

الجزء الثاني

الحرارة

والديناميكا الحرارية



# الباب الثامن

## الحرارة وقياسها

### ٨ - ١ مصادر الطاقة الحرارية :

للطاقة الحرارية عدة مصادر أساسية هي :

١ - التفاعلات الكيميائية : فعندما تتحد مادتان كيميائياً ينتج عادة عن هذا التفاعل امتصاص أو انطلاق للحرارة . فالحرارة الناشئة عن حرق الوقود الكيميائي هي في الواقع نتيجة لتفاعل كيميائي بين مادة الوقود وأوكسجين الهواء .

٢ - الطاقة الميكانيكية : تتولد الطاقة الحرارية من الطاقة الميكانيكية إما عن طريق الاحتكاك الخارجى أو الداخلى للأجسام المتحركة أو عندما تصادم بعضها مع بعض .

٣ - الطاقة الكهربائية : إذا أمرنا تيار كهربائياً في سلك مقاومة . نتج عن ذلك تسخين مما يدل على تحويل الطاقة الكهربائية إلى حرارة .

٤ - الطاقة النووية : تؤدي التفاعلات النووية إلى إنتاج طاقة حرارية هائلة نتيجة لتحويل جزء صغير من كتلة المادة المتفاعلة إلى طاقة ويتم ذلك عند اتحاد أو انشطار نوى المواد المتفاعلة نووياً . وقد حدد أينشتين العلاقة بين كتلة المادة التي تختفي وكمية الطاقة التي تتحرر نتيجة لذلك بقانونه المشهور :

$$\text{الطاقة المتحررة} = \text{الكتلة} \times \text{مربع سرعة الضوء} .$$

٥ - الطاقة الشمسية : وهي نوع من الطاقة النووية إذ من المعروف حالياً أن الحرارة المشعة من الشمس هي في الواقع نتيجة تفاعل نووى تتحرر بواسطته كميات كبيرة من الطاقة تؤدي إلى رفع درجة حرارة الشمس وتصبح بذلك مصدراً مشعاً للحرارة .

### ٨ - ٢ درجة الحرارة وقياسها :

تحدد درجة الحرارة لجسم ما المستوى له وتختلف اختلافاً بيناً عن كمية الحرارة المخزونة به والتي تحددها كمية الطاقة الميكانيكية المصاحبة لحركة الجزيئات التي يتكون منها الجسم . فإذا أعطينا كمية معينة من الحرارة

إلى كتلتين مختلفتين من نفس المادة فإننا نجد أن إحساسنا بسخونة الجسم [ذى الكتلة الصغيرة أكبر من الكتلة الكبيرة . هذا الإحساس بالسخونة أو البرودة هو الذى نعبّر عنه بدرجة الحرارة . ويصاحبه عادة التغير فى درجة حرارة جسم ما تغيرات فى خواصه الطبيعية من أهمها :

١ - التغير فى أبعاد الجسم ( ظاهرة التمدد ) .

٢ - التغير فى الضغط عند حفظ الحجم ثابتاً ( كما يحدث بوضوح فى حالة الغازات ) .

٣ - التغير فى المقاومة الكهربائية .

٤ - التغير فى القوة الدافعة الكهربائية الناتجة عن تلامس فلزين .

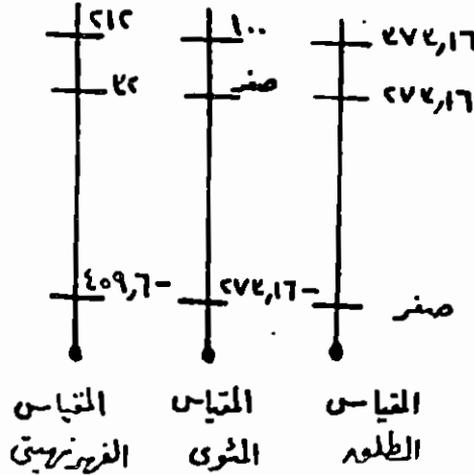
٥ - التغير فى الإشعاع الصادر من سطح الجسم ( تغير طول الموجة المشعة ) .

ولما كان قياس هذه التغيرات الطبيعية بدقة كبيرة أمراً ميسوراً لذلك نتخذها عادة وسيلة لقياس المستوى الحرارى للأجسام أى درجة حرارتها . وتسمى أجهزة قياس درجة الحرارة بالترمومترات .

مقاييس درجة الحرارة نوعان : مقياس نسبي ومقياس مطلق . المقياس النسبي كالمقياس المئوى أو الفهرنهایتى ويعتمد هذا النوع على الماء كمادة أساسية حيث تؤخذ نقطتا التجمد والغليان له كدرجتين قياسيتين . ويقسم التغير فى أى من الخواص الطبيعية المصاحبة للتغير بين هاتين الدرجتين إلى عدد معين من الأقسام ويسمى كل قسم منها بالدرجة . وفى المقياس المئوى يكون عدد هذه الأقسام ١٠٠ قسم ما بين نقطتي غليان الماء وتجمدهم كما يؤخذ صفر المقياس على أنه نقطة تجمد الماء . أما فى المقياس الفهرنهایتى فيقسم نفس هذا التغير إلى ١٨٠ قسماً وتقابل درجة تجمد الماء ونقطة غليانه على هذا المقياس الدرجتين ٣٢° ، ٢١٢° فهرنهایت على الترتيب . وبذلك تعادل الدرجة على المقياس الفهرنهایتى  $\frac{9}{5}$  من الدرجة على المقياس المئوى وتحدد العلاقة بين الدرجة المئوية  $^{\circ}C$  والدرجة الفهرنهایتية  $^{\circ}F$  بالمعادلة .

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

وفى سنة ١٨٤٨ عرف كلفن المقياس المطلق لدرجة الحرارة والذى لا يعتمد على طبيعة أى مادة قياسية . فقد اعتبر أن الطاقة الحرارية المخزونة داخل الجسم هى نفسها التى يجب أن تحدد مستواه الحرارى واعتبر درجة الصفر على المقياس المطلق هى الدرجة التى تتلاشى عندها تماماً كمية الطاقة المخزونة داخل الجسم . وقد أثبت أن هذه الدرجة تناظر درجة - ٢٧٣,١٦° م على المقياس المئوى وبين شكل ( ٨ - ) مقارنة بين المقاييس المختلفة لدرجة الحرارة .



(شكل ٨ - ٢)

### ٨ - ٣ أنواع الترمومترات :

١ - الترمومترات الزئبقية (mercuric thermometer) تعتمد على خاصية التمدد لقياس درجة الحرارة . ويستخدم الزئبق كمادة ترمومترية وذلك لما يتميز به على السوائل الأخرى . إذ يغلي في درجة  $356,7^{\circ}\text{C}$  ويتجمد في درجة  $-38,9^{\circ}\text{C}$  . وهو بذلك يسمح بقياس درجات الحرارة في المدى المتسع نسبياً من نقطة تجمده إلى نقطة غليانه . كما أن كبر معامل تمدده الحجمي (  $0,0018$  لكل درجة ) يسهل معه قياس التغير في حجمه برفع درجة الحرارة . وهو أيضاً سائل معتم تسهل معه الرؤية في الأنابيب الزجاجية .

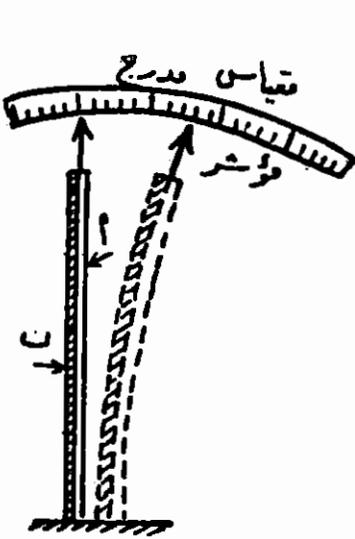
يركب الترمومتر الزئبقي المعتاد من مستودع زجاجي رقيق الجدران مملوء بالزئبق ويتصل بأنبوبة شعرية دقيقة ومنظمة المقطع ومقفلتة من طرفها العلوي . عندما ترتفع درجة حرارة الترمومتر يتمدد الزئبق في المستودع فيرتفع شريط منه في الأنبوبة الشعرية . ولعابرة الجهاز يوضع في جليد مجروش في درجة الصفر المئوي ثم في ماء يغلي في درجة  $100^{\circ}\text{C}$  ويحدد ارتفاع شريط الزئبق في الأنبوبة الشعرية في كل من الحالتين ثم تقسم المسافة بينهما إلى مائة قسم يعادل كل منها درجة واحدة مئوية . وبما يجدر ملاحظته أن حركة شريط الزئبق في هذا الترمومتر هي نتيجة للتمدد الظاهري للزئبق وهو الفرق بين التمدد الحقيقي له وتمدد الزجاج .

٢ - ترمومتر بكمان : يستخدم ترمومتر بكمان لقياس التغيرات الصغيرة في درجة الحرارة . ويركب كما في شكل ( ٨ - ٢ ) من مستودع للزئبق ذو حجم كبير نسبياً ويتصل بأنبوبة شعرية ذات مقطع دقيق جداً حتى أن الزيادة في درجة الحرارة بمقدار درجة واحدة مئوية تحرك الزئبق

في ساق الترمومتر حوالي ٤ سم . وتقسم هذه المسافة إلى مائة قسم فتكون بذلك حساسية الترمومتر هي  $0,01^{\circ}\text{C}$  ويدرج ساقه عادة إلى عدد قليل من الدرجات فقط كما هو موضح بشكل (٨ - ٢) .

ولكى يمكن استخدام الجهاز لقياس التغيرات في درجة الحرارة على مدى متسع من الدرجات يستخدم مستودع ثان ب عند النهاية العليا لساق الترمومتر لكي يستقبل الزائد من الزئبق المتمد من المستودع الأصلي إذا ما رفعت درجة حرارته وامثالاً لساق بلازئبق المتمد . ولإعداد الترمومتر للاستعمال عند درجة معينة يسخن مستودعه لدرجة أعلى قليلاً من هذه لدرجة فيتمدد الزئبق ويملأ الساق وينسكب الزائد من الزئبق في المستودع ب ثم عندما يترك الترمومتر ليبرد ينقطع شريط الزئبق عند مدخل المستودع العلوي وبذلك يكون المتبقى من الزئبق في المستودع أ كافياً لتحريك شريط الزئبق في ساق الترمومتر عند درجة الحرارة التي يراد قياس التغير عندها .

وعندما يراد إعداد الترمومتر لاستخدامه في درجات حرارة منخفضة ترفع درجة حرارة المستودع أ حتى يتصلب الزئبق في المستودعين ثم يبرد باحتراس فينكمش الزئبق داخله ساحباً وراعه كمية من زئبق المستودع ب . ثم يعد الترمومتر للدرجة المطلوبة كما سبق .



(شكل ٨ - ٣)



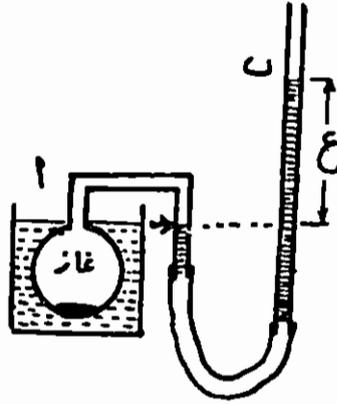
(شكل ٨ - ٢)

٣ - الترمومتر المعدني (metallic thermometers) يتركب الترمومتر المعدني من شريطين من المعدن أ ، ب (شكل ٨ - ٣) ، ملتصقين تماماً ويختلف معامل تمددهما اختلافاً كبيراً . فإذا كان معامل التمدد الشريط ب أكبر من معامل تمدد أ وإذا ارتفعت درجة الحرارة . يزداد طول ب عن أ ويتبع عن ذلك تقوس في الشريطين المتصقين من جهة الشريط أ ذي التمدد الأقل . يثبت عادة أحد

طرفي المجموعة ويوضع مؤشر على الطرف الآخر ليتحرك على مقياس مدرج . وتؤخذ حركة المؤشر ، نتيجة تقوس الشريطين بارتفاع درجة الحرارة . كمقياس لهذه الدرجة . ولعايرة الجهاز تستخدم أساط ذات درجات حرارة معلومة وبذلك يدرج المقياس ليقراً درجات حرارة مباشرة .

#### ٤ - الترمومتر الغازي : gas thermometer

يستخدم في الترمومتر الغازي خاصية التغير في ضغط أحد الغازات التي تقترب حالتها من حالة الغاز المثالي عندما ترتفع درجة الحرارة . وهذا النوع من الترمومترات أميز من الترمومترات الزئبقية إذ بواسطته يمكن قياس درجات حرارة على مدى متسع جداً من  $200^{\circ}\text{C}$  إلى  $1500^{\circ}\text{C}$  .



(شكل ٨ - ٤)

ويركب الترمومتر الغازي ذو الحجم الثابت كما في (شكل ٨ - ٤) من فقاعة زجاجية تحتوي على الغاز وتتصل بأنبوبة شعرية تنتهي بمانومتر زئبقي م . لعايرة الترمومتر يوضع مستودعه في جليد مجروش لحفظ الغاز عند درجة الصفر المئوي ثم يعدل وضع الفرع المتحرك ب الأنبوبة المانومترية حتى يصبح الزئبق في الأذوبة الشعرية أمام علامة ثابتة ويعين عندئذ ضغط الغاز ص الذي يساوي الضغط الجوي ص ح مضافاً إليه ارتفاع عمود الزئبق ع . ( يطرح من الضغط الجوي الارتفاع ع في حالة انخفاض سطح زئبق الأنبوبة ب عن العلامة الثابتة ) أي أن :

$$\text{ص} = \text{ص ح} + \text{ع}$$

ويوضع ماء يغلي حول مستودع الترمومتر ويتكرر ما سبق لتثبيت حجم كمية الغاز المحبوس نعين الضغط عند درجة  $100^{\circ}\text{C}$  وهو :

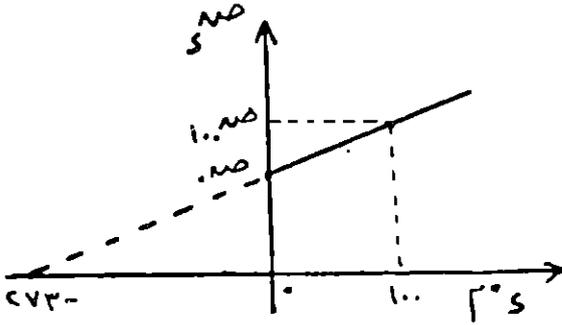
$$\text{ص} = 100 = \text{ص ح} + \text{ع} 100$$

ويتطبق قانون شارل في الغازات والذي ينص على أن ضغط الغاز يتناسب طردياً مع درجة حرارته عند ثبوت حجمه يمكن إيجاد معامل زيادة الضغط بدرجة الحرارة .

لايجاد درجة حرارة مجهولة يقاس بنفس الطريقة السابقة ضغط الغاز ص<sub>ك</sub> عند هذه الدرجة ك<sup>°</sup>م تحت نفس الحجم وتكون بذلك هذه الدرجة المجهولة :

$$١٠٠ \times \frac{ص_ك - ص_١٠٠}{ص_١٠٠ - ص_٠} = م^{\circ}م$$

$$١٠٠ \times \frac{ع_ك - ع_١٠٠}{ع_١٠٠ - ع_٠} = م^{\circ}ع$$



(شكل ٨ - ٥)

نلاحظ أنه إذا رسمت العلاقة بين ضغط الغاز الفعلي ودرجة حرارته شكل (٨ - ٥) نحصل على خط مستقيم يقطع امتداده محور درجة الحرارة في نقطة هي درجة الصفر المطلق أي عند حوالي -٢٧٣ م<sup>°</sup>.

ومن مميزات هذا النوع من الترمومترات شدة حساسيتها وذلك بالنسبة لكبر معامل تمدد الغازات ولكنه لا يصلح عادة لقياس درجة حرارة حيز صغير بالنسبة لكبير حجم مستودعه .

#### ٥ - ترمومتر المقاومة البلاتيني : Platinum thermometer

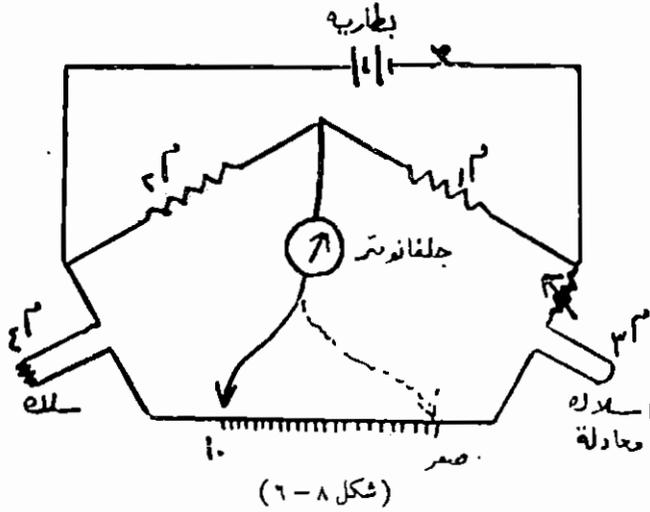
تغير مقاومة موصل معدني مع درجة حرارته تبعاً للمعادلة التقريبية

$$م = ص (١ + \alpha م)$$

حيث م ، ص هي مقاومته عند درجة ص ، صفر<sup>°</sup>م على الترتيب ،  $\alpha$  هو معامل زيادة المقاومة بدرجة الحرارة . وتستخدم هذه الظاهرة في الترمومتر البلاتيني لقياس درجات الحرارة المجهولة .

يتركب الترمومتر البلاتيني من سلك رفيع من البلاتين ملفوف على إطار من الميكا العازلة وموضو-

داخل أنبوبة رقيقة الجدران مصنوعة من الفضة لحماية السلك البلاتيني الذي يتصل طرفاه بجهاز دقيق لقياس المقاومة يتركب عادة من قنطرة هويستون (شكل ٨ - ٦) يوضع السلك البلاتيني كأحد أذرعها ثم يوجد وضع الاتزان وعدم انحراف الجلفانومتر ومنه يمكن حساب قيمة مقاومة السلك بدلالة مقاومة باقى أذرع القنطرة . ولمعادلة التغير الناشئ في مقاومة أسلاك توصيل الترمومتر البلاتيني الموضوع داخل الوسط



الساخن يوضع في ذراع القنطرة المقابل للترمومتر أسلاك معادلة تماثل تماماً أسلاك التوصيل للسلك البلاتيني وتوضع في الأخرى في نفس الوسط الساخن حتى تتغير مقاومتها بنفس المقدار كأسلاك توصيل سلك البلاتين وبذلك يكون مقدار التغير في المقاومة الذي تسجله قنطرة هويستون ناشئ فقط عن تغير مقاومة البلاتين مع درجة الحرارة .

لمعايرة الترمومتر البلاتيني يوضع سلكه في درجتى حرارة معلومتين - انصهار الجليد وغليان الماء مثلاً - ثم تقاس مقاومته عندهما ولتكن م . ، ١٠٠ م ، ثم يوضع الترمومتر في الوسط ذو الحرارة المجهولة S ° وتعين مقاومته بنفس الطريقة السابقة ولتكن م٠ وبذلك يمكن إيجاد الدرجة S من المعادلة :

$$100 \times \frac{M - S}{100 - M} =$$

ويمكن معايرة الجهاز ليعطى درجات الحرارة المجهولة مباشرة دون الاحتياج إلى إجراء الحساب السابق للمقاومات وذلك باستخدام سلك مقاومة M كالموجود بالقنطرة المترية ثم تعين عليه مواضع الاتزان عندما يوضع الترمومتر في درجتين معلومتين ( صفر ، ١٠٠ م مثلاً ) ثم تقسم المسافة بينهما إلى مائة قسم

يُنظر كل قسم منها درجة واحدة مئوية . وبذلك يمكن قراءة درجة الحرارة المجهولة مباشرة بمجرد إيجاد الاتزان على السلك  $\Psi$  ب .

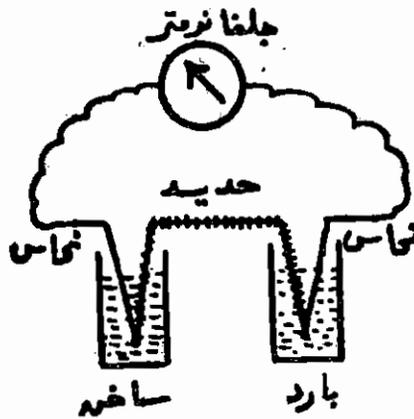
### ٦ - ترمومتر الازدواج الحرارى :

اكتشف سيك سنة ١٨٢١ الخاصة الكهر - حرارية .

