل كثافة جسم حيوان بحري صغير، فوجد ان الحيوان يبق عالقاً في المزيج علماً بان كثافة البترين والكلوروفورم تساويان 879 و 1527 kg/m^3 على التوالي:

الحل:

تفرض ان حجم البترين V_1 وكثافته ρ_1

حجم الكلوروفورم V_2 وكثافته ρ_2

ان الحجم الكلي للمحلول V

$$V = V_1 + V_2$$

الكتلة الكلية للمحلول m

$$m = \rho_1 V_1 + \rho_2 V_2$$

كثافة المزيج ρ

$$\rho = \frac{m}{V} = (\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2) / (V_1 + V_2)$$

$$\rho = \rho_1 \left(\frac{V_1}{V_1 + V_2} \right) + \rho_2 \left(\frac{V_2}{V_1 + V_2} \right)$$

$$\%80 = \frac{V_1}{(V_1 + V_2)} = \text{نسبة حجم البترين}$$

$$\%20 = \frac{V_2}{(V_1 + V_2)} = \text{نسبة حجم الكلوروفورم}$$

$$\therefore \rho = 879 \times \frac{80}{100} + 1527 \times \frac{20}{100} = 703.2 + 305.4 = 1008.6 \text{ kg/m}^3$$

معدل كثافة الحيوان المذكور .

مثال (4.2) :

أنبوب على شكل حرف U نصف قطريها يساوي (2.5) و (1) ملم يحتوي على ماء شام السطحي يساوي $7 \times 10^{-2} \text{ Nm}^{-1}$ وكثافته $1.0 \times 10^3 \text{ Kg/m}^3$. أغرق ان زاوية الاتصال تساوي صفراً. جد الفرق بين ارتفاعي السائل في الذراعين. (الشكل (4.27))

الحل : نفرض ان السطح المحدب التقعر يشكل نصف كرة ، سيكون نصف قطرها مساوياً الى نصف قطر الأنبوب ان الضغط على جهة التحدب يفوق الضغط على جهة التقعر بعامل مقداره $(-\frac{2\gamma}{r})$.

$$r_1 = 2.5 \text{ mm} = 2.5 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$r_2 = 1 \text{ mm} = 1 \times 10^{-3} \text{ m}$$

وعليه فان

$$P_2 - P_1 = \frac{2 \times 7 \times 10^{-2}}{2.5 \times 10^{-3}} = 56 \text{ N/m}^2$$

$$P_2 = P$$

$$\therefore P_1 = P - 56$$

$$P_4 - P_3 = \frac{2 \times 7 \times 10^{-2}}{1 \times 10^{-3}} = 140 \text{ N/m}^2$$

وكذلك يكون

$$P_4 = P \quad \text{الضغط الجوي}$$

$$\therefore P_3 = P - 140$$

$$\therefore P_1 - P_3 = (P - 56) - (P - 140) = 84 \text{ N/m}^2$$

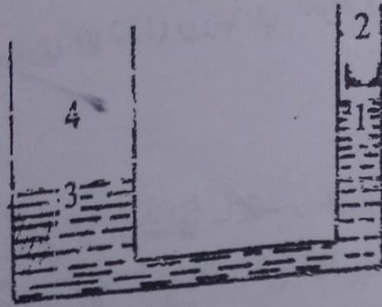
ولكن

$$P_1 = P_3 + pgh$$

$$\therefore pgh = 84 \text{ N/m}^2$$

$$\therefore h = \frac{84}{10^3 \times 9.3} \text{ m}$$

$$h \approx 8.6 \text{ mm}$$



الشكل (4.27): انبوية على شكل حرف U مختلفة أنقطرين

وهو حجم كبير جداً، اذ يكافئ حجم كرة نصف قطرها 130 متر.

مثال (4.3):

تطفو قطعة من الثلج في الماء. جد النسبة المئوية لحجم القطعة المذكورة التي ترتفع فوق سطح الماء. علماً بأن كثافة الثلج تساوي 917 Kg/m^3 وكثافة الماء تساوي 1091 Kg/m^3 .

الحل:

نفرض اذ حجم قطعة الثلج تساوي V متر مكعب
وان حجم الجزء المغمور يساوي V' متر مكعب.
ان وزن الثلج يجب ان يكون مساوياً الى وزن الماء المزاح، اي ان

$$mg = V \rho_w g$$

$$V \rho_{ice} g = V' \rho_w g$$

وعليه سيكون نسبة الحجم المغمور الى الحجم الكلي كما يأتي:

$$\frac{V'}{V} = \frac{\rho_{ice}}{\rho_w} = \frac{917}{1091} = 0.84$$

$$1 - 0.84 = 0.16$$

أما نسبة الجزء الطافي فتكون مساوية الى

أو 16% .

مثال (4.4)

سمكة وزنها في الماء يساوي (132 g) ووزنها في الهواء (1890 g) جد معدل الكثافة النسبية للسمكة.

الحل

نفرض ان وزن السمكة في الهواء = w

نفرض ان وزن السمكة في الماء = w¹

$$\frac{\rho}{\rho^1} = \frac{w}{w - w^1} = \frac{1890}{1890 - 132}$$

$$\frac{\rho}{\rho^1} = 1.08$$

مثال (4.5)

جد أقصى ارتفاع يمكن ان يوضع فيه سائل كثافته 0.85 ، اذا كانت قراءة البارومتر هي ضغطاً قيمته 76cm زئبق ، علماً بان الكثافة النسبية للزئبق يساوي 13.6 .

الحل

الضغط الجوي = ضغط السائل

الارتفاع × كثافة الزئبق × التعجيل الارضي = الارتفاع × كثافة السائل × التعجيل الارضي

$$g \times 10^3 \times 0.85 \times h = 0.76 \times 13.6 \times 10^3 \times g$$

$$h = \frac{0.76 \times 13.6 \times 10^3}{0.85 \times 10^3}$$

$$h = 12.16 \text{ m}$$

مثال (4.6) ✓

جد كمية الماء التي تنساب خلال انبوبة شعرية طولها 30 سم ونصف قطرها 0.25 سم إذا كان فرق الضغط عبر الانبوبة يساوي 4 سم زئبق. مع العلم ان لزوجة الماء تساوي 0.801×10^{-3} نيوتن . ثا / متر².

الحل

من الضروري تحويل الكميات في اعلاه الى وحداتها المناسبة قبل استخدام المعادلة المناسبة ، وكما يأتي :

$$L = 30 \text{ cm} = 0.3 \text{ m}$$

$$R = 0.25 \text{ cm} = 0.25 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$\Delta P = P_1 - P_2 = 4 \text{ cm Hg} = \left(\frac{4}{76} \right) (1.01 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2})$$

$$= 5315.79 \text{ N/m}^2$$

وبالتعويض في معادلة بوازويل

$$Q = \frac{\pi R^4 (P_1 - P_2)}{8 \eta L}$$

$$= \frac{3.14 \times (0.25 \times 10^{-2})^4 (5315.79)}{8 \times 0.801 \times 10^{-3} \times 0.3}$$

$$Q = 3.4 \times 10^{-4} \text{ cm}^3 / \text{sec.}$$

✓ مثال (4.7) مواد لتوشاح
نافورة تنذف الماء شاقولياً إلى ارتفاع $h = 170$ متر وبمعدل 26000 لتر/دقيقة. جد سرعة الجريان عند

- (1) قاعدة النافورة.
- (2) على ارتفاع 85 متر.
- (3) على ارتفاع 170 متر.

الحل

ان العلاقة بين الارتفاع والسرعة يمكن ايجادها باستخدام المعادلة الآتية والتي تسمى أحياناً بمعادلة السقوط الحر وهي:

$$-g(x - x_0) = \frac{1}{2} (v^2 - v_0^2)$$

اذ تمثل x و x_0 الارتفاع عندما تكون السرعة v و v_0 و g تمثل التعجيل الارضي ان السرعة النهائية = صفر
أي لك

$$\frac{1}{2} v_0^2 = g(x - x_0)$$

$$x - x_0 = 170 \text{ m}$$

$$\therefore v_0^2 = 2g \times 170$$

$$v_0 = \sqrt{2 \times 9.8 \times 170}$$

$$v_0 = 58 \text{ m / sec.}$$

وعندما يكون الارتفاع مساوياً إلى 85 متراً فإن السرعة تتساوى

$$v_0 = \sqrt{2 \times 9.8 \times 85}$$

مثال (4.8) برنولي

إذا كان الضغط في أنبوبة إطفاء الحريق نصف قطرها 3.5 سم هو $4 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ وكانت سرعة الجريان مساوية إلى 3.5 متر/ثا. إذا فرضنا أن الأنبوبة تنتهي بأنبوبة معدنية قطرها 3 سم. جد قيمة الضغط وسرعة الماء عند فوهة الأنبوبة المعدنية.

الحل

يمكن إيجاد سرعة الجريان عند الفوهة باستخدام معادلة الاستمرارية

$$v_2 = v_1 \frac{A_1}{A_2} = v_1 \frac{\pi r_1^2}{\pi r_2^2}$$

$$= 3.5 \times \frac{3.5^2}{1.5^2}$$

$$r_2 = \frac{d}{2}$$

$$v_2 = 19.06 \text{ m/sec}$$

ولإيجاد الضغط نستخدم معادلة برنولي

$$\frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 + P_1 = \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2 + P_2$$

$$h_1 = h_2$$

$$\frac{1}{2} \rho v_1^2 + P_1 = \frac{1}{2} \rho v_2^2 + P_2$$

وبطرح P_2 من الطرفين وإعادة ترتيب المعادلة نحصل على:

$$P_2 - P_1 = P_1 - P_2 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 - \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

$$3.5 \times 10^5 \text{ N/m}^2 = (P_1 - P_2)$$

نحصل على

$$P_2 - P_1 = 3.5 \times 10^5 + \frac{1}{2} \times 1.0 \times 10^3 \times (3.5)^2 - \frac{1}{2} \times 1.0 \times 10^3 \times (19.06)^2$$

$$= 1.704 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

✓ مثال (4.9)
ينساب زيت خلال انبوبة نصف قطرها (2.5 cm) فيقطع مسافة مقدارها (6m) خلال ثانيتين، جد معدل الانسياب.

الحل: تنص معادلة معدل الانسياب على ان

$$Q = A \cdot v$$

$$3.14 \times 2.5 \times 10^{-2}$$

$$A = \pi r^2 = 1.963 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$v = \frac{L}{t} = \frac{6 \text{ m}}{2 \text{ sec}} = 3 \text{ m/sec}$$

$$Q = 5.895 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / \text{sec}$$

$$= 5890.5 \text{ cm}^3 / \text{sec}$$

✓ مثال (4.10)

جد سرعة انسياب الماء خلال انبوبة قطرها (6 cm) متصلة بانبوبة اخرى قطرها (10 cm) ينساب خلالها الماء بسرعة مقدارها 1.5 m/sec ؟

cm

الحل:
باستخدام معادلة الاستمرارية، وهي:

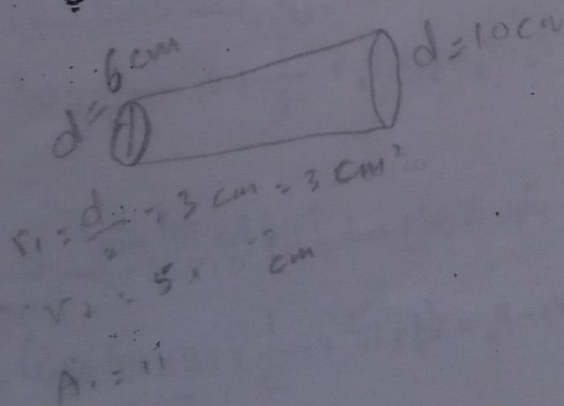
$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

$$v_1 = \frac{A_2 v_2}{A_1}$$

$$A_1 = 28.274 \text{ cm}^2$$

$$A_2 = 78.540 \text{ cm}^2$$

$$v_2 = 1.5 \text{ m/sec} = 150 \text{ cm/sec}$$



$$\begin{aligned} \therefore v_1 &= \frac{78.540 \times 150}{28.274} = \frac{117810}{28.274} \\ &= 416.7 \text{ cm/sec} \\ &= 4.167 \text{ m/sec} \end{aligned}$$

مثال (4.11)

جد كتلة الماء التي تنساب خلال (15) دقيقة من خزان خلال حنفية تركت مفتوحة قطرها (1.5 cm) وتقع على عمق (2m) تحت سطح الماء.

الحل

باستخدام معادلة برنولي التي تنص على أن

$$\frac{1}{2} \rho v_1^2 + h_1 \rho g + P_1 = \frac{1}{2} \rho v_2^2 + h_2 \rho g + P_2$$

الضغط الجوي $P_1 = P_2$

نفرض أن سرعة انسياب السائل داخل الخزان = صفر $v_1 = 0$

$$h_1 \rho g = \frac{1}{2} \rho v_2^2 + h_2 \rho g$$

$$h_1 g = \frac{1}{2} v_2^2 + h_2 g$$

$$\begin{aligned} \therefore v_2^2 &= 2h_1 g - 2h_2 g \\ &= 2g (h_1 - h_2) \end{aligned}$$

$$h_1 - h_2 = 2 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \therefore v_2 &= \sqrt{4g} = \sqrt{4 \times 9.8} = \sqrt{39.2} \\ v_2 &= 6.261 \text{ m/sec} \end{aligned}$$

ان كتلة الماء = الحجم $\times$ الكثافة PV
 الحجم الذي ينساب خلال الثانية الواحدة
 $V_1 = A_2 v_2 = 1.767 \times 10^{-4} \times 6.261 = 1.1064 \times 10^{-3} \text{ m}^3$
 اما حجم الماء الذي ينساب خلال (15) دقيقة
 $A_2 v_2 = 1.14 \times 10^{-3} \times 15 \times 60$
 $A = 1.7$

$$V_{15} = V_1 \times 15 \times 60$$

$$= 1.1064 \times 10^{-3} \times 15 \times 60$$

$$V_{15} = 9.9576 \times 10^{-1}$$

$$= 0.99576 \text{ m}^3$$

كثافة الماء النقي = $1000 \text{ كغم/متر مكعب}$

$$\therefore m = \dot{V} \rho = 0.99576 \times 1000$$

$$= 995.77 \text{ Kg}$$

$$= 995.77 \text{ لتر}$$

مثال (4.12)

جد قيمة سرعة انسياب الماء خلال خزان مغلق يكون الضغط فيه اكبر من الضغط الجوي بـ 10^4 N/m^2 .

الحل: باستخدام معادلة برنولي التي تنص على ان

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + h_1 \rho g = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + h_2 \rho g$$

اذا فرضنا ان $v_1 = 0$ ستر داخل الخزان كما وان $h_1 = h_2$

$$\therefore p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

$$p_1 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

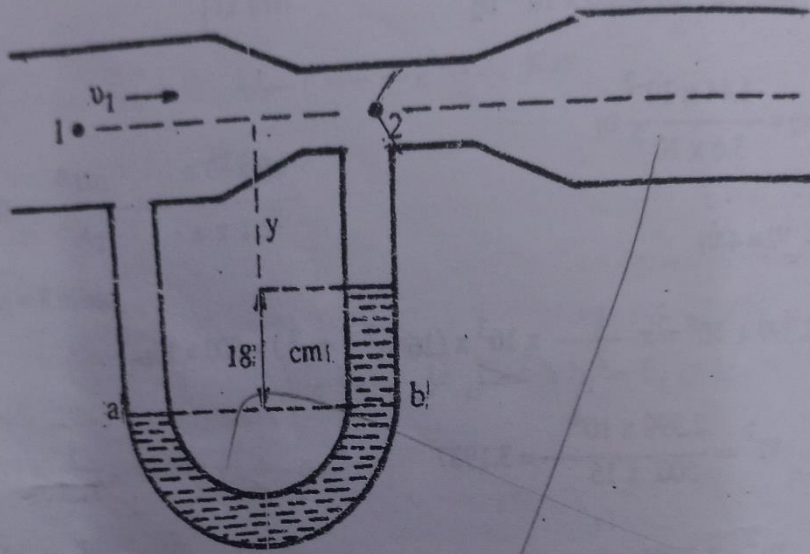
$$\therefore v_2^2 = \frac{2p_1 - 2p_2}{\rho} = \frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}$$

$$v_2^2 = \frac{2 \times 10^4}{10^3} = 20$$

$$v_2 = 4.472 \text{ m/sec}$$

مثال (4.13)

وصل جهاز قياس انسياب السوائل (جهاز فتوري) بمانومتر زيتي كما موضح في الشكل (4.28) وكان نصف قطر مقطع الدخول عند النقطة (1) يساوي 12 cm ونصف قطر مقطع الاختناق عند النقطة (2) يساوي 6 cm . جد قيمة الانسياب Q للماء في المقياس اذا كان الفرق بين ارتفاعي عمودي الزيتي هو 18 cm وان كثافة الزيت هي 13.6 g/cm^3 .



الشكل (4.28): يوضح جهاز فتوري

الحل

باستخدام معادلة برنولي عند المقطعين (1) و (2) والاعتماد على

$$h_1 = h_2$$

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2)$$

ان الضغط عند النقطة a = الضغط عند النقطة b

$$\therefore P_1 + (0.18 + y) \rho g = P_2 + y \rho m + 0.18 \rho m g$$

حيث ان ρ = كثافة الماء و ρ_m = كثافة الزيت

$$p_1 - p_2 = 0.18 (\rho_{mg} - \rho_g) = 0.18 (13.6 - 1) \times 10^3 \times 9.8$$

$$= 2.399 \times 10^4 \text{ N/m}^2$$

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

$$\pi r_1^2 v_1 = \pi r_2^2 v_2$$

$$(0.12)^2 v_1 = (0.06)^2 v_2$$

$$1.44 \times 10^{-2} v_1 = 3.6 \times 10^{-3} v_2$$

$$v_2 = \frac{1.44 \times 10^{-2}}{3.6 \times 10^{-3}} v_1$$

$$\therefore v_2 = 4 v_1$$

$$2.399 \times 10^4 = \pi \frac{1}{2} \times 10^3 \times (16 v_1^2 - v_1^2) = 500 \times 15 v_1^2$$

$$v_1^2 = \frac{2.399 \times 10^4}{500 \times 15} = 3.1987$$

$$v_1^2 = 1.7885 \text{ m/sec}$$

$$\therefore Q = A_1 v_1 = \pi (0.12)^2 \times 1.7885$$

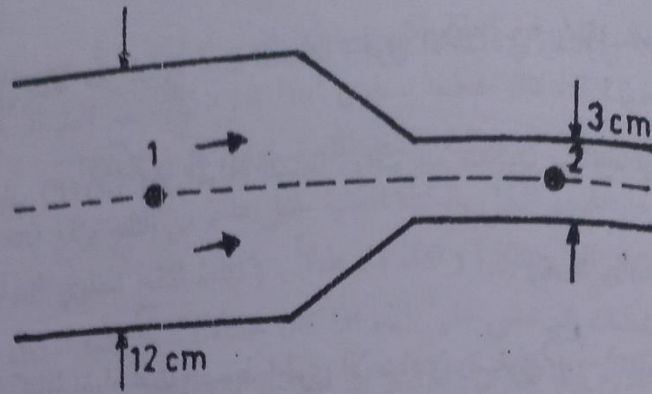
$$Q = 8.091 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{sec}.$$

امثال (4.14)

انبوبة افقية قطرها (12 cm) تنتهي بفتحة ضيقة قطرها (3 cm) انظر الشكل (4.29). جد قيمة سرعة انسياب الماء v_2 وقيمة الضغط P_2 عند الفتحة الضيقة، علماً بأن سرعة الماء داخل الانبوبة هي 0.5 m/sec وكان الضغط P_1 يساوي 10^5 N/m^2 .

الحل: باستخدام معادلة الاستمرارية، وهي:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$



الشكل (4.29): يوضح معادلة الاستمرارية

$$v_2 = \frac{A_1 v_1}{A_2} = \frac{\pi \cdot 6^2 \times 0.5}{\pi \times 1.5^2}$$

$$v_2 = 8 \text{ m/sec}$$

وبما أن $h_2 = h_1$ ، نحصل على معادلة برنولي

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

أو

$$p_2 = \frac{1}{2} \rho (v_1^2 - v_2^2) + p_1$$

$$p_2 = \frac{1}{2} \times 1000 (0.5^2 - 8^2) + 10^5$$

$$= 6.8125 \times 10^4 \text{ N/m}^2$$

مثال (4.15):

جد حجم منطاد مملوء بغاز الهيليوم (V) الذي يستطيع رفع ثقل كتلته (1000 Kg) علماً أن كثافة الهواء $\rho_{air} = 1.29 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ، $\rho_{He} = 0.18 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

الحل:

أن الوزن الكلي (w) الذي يجب رفعه يتكون من الثقل بفضله ثقل البالون ووزن غاز الهيليوم ، أي أن

$$w = mg$$

$$= (1000 + V \rho_{He}) g$$

ρ_{He} تمثل كثافة غاز الهيليوم تحت الضغط الجوي الاعتيادي وتساوي $0.18 \times 10^{-3} \text{ Kg/m}^3$
 ان قوة الطفو (F) (قوة دفع الهواء) للمنطاد ومحتوياته ستكون مساوية الى F، اي ان

$$F = V \rho_{air} g \text{ Kg}$$

ρ_{air} تمثل كثافة الهواء تحت الضغط الجوي الاعتيادي وتساوي $1.29 \times 10^{-3} \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$
 ان شرط التوازن هو ان تكون

$$F = W$$

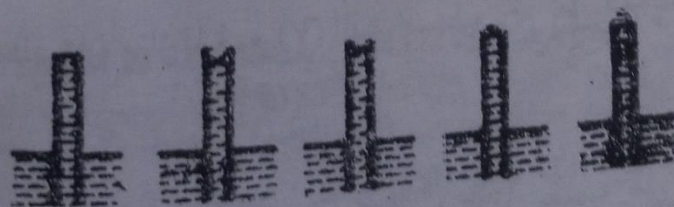
$$V \rho_{air} g = (1000 + V \rho_{He}) g$$

$$V \rho_{air} - V \rho_{He} = 1000 \quad \text{اي ان}$$

$$V(\rho_{air} - \rho_{He}) = 1000 \quad \text{او}$$

$$V = \frac{1000}{(1.29 - 0.18) \times 10^{-3}} \quad \text{اي ان}$$

$$V = 9.1 \times 10^5 \text{ m}^3$$



الشكل (4-30)

مسائل الفصل الرابع

- 1 - جد مقدار قوة الطفو التي يساهاها الهواء أو الماء على جسم الانسان المغمور كلياً فيها، اذا كان حجمه يساوي $7.5 \times 10^{-2} m^3$ مع العلم ان كثافة الهواء تساوي $1.3 \times 10^{-3} Kg/m^3$ وكثافة الماء تساوي $1000 Kg/m^3$.
- 2 - جد الحجم الكلي والكتلة الكلية لجبل عائم من الثلج يرتفع (20m) فوق سطح الماء ويمتد الى 150m و 200 متر طولاً. (كثافة الثلج تساوي $925 kg/m^3$).
- 3 - يمكنك ان تمشي على الماء اذا كان حذاءك كبيراً يشبه الزورق، جد طول الحذاء اللازم لهذا الغرض افرض ان مساحة مقبضة العرضي تساوي $40cm \times 40cm$.
- 4 - باخرة عملاقة تغطس في ماء البحر الى عمق (25m). جد العمق الذي تغطس فيه هذه الباخرة اذا انتقلت الى ماء نهر عذبة. (كثافة ماء البحر $1.02 \times 10^3 Kg/m^3$ وماء النهر $1 \times 10^3 Kg/m^3$).
- 5 - حوض كبير مملوء الى نصفه بالماء (كثافته $10^3 Kg/m^3$) ونصفه الثاني مملوء بالزيت (كثافته $0.8 \times 10^3 Kg/m^3$) افرض ان قطعة خشبية كتلتها (6 Kg) على شكل متوازي المستطيلات طولها 25 cm وعرضها 20 cm وارتفاعها 10 cm وضعت في هذا الحوض، جد العمق الذي تغطس فيه القطعة الخشبية.
- 6 - قطعة من الزجاج وزنها في الهواء يساوي (1.2 Kg) ووزنها في الماء يساوي (0.7 Kg) وكذلك وزنها في الزيت تساوي (0.8 Kg). جد كثافة الزجاج والزيت.
- 7 - قذوب قطي كتله (120 Kg) على قطعة جليد كبيرة فسب انهارها بصورة كلية. جد كتلة قطعة الجليد. اذا كانت كثافة ماء البحر تساوي $1.025 g/cm^3$ والجليد تساوي $0.920 g/cm^3$ على التوالي.
- 8 - وزن حيوان في الهواء (50.5g) ووزن في الماء (5.4g) جد كثافة جسم الحيوان.
- 9 - استخدم مزيج من الترايولين Xylene والبرومباترين Bromobenzene كثافتها النسبية 0.87 و 1.50 على التوالي لحساب كثافة الدم النسبية. فوجد ان قطرات الدم تبقى عالقة عندما يكون نسبة حجمها 72% و 28% على التوالي. جد الكثافة النسبية للدم.
- 10 - وعاء اسطواني الشكل مساحة قطعة العرض $90 cm^2$ وارتفاع الماء فيه يساوي 35 cm جد الزمن اللازم لتفريغ الحوض من الماء خلال ثقب مساحة مقطعة العرضي $1 cm^2$. عند قاعدة الوعاء. (ان سرعة نزول الماء داخل الحوض تساوي $\frac{dh}{dt}$ ، حيث ان h تمثل عمق الماء).
- 11 - جد سرعة الرياح التي يقبها مقياس بيتوت، اذا كان المقياس يسجل ضغطاً $1.3 Kg/m^3$ مع العلم ان كثافة الهواء $1.3 Kg/m^3$.