فقد وجد أنه عندما يتصل فلزان مختلفان كالنحاس والحديد مثلاً على شكل ازدواج كالمين بشكل (٧ - ٨) تتولد قوة دافعة كهربائية عندما ترتفع درجة حرارة أحد الوصلتين بينما تحفظ الأخرى باردة . وتتوقف شدة التيار الناتج والذي يسجله الجلفانومتر الموجود بالدائرة الكهربائية على فرق درجات الحرارة بين الوصلتين . فإذا وضعنا الوصلة الباردة في جليد مجروش ورفعنا درجة حرارة الوصلة الأخرى فإن الجلفانومتر يسجل انحرافاً يتناسب طردياً مع درجة الحرارة المتوية للوصلة الساخنة بشرط ألا يكون هذا الارتفاع كبيراً .

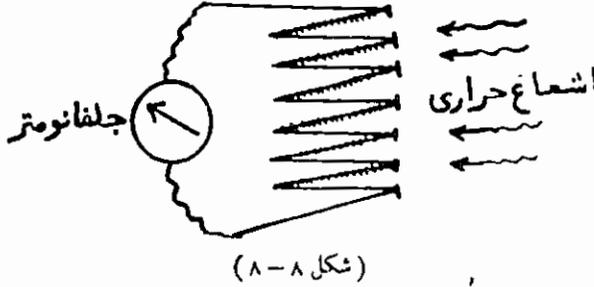
ويعاير انحراف الجلفانومتر ليعطى درجات حرارة مباشرة بوضع الوصلة الساخنة في ماء يغلي ويعين الانحراف الناشئ عن كل ارتفاع في درجة الحرارة قدره الوحدة . وعند استعمال هذا الترمومتر توضع الوصلة الساخنة في الوسط المجهول ثم يعين الانحراف الحادث في الجلفانومتر وبذلك تتعين درجة الحرارة المطلوبة .

يستخدم هذا النوع من الترمومترات لقياس التغيرات الصغيرة في درجة الحرارة وذلك لشدة حساسيته ولصغر سعته الحرارية إذ أن كمية الحرارة التي تلزم لرفع درجة حرارة مستودع الترمومتر ( الوصلة الكهربائية في هذه الحالة ) إلى درجة حرارة الوسط المجهول تكون صغيرة جداً لا تؤثر على درجة الوسط نفسه خاصة إذا كان محدوداً .



(شكل ٨-٧)

هو نوع من ترمومترات الازدواج الحرارى يستخدم فى قياس الإشعاع الحرارى . ويتركب من مجموعة كبيرة من الازدواجات متصلة على التوالى كما مبين بشكل ( ٨ - ٨ ) .



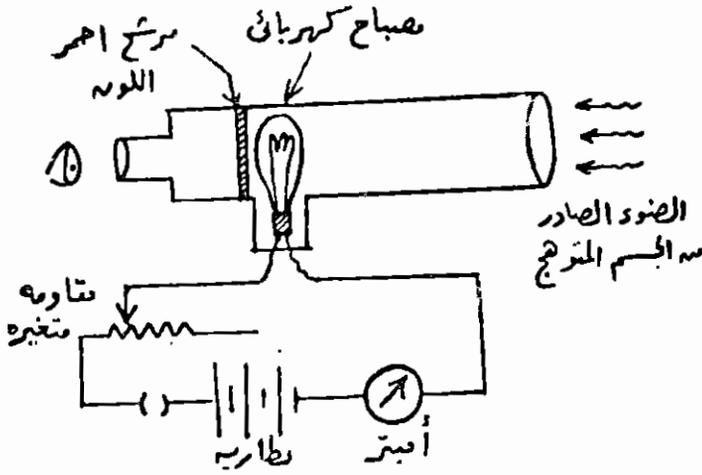
ويتصل طرفاها بجلفانومتر حساس . عندما تعرض الوصلات الأمامية لإشعاع حرارى ترتفع درجة حرارتها بينما لا تتغير درجة حرارة الوصلات الخلفية إذ أنها محفوظة داخل الجهاز بعيداً عن الإشعاع . يسبب الفرق فى درجة الحرارة بين الوصلات الأمامية والخلفية تياراً كهربائياً ينتج عنه انحراف الجلفانومتر بمقدار يتناسب مع شدة الإشعاع الساقط .

#### ٨ - البيرومتر الضوئى : Optical pyrometer

يستخدم البيرومتر الضوئى فى قياس درجات الحرارة المرتفعة جداً - فمن المعروف أنه عندما يسخن جسم لدرجة عالية يبدأ لونه فى الاحمرار ثم يبيض ويتوهج عند الدرجات المرتفعة جداً . هذا التغير فى لون الجسم من اللون المعتم إلى الاحمرار إلى الأبيض يدل على أن درجة الحرارة تتحكم فى طول الموجة الضوئية المشعة من الجسم . تقل أطوال هذه الموجات كلما ارتفعت درجة الحرارة .

يتركب البيرومتر الضوئى كما فى شكل ( ٨ - ٩ ) من تلسكوب يوجد بداخل قصبته مرشح ضوئى أحمر اللون ومصباح كهربائى صغير يتصل بدائرة كهربائية مكونة من بطارية وأمبير وقاعة متغيرة .

إذا نظرنا داخل التلسكوب جهة الجسم الساخن أو الفرن المراد إيجاد درجة حرارته فإن مجال الرؤية يكون مضيئاً باللون الأحمر وذلك بالنسبة لوجود المرشح الضوئى فى طريق الأشعة . ويرى فى نفس الوقت فتيل المصباح الكهربى كخط معتم فى مجال الرؤية . إذا أمرنا تياراً كهربائياً فى المصباح ورفعنا شدته تدريجياً باستخدام المقاومة المتغيرة يبدأ فتيل المصباح فى التوهج وتصل إلى وضع يتعذر فيه تماماً رؤية فتيل المصباح وذلك عندما تكون حرارة الفتيل هى نفس درجة حرارة الجسم الساخن . إذا زيدت شدة التيار عن هذا الحد يبدأ ظهور الفتيل كخط مضيء وليس معتماً كما كان قبل ذلك .



(شكل ٨ - ٩)

ولعابرة الجهاز لقراءة درجات الحرارة تستخدم أجسام لها درجة حرارة معلومة ويدرج الأميتر بدائرة المصباح ليعطى الدرجة مباشرة . وأهم لاستعمال لهذا النوع من الترمومترات في المصباح لتقدير درجة حرارة الأفران العالية .

### تمارين :

١ - اشرح الفرق بين المقياس المئوي والمقياس المطلق لدرجة الحرارة . وجد أن حجم كمية معينة من غاز تزداد بنسبة ١,٠٣٥ : ١ بين درجتى ١٥ ، ٢٥ م . احسب درجة الصفر المطلق على المقياس المئوي لهذا الغاز .

٢ - ترمومتران زيتريان مصنوعان من نفس الزجاج ولهما مستودعان كريان النسبة بين قطريهما ٣ : ٢ والنسبة بين القطرين الداخليين لساقها هي ٢ : ٣ على الترتيب . ما هي النسبة بين ارتفاعى عمودى الزئبق فى الساقين المناظرين لدرجة حرارة واحدة .

٢ - ترمومتر بلانيني مقاومته ٢,٥٦ أوم فى درجة الصفر المئوي ، ٣,٥٦ أوم فى درجة ١٠٠ م . وضع فى وسط مجهول الدرجة فسجل الترمومتر مقاومة مقدارها ٦,٧٨ أوم . أوجد درجة حرارة الوسط .

٤ - ترمومتر زئبقى يحتوى على ٢ سم<sup>٣</sup> من الزئبق فى درجة الصفر المئوي والمسافة بين التقطتين الثابتين للماء على ساقه هي ١٥ سم . احسب نصف قطر أنبوبه الشعرية عند درجة الصفر المئوي .

٥ - درجة الصفر المطلق على المقياس المئوي - ٢٧٣ م . أوجد قيمتها على المقياس الفهرنهي .

## الباب التاسع

### الحرارة وطبيعة المادة

#### ٩ - ١ طبيعة الحرارة :

كان الاعتقاد قديماً بأن الحرارة عبارة عن سائل شفاف لا وزن له يتناثر مع نفسه اسمه « كالوريك » ويتنقل من الأجسام الساخنة للباردة . وظل هذا الاعتقاد سائداً حتى منتصف القرن التاسع عشر عندما أعلنت نظرية بقاء الطاقة والتي تنص على أن الطاقة لا تفنى ولا تستحدث وأن الحرارة هي نوع من أنواع الطاقة مثل طاقة الحركة وطاقة الوضع . وقد دلت المشاهدات في ذلك الحين على إمكانية تحويل أنواع الطاقة المعروفة إلى حرارة كما يوجد تناسب بسيط بينها .

#### ٩ - ٢ تركيب المادة :

ثم ظهرت النظرية الجزيئية للمادة ونظرية الحركة في الغازات وعرف أن المادة تتركب من جزيئات متناهية في الصغر دائمة الحركة . وجزيئات المادة الواحدة مماثلاً ولها نفس التركيب والكتلة والخواص الميكانيكية والطبيعية . وكان من أهم دعائم هذه النظرية خاصية الانتشار في الأجسام المختلفة . فإذا أحضرنا لوحين من فلزتين نقيين  $A$  : ب ثم ضغطنا متلامسين لمدة طويلة فإننا نجد أن ذرات المادة  $A$  قد انتقلت إلى اللوح ب والعكس بالعكس . ويمكن الاستدلال على ذلك بوسيلة التحليل الكيميائي الدقيق . والانتشار في السوائل أسهل منه في الأجسام الصلبة .

أما في الغازات فيتم بسرعة كبيرة لدرجة أنه يمكنك أن تشم رائحة زجاجة عطر بعد ثوانٍ من فتحها وأنت على بعد أمتار منها . وبالرغم من هذه الحركة المستمرة لجزيئات المادة توجد بينها قوى جزيئية تمنعها من الانفصال وتحفظها في وضع الاتزان وتقل هذه القوى إذا انتقلنا من الحالة الصلبة للمادة إلى الحالة السائلة . أما في الحالة الغازية فهذه القوى من الصغر بحيث تصبح هذه الجزيئات حرة الحركة تقريباً وهذا يفسر سرعة انتشار الغازات .

بالإضافة إلى الحركة الانتقالية لجزيئات المادة والتي يتسبب عنها ظاهرة الانتشار تتحرك الجزيئات داخل المواد ( الصلبة والسائلة على وجه الخصوص ) تحت تأثير القوى الجزيئية حركة تذبذبية حول مواضع

الاتزان لكل جزيء منها وتتوقف سعة هذه الحركة على مقدار الطاقة الداخلية للجسم فكلما ازدادت هذه الطاقة الداخلية بتزويد الجسم من الخارج بطاقة حرارية مثلا ازدادت سعة هذه الذبذبات ويتم بهذه الوسيلة اختزان الجسم لهذه الطاقة على شكل طاقة ميكانيكية .

### تعريف كمية الحرارة : Quantity of heat

تسمى وحدة كمية الحرارة بالسعر ويعرف بأنه كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة جرام واحد من الماء درجة واحدة مئوية . وبذلك تكون كمية الحرارة ح اللازمة لرفع درجة حرارة كتلة من الماء ك حم من درجة  $١٥^{\circ}\text{م}$  إلى درجة  $٢٥^{\circ}\text{م}$  هي :

$$ح = ك \times ١ \times (٢٥ - ١٥) .$$

وتعرف السعة الحرارية لجسم ما بأنها كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارته درجة مئوية . وإذا فرضنا وجود كمية من الماء ترتفع درجة حرارتها درجة واحدة مئوية أيضاً إذا أعطيت نفس كمية الحرارة كما في أعطيت للجسم سميت هذه الكمية بالمكافئ المائي للجسم . وتتوقف السعة الحرارية لجسم ما على طبيعته . فالجرام من النحاس له سعة حرارية تختلف عن الجرام من الحديد وهكذا وتسمى السعة الحرارية للجرام الواحد من المادة بالحرارة النوعية لها . أما إذا اعتبرنا وزن جرام جزيء من المادة سميت سعته الحرارية بالحرارة الذرية له . وقد وجد ديولنج وبتي أن الحرارة الذرية لجميع المواد واحدة تقريباً في درجات الحرارة المرتفعة . وتساوي قيمتها ثلاثة أمثال ثابت الغاز للجرام الجزيئي . أما في درجات الحرارة المنخفضة تقل الحرارة الذرية للمادة وتقرب من الصفر كلما اقتربنا من درجة الصفر المطلق .

### كمية الحرارة وطرق تعيينها

يستخدم عادة لتعيين الحرارة النوعية لمادة ما أحد الطرق الآتية والتي يتوقف الاختيار بينها على حالة المادة ( صلبة - سائلة - أو غازية ) ، وكذلك على الكمية التي يمكن الحصول عليها من المادة ( كبيرة أو صغيرة ) .

١ - طريقة الخلط .

٢ - طريقة المسعر الجليدي .

٣ - طريقة التبريد .

٤ - الطريقة الكهربية .

٥ - طريقة التكثيف .

## ٩ - ٥ تعيين الحرارة النوعية بطريقة الخلط : Method of mixures

من المعروف أنه إذا تلامس جسمان درجة حرارتهما مختلفة انتقلت الحرارة من الجسم الساخن إلى الجسم البارد حتى تتساوى درجتاهما . ويطلق على هذا الانتقال للحرارة بالخلط . فإذا فرضنا أن كتلة الجسم الأول ك<sub>١</sub> حم ودرجة حرارته  $t_1^{\circ}$  تكون كمية الحرارة المخزونة بداخله هي ك<sub>١</sub>  $t_1$  ك<sub>٢</sub> حيث  $t_2$  هي الحرارة النوعية لمادة الجسم . إذا خلطنا حرارياً هذا الجسم بآخر كتلة ك<sub>٢</sub> حم وحرارته  $t_2^{\circ}$  فإن الحرارة تنتقل من الجسم الساخن وليكن الأول إلى الثاني حتى تتساوى درجتاهما فتصل للدرجة النهائية  $t^{\circ}$  . وبتطبيق قانون بقاء الطاقة تكون الحرارة المكتسبة من الجسم البارد = الحرارة المفقودة من الجسم الساخن .

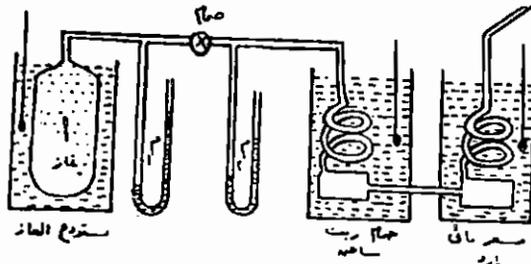
أى أن

$$K_1 t_1 + K_2 t_2 = (K_1 + K_2) t \quad \dots \dots \dots (٩-١)$$

وأهملنا هنا كمية الحرارة المفقودة بالإشعاع للوسط المحيط بالجسمين عند خلطهما . يمكن استخدام هذه المعادلة لإيجاد الحرارة النوعية لجسم ما باستخدام الماء كمادة عيارية حرارتها النوعية الوحدة وتصلح هذه الطريقة عادة في حالة الأجسام الصلبة أو السائلة ويشترط لنجاحها أن تكون السعات الحرارية لكل من الجسمين المخلوطين متقاربة وإلا كان الاختلاف في درجة الحرارة النهائية عن درجة حرارة الجسم ذو السعة الكبيرة صغيراً ويكون خطأ القياس عندئذ كبيراً .

إيجاد الحرارة النوعية لغاز بواسطة الخلط : تعطى الطريقة الآتية الحرارة النوعية لغاز تحت ضغط

ثابت  $t$  وفيها نخلط كمية من الغاز الساخن في مسعر به ماء بارد ويتركب الجهاز كما هو مبين بشكل (٩ - ١) من مستودع  $P$  يوجد به الغاز تحت ضغط مرتفع يمكن قياسه بواسطة المانومتر  $m$  .



(شكل ٩ - ١)

المستودع موضوع داخل ترموستات (جهاز حافظ لدرجة الحرارة). لتثبيت درجة حرارة الغاز داخل المستودع أثناء إجراء التجربة .

يمر الغاز خلال صمام الغرض منه تنظيم مرور تيار ثابت من الغاز داخل أنابيب التسخين والخط ويقاس ضغط هذا التيار بواسطة المانومتر ٢٣ . ترتفع درجة حرارة الغاز عند مروره داخل الأنابيب المعدنية الموضوعه داخل الحمام الزيتي الساخن ذو الدرجة ٥٥ م° ثم ينتقل بعد ذلك إلى أنابيب معدنية أخرى موضوعه داخل مسعر مائي حيث يتم خلط حرارة الغاز والمسعر المائي . فإذا كانت درجة الحرارة الابتدائية للماء هي ١٥ م° ودرجة الحرارة النهائية هي ٢٥ م° بعد إمرار الغاز الساخن تكون .

الحرارة المكتسبة من المسعر المائي ومحتوياته = المكافئ المائي له × فرق درجات الحرارة ويساوي المكافئ المائي للمسعر ومحتوياته كتلة المسعر × الحرارة النوعية لمادته مضافاً إلى ذلك كتلة أنابيب الخلط × الحرارة النوعية لها مضافاً إليها كتلة الماء بالمسعر × ١ .

الحرارة المفقودة من الغاز = ك ص (٥ - ٢٥) (٩ - ٢)

حيث ك هي كتلة الغاز المار في الأنابيب أثناء التجربة . وبمساواة الحرارة المكتسبة بالحرارة المفقودة يمكن حساب قيمة الحرارة النوعية للغاز تحت ضغط ثابت .

لتعيين كتلة الغاز ك يقاس ضغط الغاز في المستودع بواسطة المانومتر ١٣ . وذلك عند بدء إمرار الغاز وكذلك بعد الانتهاء من التجربة وليكن الضغطين هما ص ١ ، ص ٢ على الترتيب . فإذا فرضنا أن ح هو حجم المستودع وأن درجة الحرارة المطلقة للغاز في المستودع هي ص . فبتطبيق القانون العام للغازات يمكن إيجاد حجم غاز المستودع ح . عند معدل الضغط ودرجة الحرارة قبل بدء التجربة وذلك من المعادلة :

$$(٩ - ٣) \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \frac{٧٦ \times ح}{٢٧٣} = \frac{ح}{ص}$$

أي أن

$$(٩ - ٤) \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad ح = ح \times \frac{١٥}{٧٦} \times \frac{٢٧٣}{ص}$$

وبالمثل بمعرفة ضغط الغاز داخل المستودع عند نهاية التجربة يكون حجم ما تبقى من الغاز بالمستودع عند معدل الضغط ودرجة الحرارة هو ح . حيث

$$(٩ - ٥) \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad ح = ح \times \frac{٢٥}{٧٦} \times \frac{٢٧٣}{ص}$$

وبذلك يكون حجم الغاز المار في أنابيب الجهاز عند معدل الضغط ودرجة الحرارة هو :

$$ح. - ح. = \bar{ح} \times \frac{ص_2 - ص_1}{ص_1} \times \frac{٢٧٣}{١٨} \dots \dots \dots (٦-٩)$$

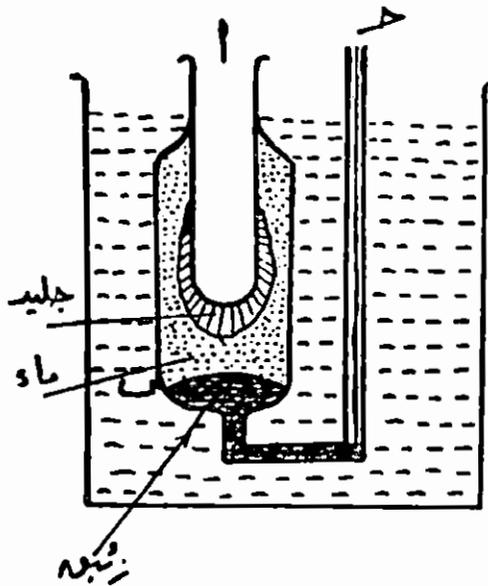
وتكون كتلة هذا الحجم من الغاز ك هي حجمه  $\times$  كثافته في المعدلين أى أن :

$$ك = (ح. - \bar{ح}) \times ٨ \dots \dots \dots (٧-٩)$$

### ٩ - ٦ تعيين الحرارة النوعية بمسعر بنزين الجليدى :

تعتمد نظرية المسعر الجليدى لإيجاد الحرارة النوعية لجسم ما على خلط كمية من الجسم بعد تسخينه لدرجة معلومة مع كتلة جليدية ينصهر جزء منها نتيجة للحرارة المكتسبة من الجسم . فإذا أمكن معرفة كتلة الجليد المنصهر تحددت كمية الحرارة التى فقدتها الجسم وبالتالي حرارته النوعية. وهذا يفرض معرفة قيمة الحرارة اللازمة لتحويل ١ جم من الجليد في درجة الصفر إلى الماء في نفس درجة الحرارة .