12 - جد مقدار الشغل اللازم لنفخ فقاعة من الصابون التي قطرها 2 سم إذا كان معامل الشد السطحي المحلول الصابوني يساوي 30 dyne/cm وزاوية التماس تساوي 60° .

13 - يحتاج رجال الأطفاء لمكافحة حريق في الطابق الخامس من عمارة التي انبوية قطرها 7 سم لقلد ما مقداره 200 غالون من الماء خلال الدقيقة الواحدة التي ارتفاعها 15 متراً. جد ما يأتي.

1 - السرعة الدنيا التي يجب أن يقلد بها الماء ليصل إلى ارتفاع 15 متراً.

2 - جد ضغط الماء داخل الأنبوب (أهمل الاحتكاك).

14 - إذا كان قطر المكبس الصغير يساوي (1.5 cm) وقطر المكبس الكبير يساوي 15 cm، فإذا تم تسليط قوة مقدارها 50 Kg على المكبس الصغير، جد مقدار القوة التي ستولد على المكبس الكبير.

15 - إذا كان مساحة المقطعين الكبير والصغير في مقياس فتوري تساويان بأربعة أضعاف، أشتق سرعة الجريان بدلالة فرق الضغط بين النقطتين 1 و 2 اللتين تمثلان نصفي المانومتر في المقطع الكبير والصغير على التوالي.

16 - انبوية شعرية غطست في الماء فارتفع الماء فيها إلى (10 cm) فوق سطحه خارج الأنبوية، فإذا انزلت هذه الأنبوية إلى أن أصبحت فتحتها على ارتفاع 5 cm من سطح السائل، ان شكل سطح الماء عند فوهة الأنبوية سيأخذ أحد الأشكال الآتية. حلل ذلك الشكل (30 - 4).

17 - سائل كثافته النسبية تساوي 0.8 ينساب خلال مقياس فتوري نصف قطرها يساوي 24 cm، وكان الانخفاض في الضغط بين نقطتي الماء والأختناق هو $2.5 \times 10^4 \text{ N/m}^2$. جد قيمة معدل الانسياب.

18 - جد قيمة سرعة انسياب الماء من فتحة على عمق (8 m) تحت سطح الماء في بحر كبير، إذا ما أثر ضغط إضافي قيمته $1.5 \times 10^4 \text{ N/m}^2$ على سطح الماء.

19 - ما هو أقصى ارتفاع يمكن أن يفضخ إليه سائل كثافته النسبية تساوي 1.25 عند قراءة البارومتر الزئبقي بؤشر قراءة مقدارها 76 cm Hg.

20 - إذا كان انسياب كمية من البترين في انبوية شعرية هو (210 sec) عند درجة حرارة 30°C بينما كان انسياب نفس الكمية محلول مخفف في الأنبوية نفسها هو 300 sec عند الدرجة الحرارة نفسها. جد لزوجة المحلول المخفف، علماً بأن لزوجة البترين عند درجة حرارة 30°C تساوي $0.564 \times 10^{-3} \text{ N.sec/m}^2$.

الفصل الثاني

الخواص الميكانيكية للمواد

The Mechanical Properties of Materials

المقدمة

العوامل المؤثرة على استجابة المواد للقوى المؤثرة

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 للمواد تكون ذات حساسية عالية لعمليات تصنيع هذه المواد.

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

وقبل الخوض في مواد هذا الفصل يجب التذكير دائماً ان جميع المواد الصلبة الحقيقية تستجيب الى حد ما تحت تأثير القوى المسلطة 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.

Stress (S)

1-5 الأجهاد

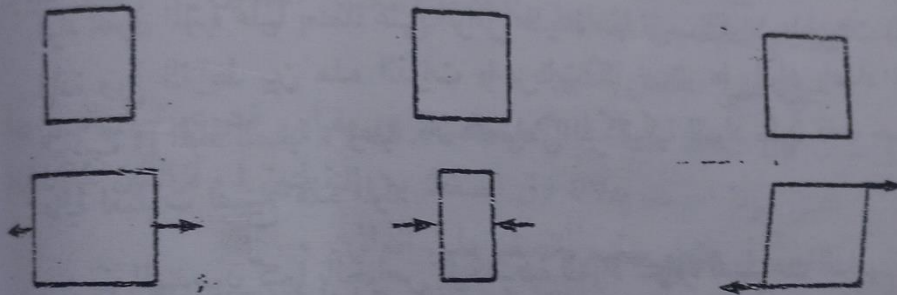
يُعرف بأنه القوة المسلطة على وحدة المساحات من السطح الذي تطبق عليه القوة. وحدة الاجهاد هي النيوتن / م² أو الداين / سم² أو الباوند / انج² أو الباوند / قدم². فإذا رمزنا للقوة ب (F) والمساحة (A) فإن :

$$\frac{\text{القوة}}{\text{المساحة}} = \text{الاجهاد}$$

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

..... 5.1

يمكن ان نقسم الاجهاد الى ثلاثة انواع هي الشد والكبس والقص كما في الشكل (5.1).

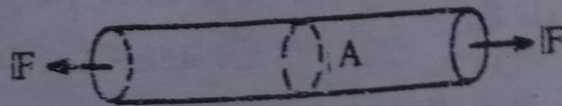


شكل (5.1)

Tensile Stress (S_T)

5-1-1 الاجهاد التوتري (اجهاد الشد)

وليه توتر قوتان متساويتان في المقدار متعاكستان في الاتجاه على نهايتي الجسم وعلى نفس خط التأثير، وعليه فإن تأثير القوتين هو العمل على استطالة الجسم. كما في الشكل (5.2).



الشكل (5.2) : يوضح اجهاد

توزيع القوة بالتساوي على جميع المساحة A (ماعدتا نهايتي الجسم).

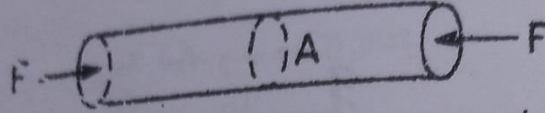
..... 5.2

$$S_T = F/A$$

2-1-5 أجهاد الكبس

Compressive Stress (S_c)

وفيه تؤثر قوتان متساويتان في المقدار متعاكستان في الاتجاه (مقابلتان) على نهايتي الجسم وعلى نفس خط التأثير، وعليه فإن تأثير القوتين هو العمل على ضغط الجسم وتقصير طوله كما في الشكل (5.3).



الشكل (5.3): يوضح أجهاد الكبس.

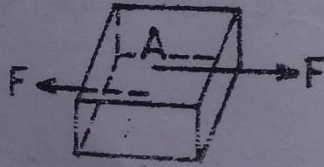
..... 5.3

$$S_c = F/A$$

2-1-5 أجهاد القص

Shear Stress (S_s)

وفيه تؤثر قوتان متساويتان في المقدار متعاكستان في الاتجاه (مبتعدتان) على نهايتي الجسم وعلى خطوط تأثير مختلفة كما في الشكل (5.4)، وعليه فإن تأثير القوتين هو العمل على تغيير شكل الجسم من دون تغيير حجمه.



الشكل (5.4): يوضح أجهاد القص.

..... 5.4

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

Strain (N)

2-5 الانفعال (المطاوعة) كحرف

يُعرف انفعال أو مطاوعة مادة ما بأنه تشوه تلك المادة. كما ويعرف أيضاً على أنه التغير النسبي الذي يسببه الأجهاد لأبعاد الجسم أو شكله أو حجمه. وبما أن هناك عدة أنواع للأجهاد فيسكون هناك عدة أنواع للمطاوعة (الانفعال) تبعاً لذلك وهي مطاوعة الشد (التوتر) ومطاوعة الكبس ومطاوعة القص. إن المطاوعة بجميع أنواعها نسبة مجردة من الوحدات.

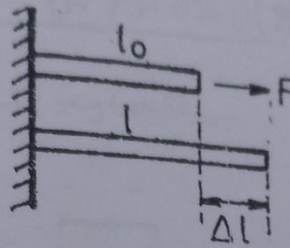
Tensile Strain (N_t)

5-2-1 مطاوعة التوتر

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

$$N_t = \frac{\Delta L}{L_0}$$

..... 5.5



الشكل (5.5) : يوضح مطاوعة التوتر.

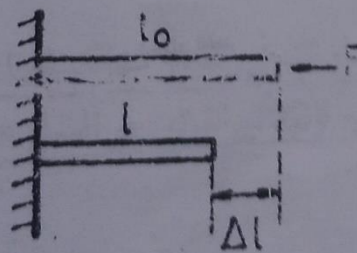
Compressive Strain (N_c)

5-2-2 مطاوعة الكبس

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

$$N_c = \frac{\Delta L}{L_0}$$

..... 5.6



الشكل (5.6) : يوضح مطاوعة الكبس.

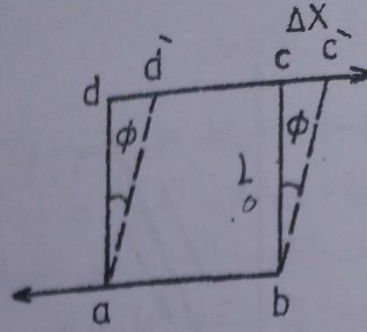
Shear Strain (N_s)

5-2-3 مطاوعة قصية

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

$$N_s = \frac{\Delta x}{l} = \tan \phi \equiv \phi$$

..... 5.7



الشكل (5.7) : يوضح مطاوعة القص.

كما ويعبر عن النسب المذكورة في اعلاه بدلالة النسبة المئوية نسبة الى الطول الأصلي :

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

Kinds of Strain

3-5 أنواع الانفعال

وكذلك تكون المطاوعة (الانفعال) على نوعين هما :

(1) الانفعال المرن .

(2) الانفعال اللدن .

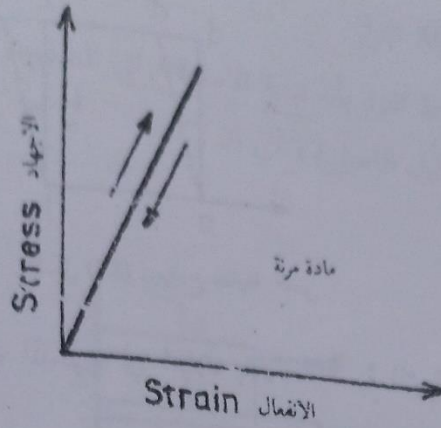
Elastic Strain

الفرق بينهما

1-3-5 الانفعال المرن

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 (5.8) .

ومن أحسن المواد المرنة (الياف الكوارتز) quartz Fiber ، التي تقترب مرونتها من المرونة الدائمة .

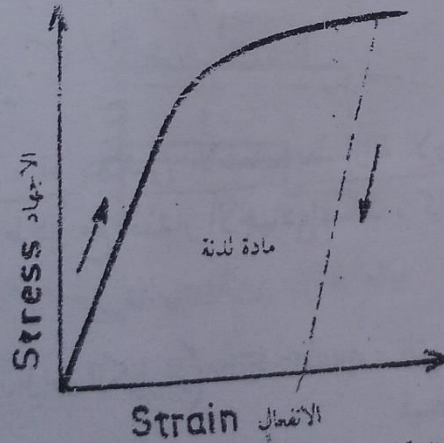


الشكل (5.8) : علاقة الانفعال - الإجهاد للجسم المرن.

Plastic Strain

2-3-5 الانفعال اللدن

وهو انفعال غير عكسي ، اذ لا يتلاشى الانفعال بعد ازالة الأجهاد المسلط ، ويحدث هذا للمادة نتيجة لتسليط الأجهاد بمقدار يتجاوز حدود المرونة ، ويحدث الانفعال اللدن نتيجة الازاحة الدائمة للذرات داخل المادة ، على عكس الانفعال المرن الذي لا يحدث ازاحات دائمة للذرات ويبقى لكل ذرة نفس الذرات المجاورة لها قبل وبعد تسليط الأجهاد. الشكل (5.9) يوضح الانفعال اللدن.



الشكل (5.9) : علاقة الانفعال - الإجهاد للجسم اللدن.

ومن أحسن الأمثلة على المواد اللدنة (المعاجين) Putty التي تقترب لدونتها من اللدنة التامة.

4-5 منحنى الأجهاد - الانفعال

Stress-Strain Curve

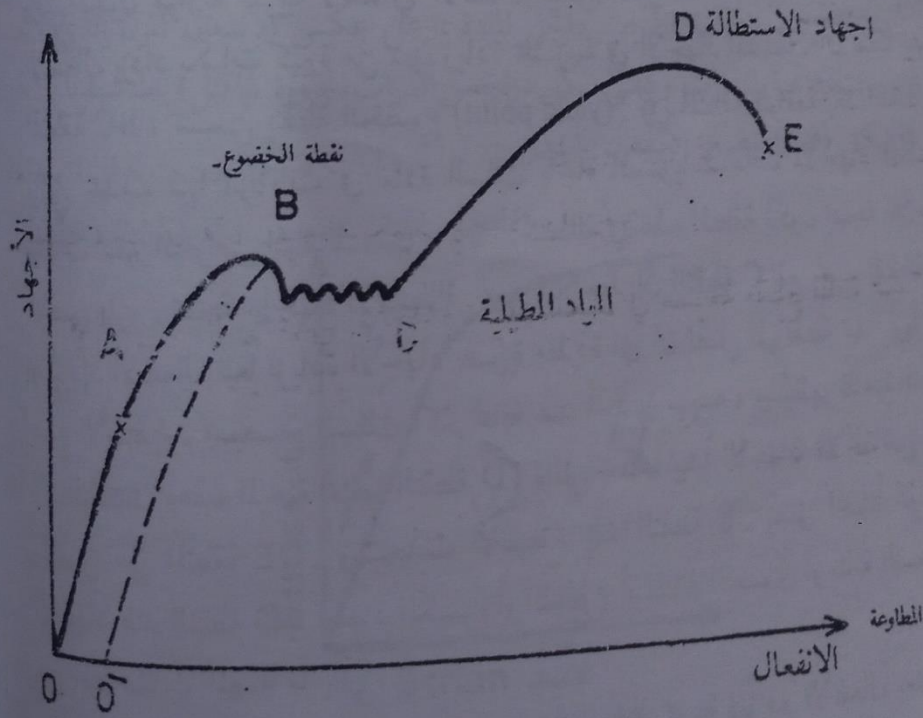
ان العلاقة بين الأجهاد المسلط على جسم ما والانفعال الناتج عنه ، علاقة معقدة تعتمد على عوامل كثيرة ، منها قوى الترابط بين ذرات وجزيئات المادة ، ودينامية ترتيب هذه الذرات والجزيئات والعيوب البلورية التي تحتويها المادة ؛ فضلاً عن طريقة تفسير هذه المادة وتاريخها الحراري . وسنقتصر على شرح منحنى الأجهاد - الانفعال لسلك من الفولاذ .

لواخذنا سلكاً من الفولاذ وعرضناه الى جهد متزايد (ثقل) ورسمنا العلاقة بين الأجهاد والانفعال . ان منحنى الأجهاد - الانفعال يوضحه الشكل (5.10) ، والذي يبين ان الجزء OA يمثل خطاً مستقيماً ويمثل المنطقة التي يطبق فيها قانون هوك (اي ان الانفعال يتناسب طردياً مع الأجهاد 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 لأحدائى الانفعال فيكون تغير المنحنى فيها غير منتظم وان الانفعال يزداد بكميات كبيرة من دون زيادة محسوسة في الأجهاد المسلط . ان نقطة بداية المنطقة BC ، تسمى بنقطة الخضوع (yield point) . وفي المنطقة الواقعة بعد النقطة C والتي يحدث فيها الزلاقات في مادة السلك باتجاه المستويات ذات الأجهاد الكبير ، وسوف تتغير الخواص المرنة للسلك ، وان الاستطالة في هذه المنطقة تكون نتيجة للأجهاد القصي وليس نتيجة لأجهاد الاستطالة . ومن الملاحظ ان النقطة C تقع تحت النقطة B . ويزداد الانفعال تبعاً لزيادة الأجهاد بصورة مطردة الى ان نصل الى نقطة تبدأ فيها حالة عدم الاستقرار ، وسيصبح السلك اكثر نحافة عند إحدى نهايتيه ، وسيظهر ظاهرة التخصر "necking" وهذه المرحلة تمثلها النقطة D والتي بعدها يبدأ الأجهاد بالانخفاض تلقائياً ونحصل على المنطقة DE . وسيحدث الانقطاع عند النقطة E . يطلق أحياناً على قيمة الأجهاد عند النقطة D بـ أجهاد الكسر (أو القطع) أو المانة القصوى أو مانة السحب . من الملاحظات المهمة ما يأتي :

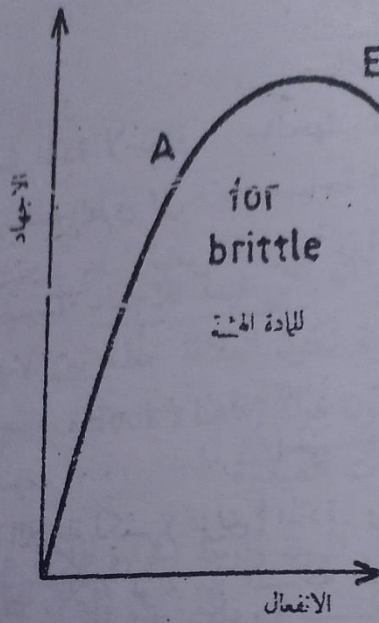
- 1 - ان نقصان مساحة المقطع العرضي للسلك يتناسب طردياً مع الانفعال بعد النقطة المرنة ، بحيث يبقى حجم السلك ثابتاً .
- 2 - اذا ازداد الأجهاد الى حد لم يتجاوز فيه حد المرونة فإن المنحنى سيكرر نفسه عند تناقص الأجهاد وان الانفعال سيصل الى قيمة الصفر عند ازالة الأجهاد .

- 3- اما اذا ازداد الاجهاد الى حد يتجاوز فيه حد المرونة ، فإن منحنياً جديداً سوف يظهر (المنحني المنقط BO في الشكل (5.10)). وان الانفعال لا يرجع الى قيمة الصفر عند ازالة الاجهاد .
- 4- ان فشل تطابق منحنى تناقص الاجهاد مع منحنى زيادته يعرف بـ الهسترة المرونة ، 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 (5.11) .

يأخذ المهندسون بنظر الاعتبار عدم تجاوز الاجهاد الاعظم لجزء محدد من اجهاد الكسر ويعرف هذا الجزء أو الكسر بأجهاد العمل ($Working Stress$) . وان نسبة اجهاد الكسر الى اجهاد العمل تعرف (بعامل السلامة) ($Factor of Safety$) .



الشكل (5.10): منحنى الانفعال - الاجهاد لسلك الفولاذ $1 < *$



الشكل (5-11) : منحنى الانفعال - الاجهاد للمادة الهشة

Ductility

5-5 المطيلية X

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

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

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

$$\Delta a = \frac{\Delta A}{A_0}$$

5.8

Hardness

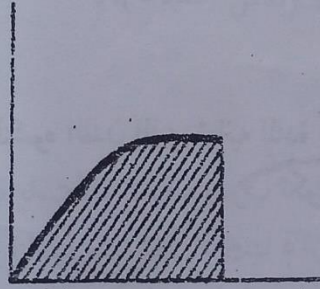
X 5-6 الصلادة

وتعرف على انها مقاومة المادة للاختراق . تستخدم طرق مختلفة لتقدير الصلادة . يعتمد قسم من هذه الطرق على إيجاد مساحة الثلم الذي يحدثه اختراق مظهر تحت ثقل قياسي ، ومنها ما يعتمد على قياس عمق الاختراق لسطح المادة والذي يحدث مظهر قياسي .

Toughness

X 5-7 العسو

ويعرف على انه الطاقة اللازمة لكسر (لتفريق) المادة . ويمكن إيجاد الطاقة من حاصل ضرب القوة $\times$ المسافة ، ولها علاقة قوية مع الميالة الموجودة تحت منحنى الأجهاد والانفعال . انظر الشكل (5.12) .



الشكل (5.12) : إيجاد طاقة الكسر (العسو) .

Modulus of Elasticity

5-8 معامل المرونة

تعرف المرونة على انها قابلية المادة على استعادة شكلها الاصلي بعد إزالة القوة المؤثرة والميالة للتشوه . هناك انواع مختلفة من المعاملات ، يعتمد نوع المعامل على نوع التشوه الذي يتعرض له المادة . كالاستطالة والانحناء وغيرها . وتمثل جميع المعاملات بإيجاد نسبة الأجهاد الى الانفعال .

ان وحدات المعامل هي وحدات الاجهاد نفسه لان الانفعال لا وحدات له . واعتد يكون الاجهاد ضمن حدود المرونة ، فان نسبة الاجهاد الى المطاوعة ستكون مقداراً ثابتاً ويسمى هذا الثابت (معامل المرونة) Modulus of elasticity ، اي ان :

الاجهاد

الانفعال

معامل المرونة =

Stress

= Strain

5.10

يعرف (المحدد للمرن) على انه أنة قيمتة للاجهاد المسبب لانفعال (مطاوعة) ثابت في المادة وتضمن حدود المرونة تكون العلاقة خطية بين الاجهاد والانفعال ولا يعتمد على الزمن، وثلاثة ما يعرف (بقانون هوك) (Hook's 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.