يتركب المسعر الجليدى في صورته العملية (شكل ٩ - ٢) من أنبوبة  $\Lambda$  يتصل بها كما هو مبين بالشكل أنبوبة أخرى أوسع منها تتهى من أسفل بأنبوبة شعرية  $\delta$  دقيقة المقطع ومثبتة على شكل U تملأ أولا الأنبوبة ب بالماء النقي ثم يستبدل بعض الماء بالزئبق وذلك بتسخينها حتى



(شكل ٩ - ٢)

يتمدد الماء فينكسب خارج الأنبوبة الشعرية > ثم يغمر طرف هذه الأنبوبة في زيتيق وعندما يبرد الماء في ب ينكمش ساحباً وراءه شريطاً من الزيتيق .

يوضع الجهاز في إناء به جليد مجروش لحفظ درجة حرارته ثابتة دائماً عند درجة الصفر المئوي . ثم يوضع في الأنبوبة أ بعض الأثير السائل ويعرر بداخله تيار من الهواء ليتبخر فيمتص بذلك حرارة التبخر من الوسط المحيط به أي من ماء الأنبوبة ب . وبما أن هذا الماء أصلاً في درجة الصفر فإنه يتجمد ويتكون حول الأنبوبة أ طبقة من الجليد في درجة الصفر أيضاً . وبعد أن يتطاير كل الأثير من أ يصبح الجهاز معداً للاستعمال . ويسخن الجسم المراد تعيين حرارته النوعية إلى درجة الحرارة °١٥ ، ثم يسقط في الأنبوبة أ حيث تنخفض درجة حرارته إلى الصفر وتستهلك الحرارة المفقودة منه في تحويل كتلة ك حم من الجليد إلى ماء في نفس الدرجة . فإذا كانت كتلة الجسم ك حم وحرارته النوعية ١٢ فإن كمية الحرارة التي يفقدها الجسم = ك ١٢ ١٥ سعراً ، وهذه تساوي كمية الحرارة الحرارة التي يكتسبها الجليد لينصهر = ك ص حيث ص هي الحرارة الكامنة لانصهار الجليد وتساوي ٨٠ سعراً للجرام الواحد .

ولإيجاد كتلة الجليد المنصهر ك تستخدم ظاهرة تغير حجم الجليد عندما ينصهر . من المعروف أن الجليد أقل كثافة من الماء إذ يطفو على سطحه فإذا كانت كثافتى الجليد والماء في درجة الصفر هما

$$١٥ \cdot ٢٥ \text{ جم/سم}^٣ \text{ على الترتيب يكون حجم الجرام من الجليد في هذه الدرجة هو ح} = \frac{١}{٥}$$

ويسمى الحجم النوعى للجليد ويساوى مقلوب الكثافة.

$$\text{وبالمثل الحجم النوعى للماء في درجة الصفر هو ح} = \frac{١}{٢٥}$$

أي أن النقص في حجم ١ جم من الجليد عند انصهاره

$$= \frac{١}{١٥} - \frac{١}{٢٥} \text{ سم}^٣$$

فعندما يسقط الجسم الساخن في المسعر وينصهر بعض الجليد يقل حجم السائل في الأنبوبة ب وبذلك يهبط شريط الزيتيق في الأنبوية > مسافة ع مثلا مسجلا بذلك نقصاً في الحجم مقدره ط ص ع حيث ص هي نصف القطر الداخلى للأنبوبة الشعرية > . وتكون بذلك كتلة الجليد ك التي نتج عن انصهارها هذا النقص في الحجم هي :

$$ك = \frac{\text{ط موع ع}}{٢٣ - ١٢} = \frac{\text{ط موع ع}}{\left(\frac{١}{٢٥} - \frac{١}{١٥}\right)} \text{ جم} \dots \dots \dots (٨-٩)$$

وبمعرفة ك تكون الحرارة المكتسبة من الجليد = ك . ص

حيث ص هي الحرارة الكامنة لانصهاره . ولحساب الحرارة النوعية للجسم تستخدم المعادلة :  
الحرارة المكتسبة = الحرارة المفقودة  
ك ص = ك ١ ص ١ . أى أن

#### ٩ - ٥ طريقة التبريد في تعيين الحرارة النوعية : Method of Cooling

إذا ترك جسم ساخن في الهواء فإنه يبرد بمعدل يتوقف على العوامل الآتية :

١ - طبيعة السطح الساخن المشع للحرارة .

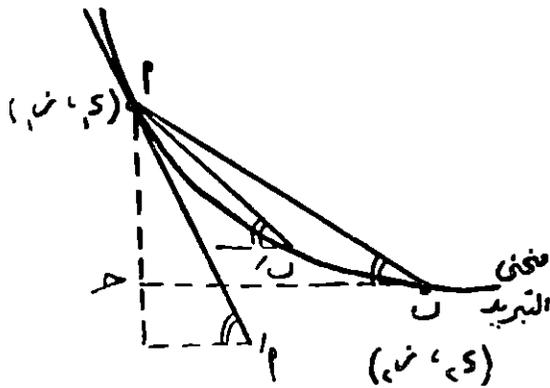
٢ - مساحة هذا السطح .

٣ - درجتي حرارة الجسم الساخن والوسط المحيط به .

ويعرف معدل التبريد لجسم بأنه كمية الحرارة المفقودة منه في الثانية ويساوي المكافئ المائي للجسم مضروباً في معدل النقص في درجة حرارته . ويمكن تعيين هذا المعدل في أى لحظة أثناء التبريد وذلك بتسجيل التغير في درجة حرارة الجسم مع الزمن مع رسم ذلك بيانياً لكي نحصل على ما يسمى بمنحنى التبريد للجسم . فإذا اعتبرنا نقطتين مثل ١ ، ب (شكل ٩ - ٣) على منحنى التبريد يمثلان حالة الجسم الحرارية (١ ك ، ٢ ك) عند الأزمنة (ز ١ ، ز ٢) يكون ميل الخط ١ ب مساوياً :

$$\frac{٢ ك - ١ ك}{ز ٢ - ز ١} = \frac{٢}{ب}$$

وهذا يعطى متوسط معدل النقص في درجة حرارة الجسم في المنطقة ما بين درجتي الحرارة ١ ك ، ٢ ك .

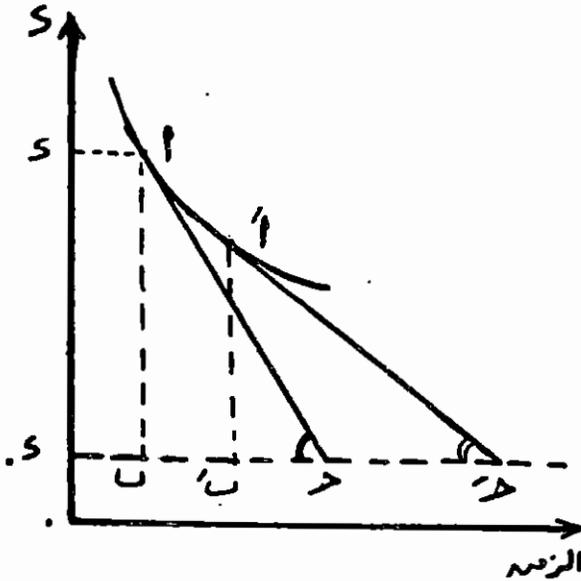


(شكل ٣٩)

وكما ضاقت المنطقة بين  $\theta$  ،  $\theta$  اقرب ميل الخط  $\theta$  ب من ميل المماس لمنحنى التبريد عند  $\theta$  الذى يعطى عندئذ معدل الفقد في درجة الحرارة عند هذه النقطة .

### قانون نيوتن للتبريد : Newton's law

وجد نيوتن أن معدل تبريد جسم ساخن يبرد في الهواء يتناسب طردياً مع الفرق بين درجة حرارة الجسم ودرجة حرارة الوسط المحيط به بشرط ألا يكون هذا الفرق كبيراً . ولتحقيق هذا القانون عملياً سنفرض أولاً صحته ثم نختبر صحة النتائج المترتبة على هذا الفرض فإذا جاءت صحيحة كان الفرض سليماً .  
لذلك نرمم منحنى التبريد لجسم ساخن كما مبين في شكل (٩ - ٤) . ثم نأخذ نقطة عليه مثل  $\theta$  نرمم عندها مماساً للمنحنى يقطع المحور الذى يبين درجة حرارة الغرفة  $S$  . في نقطة مثل  $\theta$  ثم نقطع العمود  $\theta$  ب من النقطة  $\theta$  على هذا المحور أيضاً .  
إذا كانت درجة حرارة النقطة  $\theta$  هي  $\theta^{\circ}$  فإن الفرق بين درجة حرارة الجسم والوسط  $S - \theta = \theta$  .



(شكل ٩ - ٤)

ميل المماس عند  $\theta = \frac{\theta}{\theta - S}$  وهذا يتناسب مع معدل التبريد للجسم عند النقطة  $\theta$  .

بفرض صحة قانون نيوتن فإن  $\frac{\theta}{\theta - S} = \text{معدل التبريد}$  مقدار ثابت =  $\frac{\text{معدل التبريد}}{\text{الفرق بين درجة حرارة الجسم والوسط}}$

$$\text{أى أن } \frac{1}{\beta} = \frac{1}{\alpha} \times \frac{\beta}{\alpha} = \text{مقدار ثابت.}$$

أى أنه إذا كان القانون صحيحاً فإن مسقط  $\beta$  على محور درجة حرارة الغرفة  $\alpha$  يجب أن يكون مقداراً ثابتاً لا يتوقف على موضع النقطة  $\beta$  على منحنى التبريد . أى أنه إذا أخذنا نقطة أخرى مثل  $\beta'$  على المنحنى ورسمنا المماس للمنحنى عند هذه النقطة وأوجدنا مسقطه على المحور  $\alpha'$  فإن :

$$\beta = \alpha = \beta' = \alpha' = \text{مقدار ثابت.}$$

وقد وجد بالتجربة أن هذه النتيجة صحيحة مما يثبت صحة قانون نيوتن للتبريد .

إيجاد الحرارة النوعية لجسم بواسطة التبريد :

سبق أن ذكرنا أن معدل التبريد من جسم ساخن يتوقف على طبيعة سطحه الساخن ( حرارته النوعية ) ومساحة هذا السطح المشع وارتفاع درجة حرارته عن درجة الغرفة . فإذا أحضرنا مسعرين متماثلين شكلاً ومصنوعين من نفس المادة ثم وضعنا بالمسعر الأول حجماً معيناً من سائل  $\beta$  وفى الثانى نفس الحجم من سائل  $\beta'$  ، ثم رفعنا درجة حرارتهما وتركناهما ليبردا فى الهواء ، يتساوى معدل التبريد لكل منهما عند نفس درجة الحرارة بالرغم من اختلاف الطبيعة الحرارية لكل من السائلين  $\beta$  ،  $\beta'$  . تستخدم هذه الحقيقة فى قياس الحرارة النوعية للسائل مع استخدام الماء كسائل قياسي حرارته النوعية معلومة .

يسخن كل من الماء والسائل بعد وضع حجمين متساويين منهما فى المسعرين المتشابهين ثم يرسم منحنى التبريد لكل منهما ( شكل ٩ - ٥ ) . يلاحظ الانخفاض البطيء لدرجات حرارة المسعر الموجود به الماء وذلك لزيادة السعة الحرارية لجرام الماء عنها فى أى سائل آخر .

نفرض أن  $\beta$  ،  $\beta'$  هما كتلتى المسعرين فارغين وأن الحرارة النوعية لمادة كل منهما هى  $\beta$  ،  $\beta'$  ،  $\beta'$  ،  $\beta$  هما كتلتى الحجمين المتساويين من الماء ومن السائل على الترتيب . تنخفض درجة حرارة كل من المسعرين من  $\beta$  إلى  $\beta'$  فى الزمنين  $\beta$  ،  $\beta'$  على الترتيب ويمكن تعيينهما مباشرة من منحنيات التبريد كما مبين بالشكل ( ٩ - ٥ ) .

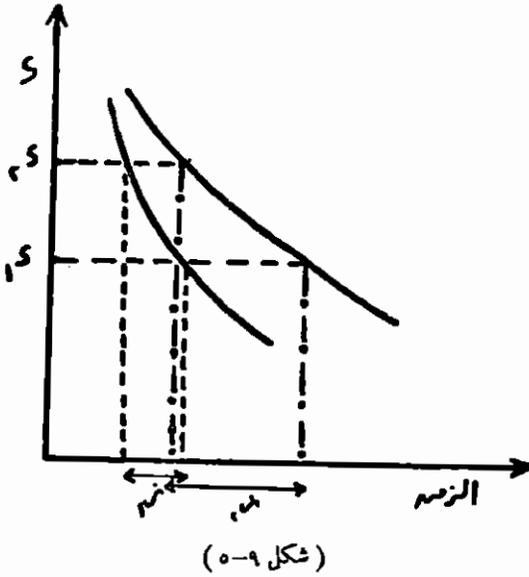
متوسط معدل التبريد للمسعر المائى فى المنطقة بين  $\beta$  -  $\beta'$

$$= \frac{(\beta - \beta') (1 \times \beta + \beta)}{\beta}$$

وبالمثل متوسط معدل التبريد للمسعر الموجود به السائل فى نفس المنطقة

$$= \frac{(\beta - \beta') (\beta + \beta')}{\beta}$$

حيث  $\beta$  هى الحرارة النوعية للسائل . وبمساواة معدلى التبريد فى المسعرين نحصل على المعادلة :



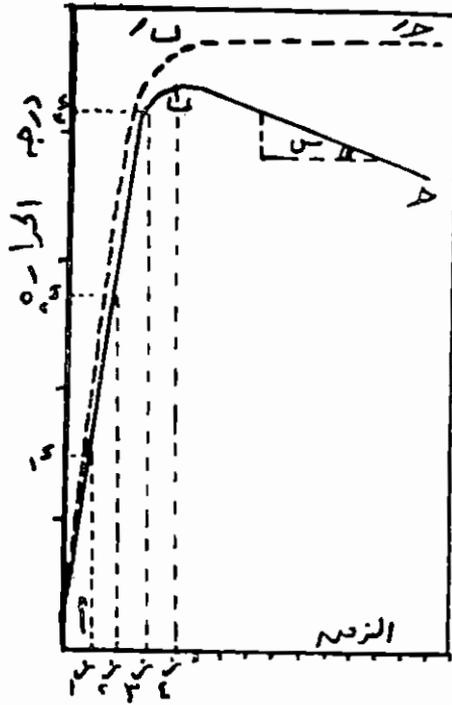
$$(٩-٩) \dots \dots \dots \frac{(٢٢ \ ٢٢ + ١٢ \ ١٢)}{٢} = \frac{(١ \times ٢٢ + ١٢ \ ١٢)}{١}$$

ومنها نوجد الحرارة النوعية المجهولة للسائل .

استخدام قانون نيوتن لتصحيح خطأ الإشعاع في تجارب الحرارة :

في جميع تجارب الحرارة التي نستخدم فيها قانون بقاء الطاقة تساوى عادة كمية الحرارة المكتسبة من الجسم البارد بكمية الحرارة المفقودة من الجسم الساخن مع اعتبار أن الجسمين يكونان مجموعة معزولة حرارياً عن الوسط المحيط بهما. هذا الفرض غير صحيح إذ أن فقد الحرارة للجو يبدأ بمجرد ارتفاع الدرجة عن درجة حرارة الغرفة ومن الممكن أيضاً أن تمتص المجموعة الحرارة من الجو لو انخفضت درجتها عن درجة حرارة الغرفة . والتصحيح الآتي ، ويسمى بتصحيح خطأ الإشعاع ، يهدف إلى حساب درجة الحرارة النهائية في التجارب التي يتم فيها الخلط الحراري بين الأجسام عندما يتعدى وجود فقدان الحرارة للجو .

نفرض على سبيل المثال حالة جسم ساخن اسقط في مسعر به ماء بارد ترتفع درجة حرارة المسعر والماء في اللحظات الأولى من إسقاط الجسم حتى تصل الدرجة إلى نهايتها عندما يتم الخلط بين حرارة الجسم الساخن والماء بالمسعر ثم تبدأ درجة حرارة المجموعة في الهبوط تدريجياً باعتبارها جسماً ساخناً يفقد حرارته للوسط المحيط به . إذا أمكننا تسجيل التغير في درجة حرارة المجموعة من لحظة سقوط الجسم الساخن فإتينا



(شكل ٩-٦)

نحصل على المنحنى  $\Gamma$  ب  $\Delta$  (شكل ٩ - ٦) حيث يمثل الجزء  $\Gamma$  ب منحنى التسخين أثناء الخلط بينما يمثل الجزء ب  $\Delta$  منحنى التبريد للمجموعة بعد وصولها إلى درجة الحرارة النهائية .

نعين من منحنى التبريد معدل النقص في درجة الحرارة ولتكن قيمته  $s$  درجة في الثانية عند درجة الحرارة النهائية للمجموعة ونحصل عليه من ميل الجزء ب  $\Delta$  فإذا كانت زيادة درجة الحرارة النهائية عن درجة حرارة الغرفة هي  $s^\circ$  فإن معدل النقص في عدد الدرجات في الثانية لكل ارتفاع قدره

$$\text{درجة واحدة مئوية عن درجة الغرفة هو } \frac{s}{s} \text{ درجة / ثانية.}$$

نقسم منحنى التسخين  $\Gamma$  ب إلى مناطق زمنية  $١s$  ،  $٢s$  ،  $٣s$  ، ونفرض أن ارتفاع درجة حرارة المجموعة عن الوسط عند هذه المناطق هي  $١s$  ،  $٢s$  ،  $٣s$  ، ... على الترتيب

تبدأ أولاً بالمنطقة الأولى : عندما تكون درجة حرارة الغرفة هي نفس درجة حرارة الجسم لا يوجد تبريداً ويكون المعدل صفراً . وعندما تصبح درجة حرارة المجموعة أعلى من درجة حرارة الوسط المحيط

يقدر  $١٥$  يصبح هذا المعدل  $١٥ \times \frac{١٥}{٥}$  لكل ثانية عند نهاية المنطقة الأولى .

ويؤخذ عادة متوسط المعدلين عند طرفي المنطقة ليكون ممثلا لهذا المعدل داخلها أى أن معدل قد درجة الحرارة فى الثانية فى المنطقة الأولى  $= \frac{١}{٢} \times ١٥$  درجة مئوية/ثانية ، وبذلك تكون درجة الحرارة المصححة للإشعاع عند نهاية المنطقة الأولى  $١٥ +$  ما فقد من درجات الحرارة فى زمن المنصقة الأولى  $١٥$  ثانية .

$$\text{أى أن الدرجة المصححة} = ١٥ + ١٥ \times \frac{١}{٢} \times ١٥ \times ٢$$

ثم نعتبر المنطقة الثانية : عند نهاية هذه المنطقة تكون الزيادة فى الدرجة فوق درجة الغرفة قد أصبحت  $٢٥$  ويكون معدل الفقد عند هذه الدرجة ( نهاية المنطقة )  $= ٢٥ \times \frac{١٥}{٥}$  . أى أن المعدل المتوسط لفقد

$$\text{درجة الحرارة فى المنطقة الثانية} = \frac{١٥ + ٢٥}{٢} \times \frac{١٥}{٥}$$

عدد ما فقد من الدرجات فى المنطقة الثانية  $= \frac{١٥ + ٢٥}{٥} \times ٢٥ \times ٢$  حيث  $٢٥$  هو زمن هذه المنطقة .