Young's Modulus (Y)

6-9-5 معامل يونك

يعرف معامل يونك بأنه نسبة الاجهاد الى المطاوعة في حالتي الاستطالة والانكماش

الطولين اي ان

الاجهاد الخطي

الانفعال الخطي

معامل يونك =

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

5.11

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

5.12

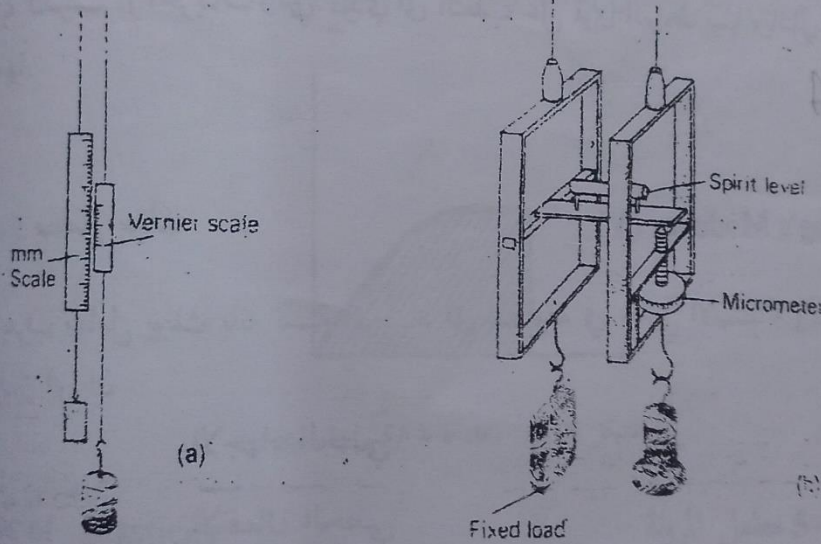
ان وحدة معامل يونك هي وحدة الاجهاد نفسه اي نيوتن / م² او داين / سم². يعتمد

* معامل يونك على نوع المادة وليس على ابعادها.

Determination of Young Modulus for a Wire

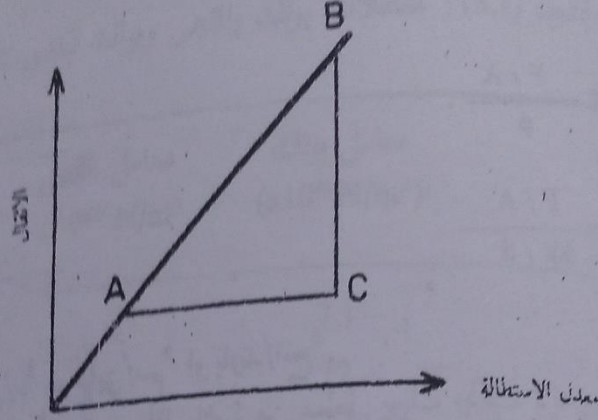
Searle's Method

وتسمى هذه الطريقة بطريقة سيرل
يتكون جهاز قياس معامل يونك لسلك من سلكين طويلين من المادة نفسها
متماثلين، ويتدليان من مكان مرتفع وليكن السقف. يحمل أحد السلكين في نهايته
تدريجات ويعلق في نهايته ثقل لجعله متوتراً. أما السلك الثاني فيحمل ورنية تتحرك امام
مسطرة ثابتة، ومعلق به حامل لحمل الاثقال من فئة $\frac{1}{2}$ او كيلوغرام واحد. الشكل (5.13)
يوضح تخطيطاً لهذا الجهاز كذلك يحتوي الجهاز على قبان كحولي. عند وضع اي ثقل فان
مستوى القبان يظهر حالة عدم التوازن، التي يمكن الحصول عليها بتدوير لولب
المايكروميتر.



الشكل (5.13): تجربة قياس معامل يونك لسلك (طريقة سيرل).

تقرأ الورنية بعد كل اضافة للاثقال، وعندما يصبح الثقل معقولاً (اقل من 10 كغم)
تقرأ الورنية بعد كل رفع أو تقليل للاثقال بنفس معدل زيادتها، ويؤخذ معدل القراءتين
كما يقاس طول السلك من نقطة التعليق الى الورنية، وكذلك يقاس قطر السلك
باستخدام المايكروميتر في عدة نقاط مختلفة ويؤخذ معدل القراءات. وترسم العلاقة بين
معدل الزيادة او النقصان في الطول على المحور السيني والاثقال المقابلة على المحور الصادي
فنحصل على خط مستقيم يمر بنقطة الأصل، كما في الشكل (5.14).



الشكل (5.14) : علاقة القص مع مقدار الاستطالة.

ان معامل يونك (Y) يعطى بالعلاقة الآتية

$$Y = \frac{\text{الاجهاد}}{\text{المطواعة}}$$

$$Y = \frac{F/A}{\Delta L/L} = \frac{FL}{A \Delta L} \quad \dots\dots 5.11$$

$$F = mg$$

$$\therefore Y = \frac{mgL}{\frac{1}{4} \pi d^2 \Delta L} = \frac{4g \cdot L}{\pi d^2} \cdot \frac{m}{\Delta L}$$

5.12

ان معدل قيمة $\frac{m}{\Delta L}$ يمكن الحصول عليه من ميل الخط المستقيم ويساوي $\frac{BC}{AC}$. وبالتعويض بالقيم المناسبة لكل من الطول L والتعجيل الارضي g والقطر d يمكن إيجاد قيمة معامل يونك.

Shear Modulus (S)

5-11 معامل القص (معامل الجساءة)

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

$$S = \frac{F/A}{\Delta x/d}$$

$$S = \frac{F/A}{\Delta x/d}$$

(5.14)

(5.15)

وحدة (S) هي نيوتن/م² أو داين/سم² أو باوند/انج².
يكون معامل القص أقل قيمة وأقل أهمية من معامل يونك وذلك لأنه من السهل جعل ذرات المادة الصلبة تتحرك على بعضها، بينما تلاقي عملية تقريب أو تفريق الذرات من بعضها صعوبات كبيرة، أكبر بكثير مما هي عليه في حالة انزلاق الذرات. إن قيم معامل القص تكون واقعة بين $\frac{1}{2}$ إلى $\frac{1}{3}$ من قيم معامل يونك.

Bulk Modulus (B)

5-12 X معامل تغير الحجم (معامل بولك)

ويسمى أيضا بالمعامل الحجمي ويعرف على أنه النسبة بين الاجهاد في الموائع (أي التغير في الضغط المسلط عليها) إلى الانفعال المناظر له (أي التغير النسبي في حجم المائع)؛ أي:

$$B = \frac{-\Delta P}{\Delta V/V}$$

(5.16)

نفس باستطاعتنا إيجاد قيم معاملات يونك ومعامل القص للموائع، لأن الموائع تستطيع فقط مقاومة الانكماش. الإشارة إلى ذلك هي أن زيادة (أو نقصان) الضغط المسلط على المائع يولد نقصاناً (أو زيادة) في حجم المائع. أما وحدة المعامل الحجمي فهي وحدة الضغط: م²/م².

Compressibility (K)

5-13 X معامل الانضغاطية

ويعرف على أنه مقلوب معامل بولك، أي أن:

$$K = \frac{1}{B}$$

(5.17)

الجدول (5.1) يحتوي على قيم معاملات يونك ومعامل القص ومعامل بولك لبعض المواد المعروفة.

الجدول (5.1) : معاملات يونك والقص ويونك لبعض المواد.

المادة	معامل يونك ($\times 10^{10} \text{ N/m}^2$)	معامل القص $\times 10^{10} \text{ N/m}^2$	معامل يونك $\times 10^{10} \text{ N/m}^2$
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
النيكل	21	7.6	18
بوليستيرين	0.14		
حديد الصلب	20		
حديد مطاوع	19		
نكستن	35		

اما الجدول (5.2) فيبين قيم معامل يونك لبعض السوائل عند درجة حرارة (20°C) .

الجدول (5.2) : معامل يونك لبعض السوائل

السائل	معامل يونك 10^{-10} N/m^2
الكحول الايثيلي	0.9
النيترين	1.05
الكبروسين	1.3
الماء	2.3
الزئبق	26

Poisson's Ratio (σ)

8-14-5 نسبة بواسون

عندما يتعرض جسم الى تأثير قوتين متساويتين في المقدار ومتعاكستين في الاتجاه (قوى سحب) فانه يستطيل (اي يزداد طوله) باتجاه قوى السحب وينكمش او يتقلص بالاتجاه العمودي اي 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 اما الانفعال الناتج باتجاه عمودي على اتجاه القوى المسلطة فيسمى بالانفعال الجانبي او العرضي Lateral. والانفعالان كلاهما يعتمدان على الاجهاد المسلط ونوع مادة الجسم تكون النسبة بين المطاوعة الجانبية والمطاوعة الطولية لمادة ما ثابتة ويطبق عليها اسم نسبة بواسون، اي ان:

$$\sigma = \frac{-\Delta\omega/\omega_0}{\Delta L / L_0} \quad \dots\dots 5.18$$

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

$$\Delta L = L - L_0$$

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. تكون القيمة العددية لنسبة بواسون للعظم المواد حوالي (0.3). الجدول (5.3) يوضح قيم نسبة بواسون لبعض المواد المعروفة.

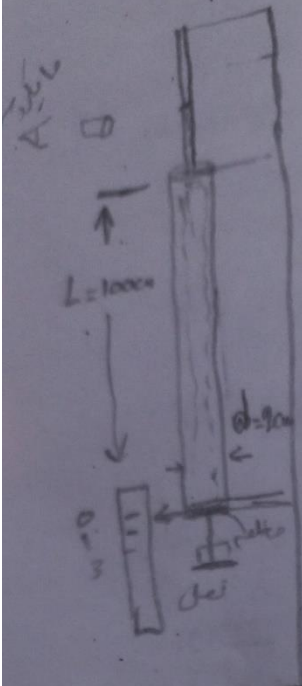
9-15-5 قياس نسبة بواسون

Determination of Poisson's Ratio

يمكن تحديد قيمة نسبة بواسون للمطاط باستخدام الجهاز المبين في الشكل (5.18) والذي يتكون من انبوب من المطاط ذي سمك قليل طوله حوالي 100 cm وقطره حوالي 2cm يتصل بنهايته السفلى المغلقة قاعدة لحمل الانتقال. اما النهاية العليا فغالبا ما تكون بقطعة مطاط يمر خلالها انبوبة شعرية ذات مقطع عرضي منتظم. يملأ الأنبوب وجزء من الانبوبة الشعرية بالماء. يثبت الجهاز على مسند صلب عند وضع الانتقال على الماء.

الجدول (5.3): نسبة لوابون لبعض المواد.

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



يزداد طول الانبوب ، ويزداد تبعاً لذلك الحجم الداخلي للانبوب ، وينخفض مستوى الماء في الانبوبة الشعرية يمكن تحديد مقدار الزيادة في طول الانبوب بوضع علامة عند النقطة x وقياس المسافة بين النقطتين x و x' قبل وبعد وضع الاثقال. كما يمكن تحديد قيمة انخفاض الماء في الانبوبة الشعرية C باستخدام الميكروسكوب المتحرك. يمكن كتابة الحجم الداخلي للانبوب V بالصيغة الآتية :

$$V = AL$$

إذاً ان A تمثل مساحة المقطع العرضي الداخلي للانبوب و L تمثل طول الانبوب فإذا فاضلنا الحجم V والمساحة A نسبة الى الطول L نجد ان

$$\frac{dV}{dL} = \frac{dA}{dL} (L, A) \quad \dots 5.19$$

ان الإشارة السالبة تعني ان A تقل بزيادة L.

وبما ان

$$A = \pi r^2$$

$$dA = 2\pi r dr$$

حيث ان r تمثل نصف قطر الانبوب

فان

ونقسم الطرفين على المساحة A نجد ان :

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

اي ان

$$dA = 2A \frac{dr}{r}$$

..... 5.20

$$\frac{dV}{dL} = \frac{d(LA)}{dL} = \frac{L}{dL} dA + A$$

وبالتعويض عن قيمة dA في المعادلة (5.19) وترتيبها نحصل على

$$\frac{dV}{dL} = \frac{(2A dr/r)}{dL/L} + A$$

..... 5.21

وبما ان

$$\frac{dr}{r} \text{ يمثل الانفعال العرضي}$$

و

$$\frac{dL}{L} \text{ يمثل الانفعال الطولي}$$

$$\text{نسبة بواسون} = \frac{\text{الانفعال العرضي}}{\text{الانفعال الطولي}}$$

وان

اي ان

..... 5.22

$$\frac{dr/r}{dL/L} = \sigma$$

اي ان

$$\frac{1}{A} \frac{dV}{dL} = -2\sigma + 1$$

..... 5.23

$$1 \left[\frac{1}{A} \frac{dV}{dL} \right]$$

يمكن إيجاد مقدار التغير في الحجم dV من معرفة نصف قطر الأنبوبة الشعرية،
ولكن r ومقدار هبوط مستوى الماء في الأنبوبة الشعرية ولكن dx ، أي أن

$$dV = \pi r^2 dx$$

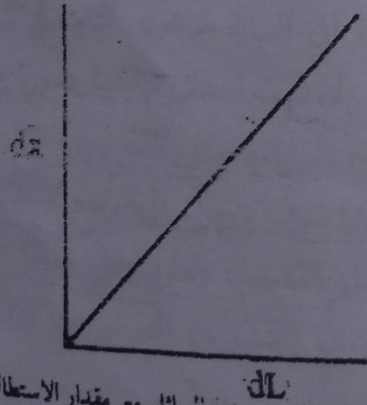
وعليه فإن

$$\sigma = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\pi r^2} \frac{\pi r^2 dx}{dL} \right]$$

$$\sigma = \frac{1}{2} \left[\frac{r^2}{r^2} \frac{dx}{dL} \right]$$

..... 5.24

المعادلة الأخيرة توضح إمكانية استخدام معدل عدة قراءات بين مقدار هبوط مستوى
السائل في الأنبوبة الشعرية dx ومقدار استطالة الأنبوب dL وذلك من رسم العلاقة بينها
وكما في الشكل (5.15). أن ميل الخط المستقيم يمثل معدل $\frac{dx}{dL}$ ومن معرفة قيمة r و σ
يمكن إيجاد قيمة نسبة بواسون (σ).



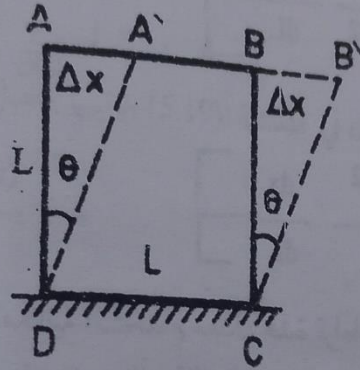
الشكل (5.15). مستوى السائل مع مقدار الاستطالة.

Modulus of Rigidity (n)

5-16 معامل الصلابة

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

لواخذنا المكعب المبين في الشكل (5.16) ABCD . فاذا ثبت الوجه الاسفل DC بقوة الى قاعدة ثابتة ، وسلطت قوة مماسية مقدارها F على الوجه الاعلى للمكعب AB . فإن المكعب ABCD سيغني تشوهاً وسيأخذ شكل متوازي الاضلاع A'B'CD . فاذا كان الطول الاصلي لطول ضلع المكعب يساوي L وان Δx تمثل الازاحة AA' والتي تساوي الازاحة BB' ، فانه يمكن التعبير عن الانفعال القصي بالمعادلة الآتية :



الشكل (5.16): حساب معامل الصلابة.

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

اما الاجهاد المماسي فانه يمكن كتابته بالنسبة الآتية :

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

وعليه فان معامل الصلابة سيكون مساوياً الى

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

..... 5.25

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

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

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

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

..... 5.26

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

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

وقد ترك الاشتقاق كتمرين محلول (مثال رقم 5.9).

Torsional Constant (τ)

17-5 ثابت اللي

ويعرف على أنه عزم الدوران اللازم لانحياز يرم (لي) لأحدى نهايتي المادة بمقدار زاوية نصف قطرية واحدة. نسبة إلى النهاية الأخرى الثابتة (الشكل 5.17) يوضح قضيباً أو اسطوانة طولها (L) وقطرها (d) تثبت إحدى نهايتيها بصورة صلبة، يؤثر على نهايتها الأخرى عزم لني مقداره G ، تدور النهاية السفلى للقطب خلال زاوية فتل مقدارها θ . أي أن الخط الشعاعي (AB) سوف يتحرك إلى الوضع الجديد الممثل بالخط AC . تعتمد زاوية الفتل θ على طول القضيب وقطره وعلى معامل الجسوة لمادته. يمكن حساب ثابت اللي في حالة الدوران (التشويه) الصغير من المثلث (ABC). وحسب المعادلة الآتية :

$$G = \tau \theta$$

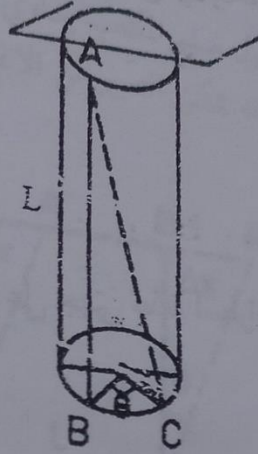
..... 5.28

Torsional Constant

حيث أن τ تمثل ثابت اللي للأسطوانة
 أن ثابت اللي علاقة بطول الأسطوانة ونصف قطرها وثابت الصلابة لمادة الأسطوانة
 تعطى بالعلاقة الآتية :

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

..... 5.29



الشكل (5.17): حساب ثابت اللي.

ان الانفعال القصي في حالة اللي 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

$$N_s = \frac{\theta}{L} \cdot r \quad \text{..... 5.30}$$

ان الزاوية المستخدمة هنا هي زاوية نصف قطرية . وستطرق الى هذا الموضوع بشيء من التفصيل في الفقرات اللاحقة.

The Work and Strain

5-18 الشغل والانفعال X

تعتمد علاقة الشغل الذي يبذل لاجداث انفعال ماعلى نوع الانفعال . وستناول الحالات الرئيسة الآتية :

1-18-5 الانفعال الطولي

The Longitudinal Strain

وتتمثل هذه الحالة في سحب (شد) سلك ما بقوة. ان القوة المعاكسة للشد تتناسب مع مقدار الاستطالة. فاذا كان مقدار الاستطالة (δL) والقوة المعاكسة (F)، فان الشغل المبذول لزيادة الطول من (L) الى ($L + \delta L$) يعطى بالصيغة الآتية:

$$\delta W = F \delta L$$

..... 5.31

فاذا كانت L تمثل الطول الاصلي للسلك و A تمثل مساحة المقطع العرضي له فانه يمكن التعبير عن معامل يونك Y بالمعادلة الآتية:

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

أو

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

وعليه فان الشغل δW سيكون

$$\delta W = \frac{YA}{L} \Delta L dL$$

..... 5.32

يمكن ايجاد مقدار الشغل المبذول في زيادة الطول بمقدار ΔL من تكامل المعادلة

(5.32) ، اي ان

$$\int \delta W = \frac{YA}{L} \int_0^{\Delta L} \Delta L dL$$

$$W = \frac{YA}{L} \frac{(\Delta L)^2}{2}$$

$$W = Y \cdot \frac{A \Delta L}{L} \cdot \frac{\Delta L}{2}$$

$$W = \frac{1}{2} F \Delta L$$

وهذا يعني ان الشغل المبذول عند تسليط قوة مقدارها F وتحدث استطالة مقدارها ΔL يكون مساوياً الى نصف القوة مضروباً في مقدار الاستطالة .
 اما الشغل المنجز لوحدة الحجم W_v فانه يمكن ايجاده بالقسمة على حجم السلك
 والمساوي الى (ΔL) أي ان :

$$W_v = \frac{1}{2} F \cdot \Delta L / aL$$

$$W_v = \frac{1}{2} \frac{F}{a} \frac{\Delta L}{L}$$

..... 5.34

وبما ان $\frac{F}{A}$ و $\frac{\Delta L}{L}$ تمثلان الاجهاد والانفعال على الترتيب فان الشغل المبذول لوحدة الحجم سيكون مساوياً الى

$$\frac{1}{2} = \text{الاجهاد} \times \text{الانفعال}$$

اي ان

$$W_v = \frac{1}{2} \text{Stress} \times \text{Strain}$$

..... 5.35

In Volume Strains

5-18-2 الانفعال الحجمي

اما في حالة الانفعال الحجمي فان الاجهاد الذي يسببه الضغط المتظم على الجسم ، P سوف يتناسب طردياً مع مقدار الانكماش δV في الحجم ، اي ان

$$\delta W = P \delta V$$

..... 5.36

فاذا اترضفط مقداره P على مساحة مقدارها A وازيحت هذه المساحة مساحة مقدارها dx ، فان مقدار الشغل المنجز ، سيكون مساوياً الى

$$W = P A dx = P \delta V$$

فاذا كان الحجم الاصلي V فان معامل بولك سيأخذ الصيغة الآتية .

Torsional Strain (θ)

$$= \frac{L \Delta \theta}{2}$$

3-18-5 انفعال اللي

اما الشغل المنجز عند لي اسطوانة مثبت احد طرفيها ويتعرض الطرف الاخر الى عزم لي مقداره G ينتج عنه دوران الاسطوانة بزاوية مقدارها θ ، حيث ان

$$G = \tau \theta$$

..... 5.41

اذ ان τ تمثل العزم المضاد لوحدة الزاوية .
اما الشغل المنجز لتغيير زاوية الدوران θ بمقدار $\Delta \theta$ فانه يعطى بالمعادلة الآتية :

$$\delta W = \text{couple} \times \text{angular twist}$$

$$= \tau \Delta \theta \cdot d\theta$$

..... 5.42

وبناءً على ماتقدم فان الشغل الكلي المبذول في زيادة زاوية اللي من صفر الى $\Delta \theta$ يمكن ايجاده بتكامل المعادلة (5.42) وكما يأتي :

$$W = \int dW = \tau \int_0^{\Delta \theta} \Delta \theta \, d\theta$$

$$W = \frac{\tau (\Delta \theta)^2}{2}$$

..... 5.43

Shear Stress

4-18-5 اجهاد القص

يمكن ايجاد قيمة الشغل المنجز على مكعب سلط عليه اجهاد قصي ، سبب ازالة السطح العلوي بمسافة مقدارها δL من تطبيق المعادلة الآتية :

$$\delta W = F \delta L$$

..... 5.44

اذ ان L تمثل طول ضلع المكعب و θ تمثل زاوية الاراحة فان معامل الاجهاد القصي τ يكون بدلالة الاجهاد القصي : كما يأتي :

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

..... 5.45

$$F = n L \Delta L$$

$$\therefore \delta W = n L \Delta L \delta L$$

..... 5.46

وعليه فان الشغل المنجز لزيادة الاراحة من صفر الى ΔL يكون

$$W = n L \int_0^{\Delta L} \Delta L \delta L$$

$$= n L \frac{(\Delta L)^2}{2}$$

$$W = \frac{1}{2} F \cdot \Delta L$$

..... 5.47

وعليه فان الشغل المنجز في حالة الاجهاد القصي يكون مساوياً الى نصف القوة المناسبة مضرورياً في الاراحة.

اما الشغل المنجز لوحدة الحجم فيمكن الحصول عليه من القسمة على الحجم L^3 ،

اي ان

$$W = \frac{1}{2} F \cdot \frac{\Delta L}{L^3}$$

$$= \frac{1}{2} \frac{F}{L^2} \frac{\Delta L}{L}$$

..... 5.48

والذي سيكون مساوياً الى

$$W = \frac{1}{2} \text{ Stress Strain}$$

مثال 5.1 ✓

- بين أي من المواد الآتية يتعرض إلى إجهاد أكبر.
- 1- قطعة من الألمنيوم أبعادها $15 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ تحت تأثير ثقل كتلته 10 Kg
 - 2- قطعة من الفولاذ أبعادها $7 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$ تحت تأثير ثقل كتلته 15 Kg
 - 3- قطعة من النحاس أبعادها $5 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ تحت تأثير ثقل كتلته 5 Kg

الحل
يعرف الإجهاد على أنه القوة المؤثرة على وحدة المساحة ، أي أن

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

$$S = \frac{10 \times 9.8}{5 \times 15} = \frac{18.6}{15} = 1.24 \text{ N/cm}^2 \quad \text{للألمنيوم}$$

$$S = \frac{15 \times 9.8}{3 \times 7} = \frac{49}{7} = 7 \text{ N/cm}^2 \quad \text{للفولاذ}$$

$$S = \frac{5 \times 9.8}{5 \times 2} = 4.9 \text{ N/cm}^2 \quad \text{للمنغنيز$$

من هذا يتبين أن الفولاذ يتعرض إلى الإجهاد الأكبر.

مثال (5.2) ✓

تضيق من النحاس الأصفر معامل مرونته يساوي $1.1 \times 10^{12} \text{ N/m}^2$. جد نظر
التضيق الذي طوله 1 م ويتعرض إلى قوة شد (سحب) مقدارها 22 نيوتن وتسبب زيادة
في طوله مقدارها 1 ملم.

الحل:

$$\frac{\text{الإجهاد}}{\text{الانفعال}} = \text{معامل المرونة}$$

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

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

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

$$A = \frac{22 \times 1}{1.1 \times 10^{12} \times 10^{-3}} = 2 \times 10^{-8} \text{ m}^2$$

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

$$r = 7.981 \times 10^{-5} \text{ m}$$

$$d = 2r = 2 \times 7.981 \times 10^{-5} = 15.962 \times 10^{-5} \text{ m}$$

0, 0

✓ مثال (5.3):

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.

$$L = 2 \text{ m} = 200 \text{ cm}$$

$$l = 8 \text{ mm} = 0.8 \text{ cm}$$

$$A = l^2 = 0.8 \times 0.8 = 0.64 \text{ cm}^2$$

$$m = 2 \text{ kg} = 2000 \text{ g}$$

$$\Delta L = 3 \text{ mm} = 0.3 \text{ cm}$$

الانفعال

معامل يونك = $\frac{\text{الشد}}{\text{الانفعال}}$

الحل:

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

نحول جميع الكميات الى وحدات الغرام سم. ثانية

$$Y = \frac{1.2 \times 1000 \times 980 \times 2 \times 100}{0.8 \times 0.8 \times 0.3}$$

$$Y = 1.225 \times 10^9 \text{ dyne/cm}^2$$

مثال (5.4) ✓
 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.

$$r = \frac{d}{2} = \frac{1 \text{ in}}{2} = 0.5 \text{ in}$$

الحل :
 بما ان معامل يونك يعطى بالعلاقة الآتية :

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

اذن الانفعال الطولي يساوي

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

$$A = \pi r^2$$

$$= \frac{100}{(3.142) \times (0.5) \times (0.5) \times 3 \times 10^6} = \frac{10^{-4}}{2.357}$$

$$\frac{\text{الانفعال العرضي}}{\text{الانفعال الطولي}} = \text{نسبة بواسون}$$

$$\text{الانفعال العرضي} = \text{نسبة بواسون} \times \text{الانفعال الطولي}$$

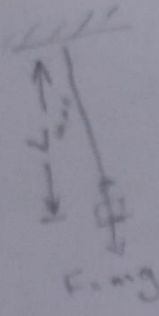
$$= 0.3 \times \frac{10^{-4}}{2.357}$$

$$= 1.273 \times 10^{-5}$$

مطلوب

مثال (5.5) ✓

جد اكبر قيمة لطول سلك من الحديد يمكن ان يعلق بصورة عمودية من دون
 انقطاعه ، علماً بان اجهاد القطع (الكسر) يساوي $(7.9 \times 10^8 \text{ dyne/cm}^2)$ 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 سم²
 اذن الحجم = (aL) سم³

$$m = (aL) \cdot \rho$$

$$m = (aL) 7.9 = 7.9 aL \text{ (g)}$$

ان وزن السلك = القوة المؤثرة

$$mg = 980 \times 7.9 aL$$

$$S = \frac{F}{A} = \frac{mg}{A} = \frac{\rho V g}{A} = \frac{\rho A L g}{A}$$

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

$$S = \frac{F}{a} = \frac{7.9 \times a \times L \times 980}{a}$$

$$= 7742 L \text{ dyne / cm}^2$$

ان اكبر طول يحصل عندما يسلط اجهاد الكسر، اي ان

$$7742 L = 7.9 \times 10^9$$

$$L = \frac{7.9 \times 10^9}{7.9 \times 980} = 1.02 \times 10^6 \text{ cm}$$

مثال (5.6)

قضيب معدني طوله (1 m) وقطره (6 mm) ثبت احدى نهايتيه في السقف بصورة جيدة وتركبت النهاية الثانية طليقة. سلطت قوة عزم مقدارها ($2 \times 10^7 \text{ dynes - cm}$) على نهايتها الطليقة. ونتيجة لذلك عكست مرآة مثبتة في النهاية الطليقة بقعة ضوء مسافة (10 cm) على مقياس يبعد (1 m). جد قيمة ثابت اللبي.

الحل: ان المسافة التي انعكست خلالها بقعة الضوء تدل على ضعف زاوية الدوران

$$\tan(2\theta) = \frac{10}{100} = 0.1$$

$$2\theta = 5.7^\circ$$

$$\therefore \theta = 2.85^\circ$$

$$= 2.85^\circ$$

$$\theta = 2.85 \times \frac{\pi}{180} \equiv 0.05 \text{ radian.}$$

$$G = \tau \theta$$

$$\therefore \tau = \frac{G}{\theta} = \frac{2 \times 10^7}{0.05}$$

$$= 4 \times 10^8 \text{ dyne / radian}$$

ثابت اللي τ /

مثال (5.7) X

جد كثافة مادة الرصاص تحت ضغط مقداره $2.5 \times 10^8 \text{ N/cm}^2$. مع العلم ان معامل بولك للرصاص يساوي $4 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ وان كثافة الرصاص تحت الضغط الجوي الاعتيادي تساوي 11.4 g/cm^3 .

الحل:

من تعريف معامل بولك نجد

$$B = \frac{P}{\frac{\Delta V}{V}}$$

وبما ان الكتلة ثابتة فان

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

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

وبالتعويض عن قيم كل من V و ΔV في المعادلة السابقة وإعادة ترتيبها نحصل على:

$$B = \frac{PV}{\Delta V}$$

$$= \frac{P \cdot m/\rho}{m/\Delta \rho}$$

$$B = \frac{P \Delta \rho}{\rho}$$

أي أن التغير في الكثافة سيكون

$$\Delta \rho = \frac{B \rho}{P}$$

$$= \frac{4 \times 10^{10} \times 11.4}{2.5 \times 10^{18} \times 10^4}$$

$$= 0.182 \text{ g.cm}^3$$

أي أن الكثافة الجديدة تحت الضغط المذكور ستكون

$$\rho = \rho + \Delta \rho = 11.4 + 0.182 = 11.58 \text{ g/cm}^3$$

مثال (5.8)

جد قيمة الشغل المبذول لاحتداث استطالة مقدارها 1.5 mm في سلك طوله 75 cm ومساحة مقطعه العرضي 1 mm². مع العلم أن معامل يونك لمادة السلك تساوي (1.25 × 10¹² dyne/cm²).

الحل: الشغل المبذول = $\frac{1}{2} \times \text{القوة المسلطة} \times \text{مقدار الاستطالة}$

$$W = \frac{1}{2} F \Delta L$$

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

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

$$W = \frac{1}{2} Y \frac{A}{L} (\Delta L)^2$$

$$= \frac{1}{2} \times 1.25 \times 10^{12} \times \frac{1 \times 10^{-2}}{75} \times (0.15)^2$$

$$= 1.25 \times 10^7 \text{ ergs}$$

مثال (5.9)

اشتق قيمة عزم المزدوج الذي تتعرض له قطعة اسطوانية طولها L وقطرها $2r$ مثبت احد اطرافها بقوة F ، وسلط عليها مزدوج قوى على ترابيتها الطليقة في مستوى عمودي على المحور مركز الاسطوانة.

الحل:

لنأخذ القطعة الاسطوانية الموضحة في الشكل (5.17). نفرض ان قوة مماسة مقدارها F لوحدة المساحة اثرت على قاعدة الاسطوانة فان

$$F = \frac{2r}{L} \theta$$

ان القوة المؤثرة على مساحة مقدارها δA تعطى بالصيغة الآتية :

$$f = F \delta A = \frac{n\tau}{L} \theta \cdot \delta A$$

ان القوة f تشكل مزدوجاً ، وبما ان عزم اي من القوتين f حول المحور المركزي يساوي حاصل ضرب القوة في نصف قطر الاسطوانة ، اي

$$G = fr$$

وعليه فان عزم المزدوج المسلط على القاعدة باجمعها δG سيكون مساوياً الى مجموع حاصل ضرب كل المزدوجات مع نصف القطر لجميع الاقراص

$$\delta G = \sum fr$$

$$= n \frac{r^2}{L} \theta \sum \delta A$$

وبما ان مساحة القاعدة لقرص سمكه δr تساوي

$$\delta A = 2\pi r \delta r$$

$$\therefore \delta G = \frac{2\pi n\theta}{L} r^3 \delta r$$

$$G = \int \delta G = \frac{2\pi n\theta}{L} \int_{r=0}^{r=r} r^3 \delta r$$

$$G = \frac{2\pi n\theta}{L} \left[\frac{r^4}{4} \right]_0^r$$

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

(5.49)

وهناك قيمة خاصة لعزم المزدوج عندما $\theta = 1$ وهي

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

وهذه تمثل قيمة عزم المزدوج اللازمة لاجداث وحدة فتل (لي) زاوية في الاسطوانة المسلط عليها المزدوج المذكور، وغالباً ما يطلق على هذه القيمة صلابة اللي Torsional rigidity او معامل اللي Modulus of torsion. ان المعادلة (السابقة) تطبق على الاسطوانة الصلدة (المتلثة). اما الجسم الاسطوانى المجوف الذى يملك نصف قطر داخلى مقداره r_1 ونصف قطر خارجى مقداره r_2 فان قيمة عزم المزدوج ستكون مساوية الى:

$$G = \frac{2\pi n\theta}{L} \int_{r_1}^{r_2} r^3 \delta r = \frac{\pi n}{2L} [r_2^4 - r_1^4] \theta$$

$$G = \frac{\pi n\theta}{L} (r_2^2 - r_1^2) (r_2^2 + r_1^2) \theta \quad \dots\dots\dots (5.50)$$

وهذا يفسر لنا لماذا يستخدم في المركبات ناقل الحركة (drive shaft) من نوع الاسطوانة المجوفة بدلاً من الاسطوانة المتلثة. لان الاسطوانة المجوفة تحتاج الى عزم مزدوج اكبر مما تحتاجه الاسطوانة المتلثة عند تساوي كتلي الاسطوانتين.

مثال (S.10)

اسطوانة صلدة من الفولاذ وانبوب اسطوانى رقيق الجدار مصنوعان من المادة نفسها وعلكان الطول نفسه والكتلة نفسها. فاذا كان قطر الاسطوانة الصلدة يساوي 6 cm والقطر الخارجى للانبوب المجوف يساوي 6 cm. جد نسبة زاوية اللي التي تتعرض اليها النهاية الطليقة لكل من الاسطوانة الصلدة والانبوبة المجوفة عند تعرضها الى عزم مزدوج متساوي.

الحل:

ا) نصف قطر الاسطوانة الصلدة = 1.5 cm
ونصف قطر الانبوب الاسطوانى = 3 cm

وباستخدام المعادلة (5.49) نحصل على :

$$G = \frac{\pi n r^4}{2L} \theta_1 = \frac{\pi n}{2L} \theta_1 (1.5)^4$$

أما الأنبوب الاسطواني ذو الجدار الرقيق

$$r_1 \cong r_2$$

$$r_1^2 + r_2^2 \cong 2 r_1^2$$

$$r_1^2 - r_2^2 \cong r^2$$

$$\pi (r_1^2 - r_2^2) = \pi r^2$$

لان

وباستخدام المعادلة (5.50) نحصل على

$$G' = \frac{\pi n}{2L} (r_1^2 - r_2^2) (r_1^2 + r_2^2) \theta_2$$

$$= \frac{\pi n}{2L} r^2 2 r_1^2 \theta_2$$

$$= \frac{\pi n}{2L} (1.5)^2 \cdot 2 (3)^2 \theta_2$$

$$G = G'$$

$$\frac{\pi n}{2L} \theta_1 (1.5)^4 = \frac{\pi n}{2L} \theta_2 (1.5)^2 2 \cdot 3^2$$

$$= \frac{\theta_1}{\theta_2} = \frac{2 \cdot 3^2}{1.5^2} = 8$$

مثال (5.11)

قضيب فولاذ ناقل للحركة قطره 3 cm وطوله 6m ، تعرض الى اجهاد لني فدار بزاوية مقدارها 0.03 rad ، جند مقدار الشغل المبذول اذا كان معامل الصلابة لمادة القضيب تساوي $8 \times 10^{10} \text{ dyne/cm}^2$

$$G = \tau \theta$$

الحل

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

$$G = \frac{3.14 \times 8 \times 10^{10} \times 105 \times 0.03}{2L}$$

$$G = 9.42 \times 10^6 \text{ dyne - cm}$$

$$= 9.42 \times 10^6 \times \frac{1}{2}$$

$$= 1.413 \times 10^5 \text{ erg}$$

$$W = \frac{1.413 \times 10^5}{4.2 \times 10^7}$$

$$W = 3.3464 \times 10^{-3}$$

$$W = \frac{1}{2} \times \text{عزم المزدوج} \times \text{الازاحة الزاوية}$$

مثال (5.12) X

قضيب معدني منتظم طوله 1 m وقطره 10 mm ثبتت بصورة عمودية من طرفه الاعلى وسلط عليه مزدوج قوة مقدارها $2.5 \times 10^6 \text{ dynes - cm}$ أثرتا على نهايته الطليقة، فتسببت في تحريك نقطة مشيئة منعكسة عن مرآة صغيرة مثبتة في نهاية الصلبة مسافة مقدارها 20 cm على تدريج يبعد 1 m عن القضيب. جد معامل صلابة السلك.

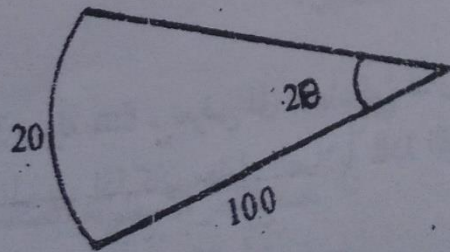
الحل:

ان زاوية الدوران المرآة تساوي نصف زاوية دوران الاشعة المنعكسة

$$\tan 2\theta = \frac{20}{100} = 0.2$$

$$\therefore 2\theta = 26.56$$

$$\theta = 13.28$$



$$\theta = 13.28 \times \frac{\pi}{180} \text{ radian}$$

$$= 0.232 \text{ radian}$$

ان قيمة نصف القطر r تساوي 0.5 cm وان $G = 2.5 \times 10^6 \text{ dyne/cm}$.
 ان العلاقة بين معامل الصلابة (n) والعزم المسلط تعطى بالمعادلة الآتية:

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

وبالتعويض عن القيم المناسبة للمقادير في هذه المعادلة نحصل على:

$$2.5 \times 10^6 = \frac{n \times 3.142 \times .5^2 \times .5^2}{2 \times 100}$$

$$n = \frac{2 \times 100 \times 2.5 \times 10^6}{3.14 \times .5^2 \times .5^2 \times (0.232)}$$

$$\cong 1.1 \times 10^{10} \text{ dyne/cm}^2$$

مثال (5.13):

The Relation Between Modulus

العلاقة بين المعاملات

مثال العديد من العلاقات بين المعاملات المختلفة يمكن استنتاجها أو اشتقاقها.
 وستناول بعض واهم هذه العلاقات:

اذا فرضنا ان الانفعالين الطولي والعرضي لوحدة الاجهاد المسلط يساويان الى α و β على الترتيب، فان نسبة بواسون ستكون مساوية الى نسبة β الى α ، اي ان

$$\sigma = \frac{\beta}{\alpha}$$

وبما ان معامل يونج يعطى بالعلاقة الآتية:

$$Y = \frac{\text{الاجهاد}}{\text{الانفعال الطولي}}$$

فإن معامل يونك لوحدة الاجهاد متأخذ الصيغة الآتية

$$Y = \frac{1}{\alpha}$$

ولو اخذنا مكعباً طول ضلعه وحدة واحدة وجهاته الثلاثة موازية الى الاحداثيات الكارتيزية كما في الشكل الآتي : وسلطنا عليه ازواجا من القوى المماسية المتعاكسة ونسكن F_x و F_y و F_z على امتداد الاحداثيات Ox و Oy و Oz على الترتيب. فإن القوة F_x على امتداد الاحداثي Ox تنتج استطالة بينا القوتين F_y و F_z تنتجان تقلص ، ونفس الشيء بالنسبة للقوتين F_y و F_z اللتين ستنتجان استطالة على طول Oy و Oz بينا F_x و F_y و F_z ستنتجان تقلص على الترتيب وبناءً على ذلك سيكون طول جانب المكعب الجديد كما يأتي :

$$Ox = 1 + \alpha F_x - \beta F_y - \beta F_z$$

وهكذا بالنسبة لبقية الجوانب الاخرى ، وكما يلي :

$$Oy = 1 + \alpha F_y - \beta F_z - \beta F_x$$

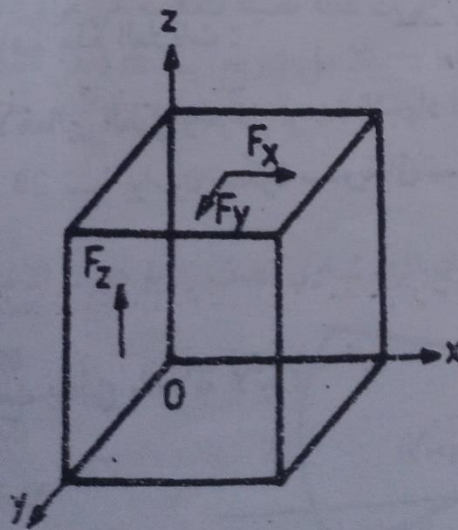
$$Oz = 1 + \alpha F_z - \beta F_y - \beta F_x$$

فإذا فرضنا ان

$$F_x = F_y = F_z = F$$

فإن

$$Ox = Oy = Oz = 1 + \alpha F - 2\beta F$$



ان الحجم الجديد للمكعب سيكون مساوياً الى

$$V = (1 + F(\alpha - 2\beta))^3$$

$$= 1 + 3F(\alpha - 2\beta) + \dots$$

اما الحدود الأخرى الحاوية على الكمية $(\alpha - 2\beta)$ والمرفوعة الى قوى اكثر من واحد فانها ستهمل لأنها صغيرة جداً.

ان الحجم الاصيل للمكعب $1 =$
وعليه فان الانفعال الحجمي للمكعب سيكون مساوياً الى

$$\phi = \frac{1 + 3F(\alpha - 2\beta) - 1}{1}$$

$$\phi = 3F(\alpha - 2\beta)$$

اما معامل بولك B والذي يكتب بالصيغة الآتية

$$B = \frac{\text{الاجهاد}}{\text{الانفعال الحجمي}}$$

فسوف يأخذ الصيغة الآتية بالنسبة الى هذا المكعب

$$B = \frac{F}{3F(\alpha - 2\beta)}$$

$$B = \frac{1}{3F(\alpha - 2\beta)}$$

ولوحدة الاجهاد فانه سيكون مساوياً الى

يمكن إيجاد العلاقة بين المعاملات الثلاثة معامل بولك ومعامل يونك ونسبة بواسون وذلك بقسمة بسط ومقام العلاقة (السابقة) على α ، اذ سنحصل على

$$B = \frac{\frac{1}{\alpha}}{3F(1-2\beta)}$$

$$Y = \frac{1}{\alpha}$$

وبما ان

$$\sigma = \frac{\beta}{\alpha}$$

و

$$B = \frac{Y}{F(1-2\sigma)}$$

فان

هناك علاقة تربط بين معامل الصلابة η وكل من α و β تأخذ الصيغة الآتية :

$$\eta = \frac{1}{2(\alpha + \beta)}$$

ونقسمه بسط ومقاوم المعادلة (السابقة) على α فسوف نحصل على :

$$\eta = \frac{Y}{2(1 + \sigma)}$$

يمكن إيجاد علاقة بين كل من Y و B و n و σ وذلك اذا اخذت المعادلتين الآتيتين ، اي ان

$$B = \frac{Y}{3(1-2\sigma)}$$

$$n = \frac{Y}{2(1+\sigma)}$$

وكذلك

وباعادة ترتيب المعادلتين المذكورتين نحصل على

$$\frac{Y}{3B} = (1 - 2\sigma)$$

$$\frac{Y}{n} = 2(1 + \sigma)$$

وبإضافة المعادلتين السابقتين إلى بعضهما نحصل على

$$\frac{Y}{3B} + \frac{Y}{n} = (1 - 2\sigma) + 2(1 + \sigma) = 1 - 2\sigma + 2 + 2\sigma$$

$$\frac{Y}{3B} + \frac{Y}{n} = 3$$

أو

$$\frac{1}{3B} + \frac{1}{n} = \frac{3}{Y}$$

أو

$$Y = \frac{3nB}{n + 3B}$$

يترك

ونقسم المعادلتين الآتيتين على بعضهما

$$\frac{Y}{3B} = (1 - 2\sigma)$$

$$\frac{Y}{n} = 2(1 - 2\sigma)$$

$$\frac{n}{3B} = \frac{1 - 2\sigma}{2 + 2\sigma}$$

نحصل على

وبإعادة ترتيب حدود هذه المعادلة نحصل على

$$2n + 2n\sigma = 3B - 6\sigma B$$

$$2\sigma(n + 3B) = 3B - 2n$$

$$\sigma = \frac{3B - 2n}{2(n + 3B)}$$

أو

ويجب أن لا ننسى بأن هذه الصيغة اشتقت جميعها على الأساس المعامل لوحدة

الاجهاد.