وبذلك يكون عدد الدرجات الكلية التى فقدت فى المنطقتين الأولى والثانية

$$= \frac{١٥}{٥} \times \frac{١٥}{٢} \times ١٥ + \frac{١٥ + ٢٥}{٥} \times ٢٥ \times ٢$$

وتكون بذلك الدرجة المصححة عند نهاية المنطقة الثانية

$$= ١٥ + ٢٥ + \frac{١٥}{٥} \times \frac{١٥}{٢} \times ١٥ + \frac{١٥ + ٢٥}{٥} \times ٢٥ \times ٢$$

ويستمر العمل هكذا فى باقى المناطق مع إضافة الدرجات التى فقدت فى المناطق السابقة على ما استجد فقه فى المنطقة الأخيرة . حتى نصل إلى الدرجة النهائية للمخلوط مصححة للإشعاع .

وبين المنحنى العلوى  $١$  -  $٢$  فى الشكل الارتفاع فى درجة حرارة المخلوط بفرض عدم وجود

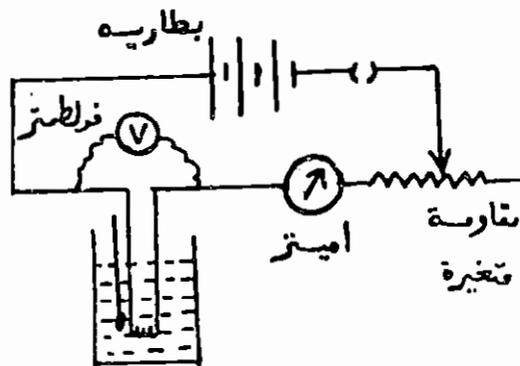
أى فقد للحرارة للجو . وواضح أنه بعد الوصول إلى الدرجة النهائية في هذه الحالة تستمر هذه الدرجة دون تغير مع الزمن لعدم وجود إشعاع .

#### ٩ - ٦ الطريقة الكهربية لتعيين الحرارة النوعية :

إذا مر تيار كهربائي شدته  $I$  أمبير في موصل وكان التمرق في الجهد بين طرفيه  $V$  فولت فإن الطاقة الكهربية المارة في زمن  $t$  ثانية هي  $W = I \cdot V \cdot t$  .  $W$  جول ( ١ جول = ١٠<sup>٧</sup> إرج ) .

تظهر هذه الطاقة داخل الموصل على شكل حرارة كميها  $Q = \frac{W}{J}$  سعراً حيث  $J$  هو ثابت التناسب بين الطاقة الكهربية والطاقة الحرارية ويعرف بالمكافئ الكهربي الحراري وسيجيء الكلام عنه فيما بعد .

وتستخدم في هذه الطريقة لتعيين الحرارة النوعية لمادة ما ( سائل مثلاً ) وذلك بتسخينه بواسطة سلك مقاومة يتصل ببطارية ومقاومة متغيرة، وأمير كما مبين شكل ( ٩ - ٧ ) .



مسعربه السائل

( شكل ٩ - ٧ )

يأمر التيار الكهربائي لمدة معينة  $t$  ثانية ، ترتفع درجة حرارة السائل بالمسعر من  $t_1$  إلى  $t_2$  وتكون الحرارة المكتسبة من المسعر ومحتوياته في زمن  $t$  ثانية هي :

$(K_2 t_2 + K_2 t_1) - (K_1 t_1 + K_1 t_2)$  حيث  $K_1$  ،  $K_2$  هما كتلي المسعر والسائل على الترتيب ،  $t_1$  ،  $t_2$  هما حرارتهما النوعية .

وتطبيق قانون بقاء الطاقة فإن هذه الكمية من الحرارة يجب أن تساوي الطاقة الكهربية التي تحولت

إلى حرارة داخل سلك التسخين . أى أن

$$ت ح ز = (ك١ و١ + ك٢ و٢) (٢٥ - ١٤) \dots \dots (٩ - ١٠) \frac{J}{J}$$

وبذلك يمكن إيجاد الحرارة النوعية المجهولة  $و٢$  بمعرفة باقى المتغيرات فى المعادلة .

### ٩ - ٧ طريقة التكتيف لتعيين الحرارة النوعية :

تعد هذه الطريقة من أدق الطرق المستعملة لإيجاد الحرارة النوعية للمواد وتعتمد نظرية هذه الطريقة على تعليق الجسم المراد تعيين حرارته النوعية فى كفة ميزان حسلس بحيث يكون متديلاً فى غرفة يمكن إمرار بداخلها بخار ماء فى درجة  $١٠٠^\circ م$  . يعادل أولاً وزن الجسم بالصنج ولتكن كتلته  $ك١$  حم ودرجة جربوته الابتدائية  $ك٢ م$  ثم يمرر بخار الماء فى غرفة البخار فيكتسب الجسم من البخار كمية من الحرارة ترفع درجته من  $ك٢$  إلى  $١٠٠ م$  وينتج عن ذلك تكتيف كتلة  $ك$  حم من البخار على الجسم . فإذا عودلت كفة الميزان مرة ثانية بعد إمرار البخار لمدة كافية تكون الزيادة فى وزن الجسم عبارة عن كتلة البخار المتكثف والتي استهلكت حرارته الكامنة فى رفع درجة حرارة الجسم من  $ك$  إلى  $١٠٠ م$  . فإذا كانت الحرارة النوعية للجسم  $و٢$  والحرارة الكامنة لتسعيد البخار  $ص$  سعر / حم فإن الحرارة المكتسبة من الجسم =  $ك١ و٢$  ( $١٠٠ - ك$ ) سعراً بينما الحرارة المفقودة من البخار =  $ك ص$  سعراً .

وبمساواة الحرارة المكتسبة بالحرارة المفقودة تحصل على المعادلة :

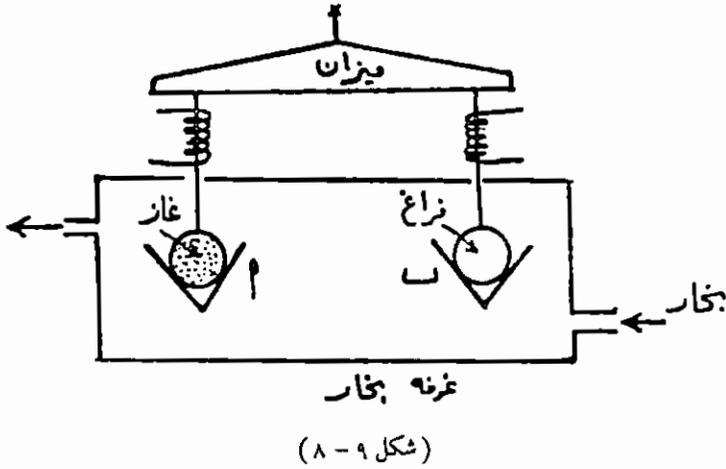
$$ك ص = ك١ و٢ (١٠٠ - ك) \dots \dots \dots (٩ - ١٠)$$

ومنها يمكن تعيين الحرارة النوعية  $و٢$  بمعرفة حرارة التصعيد .

وقد استخدم جولى هذه الطريقة لتعيين الحرارة النوعية لغازات تحت حجم ثابت  $و٢ ح$  ويطلق على الجهاز الذى استخلمه لذلك مسعر جولى البخارى .

### مسعر جولى البخارى : Joly's steam calorimeter

يتركب من كرتين  $١$  ،  $ب$  متماثلتين ومفرغتين ومعلقتين من كفتى ميزان حساس ويتدليان فى غرفة بخار شكل ( $٩ - ٨$ ) . تعادل أولاً كفتى الميزان بينما تكون الكرتان فارغتين ثم يضغط الغاز تحت الاختبار فى الكرة  $١$  بضغط كبير ثم يعادل الميزان لإيجاد كتلة الغاز  $ك١$  حم الذى وضع بالكرة . عند إمرار البخار على الكرتين فإنه يتكثف على الكرة  $١$  بمقتار أكبر من ذلك الذى يتكثف على الكرة  $ب$  بسبب وجود الغاز فى  $١$  والذى يمتص كمية من الحرارة تساوى  $ك٢ ح$  ( $١٠٠ - ك$ ) حيث  $و٢ ح$  هى الحرارة النوعية له تحت حجم ثابت ،  $ك$  هى درجة الحرارة الابتدائية للغاز .



إذا كانت الزيادة في وزن البخار المتكثف على  $P$  هي  $K$  جم فإن

ك صم = ك  $\nu$  ح (١٠٠ -  $\epsilon$ ) . . . . . (٩ - ١٢)

ومنها توجد قيمة الحرارة النوعية للغاز تحت حجم ثابت  $\nu$  ح .

يراعى في هذه التجربة أن يكون مثبتاً بأسفل كل كرة مخروط معدنى كما مبين بالشكل ليتجمع فيه قطرات البخار المتكثف على كل كرة . ولتفادى تكثف بخار الماء على أسلاك تعليق الكرات بالميزان يوضع حولها ملفات تسخين يمرر بها تيار كهربائى ليرفع الدرجة فيمنع تكاثف البخار حولها .

تمارين :

١ - سخنت ٣٠ جم من البلاطين في فرن ثم ألقيت في ماء بارد كتلته ١٠٠٠ جم فارتفعت درجة حرارة الماء من ١٥°م إلى ٢٥°م . أوجد درجة حرارة الفرن علماً بأن متوسط الحرارة النوعية للبلاطين ٠,٢٣ سعر / جم / درجة .

٢ - أوجد الحرارة النوعية لغاز تحت ضغط ثابت من المعلومات الآتية :

سعة خزان الغاز ٣٠ لتراً وكان الضغط به في بدء التجربة ٧ جو تقص إلى ٣ جو في نهاية التجربة - كثافة الغاز الموجود بالخزان تحت ضغط جوى وفي درجة حرارة الغرفة ٠,٠٠١٢ جم / سم<sup>٣</sup> - الفرق بين درجة حرارة الغاز الساخن بعد دخوله المسعر المائى وبعد خروجه منه ٢٠,٨°م وكان الارتفاع في درجة حرارة المسعر ١٠,٢°م والمكافئ المائى له ولحوياته ٧٠٠ جم .

٣ - في مسعر جولى البخارى كان حجم كل من الكرتين ٥٠٠ سم<sup>٣</sup> وكانت زيادة وزن البخار المتكثف على كرة الغاز عن الكرة الأخرى ٠,١ جم أوجد الحرارة النوعية للغاز تحت حجم ثابت إذا كان درجة الحرارة الابتدائية ١٥°م وكثافة الغاز ٠,٠٠٦ جم / سم<sup>٣</sup> .

٤ - جسم يبرد في الهواء من درجة  $95^{\circ}\text{م}$  إلى  $90^{\circ}\text{م}$  في نصف دقيقة ومن  $66^{\circ}$  إلى  $50^{\circ}\text{م}$  في ٧٠ ثانية أوجد متوسط درجة حرارة الغرفة وأوجد الزمن اللازم لكي تنخفض درجة حرارة الجسم من  $95^{\circ}$  إلى  $50^{\circ}\text{م}$ .

٥ - مسعران مئتان من النحاس يزن كل منهما  $150$  جم يحتوي الأول على  $100$  سم<sup>٣</sup> من الماء والثاني على  $100$  سم<sup>٣</sup> من سائل . سمح لهما ليبردا من  $60^{\circ}\text{م}$  إلى  $40^{\circ}\text{م}$  فاستغرقا على الترتيب  $10$  دقائق ،

٦ دقائق احسب الحرارة النوعية للسائل علماً بأن الحرارة النوعية للنحاس =  $0,095$  ، وكثافة السائل  $0,8$  جم / سم<sup>٣</sup>.

٦ - تهبط درجة حرارة جسم من  $45^{\circ}$  إلى  $40^{\circ}$  إلى  $10$  دقائق فإذا كانت درجة حرارة الغرفة هي  $15^{\circ}\text{م}$  . ما هي درجة حرارة الجسم بعد عشر دقائق أخرى ؟

٧ - اسقط  $100$  جم من الجليد في درجة  $-10^{\circ}\text{م}$  في ماء في درجة الصفر المئوي ، فوجد أن  $10$  جم من الماء قد تجمدت وأصبح الجميع في درجة صفر - أوجد الحرارة النوعية للجليد ( الحرارة الكامنة لانصهار الجليد =  $80$  سعر / جم ) .

٨ - ما هي الزيادة في طاقة الكيلوجرام من الماء في درجة  $70^{\circ}\text{م}$  عن طاقة نفس الكتلة من الجليد في درجة  $-10^{\circ}$  استخدم الحرارة النوعية للجليد من نتيجة المسألة السابقة .

٩ - في إحدى تجارب الخلط كانت درجة حرارة اسعر الابتدائية  $20^{\circ}\text{م}$  وارتفعت درجة الحرارة بعد إلقاء الجسم في المسعر إلى  $15^{\circ}\text{م}$  في العشر ثواني الأولى ثم إلى  $29^{\circ}\text{م}$  في العشر ثواني التالية ثم إلى  $32^{\circ}\text{م}$  في العشر ثواني التالية ثم بدأت درجة الحرارة بعد ذلك في الهبوط فوصلت إلى  $31,8^{\circ}\text{م}$  في العشرين ثانية التالية . احسب درجة الحرارة النهائية مصححة للإشعاع .

١٠ - أوجد كمية الحرارة اللازمة لتحويل  $10$  جم من الجليد في درجة الصفر إلى بخار في درجة  $100^{\circ}\text{م}$  .

١١ - تتوقف الحرارة النوعية  $c$  لمادة ما على درجة الحرارة  $t^{\circ}\text{م}$  حسب المعادلة :

$$c = p + bt^2 \quad \text{حيث } p, b \text{ ثوابت}$$

أوجد كمية الحرارة اللازمة لرفع كتلة  $k$  جم من هذه المادة من صفر إلى  $t^{\circ}\text{م}$  .

١٢ - القطر الداخلي للأنبوبة الشعرية في مسعر بنزن الجليدي  $0,4$  جم وعندما سخنت قطعة من معدن حرارته النوعية  $0,1$  سعر / جم / درجة إلى درجة  $100^{\circ}\text{م}$  واستقطت في فوهة المسعر تحركت نهاية الزئبق مسافة  $5$  سم . ما هي كتلة المعدن علماً بأن كثافة الجليد في درجة الصفر المئوي  $0,913$  جم / سم<sup>٣</sup> .

١٣ - ثلاثة سوائل  $p$  ،  $b$  ،  $c$  درجة حرارتها لابتدائية هي  $15$  ،  $19$  ،  $27^{\circ}\text{م}$  عند خلط  $p$  ،  $b$  أصبحت درجة حرارة المخلوط  $16^{\circ}\text{م}$  وعند خلط  $b$  ،  $c$  أصبحت الدرجة  $24^{\circ}\text{م}$  . ماذا تكون درجة حرارة مخلوط من  $b$  ،  $c$  ؟ .

١٤ - إذا كانت مساحة المقطع الداخلى للأنبوبة الشعرية لمسعر بنزن الجليدى هي  $٢,٠٣$  م. ما هي حساسية الجها بالسعر لكل ملليمتر .

١٥ - إناء مكافئه المائى  $٢٠$  جم يحتوى على  $٤٩٠$  جم من الماء فى درجة  $١٥^{\circ}$  م . سخن بمصدر ثابت الحرارة فارتفعت الدرجة إلى  $٢٥^{\circ}$  م فى دقيقتين . أوجد الزمن الذى يستغرقه تبخير  $٥٠$  جم من الماء عندما يبدأ فى الغليان . (صـ للتصعيد =  $٥٤٠$  سعر / جم) .

١٦ - أوجد التغير فى متوسط طول المسار الحر لجزء الهليوم تحت ضغط جوى عندما ترتفع درجة حرارته من صفر إلى  $١٠٠^{\circ}$  م علماً بأن لزوجة الهليوم بوحدهات سم . جم . ت تساوى  $٠,٠٠٠١٩$  عند درجة الصفر وتساوى  $٠,٠٠٢٣$  عند درجة  $١٠٠^{\circ}$  م وأن كثافة الهليوم =  $٠,٠٠٠١٧٨٥$  جم / سم<sup>٣</sup> .



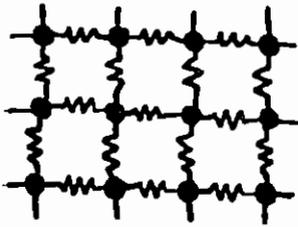
## الباب العاشر

### انتقال الحرارة

إذا ترك جسم ساخن ليبرد في الهواء مثلاً تسخن طبقات الهواء الملاصقة للجسم وبذلك تقل كثافتها فيرتفع إلى أعلى ليحل محلها هواء آخر بارد ذو كثافة أكبر وتستمر هذه العملية محدثة تيارين من الهواء أحدهما ساخن صاعد والآخر بارد هابط . ويفقد الجسم بذلك حرارته باستمرار بواسطة هذه التيارات التي تسمى تيارات الحمل . هذه التيارات تحدث طبيعياً دون وجود أى عوامل خارجية وقد يكون التبريد بهذه الطريقة قسراً إذا أمرنا تياراً صناعياً على الجسم الساخن وعموماً فدراسة تيارات الحمل هذه تلخل ضمن موضوع ديناميكا الموائع وهي خارجة عن نطاق موضوع دراستنا .

#### ١٠ - ١ انتقال الحرارة بواسطة التوصيل :

يمكن للحرارة أن تنتقل داخل أى وسط أو جسم ما دون الحاجة إلى وجود تيارات حمل لنقلها . ويتم ذلك بفعل الجزيئات المكونة لهذه المادة . فمن المعروف أن طاقة حركة الجزيء تناسب طردياً مع درجة حرارته . ولا كانت جزيئات المادة ( في الحالة الصلبة أو السائلة ) مترابطة بواسطة قوى كبيرة بينية



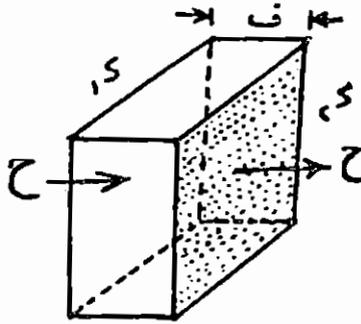
( شكل ١٠ - ١ )

تسمى بالقوى الجزيئية ، فإن من السهل انتقال طاقة الحركة من جزيء إلى آخر يجاوره . ويمكن تشبيه هذه الحالة بمجموعة من الكرات تمثل الجزيئات يربطها بعضها أسلاك زنبركية مرنة ، انظر شكل ( ١٠ - ١ ) حيث تمثل مرونة هذه الأسلاك القوى الجزيئية . عندما تتحرك أى من هذه الكرات تنتقل حركتها إلى الكرات المجاورة بفعل الزنبركات وبذلك تنتقل طاقة الحركة من كرة إلى أخرى . بهذه الكيفية تنتشر الطاقة

الحرارية بين جزيئات المادة حتى تتساوى جميعاً في درجة الحرارة وعندئذ تصل إلى حالة الاتزان الحراري .

ومن الجدير بالذكر هنا أن انتقال الحرارة بالتوصيل في المواد الغازية يتم عن طريق تصادم جزيئات الغاز بعضها مع بعض وذلك بسبب درجة الحرية الكبيرة التي تتحرك بها هذه الجزيئات كما أن صغرى

التجاذب بين جزيئات الغاز يجعل هذه القوى الجزيئية قليلة الجهدى فى نقل الحرارة بالطريقة التى تم  
بها الأجسام الصلبة أو السائلة .



(شكل ١٠ - ٢)

لكى ندرس التوصيل الحرارى للأجسام دراسة كمية يجب علينا أولاً تحديد ثابت يميز المادة هو  
معامل التوصيل الحرارى لها . وقد وجد بالتجربة أن كمية الحرارة ح التى تمر خلال طبقة من المادة ذات  
سطحين مستويين ومتوازيين درجتى حرارتيهما  $١٥$  .  $٢٥$  ( $٢٥ > ١٥$ ) تتوقف على العوامل الآتية :

- ١ - الفرق بين درجتى حرارة السطحين
  - ٢ - سمك الطبقة التى تنفذ خلالها الحرارة ف سم .
  - ٣ - مساحة السطح الذى يوصل الحرارة س سم<sup>٢</sup> .
  - ٤ - زمن مرور الحرارة ز ثانية .
- ترتبط بين المتغيرات السابقة العلاقة التجريبية الآتية :

$$ح = م \cdot س \cdot \frac{٢٥ - ١٥}{ف} \cdot ز \dots \dots \dots (١٠ - ')$$

حيث م هو ثابت حرارى يميز للمادة ويسمى بمعامل التوصيل الحرارى . ووحدات هذا الثابت هى  
سعر / سم / ثانية / درجة مئوية .

$$\text{ويسمى خارج القسمة } \frac{٢٥ - ١٥}{ف} \text{ بالميل الحرارى .}$$

ويعرف بمعدل تغير درجة الحرارة داخل الجسم بالنسبة للمسافة أى أنه الزيادة فى درجة الحرارة يعن  
تقطين يعبدان بمقدار ١ سم فى اتجاه مرور الحرارة .