20- 5 مسائل الفصل الخامس

- 1- وضح المصطلحات الآتية : الاجهاد - الانفعال - قانون هوك - نسبة بواسون.
- 2- ماذا يقصد بحد المرونة - اجهاد القطع (الكسر).
- 3- اشرح منحنى الاجهاد - الانفعال.
- 4- عرف معامل يونك - معامل بولك - نسبة بواسون.
- 5- اشتق العلاقة بين الكميات الثلاثة في السؤال السابق.
- 6- جد اكبر طول يمكن ان يعلق به سلك معدني بصورة عمودية قبل ان ينقطع. اذا علمت ان اجهاد القطع لهذه المادة تساوي $(15.2 \times 10^{10} \text{ dyne / cm}^2)$ وان كثافة هذه المادة تساوي (7.6 g/cm^3) .
- 7- قضيب قطره 2 سم وطوله (100 cm) علق به ثقل كتلته تساوي (100 Kg)، جد الانفعال العرضي، اذا علمت ان معامل يونك لهذه المادة تساوي $2.5 \times 10^{11} \text{ N/cm}^2$ ونسبة بواسون تساوي 0.27.
- 8- جد قيمة معامل يونك لسلك معدني طوله (2 m) ومساحة مقطعة العرضي 0.625 سم² يستطيل مسافة مقدارها 0.25 سم عندما يعلق به ثقل كتلته 1100 Kg.
- 9- جد مقدار الاستطالة التي يحدثها تعليق ثقل كتلته (3 Kg) بسلك طوله 1.25 سم ومساحة مقطعه العرضي تساوي (1 mm^2) (معامل يونك = $2.5 \times 10^{12} \text{ dyne/cm}^2$).
- 10- قطعة معدنية استطوانية الشكل طولها (1 m) وقطرها (1 mm) ثبتت أحد طرفيها بحدى طرفيها بصورة عمودية. سلط عزم مقدار $(2.5 \times 10^7 \text{ dyne/cm})$ على النهاية الطليقة. ونتيجة لذلك عكست مرآة مثبتة على النهاية الطليقة نقطة مضيئة مسافة (15 cm) على مقياس يبعد (1 m). جد معامل اللين.
- 11- اشرح تجربة تستطيع بواسطتها من قياس نسبة بواسون للمطاط.
- 12- اشرح تجربة سيرل لقياس معامل يونك لسلك معدني.
- 13- سلك طوله (1 m) وقطره (1 mm) سحب مسافة مقدارها (0.5 mm) بواسطة ثقل كتلته (10 Kg)، وتعرض للين خلال زاوية مقدارها (25°) بقوة مقدارها (5g) سلطت على جهتيه المتقابلتين في نهايته. جد
 - 1- معامل يونك
 - 2- معامل القص

3- معامل بولك

4- نسبة بواسون

14 - قطعة معدنية طولها 100 in ونصف قطرها 0.5 in علق بها ثقل وزنه 100 lb (باوند). جد قيمة الانفعال العرضي ، اذا كان معامل بولك لمادة القطعة المعدنية يساوي $3 \times 10^6 \text{ Ib/in}^2$ ونسبة بواسون لها تساوي 0.25.

15 - سلك طولها 4 m ونصف قطرها 2 mm سحب بقوة تعادل 900 g. فاذا كانت مقدار استطالته تساوي 1.25 mm. جد الطاقة لوحدة الحجم المخزونة في السلك.

16 - فارق بين زاوية التدوير التي يتعرض لها قضيب معدني مثبت بصورة عمودية من طرفه الاعلى ، والزاوية التي يميل بها سطح مادة مثبت قاعدتها السفلى عند تعرضها لقوة مماسية.

17 - جد قيمة الشغل المنجز في لبي سلك من الفولاذ قطره 2 mm وطوله 25 cm خلال زاوية مقدارها 45° . مع العلم ان معامل الصلابة لمادة السلك تساوي $8 \times 10^4 \text{ dyne/cm}^2$.

18 - جد مقدار التغير في كثافة مادة معدنية تملك معامل بولك مقداره $8 \times 10^{15} \text{ N/m}^2$ وتتعرض الى ضغط مقداره 25000 N/cm^2 ، مع العلم ان كثافة المادة المذكورة تحت الضغط الجوي الاعتيادي تساوي 11.2 g/cm^3 .

19 - جد معامل بولك لحجم من الهواء مقداره 250 cm^3 تحت الظروف الاعتيادية من الضغط ودرجة حرارة ، يقل حجمها بمقدار 0.55 cm^3 اذا زاد الضغط المسلط على الغاز بمقدار 2 mm Hg.

20 - سلك طولها 2 m ومساحة مقطعه العرضي تساوي 2 mm^2 علق به ثقل كتلته 5 Kg. جد مقدار استطالة السلك ، اذا كان معامل بولك لمادته يساوي $2.2 \times 10^{11} \text{ dyne/cm}^2$.

الفصل السادس

الخواص المغناطيسية للمواد

The Magnetic Properties of Materials

المقدمة

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

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

وتطلق اليوم كلمة المغناطيسية على المواد التي تظهر استجابة واضحة للمجال المغناطيسي الخارجي المسلط عليها . ومن أهم المواد المغناطيسية الحديد والنيكل والكوبلت ومادة المغنايت . وقد وجد بأن الخاصية المغناطيسية تتأثر كثيراً بدرجات الحرارة . يتناول هذا الفصل أساسيات الخاصية المغناطيسية والتأثيرية المغناطيسية وأنواع المواد المغناطيسية كما يتناول هذا الفصل الخواص المغناطيسية الأساس للمواد ، مثل التأثير المغناطيسية والعلاقة بينها وبين المغناطيسية . كما تم التطرق في هذا الفصل الى طريقة تصنيف المواد المغناطيسية والى الخواص المهمة لكل صنف منها .

وكذلك الى اهم المجموعات المغناطيسية في الجدول الدوري . تناول هذا الفصل الخواص الأساس ولم يتطرق الى التفاصيل الاخرى المتعلقة بالمواد المغناطيسية ودراستها ، لان تقع خارج مضامين هذا الفصل .

1-6 العزم المغناطيسي للإلكترون (μ) The Magnetic Moment of Electron

ان دوران الإلكترونات حول نواة الذرة يساهم في تكوين العزم المغناطيسي للذرة. ان العزم المغناطيسي الذي يولده تيار كهربائي مقداره (I) في سلك على شكل دائرة نصف قطرها (r) يساوي حاصل ضرب قيمة التيار في مساحة الدائرة (A)، اي ان

$$\mu = IA \quad (6.1)$$

$$\mu = IA$$

اذ ان

$$A = \pi r^2$$

ان دوران الإلكترونات حول النواة يمثل التيار الكهربائي المذكور. ان قيمة التيار الكهربائي الناشء عن دوران الكترون واحد ($-e$) بمقدار (v) دورة في الثانية يكافئ تيار كهربائي مقداره I ، اي ان

$$I = -ev$$

وبالتعويض عن قيم كل من A و I في المعادلة (6.1) نحصل على مايلي:

$$\mu = -ev\pi r^2 \quad (6.2)$$

يطلق على μ مصطلح العزم المغناطيسي للإلكترون

2-6 الزخم الزاوي للإلكترون (L) The Angular Momentum of Electron

يمكن إثبات سرعة الزخم الزاوي للإلكترون من معرفة سرعة الإلكترون. ان السرعة الخطية للإلكترون يمكن حسابها من العلاقة الآتية:

$$\text{السرعة الخطية} = \text{محيط الدائرة} \times \text{عدد دورات الإلكترون حول النواة في الثانية}$$

$$v = 2\pi r \nu$$

$$L = m \omega$$

$$L = m v r$$

وبما ان الزخم الزاوي للإلكترون (L) يساوي

$$\mu = \frac{eh}{4\pi m} \quad (6.3)$$

وبالتعويض عن قيمة v في المعادلة (6.3) نحصل على

$$L = 2\pi r^2 m \nu$$

$$\mu = \frac{eh}{4\pi m} \quad (6.4)$$

The relation between (μ) and L

3- العلاقة بين (μ) و L

هناك علاقة مهمة بين العزم المغناطيسي (μ) والزخم الزاوي (L) للإلكترون يمكن إيجادها من مقارنة المعادلتين (6.2) و (6.4) وهي كما يأتي :

$$\mu = \frac{-e}{2m} L$$

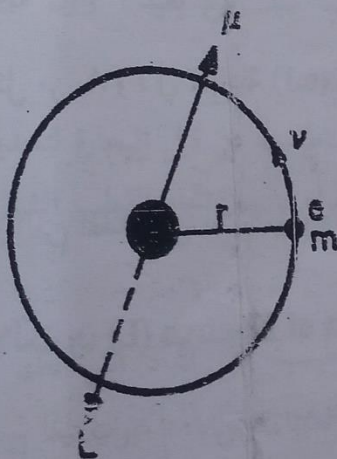
..... (6.5)

$$\frac{\mu}{L} = - \frac{e}{2m}$$

اي ان

..... (6.6)

ان نسبة العزم المغناطيسي (μ) الى الزخم الزاوي (L) تساوي نسبة شحنة الالكترون (e) الى ضعف كتلته (2m). اما الاشارة السالبة فتعني ان اتجاه العزم المغناطيسي يكون معاكساً لاتجاه الزخم الزاوي ، كما في الشكل (6.1).



الشكل (6.1) : علاقة العزم المغناطيسي بالزخم الزاوي للإلكترون.

وحسب نظرية بور Bohr theory فان الزخم الزاوي للإلكترون يكون محددًا (مكمًا) وحسب المعادلة الآتية :

..... (6.7)

$$L = n \hbar$$

n تمثل عدداً صحيحاً وان

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}$$

و h تمثل ثابت بلانك (Blank's Constant)

وهكذا فإن قيم العزم المغناطيسي ستكون متكممة أيضاً، أي أن

..... (6.8)

$$|\mu| = \frac{e}{2m} n \hbar$$

ان اصغر قيمة لـ (μ) تحدث عندما تكون قيمة (n) مساوية للواحد الصحيح، أي ان
عندما
فان
 $n=1$

..... (6.9)

$$\mu = \frac{e \hbar}{2m}$$

ان القيمة الصغرى للعزم المغناطيسي $(\frac{e \hbar}{2m})$ تسمى بمنغنيط بور (Bohr magneton) ويرمز لها بـ (μ_B) وقيمتها تساوي 9.27×10^{-24} جول لكل تسلا (J/T)،
اي ان

$$\mu_B = 9.27 \times 10^{-24} \text{ J/T}$$

ومثلاً كانت قيمة شحنة الالكترون ممثلة لاصغر قيمة للشحنة الكهربائية فان قيمة
منغنيط بور ستكون ممثلة لاصغر قيمة للعزم المغناطيسي أو المغناطيسية.

ان المغناطيسية (M) او العزم المغناطيسي لوحدة الحجم يمكن إيجادها من إضافة
جميع عزوم الذرات الموجودة في وحدة الحجم، أي ان

$$M = \sum \mu_i$$

..... (6.10)

اذ ان i تمثل عدداً صحيحاً يبدأ من 1 الذي يمثل الالكترون الاول وينتهي برقم
آخر الالكترون

ترتبط المغناطيسية M بالمجال المغنط H من خلال العلاقة الآتية

$$M = \chi H$$

..... (6.11)

اذ ان χ تمثل التأثيرية المغناطيسية. وهناك المجال المغناطيسي B الذي يعطى
بالعلاقة الآتية

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M$$

..... (6.12)

حيث ان μ_v تمثل سماحية الفراغ Permeability of vacuum . وهناك السماحية النسبية μ_r relative permeability التي تعرف بالعلاقة الآتية:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_v} \quad \dots\dots\dots (6.13)$$

وقد وجد ان هناك علاقة بين التأثيرية المغناطيسية والسماحية النسبية تعطى بالعلاقة الآتية:

$$\chi = \mu_r - 1 \quad \dots\dots\dots (6.14)$$

اما بالنسبة للوحدات فانها تختلف بحسب النظام المستخدم . ففي نظام المتر-كغم-ثا تكون وحدات كل من B و H و Weber/m² و Amper - turn/m على التوالي . اما سماحية الفراغ فانها تعطى بوحدات Henry /m.

6-4 التأثيرية المغناطيسية The Magnetic Susceptibility (χ)

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

$$\chi = \frac{M}{H}$$

تبعد التأثيرية المغناطيسية -قياسا للمدى استجابة المادة- للمغناطيسية 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 اخرى 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 او اكثر للمواد ذات المغناطيسية القوية ، فضلاً عن ان قيمها تكون سالبة لبعض انواع المواد المغناطيسية.

6-5 تصنيف المواد المغناطيسية Classification of Magnetic Materials

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

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

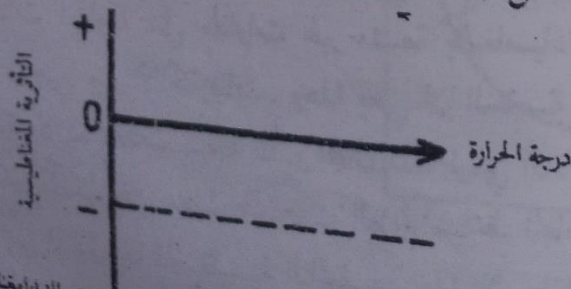
The Diamagnetic Materials

1-5-6 المواد الدايا مغناطيسية

وهي المواد التي تكون تأثيرها المغناطيسية

- 1- سالبة
- 2- قليلة جداً (10^{-5}).

ان أصل الخاصية الدايا مغناطيسية هو الحركة المدارية للإلكترونات. الأغلفة المشبعة حول النواة والتي تستحدث نتيجة تسليط مجال مغناطيسي يؤثر 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 الدايا مغناطيسية لا تمتلك عزوم مغناطيسية دائمة، بل تمتلك عزوم مغناطيسية محثّة ضعيفة غير دائمة تزول بزوال تأثير المجال المغناطيسي المسلط على المادة. ان اتجاه العزم المغناطيسي المحث يكون معاكساً لاتجاه المجال المغناطيسي المسلط. ومن أشهر المواد الدايا مغناطيسية الغازات الخاملة والمركبات ذات المدارات الإلكترونية المغلقة ومعظم المواد الصلبة الأيونية والجزيئية والمركبات العضوية. وان الخاصية الدايا مغناطيسية لا تعتمد على اتجاه العزم داخل المادة ولا تعتمد على درجة الحرارة. ان جميع المواد على اختلاف انواعها تمتلك الخاصية الدايا مغناطيسية ولكنها قد تكون ضعيفة جداً واقل بكثير من الخواص المغناطيسية الأخرى، فضلاً عن ان جميع المواد تصبح دايا مغناطيسية في درجات الحرارة العالية جداً. ان الصفة الدايا مغناطيسية صفة مؤقتة تزول بزوال المجال المغناطيسي المؤثر المسلط على المادة، ونظراً لمجدها بوجود المجال المذكور. الشكل (6.2) يبين علاقة التأثير المغناطيسية مع درجة الحرارة.



الشكل (6.2) : علاقة التأثير المغناطيسية مع درجة الحرارة للمواد الدايا مغناطيسية.

الجدول (6.1): يبين قيم التأثير المغناطيسية لبعض المواد الذئامغناطيسية

المادة	التأثير المغناطيسية χ_m $\times 10^{-5}$
البرموت Bi	- 16
الزئبق Hg	- 2.9
الكالسيوم Ca	- 2.3
النحاس Cu	- 1.0
السليكون Si	- 0.4
الذهب Au	- 3.6
الماء H_2O	- 9.0
الهيدروجين H_2	- 0.2
النروجين N_2	- 5.0

The Paramagnetic Materials

2-5-6 المواد البارامغناطيسية

وهي المواد التي تصف تأثيراتها المغناطيسية بما يأتي :

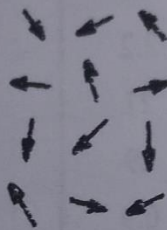
1- موجبة.

2- قليلة تتراوح بين 10^{-3} إلى 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 تصف 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 نستحدث نتيجة لتأثير المجال المغناطيسي الخارجي المؤثر عليها. وفي حالة وجود المجال المذكور فان معدل اتجاهات العزوم سيأخذ اتجهاً موازياً 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 (6.3) 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 ، اي ان :

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



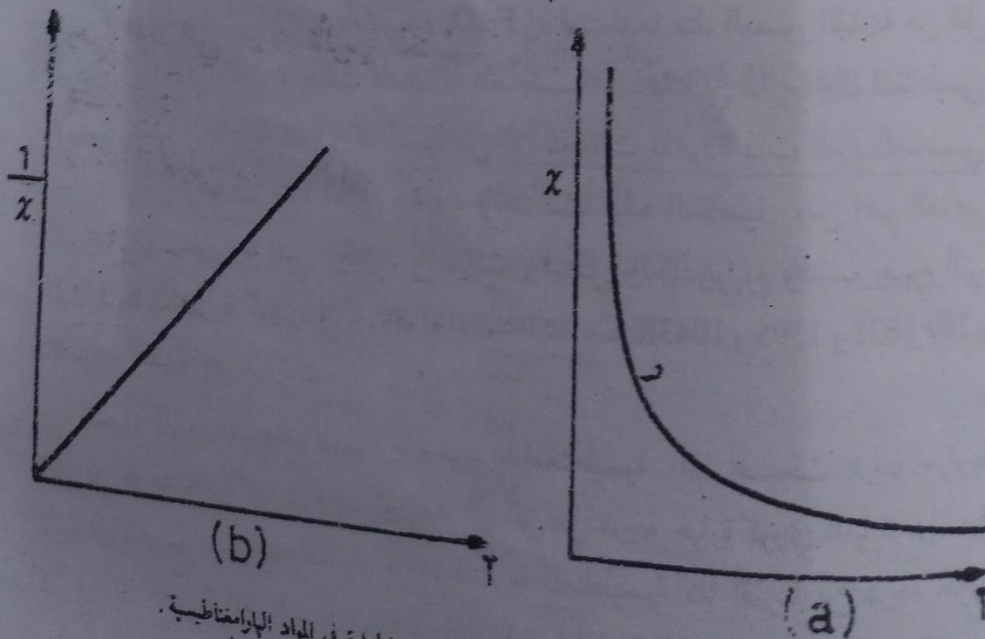
الشكل (6.3) : ترتيب العزوم في المواد البارامغناطيسية

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

$$\chi = \frac{C}{T}$$

..... (6.15)

يعرف هذا القانون (بقانون كوري) ، و C تمثل ثابت التناسب (ثابت كوري) .
الشكل (6.4) يوضح العلاقة بين χ و $\frac{1}{T}$ مع درجة الحرارة للمواد البارامغناطيسية .



الشكل (6.4) : علاقة التأثيرية المغناطيسية مع درجة الحرارة في المواد البارامغناطيسية .

الجدول (6.2) : يبين قيم التأثير المغناطيسية لبعض المواد البارامغناطيسية

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

The Ferromagnetic materials

3-5-6 المواد الفيرومغناطيسية

ان وجود مواد ذات مغناطيسية دائمية في درجة حرارة الغرفة معروف منذ زمن بعيد، ومن أشهر هذه المواد الحديد وأوكسيده Fe_3O_4 إذ استخدمنا منذ العصور القديمة من قبل البحارة في إيجاد الاتجاه، وذلك لامتلاكه المغناطيسية الدائمة التي تتأثر بالمجال المغناطيسي الأرضي. تنشأ الخاصية الفيرومغناطيسية من الالكترونات المنفردة ذات العزم المغناطيسي الدائم، أو من تراسف هذه العزوم واتجاه واحد تنشأ هذه الخاصية. ومن أهم العناصر الفيرومغناطيسية المعروفة هي الحديد والكوبلت والنيكل والكادولونيوم والدسبروميوم التي تملك درجات حرارة كوري، T_c Curie temperature، 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

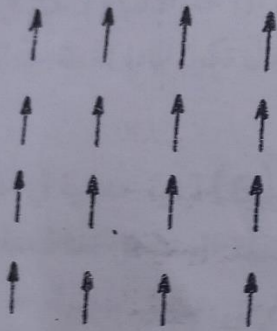
تتغير مع درجة الحرارة بحسب قانون خاص يسمى قانون كوري - وايز

Curie-Weiss law الذي يمكن كتابته كما يأتي :

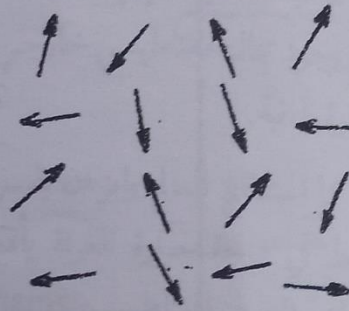
$$\chi = \frac{C}{T - \theta_c}$$

..... (6.16)

حيث ان θ_c تمثل درجة حرارة موجبة
تتأصف العزوم المغناطيسية كما في الشكل (6.5) عندما تكون درجة حرارة المادة اكبر
من واقل من درجة حرارة كوري. الجدول (6.3) يوضح اهم العناصر الفيرومغناطيسية
ودرجاتها الحرجة.



$T < T_c$



$T > T_c$

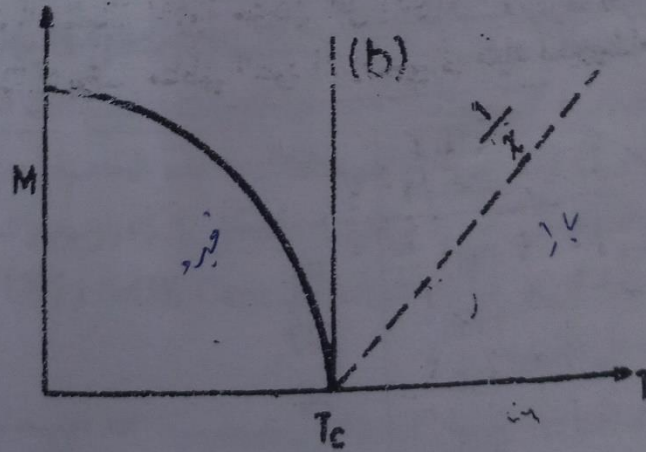
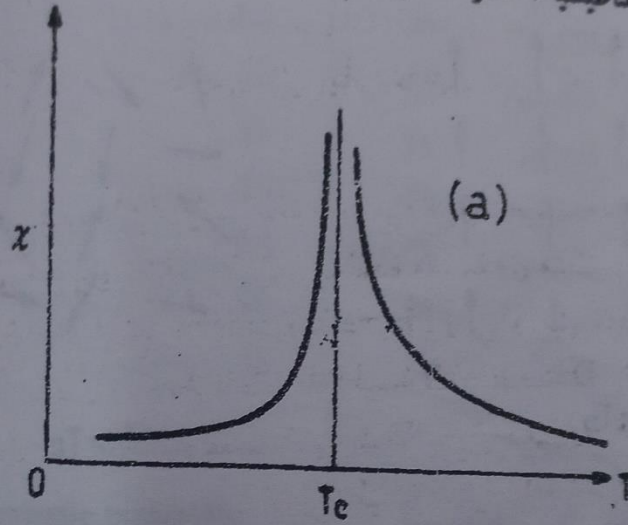
الشكل (6.5): ترتيب العزوم في المواد الفيرومغناطيسية

الجدول (6.3) يبين أشهر العناصر الفيرومغناطيسية ودرجة حرارة كوري لها

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

تتغير التأثيرية المغناطيسية للمواد الفيرومغناطيسية مع درجة الحرارة كما في الشكل (6.6a)

ترداد مغناطيسية المادة كلما انخفضت درجة الحرارة وتصل اعلی قيمة لها عند درجة الصفر الكلفينية وتقل كلما ارتفعت درجة الحرارة وتصل الى الصفر عند الدرجة الحرجة (أي درجة حرارة كوري)، التي تتحول بعدها المادة الى الحالة البارامغناطيسية، حالة تتغير الغزوم المغناطيسية، انظر الشكل رقم (6.6b).

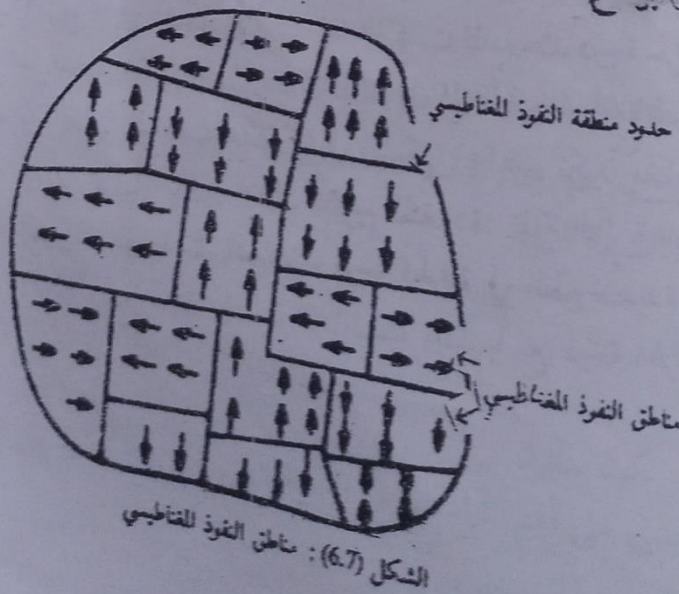


الشكل (6.6): علاقة التأثيرية المغناطيسية مع درجة الحرارة في المواد الفيرومغناطيسية

أما إذا انخفضت درجة حرارة المادة الى مادون الدرجة الحرجة T_c فانها تتحول مرة أخرى الى طور 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 ، إذا انه يستطيع ان يـمغنط المادة الى حد الاشباع ، حتى في حالة عدم وجود مجال مغناطيسي خارجي مؤثر. ويتأثر هذا المجال تكون المادة ممغنطة حد الاشباع بصورة ذاتية.

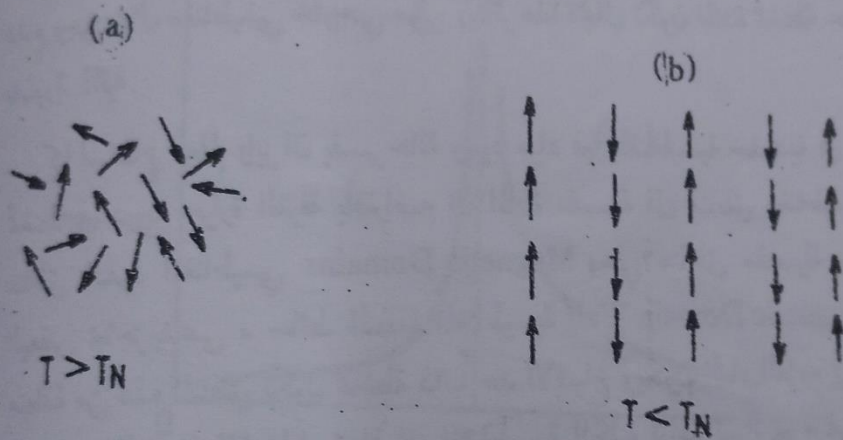
كما استطاع العالم وايز ان يفسر حالة وجود مواد فيرومغناطيسية حديدية في حالة عدم تمغنط في درجة حرارة الغرفة بأفترضه ان المادة مقسمة الى مناطق مغناطيسية تسمى مناطق النفوذ المغناطيسي Magnetic Domains وهي مناطق مفصولة عن بعضها البعض بحاجز يدعى بـ حائط المنطقة المغناطيسية Magnetic Domain Wall. ان كل منطقة 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 المفردة. الشكل (5.7) يوضح مناطق النفوذ المغناطيسي في المواد الفيرومغناطيسية.



The Anti-Ferromagnetic Materials

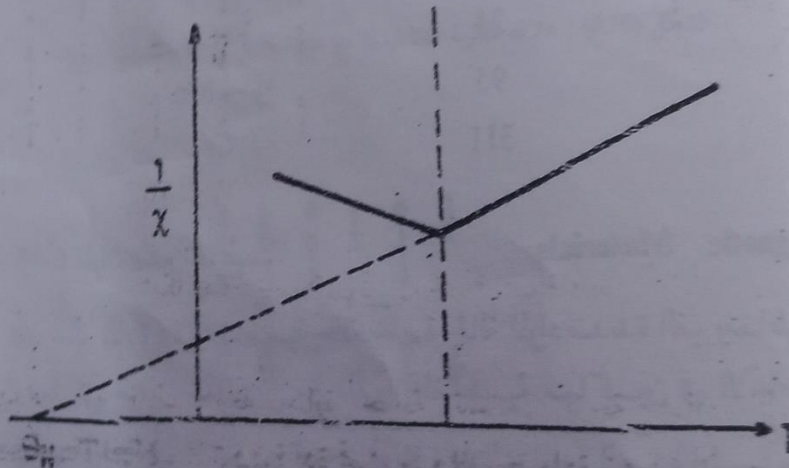
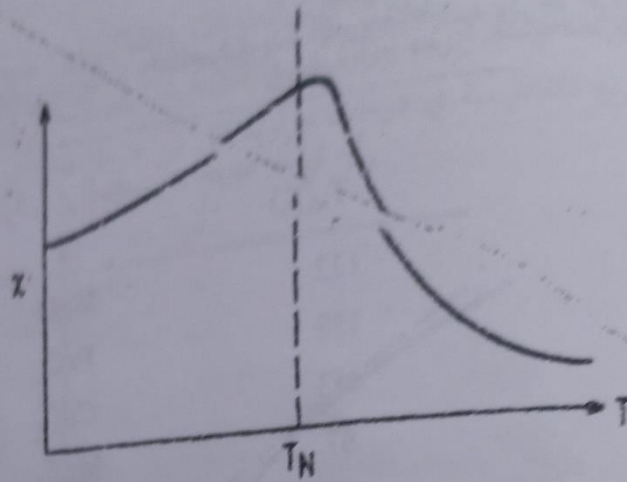
4-5-6 المواد ضد الحديد الفيرومغناطيسية

من أشهر العناصر ضد الحديد الفيرومغناطيسية الكروم Cr والسيريوم Ce والمنغنيز α -Mn وتتصف المواد ضد الحديد الفيرومغناطيسية بأن تأثيراتها قليلة ولكنها موجبة لجميع درجات الحرارة. ان العزوم المغناطيسية للذرات أو جزيئات هذه المواد تكون مرتبة بشكل صفوف متوازية ومتشابهة. ولكن اتجاهات العزوم فيها تكون في صفوف متضادة، كما في الشكل (6.8).



الشكل (6.8): ترتيب العزوم في المواد ضد الحديد الفيرومغناطيسية

تمتلك هذه المواد درجة حرارة حرجية تسمى درجة حرارة نيل (T_N) Neel Temperature، اذ تكون المادة تحت هذه الدرجة مادة ضد الحديد الفيرومغناطيسية وتترتب العزوم كما في الشكل (6.8b). اما اذا كانت المادة عند درجة حرارة اعلى من درجة حرارة اعلى من درجة حرارة نيل فان المادة تتحول الى الطور البارامغناطيسي، الذي تكون فيه العزوم مبعثرة باتجاهات مختلفة كما في الشكل (6.8a). تكون مغناطيسية هذه المواد ضعيفة (صفر تقريبا) وذلك لتشابه العزوم المتضادة. تقل التأثيرية المغناطيسية للمواد ضد الحديد الفيرومغناطيسية كلما انخفضت درجة الحرارة في الطور ضد الحديد الفيرومغناطيسية. الشكل (6.9) يوضح علاقة التأثيرية المغناطيسية ومقلوبها مع درجة الحرارة.



الشكل (6.9): علاقة التأثير المغناطيسية مع درجة الحرارة في المواد صلبة الفيرومغناطيسية
ينطبق قانون كوري - وايز على التأثير المغناطيسية للمواد صلبة الفيرومغناطيسية في الطور
المغناطيسي وتأخذ الصيغة الآتية.

$$\chi = \frac{C}{T - \theta_N} \quad \dots\dots\dots (6.17)$$

ان قيمة θ_N تكون سالبة.
الجدول (6.4). يحتوي على أهم المواد صلبة الفيرومغناطيسية ودرجة حرارة نيل لها.

الجدول (6.4) : بعض المركبات والعناصر الحديدية الفيرومغناطيسية ودرجة حرارة نيل

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

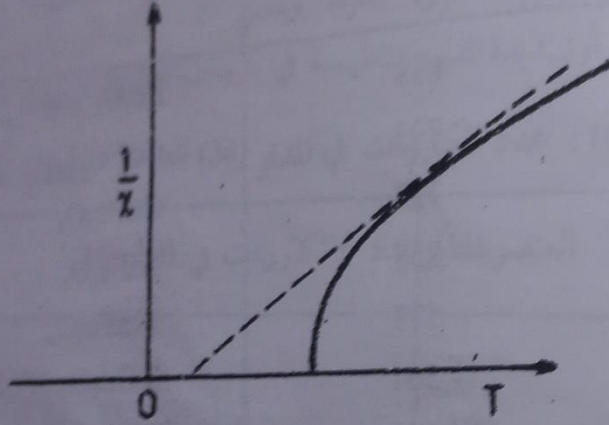
Ferrimagnetic Materials

5-5-6 المواد الفيرومغناطيسية

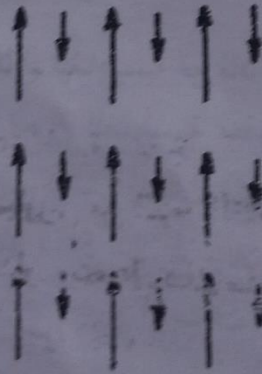
تعد حالة المادة الفيرومغناطيسية حالة خاصة لحالة المواد ضدادة الفيرومغناطيسية. إذ يكون فيها كل صفتين متجاورتين من العزوم المغناطيسية متعاكسين في الاتجاه، ولكنها تكون غير متساوية في المقدار. وبناء على ذلك، تمتلك المادة الفيرومغناطيسية مغناطيسية ذاتية حتى في حالة عدم وجود المجال المغناطيسي الخارجي على عكس المواد ضدادة الفيرومغناطيسية.

إن تأثيرية هذه المواد تقل كلما ارتفعت درجة الحرارة (فوق درجة حرارة كوري). والن العلاقة بين مقلوب التأثيرية المغناطيسية ودرجة الحرارة لا تكون خطية. الشكل (6.10) يوضح هذه العلاقة أن امتداد الجزء الواقع في درجات الحرارة العالية البعيدة عن درجة حرارة كوري يقطع احدائي درجة الحرارة في الجزء الموجب. وتمثل مجموعة الفيبرات (Ferrite) أهم المواد الفيرومغناطيسية وتمثل هذه المجموعة في الصفة الكيميائية $MO.Fe_2O_3$ ، حيث تمثل M، عناصر مثل الحديد Fe والنيكل Ni والكويلت Co والنحاس Cu وغيرها. والمواد الفيرومغناطيسية تطبيقات واسعة في الصناعة وتستخدم في

صناعة لب المواد الحثية ومخازن المعلومات (الذاكرة). الجدول (6.5) يبين بعض المواد
الغيرمغناطيسية ودرجة حرارة كوري التابعة لها. اما الشكل (6.11) فيمثل كيفية ترتيب
العزوم المغناطيسية في درجات حرارة اقل من درجة حرارة كوري:



الشكل (6.10): علاقة التأثير المغناطيسية مع درجة الحرارة في المواد القيرومتناطيسية



$$T < T_c$$

الشكل (6.11): ترتيب العزوم للمغناطيسية في المواد القيرومتناطيسية

جدول (8.5) بعض المركبات الفيرمغناطيسية ودرجة حرارتها كوري

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

Other Magnetic Materials

6-5-6 المواد المغناطيسية الأخرى

هناك أنواع أخرى من المواد المغناطيسية غير مذكورة. وهي على الأغلب سبائك خاصة لا سبق ذكرها فيها ترتيب العزوم المغناطيسية معقداً، كما في الترتيب الحزني لبعض العناصر المغناطيسية النادرة ومركباتها. وكذلك ترتيب العزوم المغناطيسية في الزجاجات المغناطيسية العنيدة Spin glasses البازيرية واللاطورية. إن دراسة مغناطيسية هذه المركبات المغناطيسية المعقدة تقع خارج الأبحاث المرسومة لهذا الكتاب.

The Magnetic Elements

6-6 العناصر المغناطيسية

يحتوي الجدول الدوري على عدة مجموعات تعمل الصفة المغناطيسية، وستنقل إلى أهم مجموعتين رئيسيتين وهما:

1- العناصر المغناطيسية الانتقالية Magnetic Transition Metals

2- العناصر المغناطيسية النادرة Magnetic Rare Earth Metals

إن الإلكترونات الموجودة في المدارات غير المشبعة هي المسؤولة عن مغناطيسية هذه العناصر. لأن أصل مغناطيسية العناصر الانتقالية هو الإلكترونات غير المزدوجة

الموجودة في المدار الثانوي (3d) غير المشبع الذي يشكل المدار الخارجي لها. الجدول (6.6) يوضح هذه العناصر مع عدد الإلكترونات الموجودة في المدار المذكور.

تحتوي هذه المجموعة على أهم العناصر المغناطيسية المعروفة مثل الحديد والنيكل والكوبلت والتي تكون فيرومغناطيسية عند درجة حرارة الغرفة. أما بقية العناصر فتكون بارامغناطيسية في درجة حرارة الغرفة ويمكن أن يكتسب قسم منها الخاصية الفيرومغناطيسية أو صديلة الفيرومغناطيسية في درجات حرارة واطئة.

الجدول (6.6): عدد الكثرونات في المدار (3d) للعناصر الانتقالية المغناطيسية

العنصر المتأين عدد الإلكترونات في المدار (3d)	
1	Ti ³⁺
2	V ³⁺
3	Cr ³⁺
4	Mn ³⁺
5	Fe ³⁺
6	Fe ²⁺
7	Co ²⁺
8	Ni ²⁺
9	Cu ²⁺
4	Ci ²⁺
5	Mn ²⁺

د⁵ نوع

1 1 1 1 1

5

1 1 1 1 1

CN CN

1

1

1

1

1

1

1

1

1

1

مركب

أما أصل مغناطيسية العناصر النادرة فهو الإلكترونات غير المزدوجة في المدار الثانوي (4f) غير المشبع. يقع المدار (4f) في هذه العناصر داخل المدارات المشبعة 5s و 5p. الجدول (6.7) بين العناصر النادرة وعدد الإلكترونات الموجودة في المدار (4f).

تكون العناصر المغناطيسية النادرة بارامغناطيسية في درجة حرارة الغرفة وتكتسب الخاصية الفيرومغناطيسية أو صديلة الفيرومغناطيسية أو تراكيب مغناطيسية معقدة في درجات الحرارة الواطئة.

الجدول (5.7): عدد الإلكترونات في المدار (4f) للعناصر الأرضية النادرة.

العناصر النادرة	عدد الإلكترونات في المدار 4f	
La	0	غير مغناطيسي
Ce	1	
Pr	2	
Nd	3	
Pm	4	
Sm	5	
Eu	6	
Gd	7	
Tb	8	
Dy	9	
Ho	10	
Er	11	
Tm	12	
Yb	13	
Lu	14	غير مغناطيسي

15-7 مسائل الفصل السادس

- 1- عرف ما يأتي :
 انعزم المغناطيسي - الزخم الزاوي - المغناطيسية - التأثير المغناطيسي - ظاهرة هول - المجال المغناطيسي الحرج - الدرجة الحرارية الحرجة للتوصيلية الفائقة .
 الدرجة الحرارية الحرجة للمادة الفيرومغناطيسية - قانون كوري - قانون كوري-وايز - منغنيط بور .
- 2- عرف مع ذكر القانون واذكر على اي المواد ينطبق كل من قانون :
 1- كوري
 2 - كوري - وايز
 3- عرف منغنيط بور واشتق :
 1- قيمته .
 2 - وحدته .
- 4- ارسم علاقة التأثير المغناطيسية - درجة الحرارة للمواد المغناطيسية المشهورة .
- 5- بالاعتماد على التأثير المغناطيسية وعلاقتها مع درجة الحرارة صنف المواد المغناطيسية .
- 6- ما المواد الذائيا مغناطيسية . وما أصل هذه الخاصية .
- 7- ما المواد البارامغناطيسية ، اذكر امثلة لهذه المواد .
- 8- ما الفرق بين المواد الفيرومغناطيسية والمواد صلبة الفيرومغناطيسية .
- 9- كيف تفسر ظاهرة وجود قطع حديدية غير ممغنطة ، اي لا تحمل عزمًا مغناطيسيًا في :
 1- درجة حرارة 300 K
 2 - درجة حرارة 100 K
- 10- عرف كلا من ما يأتي :
 1- درجة حرارة كوري T_c
 2 - درجة حرارة نيل T_N
- 11- تكلم عن فرضيات وايز
- 12- تكلم عن ظاهرة التخلقية المغناطيسية .
- 13- عدد اهم المجموعات المغناطيسية في الجدول الدوري ، وسبب المغناطيسية فيها .
- 14- عدد أهم الفروق بين مجموعة العناصر الانتقالية ومجموعة العناصر النادرة

المغناطيسيتان .

الفصل السابع

الخواص الكهربائية للمواد

The Electrical Properties of Materials

المقدمة

تظهر المواد مدى واسعاً من قيم قابليتها على التوصيل الكهربائي. تتفوق الموصلات الجيدة (كالفضة والنحاس والألمنيوم) على المواد العازلة الجيدة في قيم توصيلتها الكهربائية بمقدار 10^{20} على الأقل.

يتناول هذا الفصل أهم أساسيات الخواص الكهربائية للمواد المختلفة.

7-1 الموصلية الكهربائية

تعرف (الموصلية الكهربائية) على أنها قابلية المادة لتوصيل التيار الكهربائي. ويستجيب توصيل التيار الكهربائي عن حركة الإلكترونات أو الأيونات أو كليهما داخل المادة. وبصورة عامة تكون المواد المعدنية الصلبة (العناصر) جيدة التوصيل الكهربائي. تقسم المواد اعتماداً على قابليتها لتوصيل التيار الكهربائي إلى ثلاثة أقسام رئيسية:

7-1-1 الموصلات

The Conductors

من أهم الموصلات المعادن (الفلزات) والتي تكون ذات مقاومة نوعية كهربائية منخفضة (موصليتها الكهربائية عالية) تتراوح تقريباً من 10^{-8} إلى 10^{-6} أوم-متر في درجة حرارة الغرفة، ولها أمثلة الموصلات الجيدة الفضة والنحاس والألمنيوم والحديد.

7-1-2 أشباه الموصلات

The Semiconductors

تكون قيمة المقاومة النوعية الكهربائية لها متوسطة بين الموصلات والعوازل، إذ تتراوح بين 10^{-4} إلى 10^6 أوم-متر في درجة حرارة الغرفة. ومن أمثلتها معدني السيليكون والجرمانيوم.

3-1-7 العوازل

تتميز المواد العازلة كهربائياً بمقاومتها النوعية الكهربائية العالية والتي تتراوح بين 10^7 الى 10^{18} اوم - متر في درجة حرارة الغرفة ، ومن امثلة العوازل الخشب والزجاج والمطاط والنايلون .

The Insulators

عند وضع كمية من الشحنة الكهربائية على طرف من موصل فإنها تنتشر بسرعة على سطح الموصل الى ان يحصل التوزيع المتعادل للشحنة الكهربائية ، بينما عند وضع نفس الشحنة على جهة من العازل فإنها لن تنتشر وتبقى في مكانها . ان حركة الشحنة داخل الموصلات ناتجة عن حركة الالكترونات . تكون بعض الالكترونات حرة غير مرتبطة بقوة الى اية ذرة أو جزيئة ، على الرغم من كونها مرتبطة بقوة بالمادة ككل . ان الالكترونات الواقعة في المدارات الداخلية تكون مرتبطة بقوة الى نواة الذرة ، بينما تكون الالكترونات الخارجية مرتبطة بقوة ضعيفة الى النواة ، ان هذه الالكترونات تكون الالكترونات الحرة للمادة . تتحرك الالكترونات الحرة بحرية داخل المادة كككل وتعاني تصادمات متكررة .

ان الالكترونات الحرة تشكل الغاز الالكتروني الحر (free electron gas) . ان هذه الالكترونات تكون محفوظة داخل المادة ، كما تحفظ جزيئات الغاز داخل الوعاء المغلق . ان عملية شحن الموصل تتضمن اضافة أو سحب الالكترونات منها ، اذ سيكتسب المادة صافي شحنة موجبة اذا تم سحب الالكترونات منها ، وستكون صافي الشحنة سالبة في حالة اضافة الالكترونات اليها . ان الشحنة الموجبة للمادة تعني نقصاً في عدد الكتروناتها وعلى العكس من ذلك تعني الشحنة السالبة للمادة زيادة في عدد الكتروناتها . ومن التصادمات التي تعانيها الالكترونات الحرة أو الأيونات الموجبة اثناء حركتها تنشأ المقاومة الكهربائية لسريان التيار الكهربائي ، وينشأ عنها حرارة تتناسب طردياً مع مربع قيمة التيار الكهربائي وتعرف المقاومة الكهربائية على انها خاصية المادة التي تعاكس (أو تعيق) سريان التيار الكهربائي (اي الالكترونات) خلالها .

Electrical Resistivity (σ)

2-7 المقاومة الكهربائية

عندما يسלט مجال كهربائي مؤثر على المادة الصلبة ، فإنه يسبب سريان حاملات الشحنة الكهربائية (الالكترونات) ، وتكون الموصلية الكهربائية نتيجة لهذا التأثير ، يمكن كتابة العلاقة بين التوصيلية الكهربائية (σ) والمجال الكهربائي المؤثر E وكثافة التيار الكهربائي J بالعلاقة الآتية :

$$J = \sigma E$$

..... (7.1)

تعبّر قيمة كثافة التيار الكهربائي J عن عدد الشحنات الكهربائية (أو حاملات الشحنة) التي تمر خلال وحدة المساحة في وحدة الزمن ، أي أن

$$J = ne v_d$$

..... (7.2)

حيث أن n تمثل عدد الإلكترونات (حاملات الشحنة) لوحدة الحجم و v_d متوسط سرعة الانجراف التي سببها تأثير المجال الكهربائي . من مقارنة المعادلتين (7.1) و (7.2)

$$\sigma E = ne v_d$$

نحصل على :

$$\sigma = \frac{ne v_d}{E}$$

..... (7.3)

أن نسبة السرعة المتوسطة للانجراف إلى المجال الكهربائي المسلط $\left(\frac{v_d}{E}\right)$ يعرف (بحركة الشحنة الكهربائية) (μ) ، أي أن

$$\mu = \frac{v_d}{E}$$

..... (7.4)

وبالتعويض عن μ في المعادلة (7.3) نحصل على المعادلة الآتية

$$\sigma = ne \mu$$

..... (7.5)

أن مقلوب الموصلية الكهربائية يعرف (بالمقاومة النوعية الكهربائية) (electrical resistivity) ويرمز لها عادة بـ (ρ) . أن حركة الإلكترونات داخل المادة لا يتم من دون حدوث اشتطارة أو تشتت نتيجة لتصادمها مع تذبذب الشبكة الحرارية أو العيوب الخفية في الشبكة . أن اصطدام الإلكترون يؤدي إلى ارتداده باتجاه عشوائي ، ثم يبدأ بالتسارع مرة أخرى لحين حدوث الاصطدام الثاني . يسمى متوسط قيمة الزمن بين التصادمات المذكورة (بزمن الاسترخاء) (Relaxation time) ويرمز لها عادة بـ (τ) أن حاصل ضرب زمن الاسترخاء τ مع متوسط سرعة الانجراف (v_d) يعرف (بمتوسط المسار الحر للإلكترون λ) ، أي أن

$$\lambda = v_d \tau$$

..... (7.6)

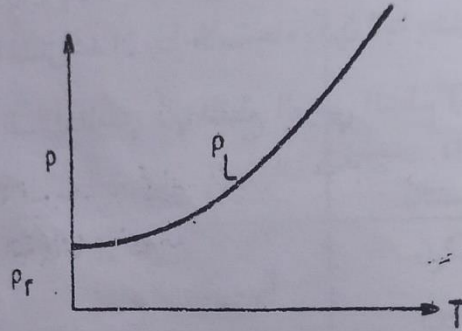
يمكن تلخيص العوامل المسببة للمقاومة الكهربائية بالتصادمات التي تحدث بين الإلكترونات الحرة وكل مما يأتي :

- (1) - التذبذب الحراري للذرات أو الجزيئات ويزداد بزيادة درجة الحرارة ويقل بانخفاضها، ويعد العامل الرئيس للمقاومة الكهربائية في درجة حرارة الغرفة.
- (2) - العيوب والشوائب داخل المادة ويظهر تأثيرها بصورة واضحة في درجات الحرارة المنخفضة جداً.