## ١٠ - ٢ قياس معامل التوصيل للمواد :

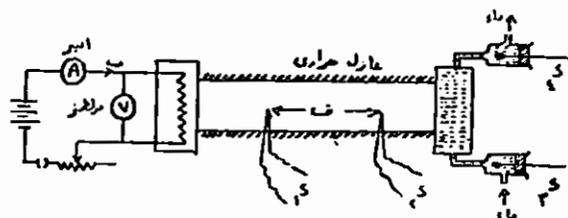
تختلف المواد من حيث طبيعتها الحرارية فهناك مواد جيدة التوصيل الحرارى مثل المعادن عموماً وهناك مواد أخرى عازلة حرارياً أو رديئة التوصيل كالزجاج وتتفاوت قيمة معامل التوصيل بين ١ إلى ٠,٠٢ للمعادن وبين ٠,٠٠٣ إلى ٠,٠٠٠٣ للغازات وبسبب هذا الاختلاف الكبير بين قيمة المعاملات تختلف الفرق المستخدمة في قياسها أو التي تعتمد في بعض الأحيان على شكل المادة تحت الاختبار .

يطلق على جسم ما أنه في حالة اتزان حرارى مع الوسط المحيط به إذا ظلت درجة حرارة كل جزء منه على حدة ثابتة لا تتغير مع الزمن . أى أن معدل تغير درجة الحرارة مع الزمن في أى منطقة من هذا الجسم يكون مساوياً للصفر . فعند ترك جسم ساخن ليبرد في الهواء فإنه يصل إلى حالة الاتزان الحرارى عندما تصبح درجة حرارته مساوية لدرجة حرارة الوسط . أما إذا اتصل الجسم بمصدر حرارى يعوضه عن الحرارة المفقودة للوسط المحيط فإن درجة حرارة الأجزاء المختلفة من الجسم قد تكون أعلى من درجة حرارة الوسط وتتوقف قيمتها على بعدها أو قربها من المصدر الحرارى وتثبت درجة حرارة هذه الأجزاء بعد أن يصل الجسم إلى حالة الاتزان . وواضح أن تلامس الجسم بالمصدر الحرارى الذى تندفق منه الطاقة الحرارية هو الذى يحفظ وجود ميل حرارى بين أجزاء الجسم المختلفة .

## ١٠ - ٣ تعيين معامل التوصيل لمادة جيدة التوصيل الحرارى :

تعد طريقة سيرل من أبسط الطرق المباشرة لقياس معامل التوصيل الحرارى للمعادن وفيها يسخن أحد طرفي قضيب من المعدن تحت الاختبار بواسطة مصدر حرارى كسلك تسخين يمر فيه تيار كهربائى أو بواسطة غرفة يمر بها بخار ماء ساخن ، شكل ( ١٠ - ٣ ) . تنتقل الحرارة داخل القضيب ويتكون ميل حرارى بين أجزائه المختلفة . تمتص جميع الحرارة التى تصل إلى الطرف الآخر للقضيب إما بواسطة غرفة تبريد ملامسة له أو عن طريق مجموعة من الأنايب المعدنية مافوفة حواه .

يمر تيار ماء بارد في غرفة التبريد مع قياس درجة حرارتها قبل دخولها وبعد خروجها منها . يغطى



(شكل ١٠ - ٣)

القضيب والمصدر الحرارى وغرفة التبريد بمادة عازلة حراريًا كالبلاد لمنع فقد الحرارة للوسط المحيط بنى طريق آخر غير التوصيل . يقاس التوزيع الحرارى داخل مادة القضيب بواسطة ترمومتران  $K_1$  ،  $K_2$  من نوع الازدواج الحرارى يبعدان ف سم عن بعضهما .

ولإجراء التجربة يمرر تيار كهربائى ت أمبير فى سلك التسخين للمصدر الحرارى فتولد كمية من الحرارة بمعدل منتظم قدره ت . جول / ثانية ، حيث  $\Delta$  هو فرق الجهد الناشئ عن مرور التيارات فى السلك . تنتقل هذه الحرارة داخل مادة القضيب بالتوصيل ويمتصها تيار الماء فى غرفة التبريد فترتفع درجة حرارته . إذا ترك الجهاز لمدة كافية حتى الوصول إلى حالة الاتزان الحرارى تثبت درجة حررة كل من الترمومتريين  $K_1$  ،  $K_2$  ويكون الميل الحرارى عندئذ  $\frac{K_2 - K_1}{F}$  وكذلك تثبت درجة الحرارة النهائية للماء عند خروجه من أنابيب التبريد . وتكون عندئذ كمية الحرارة المارة داخل القضيب بالتوصيل مساوية تماماً لكمية الحرارة التى تكفى لرفع حرارة تيار الماء من  $K_1$  إلى  $K_2$  أى أن معدل مرور الحرارة بالتوصيل داخل القضيب .

= معدل امتصاص الماء للحرارة =  $K \times (K_2 - K_1)$  سعر / ثانية ، حيث ك هى كتلة الماء البارد فى الثانية وتسمى بمعدل التدفق . إذا كان  $\rho$  هو نصف قطر القضيب فإن مساحة مقطعه هو  $\rho^2$  وهى المساحة التى تنفذ خلالها الحرارة . وبتطبيق قانون التوصيل الحرارى فإن :

$$K (K_2 - K_1) = m \times \rho^2 \times \frac{K_2 - K_1}{F} \times 1 \times \dots \dots (10-2)$$

ومن هذه المعادلة يمكن حساب معامل التوصيل الحرارى م لمادة القضيب .

وهناك طريقة أخرى لحساب كمية الحرارة المارة بالتوصيل وذلك عن طريق معرفة معدل توليد الطاقة الحرارية داخل سلك التسخين . وهذا يكافئ معدل بذل شغل كهربائى داخل سلك التسخين أى  $\frac{T}{J}$

سعرًا / ثانية حيث J هو المكافئ الكهربائى الحرارى . وتصبح المعادلة السابقة ( ١٢ - ٢ ) :

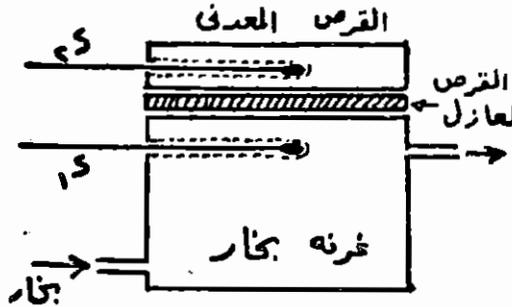
$$\frac{T}{J} = m \cdot \rho^2 \cdot \frac{K_2 - K_1}{F} \dots \dots (10-3)$$

#### ١٠ - ٤ تعيين معامل التوصيل الحرارى لمادة رديئة التوصيل : جهاز لى (Lee)

لا تصلح طريقة سيرل لتعيين معامل التوصيل لمادة رديئة التوصيل وذلك لأن طول القضيب فى هذه الحالة ورداءة توصيله الحرارى يعملان على منع الحرارة تماماً من الوصول إلى أنابيب التبريد . ولذلك يستعمل

جهاز لى حيث تكون المادة رديئة التوصيل على شكل قرص رقيق يحفظ أحد وجهيه فى الدرجة العالية فيستقل بذلك قدرأ كافياً من الحرارة خلال سمكه الرقيق بحيث يمكن قياس كميته .

يركب جهاز لى ، شكل ( ١٠ - ٤ ) ، من غرفة معدنية للبخار يوجد بها ترمومتر ك١ لتعيين الحرارة بداخلها . يوضع فوق غرفة البخار القرص تحت الاختبار ويوضع فوقه قرصاً آخر معدنياً بداخله ثقب أسطوانى يسمح بوضع ترمومتر لقياس درجة حرارة القرص العلوى التى تمثل درجة حرارة السطح العلوى للقرص تحت الاختبار .



(شكل ١٠ - ٤)

يمرر بخار ماء فى درجة ١٠٠°م داخل الغرفة لمدة كافية للوصول إلى حالة الاتزان الحرارى حيث تثبت درجتى حرارة كل من الترمومتريين ك١ ، ك٢ عند هذه الحالة تتساوى كميته الحرارة المارة بالتوصيل خلال قرص المادة بالحرارة التى يفقدها القرص المعدنى للجو بالإشعاع والحمل فى زمن معين . أى أن معدل التوصيل يساوى معدل فقد الحرارة من القرص للجو .

ولقياس معدل التبريد من القرص المعدنى يرفع القرص من فوق غرفة البخار وترفع درجة حرارته ٥ درجات فوق درجة الحرارة ك٢ التى وصل إليها الترمومتر العلوى عند حالة الاتزان الحرارى . ثم يترك ليبرد فى الهواء تحت نفس ظروف التجربة ويسجل الزمن ( ز ثانية ) اللازم لكى تنخفض درجة حرارة القرص بمقدار ٥ درجات تحت الدرجة ك٢ . وبمعرفة كتلة القرص المعدنى ك وحرارته النوعية ن يكون متوسط معدل التبريد منه فى المنقطة بين ( ك٢ + ٥ ) ، ( ك٢ - ٥ ) هو

$$ح = \frac{ك \cdot ن \cdot ١٠}{ز} \text{ سعر / ثانية}$$

وهذا يساوى معدل التوصيل للحرارة . وبتطبيق قانون التوصيل نحصل على معامل التوصيل للمادة م من المعادلة :

$$م = \frac{ك \cdot ن \cdot ١٠}{ز} \cdot ط \cdot ف \cdot \frac{ك١ - ك٢}{ف}$$

حيث  $\tau$  هو مساحة سطح القرص الدائري (وهو نصف القطر) ،  $\frac{s_1 - s_2}{f}$  هو الميل الحراري أثناء التجربة ،  $f$  هو سمك القرص بالاستيترات .

يمكن مقارنة معاملات التوصيل لمواد مختلفة بجهاز لى دون الحاجة لقياس معدل فقد الحرارة من القرص المعدني وذلك بالاستعانة بقانون نيوتن للتبريد (معدل التبريد يتناسب طردياً مع الفرق بين درجة حرارة الجسم والوسط المحيط) فإذا كانت درجة حرارة الغرفة عند إجراء التجربة هي  $s_3$  . يكون معدل التبريد من القرص المعدني تساوي :

$$\theta = (s_2 - s_3) \quad \text{حيث } \theta \text{ هو ثابت التناسب . أى أن}$$

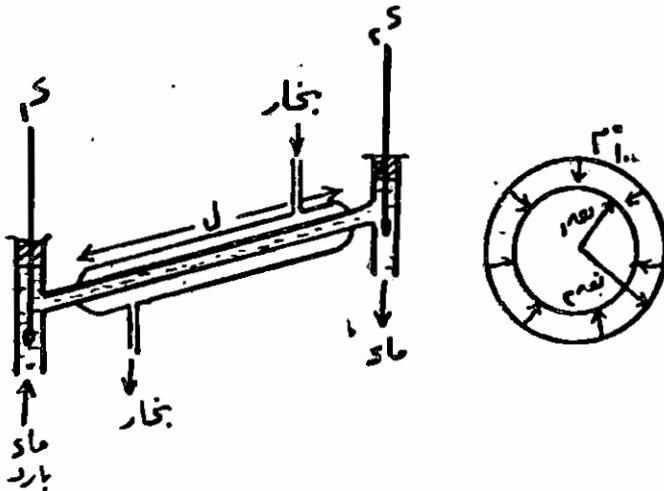
$$\theta = (s_2 - s_3) \quad m \tau \frac{s_1 - s_2}{f} \dots \dots \dots (10-4)$$

وبإعادة إجراء التجربة على قرص المادة الثانية الذي له نفس نصف القطر  $\tau$  نحصل على المعادلة :

$$\theta = (s_2 - s_3) \quad m \tau \frac{s_1 - s_2}{f} \dots \dots \dots (10-5)$$

حيث  $m$  ،  $f$  ،  $s_3$  ،  $s_2$  ،  $s_1$  ،  $\tau$  لها نفس المثلوات السابقة ولكن بالنسبة للمادة الثانية ويقسمه المعادلتين (10-4) ، (10-5) نحصل على النسبة بين معامل التوصيل للمادتين :

$$\frac{\tau s_1 - \tau s_2}{\tau s_2 - \tau s_3} \cdot \frac{s_2 - s_3}{s_1 - s_2} \cdot \frac{f}{f} = \frac{m}{m}$$



(شكل ١٠-٥)

## ١٥ - ٥ إيجاد معامل التوصيل لمادة رديئة التوصيل على شكل أنبوبة :

نفرض أن المادة المراد إيجاد معامل التوصيل لها على شكل أنبوبة أنصاف أقطارها الداخلية والخارجية على الترتيب هي  $t_1$  ،  $t_2$  تحاط الأنبوبة بغلاف يمرر بداخله بخار ماء ساخن يكون كمصدر حرارى . ويمرر بداخل الأنبوبة تيار منتظم من الماء يمكن قياس درجة حرارته عند مدخل الأنبوبة وعند مخرجها  $t_3$  ،  $t_4$  . تنتقل الحرارة بالتوصيل من السطح الخارجى للأنبوبة والملامس للبخار إلى السطح الداخلى لها الملامس للماء البارد فيسخن بذلك تيار الماء بمروره داخل الأنبوبة وترتفع درجة حرارته عند الوصول إلى حالة الاتزان الحرارى من  $t_3$  إلى  $t_4$  درجة مئوية . إذا كان  $k$  سم / ثانية هو معدل مريان الماء فى الأنبوبة يكون معدل الحرارة المارة بالتوصيل فى الجدران  $k \times 1$  (  $t_3 - t_4$  ) سعر / ثانية .

يتغير الميل الحرارى من مكان إلى آخر على طول الأنبوبة . درجة حرارة السطح الخارجى الساخن للأنبوبة ثابتة وتساوى درجة حرارة البخار  $100^\circ$  م ولكن تتغير درجة حرارة السطح الداخلى للأنبوبة إذ ترتفع من درجة  $t_3$  عند مدخلها إلى درجة  $t_4$  عند المخرج . ويتغير تبعاً لذلك الميل الحرارى من  $\frac{100 - t_3}{t_2 - t_1}$  عند المدخل إلى  $\frac{100 - t_4}{t_2 - t_1}$  عند المخرج حيث  $t_2 - t_1 = 1$  سم هو سمك المادة التى يمر خلالها التيار الحرارى .

وتكون بذلك القيمة المتوسطة للميل الحرارى هى  $\frac{s - 100}{t_2 - t_1}$

حيث  $s = \frac{t_3 + t_4}{2}$  وهى القيمة المتوسطة للدرجتين .

عند حساب المساحة التى تمر خلالها الحرارة يلاحظ أن مساحة السطح الساخن للأنبوبة الملامس للبخار هو  $2 \pi r_1 l$  حيث  $l$  هو طول الأنبوبة المعرض للتسخين . بينما مساحة السطح الداخلى الملامس للماء هو  $2 \pi r_2 l$  . ولذلك تؤخذ المساحة المتوسطة  $2 \pi r l$  عند التعويض فى معادلة التوصيل الحرارى حيث  $t_1 = \frac{1}{2} (t_2 + t_3)$  هى القيمة المتوسطة لنصف قطرى الأنبوبة .

يمكن من البيانات السابقة إيجاد معامل التوصيل  $k$  لمادة الأنبوبة من المعادلة

$$k \times 1 \times (t_3 - t_4) = m \times 2 \pi r l \cdot \frac{s - 100}{t_2 - t_1} \dots \dots (10 - 6)$$

## ١٠ - ٦ التوصيل الحرارى فى السوائل :

يراعى عند تعيين معاملات التوصيل الحرارى للسوائل التى تكون قيمتها صغيرة عادة ، تجنب انتقال الحرارة بواسطة تيارات الحمل . لذلك يوضع السطح الساخن للمصدر فوق السطح البارد للمستقبل للحرارة ويوضع بينها السائل . يتركب الجهاز المستخدم لهذا الغرض من إناءين من النحاس يفصلهما طبقة رقيقة من السائل تحت الاختبار . يمرر بالإناء العلوى (وهو المعزول حرارياً) بخار ماء ساخن ، بينما يوضع بالإناء السفلى جليد مجروش لحفظ درجة حرارته دائماً عند الصفر المئوى . إذا كانت سمك طبقة السائل

هى  $F$  يكون الميل الحرارى هو  $\frac{100 - \text{صفر}}{F}$  درجة / سم

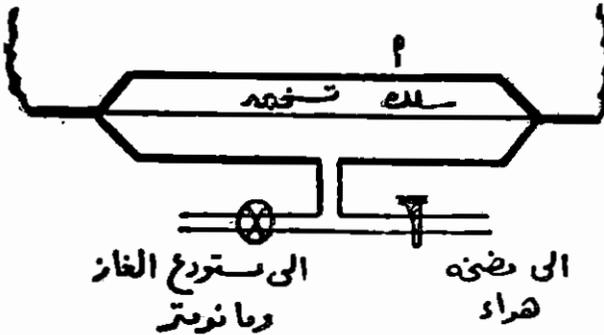
لتعيين معدل مرور الحرارة بالتوصيل خلال السائل توجد كتلة البخار المتكثف فى الإناء العلوى فى زمن معين وليكن معدل التكثيف هو  $K$  . حم فى الثانية ، كمية الحرارة المفقودة من البخار فى الثانية =  $K$  حيث  $K$  الحرارة الكامنة للتصعيد . وتساوى هذه الكمية معدل مرور الحرارة بالتوصيل خلال السائل .

وبمعرفة مساحة سطح السائل من يمكن إيجاد معامل توصيله الحرارى من المعادلة :

$$K \text{ ص} = M \text{ سم} \cdot \frac{100 - \text{صفر}}{F} \dots \dots \dots (10 - 7)$$

## ١٠ - ٧ التوصيل فى الغازات :

تستخدم طريقة السلك الساخن لتعيين معامل توصيل الغازات . ويركب الجهاز المستخدم لذلك (انظر شكل ١٠ - ٦) من أسطوانة مفرغة  $A$  يوجد على محورها سلك تسخين طوله  $L$  سم . تتصل الأسطوانة بمضخة ومانومتر لقياس ضغط الغاز بالداخل كما يمكن أن تتصل أيضاً بخزان الغاز تحت



(شكل ١٠ - ٦)

الاختبار . عند بدء التجربة تفرغ الأنبوبة جيداً ثم يفتح خزان الغاز لإدخال كمية منه تحت ضغط معين . يمرر تيار كهربائي في سلك التسخين . تنتقل الحرارة بالتوصيل داخل الغاز إلى الأسطوانة الخارجية . فإذا كانت درجتي حرارة سطح السلك والأسطوانة هما  $k_1$  ،  $k_2$  على الترتيب ونصف قطريهما  $r_1$  ،  $r_2$  على الترتيب يمكن إثبات أن معامل التوصيل  $\mu$  للغاز يتحدد بالعلاقة :

$$\mu = \frac{1}{2} \frac{C}{\text{ط ل}} \cdot \frac{C}{k_1 - k_2} \cdot \text{لو ه} \frac{r_2^2}{r_1^2} \dots \dots \dots (10-8)$$

حيث  $C$  هي كمية الحرارة التي تمر في الغاز في الثانية (معدل التوصيل الحراري) وتكافئ كمية الطاقة الكهربائية المستهلكة في الثانية أي  $T$  .  $C$  جول / ثانية حيث  $T$  ،  $C$  هما شدة التيار وفرق الجهد على طرفي السلك على الترتيب أي أن

$$C = \frac{T \cdot A}{J} \quad \text{حيث } J \text{ هو المكافئ الكهربائي الحراري .}$$

وتقاس درجة حرارة سلك التسخين بمعايرة التغير في مقاومته الكهربائية .

ومن الجدير بالذكر هنا أنه قد وجد أن معامل التوصيل الحراري لأي غاز مقدار ثابت لا يتوقف على ضغطه .

## ١٠ - ٨ العلاقة بين معامل التوصيل الحراري والتوصيل الكهربائي للفلزات :

قانون فيدمان - فرانز Wiedemann ' Franz law

أجرى فيدمان وفرانز عدة تجارب لقياس معاملات التوصيل الحراري والكهربائي لبعض الفلزات جيدة التوصيل . وقد وجد أن النسبة بين معامل التوصيل الحراري إلى معامل التوصيل الكهربائي لجميع الفلزات النقية مقدار ثابت إذا قيست هذه المعاملات عند نفس درجة الحرارة . وقد وجد لورنتز أن هذا المقدار الثابت يتناسب طردياً مع درجة الحرارة المطلقة .

وقد فسرت هذه الظاهرة بأن العوامل التي تسبب انتقال الحرارة في الفلزات هي نفس العوامل التي تحدث التوصيل الكهربائي . ولما كانت الإلكترونات الحرة في الفلزات هي التي تتحكم في التوصيل الكهربائي لذلك اقترح درودي أن هذه الإلكترونات الحرة تكون داخل الفلز ما يشبه الغاز المثالي الذي تنقل جزيئاته (الإلكترونات) الحرارة من مكان إلى آخر وذلك عن طريق نقل طاقة حركتها إما بتصادمها مع بعضها أو مع ذرات الفلز ذاته .

## انتقال الحرارة بواسطة الإشعاع

### Radiation of heat

لا يحتاج انتقال الحرارة بالإشعاع من الأجسام الساخنة إلى وسط ناقل كما هو الحال بالنسبة للحمل والتوصيل . فالإشعاع الحرارى له نفس طبيعة الضوء من حيث أنه أمواج كهرومغناطيسية يمكنها أن تنتقل في الفراغ . ويكون الإشعاع جزءاً من الطيف الكهرومغناطيسى ويوجد في منطقة الأشعة تحت الحمراء .  
ويتبين الجدول الآتى مكان الإشعاع الحرارى في الطيف :

نوع الأشعة	طول الموجة بالسنتيمتر
	من إلى
أشعة جاما	٠,٠٠٠٢ - ٠,١٥
أشعة اكس	٠,١ - ١٥٠
أشعة فوق بنفسجية	١٠٠ - ٣٥٠٠
أشعة منظوره (ضوئية)	٣٥٠٠ - ٧٨٠٠
أشعة تحت حمراء (حرارية)	٠,٠٠٠٧٨ - ٠,١٤
أمواج لاسلكية	٠,١٤ - ١٠ × ١٠ <sup>٦</sup> سم

من المعروف أن اللون الأسود يمتص جميع الأشعة الساقطة عليه وهذا سبب سواد لونه . ويطلق لفظ الجسم الأسود على ذلك الجسم الذى إذا سقطت عليه كمية من إشعاع حرارى امتصها تماماً أى أن معامل امتصاص الجسم الأسود يساوى الوحدة بينما هو دائماً أقل من ذلك بالنسبة لجميع الأجسام الأخرى وذلك بسبب ما ينعكس من إشعاع على السطح الخارجى للجسم .

ويعرف معامل الامتصاص بأنه النسبة بين كمية الحرارة الممتصة إلى كمية الحرارة الساقطة .

تعريف قوة الانبعاث . ٢- إذا سخن جسم للدرجة مرتفعة  $t_1$  فإن كمية ما يشع من الحرارة في وحدة الزمن من وحدة المساحات من سطحه الخارجى تتوقف على طبيعة السطح المشع . وتعرف قوة الانبعاث لمسطح جسم ساخن بالنسبة بين معدل ما يشع من  $1 \text{ سم}^2$  من سطحه إلى معدل ما يشع من  $1 \text{ سم}^2$  من جسم تام السواد عند نفس درجة الحرارة .

### ٩- ١٠ نظرية برنوليست للتبادل الحرارى : Prevost theory of exchange

يتوقف نوع الإشعاع الحرارى الصادر من أى جسم ساخن على درجة حرارته فقط وليس على طبيعة

سطحه المشع . ويقصد بنوع الإشعاع هنا أطوال الموجات المنبعثة من الجسم الساخن . فكل جسم يبدأ في الاحمرار أى فى إرسال أشعة حمراء إذا رفعت درجة حرارته إلى حوالى  $550^{\circ}\text{C}$  مهما كانت مادته أو طبيعة سطحه المشع .

وتنص نظرية برقيفوس للتعادل الحرارى على أن أى جسم درجة حرارته فوق درجة الصفر المطلق يشع كمية من الحرارة للوسط المحيط به كما يستقبل فى نفس الوقت كمية أخرى من الحرارة صادرة من نفس هذا الوسط المحيط . ويظل هذا التبادل الحرارى قائماً حتى تتساوى كميتى الأشعة الصادرة من الجسم والواردة إليه ويقال عندئذ أن الجسم والوسط فى حالة اتزان حرارى .

### ١٠ - ١٠ قانون كيرشوف : Kirchhoff's law

ينص قانون كيرشوف على أنه عند أى درجة حرارة تكون النسبة بين قوة الانبعاث إلى قوة الامتصاص لسطح جسم ما مقداراً ثابتاً لا يتوقف على طبيعة سطح الجسم ولكن فقط على درجة حرارته وطول الموجة المشعة . ويساوى هذا الثابت قوة الانبعاث لجسم تام السواد .

ولإثبات هذا القانون نفرض أن لدينا حجرة معزولة حرارياً عن كل ما يحيط بها وموجود بداخلها كمية من إشعاع حرارى له درجة حرارة وطول موجة معينة . تساوى شدة هذا الإشعاع الحرارى ش قوة الانبعاث  $e_s$  من جسم أسود له نفس درجة الحرارة . أى أن  $e_s = e_s$  .

فإذا وضع جسم ما داخل هذه الغرفة فإن الوصول إلى حالة الاتزان الحرارى تم عندما تتساوى كميتى الحرارة الممتصة والمشعة من الجسم فإذا كان معامل الامتصاص لسطح الجسم هو  $a_\lambda$  وقوة الانبعاث له هى  $e_\lambda$  فإن :

$$\text{معدل امتصاص الحرارة من وحدة المساحات} = e_s \cdot a_\lambda$$

$$\text{ومعدل إشعاع الحرارة من وحدة المساحات} = e_\lambda$$

وبما أنهما متساويان فإن

$$e_s = \frac{e_\lambda}{a_\lambda} = e_s \quad \dots \dots \dots (12 - 9)$$

وهذا يثبت قانون كيرشوف . ولهذا القانون نتائج هامة هى :

١ - الإشعاع الحرارى لا يتوقف على طبيعة وشكل الحيز الذى يحتويه كما أنه لا يتأثر إطلاقاً بوجود أى جسم بداخله طالما ظلت حالة الاتزان الحرارى قائمة .

٢ - إذا كان جسم ما قادراً على امتصاص إشعاع له طول موجة معينة عندما تكون درجة حرارته منخفضة فإنه يكون أيضاً قادراً على بعثها عندما ترفع درجة حرارته .

فمثلاً إذا أحضرنا كرة من البلاتين المصقول ثبت عليها قطعة صغيرة من البلاتين الأسود ، تعكس الكرة عند درجات الحرارة المنخفضة معظم الأشعة الساقطة عليها ولذلك تظهر لامعة بينما تمتص قطعة البلاتين الأسود كل هذه الأشعة ولا تعكس شيئاً ولذلك تظهر سوداء وعندما توضع هذه الكرة في فرن لرفع درجة حرارتها بحيث تصبح قادرة على الإشعاع في منطقة الأشعة الضوئية المرئية ، نجد أن قطعة البلاتين السوداء هي التي أصبحت مضيئة بينما تحولت الكرة كلها إلى اللون المعتم .

وهذا يدل على أن البلاتين الأسود الذي كان قادراً على امتصاص جميع الأشعة عندما يكون برداً يصبح قادراً على بعث الأشعة وإشعاعها بدرجة كبيرة أيضاً عندما يصبح ساخناً لذلك يظهر مضيئاً بينما يحدث عكس ذلك للبلاتين المصقول . وهذا يثبت صحة قانون كيرشوف من الناحية العملية .

### ١٠ - ١١ قانون ستيفان بولتزمان للإشعاع : Stefan Boltzman's law

أجرى ستيفان الكثير من التجارب على الإشعاع الصادر من الأجسام عند رفعها لدرجات حرارة مختلفة . وقد وجد أن معدل الإشعاع الحراري من جسم ما (معدل تبريده) يتناسب مع الأس الرابع لدرجة حرارته المطلقة ولا يتوقف. هذا المعدل على طول الموجة المشعة . وقد أثبت بولتزمان هذا القانون رياضياً معتمداً على قوانين الديناميكا الحرارية .

إذا كانت درجة الحرارة المطلقة لجسم هي  $M$  فإن معدل الإشعاع من وحدة المساحات من سطحه تكون  $\sigma M^4$  حيث  $\sigma$  هو ثابت التناسب ويطلق عليه ثابت ستيفان .

إذا كان الجسم المشع موضوعاً في وسط درجة حرارته المطلقة  $M_0$  ، فإن كمية الحرارة التي يستقبلها الجسم من الوسط في وحدة الزمن على وحدة المساحات تساوي  $\sigma M_0^4$  .  
وتطبيق نظرية التبادل الحراري نيريفوست يكون معدل التبريد من الجسم .

$$ح = \sigma (M^4 - M_0^4)$$

إذا كان الفرق صغيراً بين درجتي حرارة الجسم المشع والوسط المحيط أي أن  $M = M_0 + \Delta M$  حيث  $\Delta M$  هو فرق درجات الحرارة فإن قانون ستيفان بولتزمان يصبح :

$$ح = \sigma (M^4 - M_0^4) = \sigma (M_0^4 + 4M_0^3 \Delta M + \dots) - \sigma M_0^4 \dots \dots \dots (12 - 10)$$

ويمكن اختصار هذه المعادلة بتلك الأقواس وإهمال الكميات الصغيرة من الدرجة الثانية فما فوق

$$\text{مثل } \Delta M^2 , \Delta M^3 \text{ وهكذا فنحصل بذلك على :}$$

$$ح = \sigma [4M_0^3 \Delta M + \text{كميات مهملة}]$$

من هذا يتضح وجود تناسب بسيط بين معدل فقد الحرارة من الجسم والفرق بين درجة حرارته ودرجة

حرارة الوسط المحيط (  $\Delta M$  ) طالما كان هذا الفرق صغيراً .

وهذا هو نص قانون نيوتن للتبريد وقد سبق الكلام عنه . أى أن قانون نيوتن للتبريد هو حالة خاصة من قانون ستيفان - بولتزمان عندما يكون فرق درجة الحرارة بين الجسم الساخن والوسط صغيراً .

## ١٢ - ١٢ الثابت الشمسى : Solar Constant

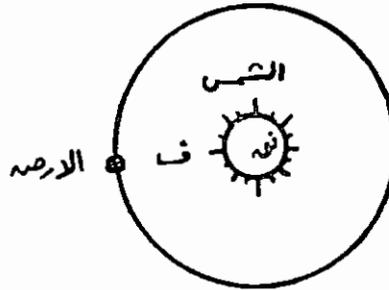
من أهم الثوابت فى موضوع الطاقة الشمسية هو الثابت الشمسى ويعرف بكمية الطاقة الحرارية التى تسقط من الشمس عمودياً على وحدة المساحات من سطح الأرض فى وحدة الزمن . . ويديى أن قيمته تتوقف على المكان الذى يقاس عنده وأيضاً على العوامل الخارجية المؤثرة . وقد وجد أن القيمة المتوسطة لهذا الثابت هى ١,٩٤ سم<sup>٢</sup> / دقيقة . كما أمكن بواسطته تقدير درجة حرارة الشمس بتطبيق قانون ستيفان بولتزمان عليها واعتبارها جسماً ساخناً يشع حرارته فى الفراغ .

إذا فرض أن درجة الحرارة المطلقة للشمس هى  $M$  وأن نصف قطرها  $r$  تكون كمية الحرارة الكلية المشعة من الشمس فى الثانية الواحدة هى  $C$  حيث

$$C = 4\pi r^2 \sigma M^4$$

حيث  $4\pi r^2$  هى مساحة السطح الساخن المشع للشمس .

إذا كانت المسافة بين الأرض والشمس  $F$  فإن الطاقة الشمسية  $C$  تتوزع فى جميع الاتجاهات على مساحة  $4\pi F^2$  هى مساحة الكرة التى يكون مدار الأرض حول الشمس أحد مقاطعها وبذلك



(شكل ١٢ - ٧)

تكون كمية الحرارة الساقطة من الشمس فى وحدة الزمن على  $1\text{سم}^2$  من سطح الأرض هى الثابت الشمسى حيث

$$H = \frac{C}{4\pi F^2} = \frac{4\pi r^2 \sigma M^4}{4\pi F^2} = \sigma M^4 \left(\frac{r}{F}\right)^2$$

أى أن

$$\sigma = \frac{E}{F} \cdot \frac{1}{T^4}$$

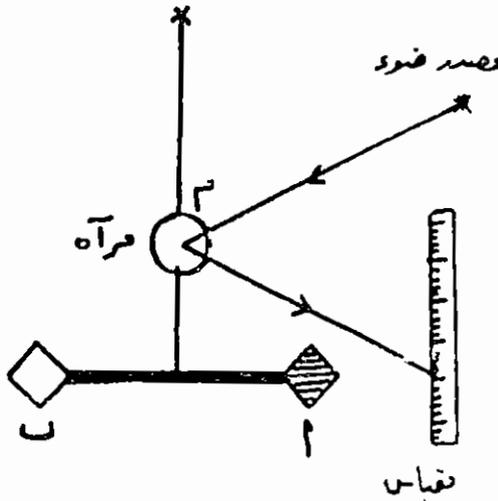
ويعتبر الأبعاد  $E$  ،  $F$  بطرق فلكية وبإيجاد ثابت ستيفان والثابت الشمسي بطرق معملية أمكن تعيين درجة حرارة الشمس التي قدرت بستة آلاف درجة تقريباً .

### ١٠ - ١٣ طرق قياس الإشعاع الحرارى :

يعتبر الترموبيل من أفضل الأجهزة لقياس الإشعاع الحرارى ، وتعتمد نظريته على الخاصية الكهر حرارية . وقد سبق الكلام عنه في الباب الثامن .

يستخدم أيضاً جهاز الراديومتر Radiometer ويتركب كما في شكل (١٠-٨) من إطار خفيف من الألومنيوم مثبت عليه ورقتين خفيفتين من الميكا  $A$  : ب أحدهما  $(B)$  مغطاه جيداً بطبقة من الصنّاج الأسود وذلك لكي تمتص الإشعاع الحرارى إذا سقط عليها . يعلق الإطار بواسطة خيط رفيع من الكوراتز مثبت عليه مرآة  $M$  يسقط عليها شعاع ضوئى فينعكس ليسقط على مقياس مدرج .

عند سقوط إشعاع حرارى على الإطار تمتص الورقة  $A$  معظم الأشعة الساقطة عليها بينما تعكسها الورقة  $B$  فترتفع بذلك درجة حرارة  $A$  عن  $B$  و ينتج عن ذلك تسخين جزيئات الهواء القريبة من  $A$  فتزداد سرعتها ويزداد بالتالى دفعها للورقة  $A$  بينما لا يحدث هذا على الورقة  $B$  . ويتكون نتيجة لذلك ازدياد

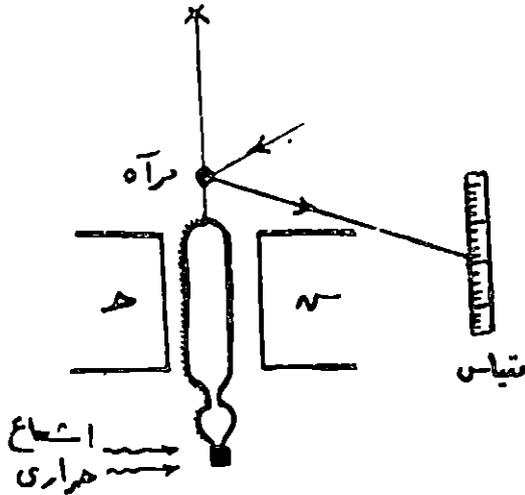


(شكل ١٠-٨)

يسبب دوران الإطار حول محور التعليق وبالتالي يدور مستوى المرآة فيتحرك شعاع الضوء المنعكس عليها مسجلاً انحرافاً على المقياس المدرج تتناسب قيمته مع شدة الإشعاع الساقط على الجهاز .

### ١٠ - ١٤ جهاز بوى لقياس الإشعاع : Boys method

يستخدم في هذا الجهاز نظرية الجلفانومتر ذو الملف المتحرك . ويتركب من مغناطيس ثابت يتحرك بين قطبيه ملف صغير مركب من سلكين مختلفين يكونان أزواجاً حراريّاً ( شكل ١٠ - ٩ ) الملف معالق من خيط رفيع مثبت عليه مرآة يسقط عليها شعاع ضوء ينعكس على مقياس مدرج . مثبت على أحد وصلتي الأزواج الحراري الذي يتكون منه الملف المتحرك قطعة رقيقة من النحاس عليها صنّاج أسود . عندما تعرض هذه الوصلة للإشعاع الحراري ترتفع درجة حرارتها عن الوصلة الأخرى فيمر تيار كهربائي حراري في الملف يتسبب في دورانه في مجال المغناطيس . وبدوران المرآة مع حركة الملف ينحرف شعاع الضوء المنعكس عليها والساقط على المقياس المدرج حيث تتناسب شدة الإشعاع الساقط مع الانحراف الحادث على المقياس .



(شكل ١٠ - ٩)

### تمارين :

- ١ - غلاية من الحديد مساحة سطحها الموصل للحرارة هو متر مربع . ما كمية الماء الذي يتبخّر في الساعة إذا كان السطح الخارجى الساخن للغلاية  $١٥٠^{\circ}$  وسمك جدار الغلاية  $٠,٧$  سم ؟
- ٢ - قضيب نحاس طوله  $٢٨$  سم ومساحة مقطعه  $٤$  سم<sup>٢</sup> . وضع أحد طرفيه في غرفة بخار ماء بينما وضع طرفه الثاني في مخلوط من جليد وماء . إذا أهملت فقد الحرارة عن طريق سطح القضيب أوجد :

أولاً : شدة التيار الحرارى داخل القضيب .

ثانياً : درجة الحرارة عند نقطة تبعد ٣ سم عن طرف القضيب البارد .

٣ - قضيب من الصلب قطره ١ سم يغلقه من الخارج أسطوانة من النحاس قطرها الخارجى ٣ سم ويوجد عليها طبقة عازلة حرارياً . إذا كان طول هذا القضيب المركب ٢ متراً وحفظ طرفيه عند درجتى ١٠٠ م ، صفرم أوجد :

أولاً : التيار الحرارى الكلى المار بالقضيب .

ثانياً : ما هى النسبة التى تمررها كل من مادة الصلب والنحاس ؟

٤ - لوح مكون من طبقتين متوازيتين من مادتين مختلفتين سمكاهما ٣،٥ سم وبعملا توصيهما الحرارى ٠،٦ ، ٠،٤ وحدات سم . جم . ثانية على الترتيب . فإذا كان السطحان المتقابلان الخارجيان لهذا اللوح فى درجة صفر . ١٠٠ م . ما هى درجة السطح الذى يفصل المادتين .

٥ - وضع حاجز من الحديد سمكه ٢ سم وارتفاعه ١٠ سم وعرضه ١٥ سم فى إناء بحيث قسم إلى قسمين منفصلين وضع بالأول جليد وأمرر بالثانى بخار ماء . أوجد كمية ما ينصهر من الجليد فى ٥ دقائق . كذلك المعدل الذى يتكثف به البخار .

٦ - أمكن بواسطة موقد شمسي تجميع أشعة الشمس الحرارية الساقطة على مسطح مساحته متر مربع فى نقطة . أوجد الزمن اللازم لكى تتبخر تماماً كتلة ١٠ جرام جليد فى درجة الصفر وضعت فى هذه النقطة . علماً بأن متوسط الثابت الشمسى ١،٩٤ سعر / سم<sup>٢</sup> دقيقة .

٧ - وضعت كرة سوداء من لنحاس نصف قطرها ٢ سم فى حيز مفرغ درجة حرارة سطحه ١٨٠ م . ما هى كمية الطاقة التى يلزم تزويد الكرة بها فى الثانية الواحدة حتى تحتفظ بدرجة حرارتها عند درجة ١٢٧ م<sup>٩</sup> .