فإذا رمزنا للعامل الأول ρ_L والعامل الثاني ρ_r فإن المقاومة النوعية الكلية للمعادن تكون مساوية الى ρ أي أن

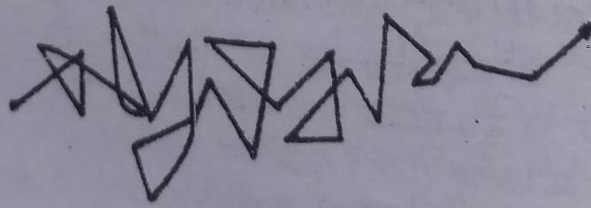
..... (7.7)

$$\rho = \rho_r + \rho_L$$



الشكل (7.1) يوضح علاقة المقاومة الكهربائية بدرجة الحرارة للمعادن (الفئات) العادية

تحتوي الموصلات على عدد كبير جداً من الإلكترونات الحرة. فعلى سبيل المثال يحتوي المستمير المكعب الواحد على أكثر من (10^{22}) إلكترون. تنتشر الإلكترونات الحرة خلال جميع حجم المادة. ويتنسى دائماً في الموصل المتعادل كهربائياً تساوي عدد الشحنات السالبة أي الإلكترونات الحرة مع الشحنة الموجبة لنوى الذرات في الشبكة. تكون حركة الإلكترونات عشوائية وتتبع مسارات ذات اتجاهات مختلفة كما في الشكل (7.2).



الشكل (7.2) : الحركة العشوائية للإلكترون داخل المادة.

يتحرك الغاز الإلكتروني بسرعة بطيئة خلال المادة الموصلة ومعدل سرعة يقارب سنتيمتر واحد لكل ثانية (1cm/sec). ان هذه السرعة تكون بطيئة جداً عند مقارنتها بالسرعة العشوائية الحرارية للإلكترون خلال المادة الموصلة والتي تقارب المليون متر للثانية الواحدة (10⁶m/sec). تمتلك الإلكترونات الحرة سرعة عالية نتيجة طاقة الحرارة والتي تكون بشكل عشوائي وتعاني خلالها عدداً كبيراً من التصادمات والتي تقدر بـ 10¹⁴ تصادم في الثانية الواحدة. ان السرعة التي يكتسبها الإلكترون نتيجة تأثير المجال الكهربائي المسلط تكون صغيرة جداً عند مقارنتها بالسرعة العشوائية الحرارية ، ولذلك فان معدل التصادمات يكاد يكون غير معتمداً على المجال الكهربائي (تأثير ضعيف جداً). ومن هذه الحقائق نجد ان زمن الاسترخاء يكون ثابتاً يعتمد فقط على طبيعة المادة.

ترتبط مقاومة السلك المعدني ذي المقطع العرضي المنتظم (A) مع طوله (L) بالعلاقة الآتية :

$$R \propto \frac{L}{A}$$

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad \dots\dots\dots (7.8)$$

فـ تمثل المقاومة النوعية الكهربائية ، تعتمد المقاومة النوعية على درجة الحرارة ، وفي المعادن تزداد المقاومة النوعية بصورة بطيئة مع درجة الحرارة. ويعزى ذلك الى زيادة معدل التصادمات بين الإلكترونات والذرات (الشبيكة) نتيجة لزيادة الاهتزازات وذبذبات الشبيكة نتيجة لارتفاع درجة الحرارة. يبين الجدول (7.1) قيم المقاومة النوعية لبعض المواد المعروفة عند درجة حرارة الغرفة.

ان كل تصادم يبطئ من سرعة الإلكترون ، أو يجعل تلك السرعة صيفراً أو يعكسها باتجاه آخر. ونتيجة لهذا العدد الكبير من التصادمات التي تبغثر سرعة الإلكترون ، فان الإلكترون لن يكتسب على الإطلاق سرعة كبيرة نتيجة لتأثير المجال الكهربائي الذي يحاول تعجيل الإلكترونات الحرة. ان التصادمات المذكورة تبدد الطاقة الحركية للإلكترون ، والتي تم اكتسابها نتيجة لتأثير المجال الكهربائي عليها. ان الطاقة الحركية المبددة ستظهر على شكل حرارة ترفع من درجة حرارة المادة.

الجدول (7.1) : قيم المقاومة النوعية لبعض المواد المعروفة عند درجة حرارة الغرفة

المادة	$\rho (\Omega.m) \times 10^{-8}$ المقاومة النوعية
الفضة	1.6
النحاس	1.7
الالنيوم	2.8
النيكل	7.8
الحديد	10
الصلب	11
البراس	7
الكونستان	~50
السليكون	2.6×10^3
الجرمانيوم	0.42×10^3
الكاربون	
(كرافيت)	3.5×10^{-5}
البولي اثيلين	20×10^{12}
الزجاج	$\sim 1 \times 10^{12}$
المطاط	10×10^{12}

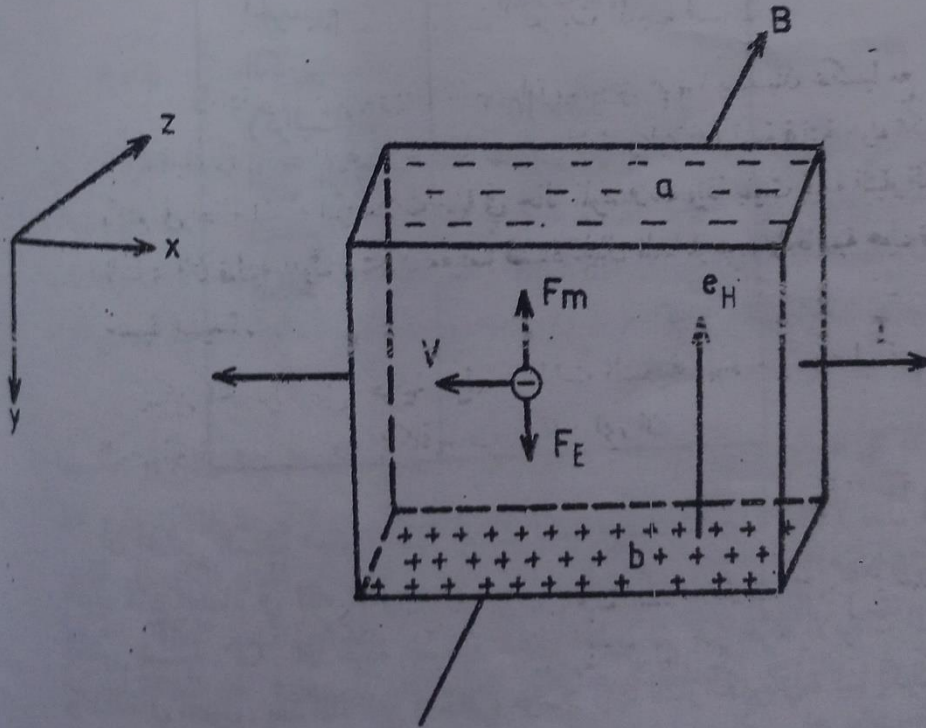
ان المحاليل السائلة الحاوية على ايونات تكون موصلات جيدة أيضاً، مثال ذلك محلول ملح الطعام في الماء الذي يحتوي على ايونات الصوديوم الموجبة Na^+ وايونات الكلور السالبة Cl^- . ان حركة الشحنة خلال المحلول تتم عبر حركة الايونات الموجبة والسالبة في المحلول. بعد الماء النقي (المقطر) موصلاً رديئاً للتيار الكهربائي، بينما يكون الماء الاعتيادي موصلاً جيداً للتيار الكهربائي بسبب احتوائه على بعض الايونات السالبة والموجبة لمواد شائبة ذائبة في الماء.

تعد الغازات العادية عوازل جيدة للتيار الكهربائي ، على عكس الغازات المتأينة التي تكون موصلات جيدة للتيار الكهربائي . مثال ذلك الهواء الجاف الذي يكون عازلاً جيداً ، بينما يكون الهواء المتأين في خط البرق موصلاً جيداً للكهربائية ، وذلك لاحتواء الهواء المتأين على خليط من الأيونات الموجبة والالكترونات الحرة . يطلق على الغاز المتأين البلازما Plasma التي تستغرق إليها في الفصل القادم .

Hall Effect

7-3 ظاهرة هول تعرف

إذا مر تيار كهربائي مستمر خلال مادة موصلة أو شبه موصلة ، موضوعة في مجال مغناطيسي خارجي وكانت خطوط الفيض المغناطيسي متعامدة مع اتجاه سريان التيار الكهربائي ، فإن فرق جهد سيتولد بين جهتي المادة وباتجاه عمودي على كل من التيار الكهربائي وخطوط الفيض المغناطيسي . أي ان كل من اتجاه التيار واتجاه المجال والفولتية المتولدة تكون متعامدة مع بعضها البعض ، انظر الشكل (7.3) .



الشكل (7.3) : يوضح ظاهرة هول.

وتسمى القوة الدافعة الكهربائية المتولدة بفولتية هول V_H Hall Voltage. ان مقدار فولتية هول يتناسب طردياً مع كل من التيار الكهربائي وشدة المجال المغناطيسي. يمكن التعبير عن فولتية هول V_H بدلالة التيار الكهربائي I والمجال المغناطيسي B ومكث المادة d كما في المعادلة الآتية :

..... (7.9)

$$V_H = R_H \frac{IB}{d}$$

اذ ان R_H تمثل مكافئ (أو ثابت) هول. يعتمد ثابت هول على نوع المادة المستخدمة أو عدد ونوع حاملات الشحنة. هناك نوعان لحاملات الشحنة وهما الإلكترونات أو الفجوات الموجبة الشحنة. يمكن التعبير عن R_H كما في المعادلة الآتية :

..... (7.10)

$$R_H = \frac{1}{nq}$$

ان إشارة R_H يمكن ان تكون سالبة أو موجبة اعتماداً على نوع حاملات الشحنة. فاذا كانت هذه الحاملات الكترونات فان إشارة R_H تكون سالبة. اما اذا كانت الإشارة موجبة فان حاملات الشحنة ستكون الفجوات الموجبة الشحنة.

ومن المعادلتين (7.9) و (7.10) نجد ان R_H ومن ثم V_H يتناسبان عكسياً مع n والتي تكون قليلة في اشباه الموصلات عنها في الموصلات وعليه فان قيمة فولتية هول تكون اكثر بكثير في حالة اشباه الموصلات منها في حالة الموصلات واذا بقيت قيمة التيار الكهربائي ثابتة ، فان فولتية هول ستكون مقياساً لشدة المجال المغناطيسي. ولخاصية هول تطبيقات عملية عديدة.

يمكن الحصول على حركية هول لحاملات الشحنة μ_H من حاصل ضرب قيمة التوصيلية الكهربائية σ بمكافئ هول R_H ، اي ان

$$\mu_H = -\sigma R_H$$

وتستخدم قيمة مكافئ هول في حساب قيمة عدد حاملات الشحنة لوحدة الحجم. والجدول (7.2) يبين قيم مكافئ هول والتوصيلية الكهربائية وحركية هول لعدد من المواد المعروفة.

الجدول (7.2) : قيم التوصيلية الكهربائية ومكافئ جول وحركية هول لبعض المواد المعروفة

المادة	التوصيلية الكهربائية $\Omega^{-1} m^{-1}$	مكافئ هول m^3/C	حركية هول $m^2/V \cdot sec$
الفضة Ag	2.4×10^8	$- 8.4 \times 10^{-11}$	0.0202
الالنيوم Al	2.1×10^8	$- 3.0 \times 10^{-11}$	0.0063
الحديد Fe	9.0×10^7	$+ 2.5 \times 10^{-11}$	سالبة
النيكل Ni	1.0×10^8	$- 6.0 \times 10^{-10}$	0.0600
الكادميوم Cd	4.3×10^7	$+ 6.0 \times 10^{-11}$	سالبة

The Superconductivity

3-4-7 ظاهرة التوصيلية الكهربائية الفائقة

من المعروف ان مقاومة المواد الموصلة العادية تقل كلما انخفضت درجة الحرارة وانها تصل الى الصفر عند درجة حرارة الصفر المطلق 0K اي عند $- 273^\circ C$ ، يمكن الوصول الى درجات حرارة منخفضة باسالة الغازات ، مثل الاوكسجين والنيتروجين والهيدروجين والهيليوم ، والتي تملك درجات حرارة غليان $- 183^\circ C$ و $- 196^\circ C$ و $- 263^\circ C$ و $- 269^\circ C$ تقريباً على الترتيب . وقد وجد ان مقاومة بعض المعادن مثل الرصاص والقصدير والزنك والنيوبيوم تنخفض درجة حرارتها الى درجة حرارة معينة تسمى

درجة الحرارة الحرجة T_c (Critical Temperature) وتظهر ما يعرف اليوم (بالوصيلية الفائقة) Superconductivity . ان مقاومة المادة تصبح صفراً ويمكن لتيار كهربائي ان يسري الى سنوات عديدة في حلقة من مادة موصلة من دون الحاجة الى بطارية او مصدر القوة الدافعة الكهربائية . وتم اكتشاف العديد من المواد ذات التوصيلية الفائقة ، ومن اهم هذه المواد السبائك التي تم اكتشافها حديثاً من انها مواد ذات توصيلية فائقة عند درجات حرارة مرتفعة نسبياً (اكثر من 100 K) . ويحاول العلماء الحصول على مواد ذات توصيلية فائقة عند درجة حرارة الغرفة لما لها من تطبيقات واسعة في الصناعة .

وتستخدم الآن المواد ذات التوصيلية الفائقة في صنع المغناطيس الكهربائية التي تستطيع ان تنتج مجالا مغناطيسياً ذا قيمة عالية . والجدول (7.3) سين بعض العناصر والسبائك فائقة التوصيلية الكهربائية مع درجات حرارتها الحرجة ، T_c

جدول (7.3) : درجة الحرارة الحرجة لتحول المادة الى التوصيلية الفائقة لبعض المواد المعروفة

العنصر او المركب	درجة الحرارة الحرجة T_c (K)
الالمنيوم	Al
الانديوم	In
الرصاص	Pb
الزئبق	Hg
القصدير	Sn
الفاناديوم	V
نيوبيوم - جرمانيوم	Nb ₃ Ge
فانديوم - سليكون	V ₃ Si
نيوبيوم - المنيوم	Nb ₃ Al
نيونيم - زركونيوم	Nb ₉₀ Zr ₁₀
السيكة	Nb ₃ Sn
السيكة	NbN
السيكة	Nb ₃ Al ₈ Ge ₂
السيكة	V ₃ Ga

The Critical Field

7-5-4 المجال المغناطيسي الحرج

من الخواص المهمة الأخرى للمادة فائقة التوصيلية الكهربائية هو أن مقاومتها الكهربائية العادية يمكن أن تعود مجدداً وذلك عندما يسلط عليها مجال مغناطيسي ذو قيمة أكبر من القيمة الحرجة B_c ، حتى وإن كانت قيمة درجة الحرارة أقل من القيمة الحرجة T_c . أن قيمة المجال المغناطيسي الحرج يعتمد على نوع المادة وعلى درجة الحرارة. أن تحطيم ظاهرة التوصيلية الفائقة بواسطة المجال المغناطيسي يحد من القيمة العظمى للتيار الكهربائي الذي يمكن إرساله خلال المادة وهي في حالة التوصيلية الفائقة. أن علاقة قيمة المجال المغناطيسي الحرج B_c ، ودرجة الحرارة يعبر عنها بالمعادلة الآتية:

$$B_c = B_0 \left\{ 1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right\} \quad \text{..... (7.12)}$$

اذ ان B_0 تمثل القيمة الثابتة للمجال المغناطيسي عندما تقترب درجة الحرارة من الصفر المطلق ، $0 K$. يتبين من هذه المعادلة ايضاً ان قيمة B_c تساوي صفراً عند تساوى درجة الحرارة مع درجة الحرارة الحرجة للمادة T_c . وبصورة عامة ، كلما تكون قيمة T_c عالية فان قيمة المجال الحرج تكون عالية ايضاً والعكس صحيح ، وعليه فان قيم المجال الحرج صغيرة جداً للمعادن النقية ، الشكل (7.15) يوضح علاقة المجال الحرج مع درجة الحرارة لبعض العناصر المعروفة في توصيلتها الفائقة . الجدول (7.4) يبين قيم المجال المغناطيسي الحرج لبعض المواد المعروفة .

الجدول (7.4) : قيم المجال المغناطيسي الحرج
لبعض المواد الفائقة التوصيلية

المادة	المجال الحرج (كاوس)
الالمنيوم Al	99
الزئبق Hg	411
الإنديوم In	293
نيوبيوم Nb	1980
الرصاص Pb	803
الفانديوم V	1020
الزنك Zn	53
التنكستن W	1
المولبديوم Mo	98
الزركونيوم Zr	47

ان ازالة خاصية التوصيلية الفائقة لا يقتصر فقط على تسليط مجال مغناطيسي مناسب بل ان مرور تيار كهربائي ذو قيمة مناسبة في المادة ذات التوصيلية الفائقة كفيل في احيان

كثيرة من أرائة التوصيلية الفائقة او تحطيمها. يطلق على قيمة التيار الكهربائي اللازمة لتحطيم خاصية التوصيلية الفائقة (بالتيار الحرج) Critical Current ان قيمة التيار الحرج تعتمد على عوامل عديدة منها :

- 1- طبيعة المادة.
- 2- شكلها الهندسي.
- 3- قيمة المجال المغناطيسي الناتج عن مرور التيار الكهربائي.

ان قيمة التيار الحرج يمكن ان تتجاوز ال 100 أمبير لسلك قطره 1mm .
واعتماداً على طبيعة التحول من الحالة فائقة التوصيلية الى الحالة الاعتيادية للمادة يمكن (تقسيم المواد فائقة التوصيلية الكهربائية الى صنفين رئيسين هما)

Type I

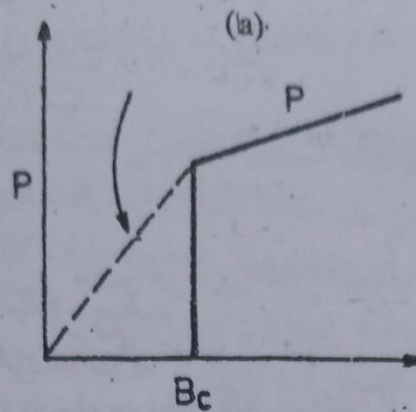
النوع الاول

ويطلق عليها ايضاً اسم المواد فائقة التوصيلية اللينة . وتمتاز هذه المواد بالتحول الحاد والمفاجئ لجميع المادة الى الحالة الاعتيادية عندما تصل قيمة المجال المغناطيسي الى القيمة الحرجة والتي تسترجع عندها المادة مقاومتها الكهربائية وتفقد الخاصية الدايامغناطيسية . وتعود معظم العناصر الفلزية ذات الصفة الفائقة التوصيلية الى هذه المجموعة ، مثل الرصاص Pb والقصدير Sn والالنيوم Al والزرنيق Hg . الشكل (7.4) يوضح تصرف النوع الاول للمواد الفائقة التوصيلية . ان قيمة المجال المغناطيسي الحرج لهذا النوع من المواد يكون منخفضاً .

Type II

النوع الثاني

يكون تحول المادة من الحالة فائقة التوصيلية الفائقة الى الحالة الاعتيادية تدريجياً ويمتد ليشمل مدى واسعاً للمجال المغناطيسي المسلط . اي ان المادة تفقد خاصيتها الدايامغناطيسية بصورة تدريجية . أما المقاومة فان المادة تستعيد عند قيمة اخرى للمجال المغناطيسي المسلط . الشكل (7.5) يوضح طبيعة هذا التحول لهذا النوع من المواد الفائقة التوصيلية . وهذا يدل على ان اجزاء المادة لا تتحول جميعها في لحظة واحدة الى الحالة الاعتيادية ، بل ان التحول يشمل جزءاً من المادة ويبقى الجزء الآخر محتفظاً بخاصيته من دون تحول ، وسيتحول عند قيمة اعلى للمجال المغناطيسي المسلط .



وواسعة. فعلى سبيل المثال نذكر انتشار الأشعاع الكهرومغناطيسي خلال المواد العازلة على مدى واسع يمتد من الترددات الراديوية الى الترددات المرئية تقريباً، وتفرق الضوء في الأوساط البصرية وفقدان صفة العزل الكهربائية وانسيابه في المسعات وغيرها الانتشار الواسع لاستخدام الاجهزة الكهربائية وبخاصة اجهزة قياس الانفعال واجهزة لانتقاط المايكروفون وغيرها. وقبل البدء بدراسة الخواص المهمة للعوازل نذكر باختصار اهم خواص المجال الكهربائي والمتسعة الكهربائية لعلاقتها بالموضع وسنركز على خواص العوازل المهمة من دون الخوض في تفاصيل استخدام هذه العوازل في المسعات والتي يتناولها موضوع الكهربائية المستقرة في نفس المرحلة الدراسية.

7-7 X المجال الكهربائي

Electric Field (E).

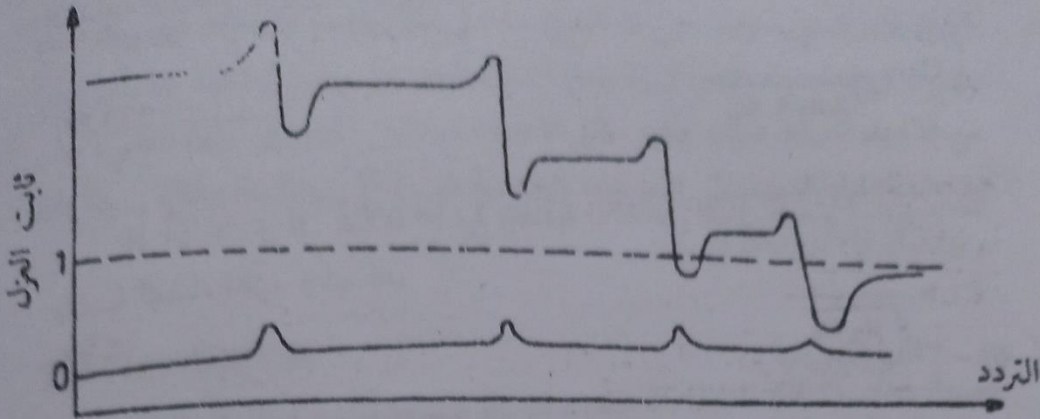
يعرف المجال الكهربائي ببساطة على انه القوة لوحدة الشحنة الموجبة. لأجل إيجاد قيمة المجال الكهربائي عند نقطة ما، نأخذ شحنة نقطية ونضعها في المكان المطلوب إيجاد المجال الكهربائي فيه. ستؤثر قوة كهربائية F على الشحنة في مكانها الجديد، ان حصل قسمة القوة الكهربائية على قيمة الشحنة الكهربائية q يساوي المجال الكهربائي، اي ان:

$$E = \frac{F}{q} \quad \dots\dots\dots (7.13)$$

ان وحدة المجال الكهربائي تساوي نيوتن لكل كولومب.
ان المجال الكهربائي الذي يحيط شحنة او توزيع من الشحنات الكهربائية يكون معتمداً على المكان الذي يقاس عنده.