٨ - باعتبار الشمس جسم ساخن مشع وأن شدة الإشعاع عند نقطة ما تناسب عكسياً مع مربع بعد النقطة عن مركز الشمس أوجد درجة حرارة سطح الشمس علماً ، بأنها تبعد عن الأرض ٩٣ مليون ميل وأن كمية الحرارة التى تصل إلى سطح الأرض من الشمس هى ١،٨ سعر / دقيقة / سم<sup>٢</sup> ونصف قطر الشمس - ٤٠٠٠٠٠ ميل .

٩ - كرة سوداء من الحديد قطرها ١٠ سم تبرد بالإشعاع فى فراغ حفظت جدرانه فى درجة الصفر المئوى . ما الزمن اللازم لهذه الكرة لكى تبرد من ٢٠٠ م<sup>٥</sup> إلى درجة ١٩٩ م<sup>٥</sup> . ه الحرارة النوعية للحديد = ٠،١١ سعر / جم / درجة .

ثابت ستيفان للإشعاع =  $٥,٧٦ \times ١٠^{-٥}$  ارج / سم<sup>٢</sup> درجة / ثانية .

١٠ - سلك مقاومته ٠،١ أوم لكل سنتيمتر موضوع فى محور أسطوانة من مادة عازلة نصف قطريها الداخلى والخارجى هما ٠،٥ ، ١ سم على الترتيب . عندما يمر تيار مقداره أمبير يتكون فرق فى درجة الحرارة بين سطحى الأسطوانة العازلة بمقدار ١٢٥ م<sup>٥</sup> . أوجد معامل التوصيل الحرارى للمادة .

# الباب الحادى عشر

## نظرية الحركة للغازات

تتحرك جزيئات أى غاز حركة مستمرة بسرعة متوسطة تتوقف على درجة حرارته فكلما ارتفعت درجة الحرارة ازدادت السرعة المتوسطة للجزيئات وتزداد بالتالى طاقة الحركة الكلية لها . وقد وجد أنه عند الضغوط المخلخلة لجميع الغازات تنطبق بعض قوانين الغازات البسيطة التالية :

### ١١-١ قوانين الغازات التامة :

١ - قانون بويل : وينص على أنه لكتلة معينة من غاز يتناسب ضغط الغاز عكسياً مع حجمه عندما تظل درجة حرارته ثابتة .

٢ - قانون شارل : وينص على أنه عند تسخين كتلة معينة من غاز مع تثبيت حجمها يزداد ضغط الغاز طردياً مع درجة الحرارة .

٣ - قانون دالتون للضغوط الجزئية : وينص على أن ضغط مخلوط من غازات على جدران الإناء الذى يحتويه يساوى مجموع الضغوط التى تؤثر بها هذه الغازات لو وجد كل منها على حدة فى نفس هذا الإناء .

٤ - قانون جول : وينص على أن الطاقة الداخلية لغاز لا تتوقف على حجمه أى أنه إذا تمدد تمدداً حراً فى فراغ لا تتأثر طاقته الداخلية بالزيادة أو بالنقصان .

٥ - قانون جاي لوساك : ويعالج هذا القانون الاتحاد الكيميائى بين الغازات وينص على أن حجم الغازات المتفاعلة كيميائياً يكون بينها نسباً بسيطة وكذلك مع حجم ناتج التفاعل لو كان هذا الناتج غازياً أيضاً .

٦ - قانون أفوجادرو : وينص على أن الحجم المتساوية من الغازات عند نفس درجة الحرارة والى يكون لها نفس الضغط تحتوى على نفس العدد من الجزيئات . ويعرف عدد الجزيئات فى الجرام الجزيئى من أى غاز بعدد أفوجادرو وتبلغ قيمته  $6,023 \times 10^{23}$  جزيء .

## ١١ - ٢ مواصفات الغاز التام :

من قوانين الغازات السابقة تحت الضغط المخفض يمكن استنباط تركيب بسيط للغازات وسيطحي على كل غاز ينطبق عليه مواصفات هذا الغاز بالغاز التام Perfect gas . وهو غاز أحادي الذرة تكون لجزيئاته الصفات التالية

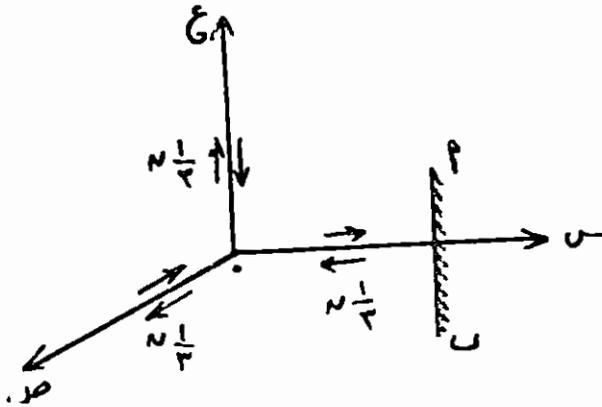
- ١ - تتركب جزيئاته من كرات ممتلئة صلبة ولمساء ، تامة المرونة .
- ٢ - تتحرك الجزيئات حركة عشوائية مستمرة وتتصادم مع بعضها وكذلك مع جدران الإناء المحتوى لها دون أن تفقد أى قدر من طاقتها لكالية نتيجة لذلك .
- ٣ - متوسط طاقة حركة الجزيء متناسب طردياً مع درجة الحرارة المطلقة للغاز .
- ٤ - لا توجد أى قوى بينية جزيئية No intermolecular forces
- ٥ - يكون حجم الجزيئات مهملاً بالنسبة إلى الحجم الكلى الذى يشغله الغاز .

## ١١ - ٣ حساب ضغط الغاز التام :

نفرض كمية من غاز مثالى موجود داخل حيز مغلق تعرفه محاور الأحداثيات  $x, y, z$  ، شكل (١١ - ١) . يوجد بكل ١ جرام جزيء من الغاز عدد أفوجادرو  $N$  فإذا كان حجم الجراء

$$\text{الجزيئى هو } \rho \text{ سم}^3 \text{ فإن عدد الجزيئات فى وحدة الحجم هو } \nu = \frac{N}{\rho} .$$

نفرض أن  $P$  يمثّل مساحة دائرية قدها ١ سم<sup>٢</sup> من جدار الإناء المحتوى للغاز وأن هذه المساحة تقع عمودية على المحور السينى للأحداثيات كما فى الشكل .



(شكل ١١ - ١)

بما أن حركة الجزيئات عشوائية في أى اتجاه يمكننا اعتبار أن ثلث الجزيئات تتحرك في كل من الاتجاهات س ، ص ، ع . وكذلك توجد امكانية متساوية للجزيئات المتحركة في الاتجاه السبى مثلا أن تتحرك في أى من الاتجاهين الموجب أو السالب أى في اتجاه المساحة  $\uparrow$  ب أو بعيداً عنها . وبذلك تكون عدد الجزيئات في وحدة الحجم والتي تتحرك في الاتجاه السبى ناحية المساحة  $\uparrow$  ب هي

$$\frac{1}{4} \times \frac{1}{4} \times \frac{1}{4} \text{ أى } \frac{1}{4} \text{ جزيء .}$$

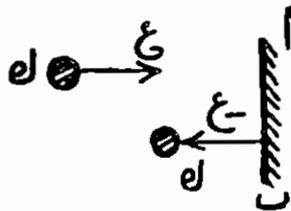
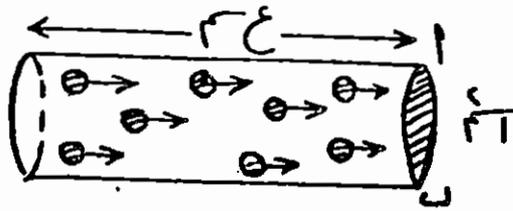
وإذا كانت كتلة الجزيء  $m$  وسرعه المتوسطة  $c$  سم / ثانية فإن كمية تحرك الجزيء =  $mc$  . عندما يسقط هذا الجزيء عمودياً على  $\uparrow$  ب فإنه يرتد بنفس السرعة التي سقط بها ولكن بإشارة معاكسة وتكون بذلك كمية الحركة للجزيء بعد ارتداده =  $-mc$  .  
التغير في كمية الحركة للجزيء كل مرة تصادم .

$$= mc - (-mc) = 2mc .$$

يتحرك كل جزيء سرعته  $c$  سم / ثانية مسافة قدرها  $c$  سم كل ثانية . وهذا يعنى أن يتصادم مع المساحة  $\uparrow$  ب كل ثانية جميع الجزيئات التي تكون متجهة إليها وعلى بعد يساوى أو أقل من المسافة  $c$  سم . هذه الجزيئات موجودة جميعاً في داخل الأسطوانة التي مساحتها  $\uparrow$  ب وارتفاعها  $c$  كما مبين بشكل ( ١١ - ٢ ) .

حجم هذه الأسطوانة = مساحة القاعدة  $\times$  الارتفاع

$$= c \times \frac{1}{4} \text{ سم}^3$$



(شكل ١١ - ٢)

عدد الجزيئات داخل هذا الحجم والتي تتحرك في الاتجاه السببي ناحية P ب فقط (الاتجاه

$$\text{الموجب) } = \frac{v}{6} \times \epsilon$$

التغير في كمية حركة الجزيئات عند تصادمها مع P ب  
= عدد الجزيئات المتصادمة  $\times$  التغير في كمية حركة كل جزيء

$$= 2 \text{ ك ع} \times \frac{v}{6} \times \epsilon = \frac{1}{3} \text{ ك} v \epsilon \dots \dots \dots (10 - 1)$$

يساوى هذا المقدار من التغير في كمية تحرك الجزيئات الدفع الذى يحدثه تصادمها مع المساحة P ب (1 سم<sup>2</sup>) في زمن قدره ثانية واحدة وذلك كما ينص عليه قانون نيوتن للحركة . فإذا علم أن الدفع هو القوة  $\times$  الزمن وأن الضغط هو القوة الواقعة عمودياً على وحدة المساحات فإن دفع الجزيئات للمساحة P ب أى على وحدة المساحات في اثنانية = ضغط الغاز ، أى أن

$$ص = \frac{1}{3} \text{ ك} v \epsilon$$

ويلاحظ هنا أننا حصلنا على ضغط الغاز بدلالة مربع سرعة جزيئاته بفرض أن لجميع الجزيئات سرعات واحدة . وهذا الفرض تبسيط شديد يهدف إلى تسهيل المعالجة الرياضية . وحقيقة الأمر أن الجزيئات تتفاوت في سرعاتها ابتداء من الصفر وحتى المالا نهاية ولكن تتجمع معظم سرعات الجزيئات حول قيمة متوسطة . وبمعالجة هذا الموضوع بدقة أكثر من الناحية الرياضية يجب استبدال مربع سرعة الجزيئات ع<sup>2</sup> في العلاقة السابقة بمتوسط مربع سرعة الجزيئات ع<sup>2</sup> والخط فوق ع<sup>2</sup> يعبر عن القيمة المتوسطة . وتعطى بالعلاقة

$$\overline{ع^2} = \frac{\sum_{i=1}^m v_i^2}{m} \quad \text{حيث } m = 1, 2, 3, \dots$$

$v_m$  هى عدد الجزيئات التى لها سرعات ع<sub>m</sub> وبديهي أن العدد الكلى للجزيئات يساوى  $\sum m$  يطلق على  $\sqrt{\overline{ع^2}}$  بجذر متوسط مربع اسرعة لجزيئات الغاز

root mean square velocity r.m.S.V.

١١ - ٤ قانون تساوى توزيع الطاقة :

$$\text{بالتعويض في معادلة الضغط عن } v = \frac{u}{c} \text{ نحصل على}$$

$$ص = \frac{1}{3} \frac{و}{ع} ك$$

$$ع ص = \frac{1}{3} ن ك$$

$$(١٠-٢) \dots \dots \dots \frac{2}{3} ك = \frac{1}{3} ع$$

حيث  $ك = ن$  هو الوزن الجزيئي للغاز،  $\frac{1}{3} ك ع$  هي طاقة الحركة الكلية لجزيئات ١ جم جزىء من الغاز وتناسب هذه الطاقة مع درجة الحرارة المطلقة للغاز  $م$  وتكون بذلك المعادلة السابقة القانون العام للغازات  $ح ص = ث م$  حيث  $ث$  هو ثابت الغاز ويساوى ٢ تقريباً للجرام الجزيئي .

$$\text{أى أن } \frac{2}{3} ك \times \frac{1}{3} ع = \frac{2}{3} ث م$$

$$\therefore \frac{1}{3} ك ع = \frac{2}{3} ث م$$

ولما كانت طاقة الحركة للجزىء الواحد  $\frac{1}{3} ك ع$  فإن  $\frac{1}{3} ك ع = \frac{2}{3} ث م$  .

حيث  $ك$  هو ثابت بولتزمان ويساوى  $\frac{ث}{ن}$  أى أن طاقة الحركة لكل جزىء يتحرك فى الفراغ

تساوى  $\frac{2}{3} ك م$  . ولما كان كل جزىء حراً ليتحرك فى أى من الاتجاهات الثلاثة من ، ص ، ع للفراغ لذلك يمكن توزيع طاقة كل جزىء على الاتجاهات الثلاثة بحيث يخص كل اتجاه طاقة قدرها  $\frac{1}{3} ك م$  . ويسمى هذا بقانون تساوى توزيع الطاقة . وينص على أن طاقة الجزىء فى المادة تتوزع بالتساوى على درجات الحرية للحركة ويخص كل منها مقدار قدره  $\frac{1}{3} ك م$

١١ - ٥ قانون ديولنج<sup>٥</sup> وبنى للحرارة الذرية للمواد :

سبق أن ذكرنا أن لجزيئات الغاز المثالى ثلاثة درجات حرية كلها انتقالية وذلك لعدم وجود قوى بين الجزيئات تربطها ببعضها . فى الأجسام الصلبة والسائلة حيث تظهر بوضوح هذه القوى الجزيئية يضاف إلى درجات الحرية الانتقالية الثلاثة ثلاثة درجات حرية أخرى دورانية . وذلك لأن كل جزىء أودرة داخل هذه المواد يستطيع أن يتحرك دورانياً حول نفسه تحت تأثير القوى الجزيئية وبذلك تصبح لكل جزىء ستة درجات حرية للحركة ثلاثة منها انتقالية وثلاثة أخرى دورانية . وتكون طاقة الجرام الجزيئي من المادة فى هذه الحالة مساوياً .

$$ح = 6 \times \frac{1}{3} ث م \quad \text{أى } ٣ ث م$$

ولما كانت الحرارة النوعية للجرام الجزيئي ( الحرارة الذرية ) هى معدل تغير طاقة الجرام الجزيئي بالنسبة أساسيات الميكانيكا

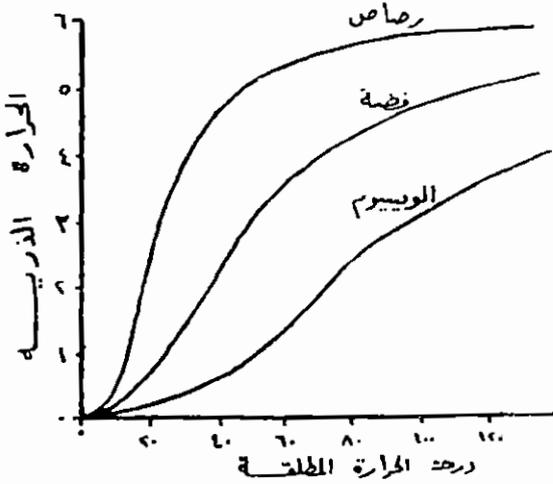
لدرجة الحرارة أى أن :  $\nu = C \left( \frac{C}{M} \right) = C$  ث لذك يذرم كمفة من الطاقة قدرها ٣ ث لكى

ترفع درجة حرارة هذا الجرام الجزئى درجة واحدة مئوية أى أن

الحرارة الذرية لجميع المواد = ٣ ث = ٦ تقريباً . . . . . (١١-٣)

ويعرف ذلك بقانون ديولنج وبى وهذا القانون صحيح فقط فى درجات الحرارة المرتفعة إذ وجد أن

الحرارة الذرية للمواد تقل كلما اقتربنا من درجة الصفر المطلق . كما مبين بشكل (١١-٣) .



(شكل ١١-٣)

العلاقة بين الحرارة الذرية والحرارة النوعية للمواد هى كما يأتى :

الحرارة الذرية = الحرارة النوعية × الوزن الذرى .

١١-٦ استنتاج قوانين الغازات من نظرية الحركة :

١- قانون بويل : إذا كان ح ، صه هما حجم وضغط كتلة معينة من غاز فإن حسب نظرية

الحركة .

$$ح . صه = \frac{1}{4} ك \nu ع^2$$

إذا كانت درجة حرارة الغاز ثابتة تظل السرعة المتوسطة لجزيئات الغاز ثابتة أيضاً وبذلك تصبح

المعادلة .

ح . صه = ثابت عند ثبوت درجة الحرارة . . . . . (١٠-٤)

وهو قانون بويل .

٢- قانون فوجادرو : عندما نخلط كميتين من غازين لهما نفس درجة الحرارة والضغط فإنه

لن يحدث انتقال متبادل للطاقة بين الغازين . اعتبر حجم ثابت من كل من الغازين يكون الضغط لهما هو :

$$ص = \frac{1}{3} ك_١ \nu_١ ع_١ = \frac{1}{3} ك_٢ \nu_٢ ع_٢$$

ولما كانت درجة حرارة الغازين واحدة فإن طاقة حركة الجزيئات تكون أيضاً واحدة لهما .

$$\therefore \frac{1}{3} ك_١ \nu_١ ع_١ = \frac{1}{3} ك_٢ \nu_٢ ع_٢$$

$$\nu_١ = \nu_٢$$

أى أن الحجم المتساوية من الغازات عند نفس درجة الحرارة والضغط تحتوى على نفس العدد من الجزيئات . هذا هو قانون أفوجادرو .

٣- قانون دالتون : نفرض مجموعة من غازات مختلفة كثافتها  $\rho_١$  ،  $\rho_٢$  ،  $\rho_٣$  ، ومتوسط سرعة جزيئات كل منها  $v_١$  ،  $v_٢$  ،  $v_٣$  ، على الترتيب : عند خلط هذه الغازات يكون الضغط الكلى لما هو  $ص$  حيث :

$$ص = \frac{1}{3} ك_١ \nu_١ ع_١ + \frac{1}{3} ك_٢ \nu_٢ ع_٢ + \dots$$

$$= \frac{1}{3} ك_١ \nu_١ ع_١ + \frac{1}{3} ك_٢ \nu_٢ ع_٢ + \dots$$

$$= ص_١ + ص_٢ + \dots \quad (١٠-٥)$$

أى أن الضغط الكلى للمخلوط يساوى مجموع الضغوط الجزئية بفرض أن كل غاز يشغل الحيز كله منفرداً .

تعيين السرعة المتوسطة لجزيئات الغاز :

إذا عرفنا الوزن الجزيئى للغاز ودرجة حرارته المطلقة يمكننا تعيين السرعة المتوسطة للجزيئات باستخدام المعادلة :

$$ص = \frac{1}{3} ك ن ع = \frac{1}{3} ك ع$$

$$\text{حيث } ك = ك ن = \text{الوزن الجزيئى للغاز ، كثافة الغاز} = \frac{ك}{ح}$$

$$\therefore ص = \frac{1}{3} ك ع = \frac{1}{3} ك \frac{ك}{ح} \quad \text{أى أن}$$

$$ع = \sqrt{\frac{3}{\delta}} \quad \dots \quad (١١-٤)$$

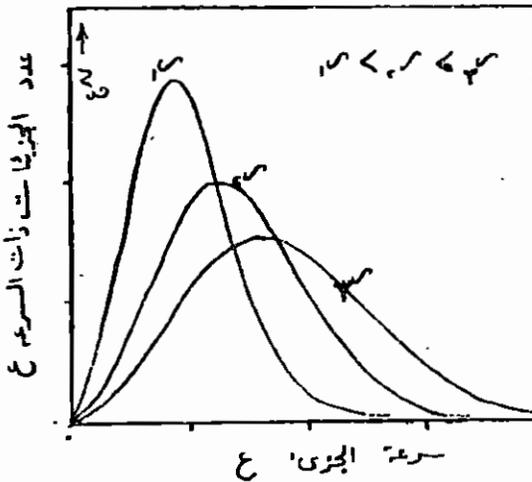
من المعادلة السابقة وبمعرفة ضغط الغاز  $\delta$  وكثافته  $\delta$  يمكن تعيين السرعة المتوسطة للجزيئات الغاز .