ان المجال الكهربائي الذي تنتجه صفيحتان متطعتان متوازيتان تحملان شحنتين مختلفتين يساوي حاصل تراكم المجالين المتجهين بوساطة الشحنتين كل على انفراد. وفي المنطقة المحصورة بين الصفيحتين يضاف المجالين الى بعضهما. وبدلالة مقدار الشحنة الموجودة على اي من الصفيحتين لوحدة المساحة يمكن كتابة المجال، كما يأتي:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad \dots\dots\dots (7.14)$$



الشكل (7.8): علاقة ثابت العزل مع التردد

Electrical Breakdown.

5- 13-7 الانهيار الكهربائي

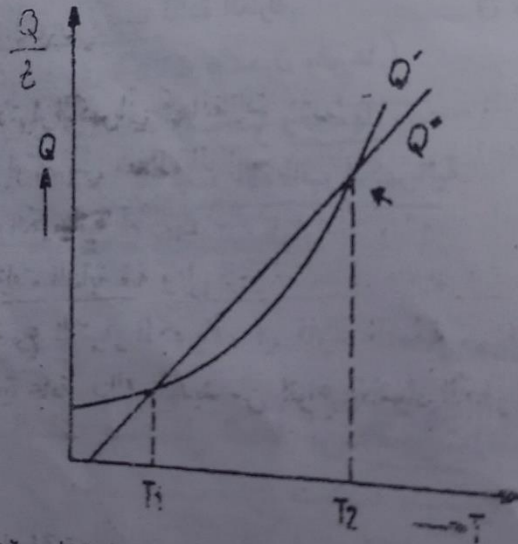
ان حدوث الانهيار الكهربائي في الغازات معروف منذ زمن بعيد ، ومن أمثلته حدوث البرق. ان مرور تيار كهربائي خلال الغاز يكون عادة مصحوباً بتحرير كمية من الحرارة والضوء والتأثيرات الكيميائية الأخرى. ان الانهيار الكهربائي في السوائل يعتمد على نقاوة السائل وعلى الغازات المذابة فيه وعلى لزوجة السائل ودرجة الحرارة وغيرها من العوامل الأخرى. ان موضوع الانهيار الكهربائي في المواد الصلبة هو الأكثر تعقيداً ويكتفه الغموض. وبصورة عامة هناك العديد من انواع الانهيار الكهربائي في المواد الصلبة، سنذكر أهمها:

Thermal Breakdown

(1) 13-7 الانهيار الحراري

ويتبع عندما تزيد كمية الحرارة المتحررة محلياً على كمية أكبر من كمية الحرارة التي يستطيع ان يفقدها العازل. والتي ستؤدي الى ارتفاع في درجة حرارة العازل. ان ارتفاع درجة حرارة العازل تؤدي الى زيادة توصيليته الكهربائية. ويحدث الانهيار الحراري عند درجات حرارة عالية وان شدة المجال الكهربائي اللازم لحدوث الانهيار يعتمد على حجم وشكل المادة العازلة وعلى الخواص الحرارية للاقطاب وعلى الوسط. ان زمن الانهيار يكون محدود ملي ثانية ، ويمكن ان يكون أطول من ذلك بكثير. يعتمد فقدان القدرة في معظم المواد الصلبة العازلة على درجة الحرارة ، ويتبع دالة أسية. ان شدة الانهيار الكهربائي يكون اقل في حالة المجال الكهربائي المتذبذب عما هو عليه في حالة المجال الكهربائي

المستمر، لأن فقدان القدرة يزداد بزيادة التردد. كما وأن كمية الحرارة المتحررة لوحدة الزمن في العازل الصلب تتغير اسياً مع درجة الحرارة. أما كمية الحرارة التي يمكن أن يفقدتها العازل الصلب إلى محيطه فإنها تعتمد بصورة طردية على عدة عوامل منها درجة الحرارة والتوصيلية الحرارية لمادة العازل ومعامل انتقال الحرارة من سطح العازل إلى محيطه القريب. الشكل (7.9) يبين علاقة كل من الحرارة المتولدة في العازل الصلب والحرارة المفقودة منه كدالة لدرجة الحرارة. عند قيمة مقبولة للمجال الكهربائي المسلط، عند درجة الحرارة T_1 سيحدث توازن بين كميتي الحرارة المتولدة والمفقودة ولا يحدث الانهيار الكهربائي. أما عند درجة الحرارة T_2 فسوف يختل التوازن وستكون الحرارة المتولدة أكبر من من الحرارة المفقودة وسيحدث الانهيار الكهربائي.



الشكل (7.9): الحرارة المتولدة والحرارة المفقودة في العازل

Intrinsic Breakdown

2-13-7 الانهيار الاصلي (الذائي)

من أهم خصائص هذا النوع من الانهيار الكهربائي هو حدوثه عند درجات حرارة واطئة (حوالي درجة حرارة الغرفة) أو أقل. كما أن شدة هذا الانهيار لا تعتمد على شكل موجة الفولتية المسلطة وأن حدوثه يستغرق زمناً محدوداً عدة ملي ثانية أو أقل من ذلك. كما وأنه لا يعتمد على حجم أو شكل العينة ولا على ترتيب الأقطاب. تحتوي المادة العازلة على العديد من العيوب والشوائب، وأن هذه العيوب والشوائب تساهم بالكثرونات حرة في العازل الصلب عند درجات الحرارة الاعتيادية وأنها مسؤولة عن الانهيار الكهربائي في هذه

7-15 مسائل الفصل السابع

- 1- متسعة ذات الواح المنيوم متوازية مساحة كل منها $0.25m^2$ والمسافة بينهما تساوي $0.1mm$ ، يفصل بين لوحيهما الهواء. سلط فرق جهد مقداره $250V$ عليها. جد قيم كل مما يأتي:
1- سعة المتسعة
- 2- الشحنة الموجودة على كل لوح.
- 3- ما شدة المجال الكهربائي بين لوحيه المتسعة.
- 2- جد مساحة الواح الالمنيوم اللازم لتصنيع متسعة سعتها $4\mu F$ تحتوي بين لوحيهما مادة عازلة من البولي اثيلين سمكها $5 \times 10^{-2}mm$ وثابت عزلها النسبي يساوي $(K=2.3)$.
- 3- جد ثابت عزل مادة عازلة سمكها $1.5cm$ وضعت بين لوحيه متسعة. فاذا كان فرق الجهد بين لوحيه المتسعة يساوي 3×10^5V و 1.8×10^5V في حالتي عدم وجود وجود المادة العازلة على الترتيب مع ثبات قيمة وشحنة المتسعة.
- 4- عدد أهم المتغيرات التي نظراً على الشحنة وفرق الجهد والمجال الكهربائي لمتسعة مشحونة عند وضع مادة عازلة بين لوحيه ذات ثابت عزل نسبي مقداره K .
- 5- اشرح كيفية تكون عزم الثنائي الكهربائي عند وضع المواد داخل مجال كهربائي.
- 6- اشرح ظاهرة الانهيار الكهربائي. اذكر أهم أنواعه وكيفية حدوث الانهيار الكهربائي فيها.
- 7- اشرح ظاهري الفير كهربائية والبيزوكهربائية وتطبيقاتها في الصناعة.
- 8- عرف التوصيلية الكهربائية. صنف المواد حسب قيم توصيليتها الكهربائية.
- 9- عرف المقاومة النوعية. اشرح باختصار اسباب المقاومة الكهربائية في المواد.
- 10- عرف فولتية هول. اشرح كيفية نشوئها في المواد الصلبة.
- 11- عرف الاستقطاب في المواد العازلة كهربائياً.
- 12- عرف ثابت العزل الكهربائي. وبين كيف يؤثر على قيمة سعة المتسعة.
- 13- ماهي وحدات قياس كل من الوحدات الآتية: فرق الجهد الكهربائي - المقاومة النوعية - التوصيلية الكهربائية - السعة واجزائها - الشحنة الكهربائية.
- 14- عرف الاستقطابية واشتق علاقتها مع التأثيرية الكهربائية.
- 15- عرف سماحية الفضاء الحر والسماحية النسبة وعلاقتها مع ثابت العزل.

الفصل الرابع

البلازما

The Plasma

المقدمة

نمّ حد الآن دراسة بعض خواص حالات المادة الثلاثة الصلبة والسائلة والغازية. ان المادة في هذه الحالات الثلاث لا تشكل سوى أقل من 10% من المادة الكلية الموجودة في الكون، وان ما تبقى من هذه النسبة وهي أكثر من 90% فتتمثلها الحالة الأيونية، وهي ما يطلق عليه اليوم الحالة الرابعة للمادة أو حالة البلازما. لقد ازدادت أهمية دراسة البلازما حديثاً، وذلك لزيادة استخداماتها العملية في التكنولوجيا الحديثة، فضلاً عن أن الآمال المعقودة على أنها ستكون مصدر طاقة المستقبل البديلة.

يمكن أحداث تغير في حالات المادة الثلاث الأولى وذلك بتغيير درجة حرارتها. ان المادة وان اختلفت في طبيعة حالاتها الثلاث، الا انه يوجد عامل مشترك بين هذه الحالات وهو ان المادة تكون متعادلة كهربائياً سواء كانت صلبة أو سائلة أو غازية. ان معظم مادة الكون تكون بحالة غير متعادلة كهربائياً، اذ يمكن وصف الشمس والنجوم ككلاً هائلة من البلازما الساخنة - حالة المادة -.

The Plasma

1-8 البلازما

تعرف حالة المادة بـ (البلازما) عندما تكون نسبة عالية من ذراتها موجودة على شكل أيونات موجبة منفصلة عن إلكتروناتها السالبة. تتأين ذرات وجزيئات المادة المكونة للنجوم نتيجة لوجودها في درجات حرارية عالية جداً. لا يوجد الغاز العالي التأين في درجات حرارية عالية جداً بصورة طبيعية على سطح الكرة الأرضية، بل يتم انتاجها اصطناعياً في مختبرات خاصة.

Plasma Production

2-8 توليد البلازما

يتم توليد البلازما بتسخين الغاز تحت ضغط واطئ إلى درجات حرارة عالية بحيث تصبح الطاقة الحركية لذراته وجزيئاته مساوية أو تزيد على طاقة تأين تلك الذرات والجزيئات. ان درجة حرارة الغاز يجب ان تكون عالية ومحدود 10^4 إلى 10^5 درجة كلفينية وقد تصل الى ملايين الدرجات الحرارية. يعد الغاز المتأين جزئياً في المصابيح الكهربائية المتفلورة وغيرها بلازما تتعرض باستمرار إلى تبريد مستمر نتيجة لأصطدام الأيونات الموجبة والالكترونات السالبة بجدران المصباح ذي درجة الحرارة المنخفضة. لا يمكن الاحتفاظ بالبلازما داخل اوعية مادية لان درجة حرارة البلازما العالية ستؤدي إلى صهر هذه الاوعية. وقد امكن الاحتفاظ بالبلازما في درجات الحرارة العالية ضمن المجالات المغناطيسية التي تمنع البلازما من التلامس مع جدران الأوعية المادية.

Investigation of Plasma

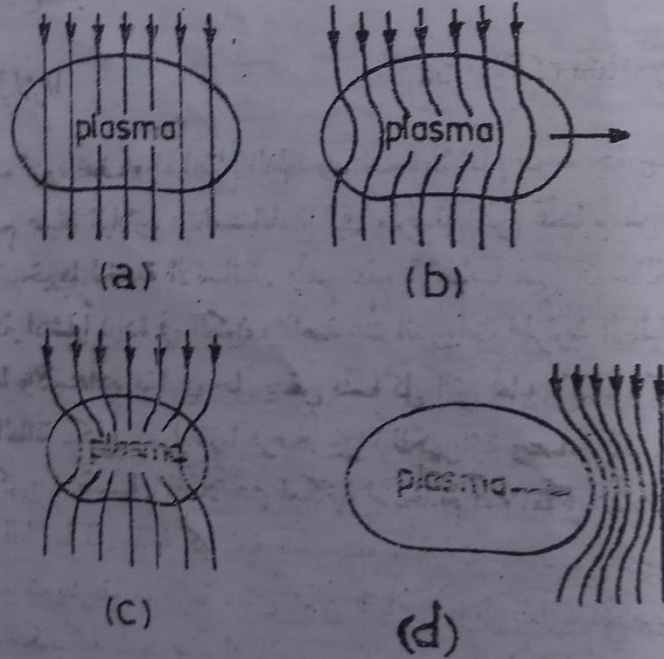
3-8 دراسة البلازما

هناك أسباب كثيرة تقف وراء اهتمام العلماء واستخدامهم لتقنيات حديثة ومكلفة من أجل دراسة وفهم طبيعة البلازما، واستنباط الطرق والوسائل التي تمكنهم من السيطرة على البلازما وتسخيرها لخدمة الإنسانية. وأهم هذه الأسباب هي ان حالة البلازما تمثل الحالة الأكثر انتشاراً للمادة في الكون وبخاصة عند الدرجات الحرارية العالية، وعليه يجب الاهتمام بها والاستفادة منها في حل بعض المشاكل التي تواجه العلماء، كمشاكل تحويلات ونتاج الطاقة. كما وتعد البلازما موصلاً جيداً للكهربائية ومصدراً للضوء، وتؤثر كثيراً بالقوى الكهرومغناطيسية. فضلاً عن امكانيه استخدام البلازما في تطبيقات تحويل الطاقة الحرارية للبلازما الى طاقة كهربائية باستخدام المجالات المغناطيسية. فضلاً عن اجراء هذه العمليات بطريقة معكوسة، اي يمكن القيام بتحويل الطاقة الكهربائية إلى طاقة حرارية أو ميكانيكية باستخدام المجالات المغناطيسية. فضلاً عما تقدم فان هناك تطبيقات مهمة للبلازما مثل استخدامها في مفاعلات الاندماج النووي وتوليد الكهرباء وكوقود في الصواريخ وتكبير الموجات الكهرومغناطيسية بواسطة مضخات البلازما. ولأجل دراسة البلازما يجب أولاً دراسة المعادلات الأساس المستخدمة في وصف الظواهر الكهرومغناطيسية، والتي تعرف بمعادلات ماكسويل التي يمكن التحقق من صحتها تجريبياً. ونقع دراسة معادلات ماكسويل خارج نطاق مضمين هذا الكتاب.

8-4 البلازما والمجال المغناطيسي

Plasma and Magnetic Field

يمكن للمجال المغناطيسي الثابت ان يتواجد داخل البلازما على عكس المجال الكهربائي الستاتيكي الذي لا يستطيع ان يتواجد داخل البلازما. ان وجود خطوط المجال المغناطيسي داخل البلازما يفرض عليها الكثير من المحددات، حيث انها تكون مجمدة داخل البلازما. فاذا كانت البلازما ساكنة فان خطوط المجال المغناطيسي تكون ساكنة ايضاً والعكس صحيح الشكل (8.1a) يوضح خطوط المجال المغناطيسي خلال كرة من البلازما تقع بين قطبي مغناطيسي كهربائي، فاذا سحبنا الكرة جانباً فانها ستسحب خطوط المجال معها ايضاً الشكل (8.1b). واذا تعرضت كرة البلازما الى قوة كبس من جهتيها، تعرضت خطوط المجال المغناطيسي الى ما تعرضت له البلازما، كما نرى ذلك واضحاً في الشكل (8.1c).



الشكل (8.1): البلازما وخطوط الفيض المغناطيسي

ان سبب الالتصاق القوي لخطوط المجال المغناطيسي الى البلازما هو توصيلية البلازما العالية، والتي تكون مالا نهائية في البلازما المثالية، والى هذا يعود سبب اختفاء المجال الكهربائي خلال البلازما.

ومن المعلوم ان اي تغيير في المجال المغناطيسي ينتج عنه مجال كهربائي محث . وبما ان المجال الكهربائي معنوم في البلازما ، فان التغير في المجال المغناطيسي سيكون معدوماً ايضاً وهذا يعني ان خطوط المجال المغناطيسي تبقى ثابتة . ان تصرف البلازما لا يقتصر على المحافظة على خطوط المجال المغناطيسي داخلها ، بل يتعداه الى المحافظة على طرد خطوط المجال المغناطيسي الواقعة خارجها . فاذا قربنا كرة من البلازما من خطوط مجال مغناطيسي فانها ستعمل على دفع وتشويه المجال المغناطيسي الواقع الى الخارج كما موضحاً في الشكل (8.1d).

Confinement of Plasma

5-8 احتواء البلازما

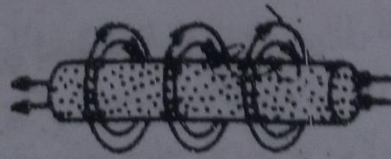
تجرى عملية احتواء البلازما الساخنة عملياً في مفاعلات الانشطار النووي الحراري باستخدام مجالات مغناطيسية مصممة بعناية خاصة .

ان هذا الترتيب للمجال المغناطيسي غالباً ما يطلق عليه القنية المغناطيسية Magnetic bottle . تستطيع القنية المغناطيسية من احتواء البلازما الساخنة ، التي لا يمكن الاحتفاظ بها باي وعاء معدني اوزجاجي نتيجة لارتفاع درجة حرارتها العالية . الشكل (8.2) يوضح قنية مغناطيسية حاوية على البلازما تم الحصول عليها باستخدام مجال مغناطيسي بوساطة ملف حلزوني .

يمكن استخدام خطوط المجال المغناطيسي الناتج عن مرور تيار كهربائي خلال البلازما نفسها في المحافظة على البلازما الساخنة واحتوائها . الشكل (8.2) يوضح اعمود اسطواني من البلازما الساخنة يمر خلالها تيار كهربائي وان خطوط المجال المغناطيسي الناتج عن مرور التيار الكهربائي يحيط بالبلازما ويسلط ضغطاً عليها من اجل احتوائها . ان اكبر قيمة للمجال المغناطيسي تكون عند سطح البلازما ، اي ان الضغط يكون اكبر ما يمكن عند السطح وسيدفع البلازما نحو الداخل . ان قيمة التيار الكهربائي المستخدم في المحافظة على البلازما في مفاعلات الانشطار النووي الحراري قد يبلغ المليون أمبير .

وقد وجد عملياً ان (احتواء البلازما بوساطة مجالها المغناطيسي يلاقي مصاعب عديدة

منها :)



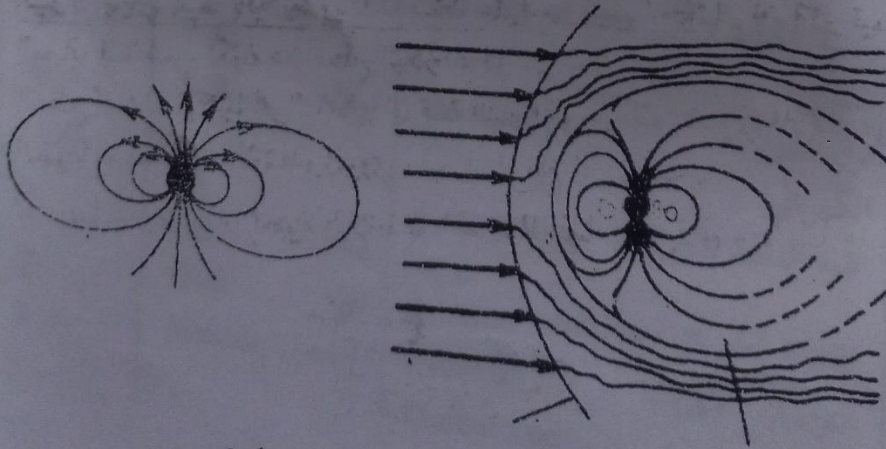
الشكل (8.2) : يوضح القنية المغناطيسية

- 1- تسرب البلازما عند نهايات التمسمة المغناطيسية.
 - 2- عدم الاستقرار الذي يؤدي الى فقدان الموازنة بين ضغط المجال المغناطيسي وضغط البلازما الحركي مما يؤدي الى تسربها من وعائها المغناطيسي.
- وقد تمكن العلماء من بناء العديد من حاويات البلازما المغناطيسية التي تكفل عدم تسربها.

6-8 المجال المغناطيسي، الارضي والبلازما الكونية

The Earth Magnetic Field and the Solar Plasma

ان دفع البلازما المتحركة لخطوط المجال المغناطيسي الواقعة خارجها أدى الى تشوه شكل المجال المغناطيسي الارضي. الشكل (8.3a) يبين شكل المجال المغناطيسي للأرض في حالة عدم وجود موثر خارجي مثل البلازما، اذ سيكون مجالاً مغناطيسياً متناظراً ذا قطبين شمالي وجنوبي. ان الشكل الحقيقي للمجال المغناطيسي الارضي يختلف تماماً عن الشكل المثالي والسبب في ذلك يرجع الى تأثير الرياح الشمسية. والرياح الشمسية ماهي الا بلازما تهب (تصدر) من الشمس، وتكون خليطاً متعادلاً من الالكترونات والبروتونات تنطلق بسرعة 400 Km/sec . ان دفع او ضغط هذه الرياح بسبب تشوه خطوط المجال المغناطيسي الارضي وذلك بضغط خطوط المجال عند الجهة المواجهة للشمس واستطالة المجال في الجهة المقابلة. يطلق على الفضاء الذي يشغله المجال المغناطيسي الارضي بالكرة المغناطيسية Magnetosphere. تتخذ الكرة المغناطيسية شكل قطرة المطر المسجوبة مع ذيل يمتد الى مسافة عدة مئات من الاف الكيلو مترات. الشكل (8.3b) يوضح المجال المغناطيسي الارضي المشوه نتيجة الرياح الشمسية.



الشكل (8.3): المجال المغناطيسي، والبلازما الكونية

7-8 مسائل الفصل الثامن

- 1- عرف الحالة السريعة لمادة (البلازما) وقارن بينها وبين الحالات الثلاث الأخرى للمادة.
- 2- كيف يمكن الحصول على البلازما.
- 3- لماذا لا يمكن حفظ البلازما في أوعية من المادة الصلبة.
- 4- ماهي الأسباب التي تقف وراء اهتمام العلماء بدراسة البلازما.
- 5- عدد أهم استخدامات البلازما.
- 6- وضع كيف تتفاعل البلازما مع خطوط المجال المغناطيسي الواقعة:
 - 1- داخل البلازما.
 - 2- خارج البلازما.
- 7- لماذا لا يتواجد المجال الكهربائي داخل البلازما.
- 8- وضع كيف تؤثر البلازما الكونية على المجال المغناطيسي الأرضي.
- 9- كيف تمكن العلماء من احتواء البلازما في مفاعلات الانشطار النووي الحراري.
- 10- كيف يمكن التوفيق بين حقيقة أن التغير في المجال المغناطيسي يتسبب عنه مجال كهربائي محث وعدم تواجد المجال الكهربائي داخل البلازما.