### ١١-٧ قانون ماكسويل للتوزيع العددي للسرعات :

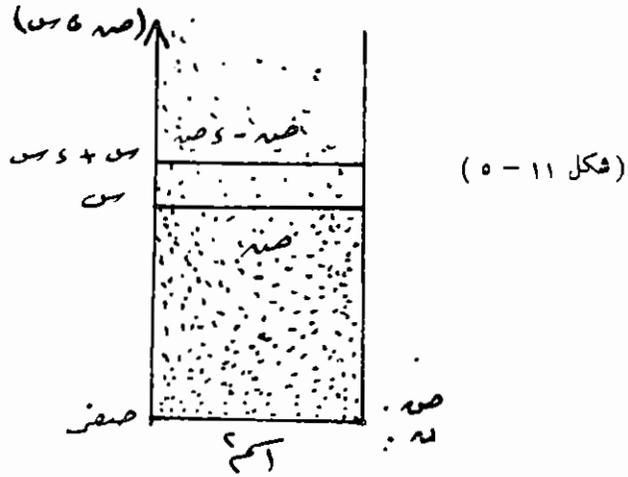
إذا قيل أن غاز ما في حالة استقرار فهذا لا يعنى مطلقاً أن سرعات كل الجزيئات في الغاز واحدة يوجد حقيقة سرعة متوسطة تعبر عن درجة حرارة الغاز وترتبط بها ولكننا إذا اخترنا جميع الجزيئات في لحظة ما لوجدنا أن هناك بعض جزيئات ذات سرع بطيئة جداً وأخرى سريعة جداً أما الأغلبية فسرعاتها قريبة من قيمة السرعة المتوسطة . وتتغير دائماً قيمة السرعة الذاتية للجزيء كنتيجة للتصادم ولكن تظل دائماً الطاقة الداخلية الكلية للغاز واحدة حيث أن درجة حرارته لم تتغير .

عدد الجزيئات  $n$  في وحدة الحجم من الغاز والذي تتراوح سرعته بين  $ع$  ،  $ع + دع$  يظل ثابتاً دائماً لا يتوقف على الزمن . إذا رسمنا بيانياً العلاقة بين عدد جزيئات الغاز عند درجة حرارة  $١٤٤$  والتي يكون لها سرعة معينة فإننا نحصل على المنحنى المبين بشكل ( ١١ - ٤ ) وهو يمثل شكل ناقوس مقلوب . إذا رفعت درجة الحرارة إلى  $٢٤٤$  فإن الشكل يزاح إلى منطقة السرعات الأكبر .

لايات قانون ماكسويل للتوزيع العددي للسرعات تعتبر عمود من الهواء الجوى مساحة مقطعة الوحدة يرتفع عمودياً على سطح الأرض وفي حالة اتزان ديناميكي حراري عند درجة الحرارة  $٤٤$  وعلى



(شكل ١١ - ٤)



ثابتة في كل مكان داخل هذا العمود . تتوزن جزيئات الهواء في العمود تحت تأثير الجاذبية الأرضية .  
 اعتبر طبقة من الهواء تحدها الطبقتان  $s$  ،  $s + s$  حيث يكون ضغط الهواء  $s$  ،  
 $s - s$  ( انظر شكل ١١ - ٥ ) .

وزن جزيئات الهواء في هذه الطبقة =  $\rho \cdot s \cdot h$  .

حيث  $\rho$  هي كثافة الهواء على ارتفاع  $s$  من سطح الأرض .

يتوزن هذا الوزن مع الفرق في الضغط على جانبي هذه الطبقة ، أي أن

$$(s - s) - s = s - s$$

$$\rho \cdot s \cdot h = s - s$$

لكن  $\rho = \frac{m \cdot n}{V}$  وأيضاً  $V = \frac{V}{h}$

حيث  $n$  هو عدد الجزيئات في وحدة الحجم من الهواء عند الارتفاع  $s$  .

$$m \cdot n \cdot V = s - s$$

$$m \cdot n \cdot V = s - s$$

أيضاً  $P = n \cdot k$  حيث  $k$  هي كتلة الجزيء

∴ بالتعويض في المعادلة

$$- m \cdot n \cdot V = s - s$$

$$\therefore \frac{v}{v} = \frac{K}{v^2 k} \cdot K$$

وبالتكامل

$$\therefore v = v_0 \cdot e^{-\frac{L}{v^2 k}} \quad (11-7)$$

وهذه هي نفس معادلة التوزيع العددي لدقائق جسم معلق في سائل (معادلة 7-4) على الارتفاعات المختلفة  $s$ . ولما كان ضغط الهواء متناسب طردياً مع عدد الجزيئات في وحدة الحجم

$$\therefore v = v_0 \cdot e^{-\frac{L \cdot K}{v^2 k}} \quad (11-8)$$

اعتبر الآن حركة جزيئات الغاز في عمود الهواء. يعبر تيار من جزيئات الطبقة المذكورة من أسفل إلى أعلى بينما يعبرها تيار آخر من أعلى إلى أسفل. أي جزيء تكون سرعته الابتدائية  $v_0$  عند سطح الأرض: ( $s = 0$  صفر) يستطيع أن يرتفع إلى البعد  $s = \frac{v_0^2}{2g}$  وفقاً لقوانين الحركة لنيوتن

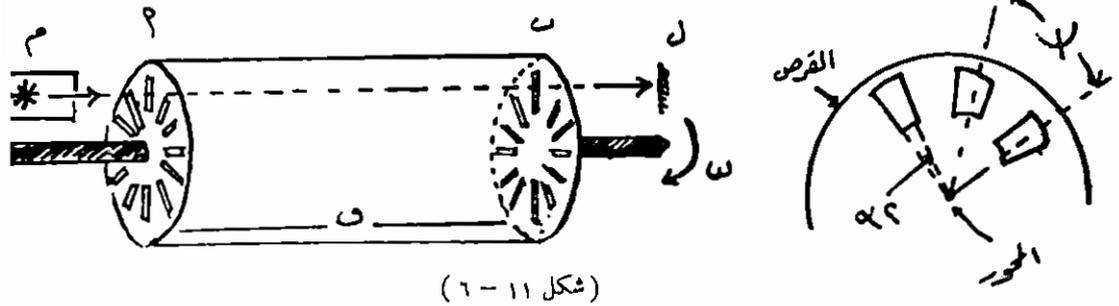
تكون طاقة الحركة لهذا الجزيء قد تحولت تماماً عند هذا الارتفاع إلى طاقة موضع  $K \cdot s$ . ويسقط مثل هذا الجزيء تحت تأثير الجاذبية الأرضية بعد ذلك أي أنه يغير اتجاهه الصاعد ليصير هابطاً. أي أن الجزيئات التي تستطيع عبور الطبقة الهوائية على ارتفاع  $s$  من سطح الأرض هي فقط الجزيئات التي تكون لها سرعات ابتدائية عند سطح الأرض مساوية  $\sqrt{2gs}$  بينما يمكن لجميع الجزيئات في التيار الهابط أن تعبر هذه الطبقة مهما كانت سرعاتها حيث أنها هابطة تحت تأثير الجاذبية الأرضية. نفرض أن  $v$  د (ع).  $v_0$  هو عدد الجزيئات الذي له سرعات تقع بين  $v_0$  و  $v_0 + dv_0$ . عند سطح الأرض ( $s = 0$  صفر) عدد الجزيئات الذي يعبر الطبقة  $K \cdot s$  إلى أعلى هو

$$N = \int_0^{\infty} v_0 \cdot e^{-\frac{L \cdot K}{v_0^2 k}} \cdot dv_0 \quad (ع. د) \quad K \cdot s$$

الحد الأدنى للتكامل  $\sqrt{2gs}$  يدل على الجزيئات ذات السرعات التي تقل عن هذا الحد لا تصل إلى الطبقة المعنية وبالتالي فلا يجب حسابها. عدد الجزيئات الذي يعبر الطبقة  $K \cdot s$  إلى أسفل هو

$$N = \int_0^{\infty} v_0 \cdot e^{-\frac{L \cdot K}{v_0^2 k}} \cdot dv_0 \quad (ع. د) \quad K \cdot s$$





(شكل ١١ - ٦)

نضع أمام القرص P مصدراً للأشعة الجزيئية كفرن حرارى لتبخير الزيتق فتخرج ذرات الزيتق من القرن م (درجة حرارته ثابتة) وتكون لها سرعات ع يمكن قياسها عن طريق إدارة المحور الدوراني بسرعة زاوية  $\omega$  تزداد تدريجياً حتى تصل ذرات الزيتق التي مرت من فتحة القرص P إلى الفتحة النائية على القرص ب لتلك الفتحة المقابلة التي مر خلالها بخار الزيتق من P وتصل بذلك إلى جهاز الاستقبال ل. نفرض أن ز هو الزمن الذي أخذه بخار الزيتق لينتقل المسافة ف. بين القرصين تكين

$$\text{سرعة الجزيئات ع} = \frac{ف}{ز}$$

أثناء هذا الزمن ز يكون القرص قد دار خلال زاوية  $\psi$  هي

$$\psi = \omega \cdot ز = \frac{ف \cdot \omega}{ع}$$

أى أن الذرات التي لها سرعات ع =  $\frac{ف \cdot \omega}{\psi}$  هي فقط التي تستطيع المرور من فتحات القرص ب

ويمكن تسجيلها بواسطة المستقبل ل.

وإذا كان اتساع الفتحة (انظر الشكل) بالتقدير الزاوى هو  $\alpha$  يكون للذرات التي استطاعت

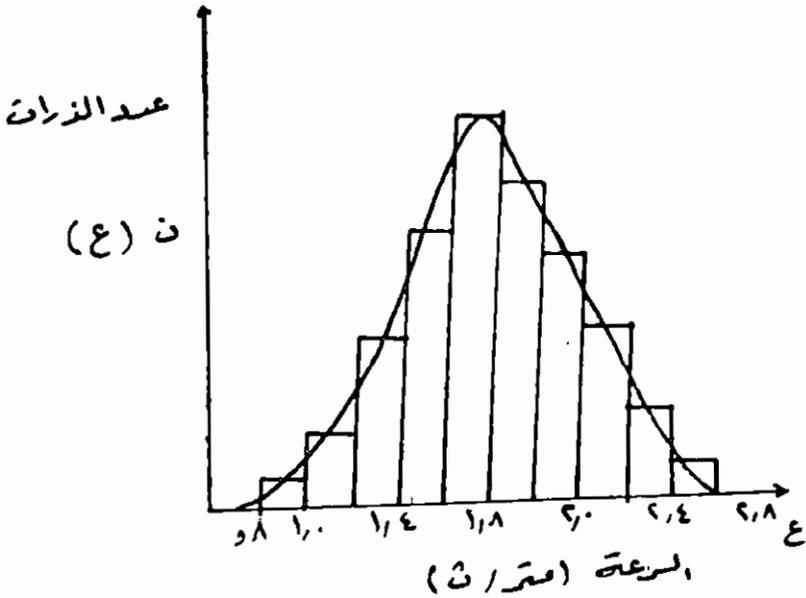
$$\text{المرور من خلال القرصين P ، ب سرعات تقع بين ع}_1 = \frac{ف \cdot \omega}{(\alpha + \psi)} ، \text{ ع}_2 = \frac{ف \cdot \omega}{(\alpha - \psi)}$$

وبهذه الطريقة وبتغيير سرعة دوران المحور والقرصين يمكن لنا أن ندرس جزءاً فقط من طيف

السرعات لبخار الزيتق الخارج من المصدر ذو درجة الحرارة م. ولكي نزيد من حساسية الجهاز

يمكن زيادة عدد الفتحات المتقابلة في القرصين P ، ب.

وبدراسة تغير كثافة بخار الزيتق المتكثف على المستقبل ل مع سرعة ذرات الزيتق أمكن الحصول



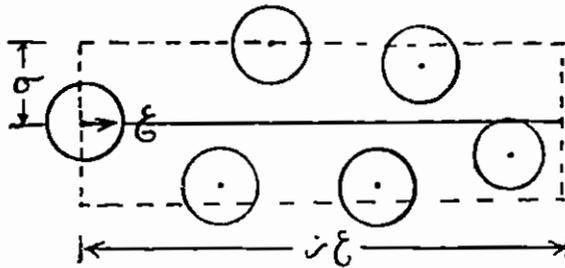
(شكل ١١ - ٧)

على منحنى كالمبين بشيكل (٧-١١) ويلاحظ تطابق النتائج العملية المبينة بالمنحنى السلمي مع النتائج المحسوبة نظرياً باستخدام دالة التوزيع لماكسويل وهي المبينة بالشكل المنحنى .

متوسط طول المسار الحر للجزيء : mean free path

هو المسافة المتوسطة التي يقطعها الجزيء بين تصادمين متتالين . نفرض أن قطر الجزيء  $\sigma$  وأنه يتحرك بسرعة  $c$  بين جزيئات الغاز التي سنفرض أنها في حالة سكون (شكل ١١ - ٨) .

يتصادم هذا الجزيء مع جميع الجزيئات التي توجد مراكزها داخل أسطوانة مساحة مقطعها  $\sigma^2$



(شكل ١١ - ٨)

ومحورها هونفس مسار الجزيء المتحرك . في زمن  $\tau$  يتحرك الجزيء مسافة  $c \cdot \tau$  . جميع الجزيئات الموجودة في الحجم  $\tau^3$  ،  $c \cdot \tau$  سوف تصادم مع هذا الجزيء .

$$\text{عدد التصادمات في الزمن } \tau = \tau^3 c \cdot \tau$$

حيث  $\tau$  هو عدد الجزيئات في وحدة الحجم من الغاز .

$$\lambda = \frac{\text{المسافة الكلية المقطوعة في زمن } \tau \text{ ثانية}}{\text{عدد التصادمات}}$$

$$\lambda = \frac{c \cdot \tau^4}{\tau^3 c \cdot \tau} = \frac{1}{\tau}$$

ولا كانت جميع جزيئات الغاز متحركة وليست ساكنة كما في الفرض هنا فإن تصحيح ذلك يعطى عدد تصادمات أكثر بمقدار  $\sqrt{2}$  ويكون بذلك

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2} \tau}$$

ولا كاذ ضغط الغاز يتناسب طردياً مع كثافته أي على عدد الجزيئات في وحدة الحجم لذلك فإن متوسط طول المسار الحر يتناسب عكسياً مع ضغط الغاز .

### ظواهر الانتقال في الغازات : Transport phenomena

إذا لم يكن الغاز في حالة استقرار فإن إحدى الحالات الثلاث الآتية لا بد أن تحدث :

١ - إذا لم تكن سرعة تدفق الغاز واحدة في كل أجزائه تتكون حركة نسبية بين طبقاته وتعطى هذه الحالة ظاهرة اللزوجة .

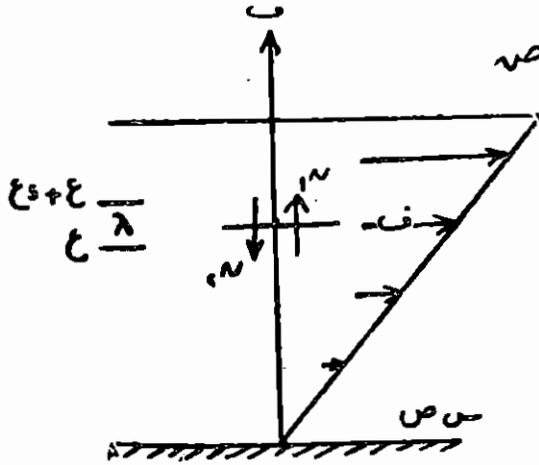
٢ - إذا لم تكن درجة حرارة لغاز واحدة في كل أجزائه فإن الجزيئات ذات الطاقة العالية تنتقل إلى الأماكن التي تكون طاقة الجزيئات فيها أقل وهذه تعطى ظاهرة التوصيل الحرارى .

٣ - عندما يكون تركيز جزيئات الغاز مختلفاً في الأماكن المختلفة تنتقل الجزيئات من المناطق ذات الكثافة العالية إلى المناطق الأقل كثافة وتتكون بذلك ظاهرة الانتشار .

وهذا يعنى أن ظواهر اللزوجة والتوصيل الحرارى والانتشار في الغازات تمثل في حقيقة الأمر عمليات تنتقل فيها كمية الحركة ، والطاقة ، والكتلة للجزيئات التي تكون دائماً في حالة حركة .

لزوجة الغازات باستخدام نظرية الحركة :

اعتبر غازاً يتحرك في اتجاه معين على سطح أفقى س ص بحيث تتحرك طبقات الغاز موازية له وليست عمودية عليه (شكل ١١ - ١١) . إذا كانت سرعة تدفق طبقة معينة على ارتفاع ف من السطح هي ع فإن جزيئات الغاز فوق الطبقة ف لها سرعات أكبر من الجزيئات تحت هذه الطبقة ولذلك فكمية حركتها تكون أكبر .



(شكل ١١ - ١١)

إذا انتقل جزيء من طبقة فوق ف إلى طبقة تحتها فإنه يفقد كمية حركة وذلك بسبب نقص سرعته وبالعكس إذا انتقل جزيء إلى طبقة عليا فإنه يكتسب كمية حركة لزيادة سرعته في الطبقة الأعلى . بما أن حركة الطبقات المكونة للغاز كلها في اتجاه س ص وبما أنه لا توجد حركة عمودية للغاز فإن عدد الجزيئات  $n$  الذي يعبر طبقة ف إلى أعلى لا بد أن يساوى عدد الجزيئات  $n$  الذي يعبرها إلى أسفل .

إذا كانت  $\lambda$  هي متوسط طول المسار الحر للجزيء عند الطبقة ف حيث معدل تغير السرعة

مع المسافة هو  $\frac{c}{\lambda}$  فإن الفرق بين متوسط السرعة الجزيئية بين طبقتين يفصلهما مسافة  $\lambda$  هو :

$\lambda \cdot \frac{c}{\lambda}$  . وتكون كمية الحركة التي تنتقل عند عبور جزيء كتلته ك هي :  $\lambda \cdot \frac{c}{\lambda}$  وإذا كانت

$n$  هي عدد الجزيئات من الغاز في وحدة الحجم .

∴ عدد الجزيئات الذي يعبر وحدة المساحات من الطبقة ف في الثانية =  $\frac{1}{4} v \bar{c}$  حيث  $\bar{c}$  هي السرعة المتوسطة لجزيئات الغاز عند هذه الدرجة من الحرارة .

كمية الحركة الكلية التي تنتقل في الثانية الواحدة خلال وحدة المساحات =  $\frac{1}{4} k v \bar{c} \lambda \frac{g}{cm^3}$  وهذه الكمية تحدث قوة مماسية على طبقات الغاز السفلى . ومن تعريف اللزوجة  $\eta$

$$\frac{g}{cm^3} \eta = \text{القوة المماسية على وحدة المساحات}$$

$$\therefore \frac{g}{cm^3} \eta = \frac{1}{4} k v \bar{c} \lambda \frac{g}{cm^3}$$

$$\eta = \frac{1}{4} k v \bar{c} \lambda$$

حيث  $\delta = k v =$  كثافة الغاز .

ولما كانت  $\lambda$  تتناسب عكسيًا مع كثافة الغاز  $\delta$  لذلك فإن لزوجته لا توقف على ضغط الغاز عند درجة الحرارة الواحدة .

مثال ١ - أوجد متوسط طول المسار الحر للأيدروجين عند المعدلين إذا علم أن معامل اللزوجة بوحدات سم . جم . ث هو ٠,٠٠٠٠٠٨ وكثافة الأيدروجين في المعدلين = ٠,٠٠٠٠٠٩ جم / سم<sup>٣</sup>

$$\text{معامل اللزوجة } \eta = \frac{1}{4} \lambda \delta \bar{c}$$

$$\text{وكذلك } \eta = \frac{1}{4} \delta \bar{c}^2$$

$$\therefore \lambda = \frac{\eta}{\delta} \sqrt{\frac{3}{\delta}} = \frac{\eta}{\delta} \sqrt{\frac{3}{\delta}}$$

$$\therefore \lambda = \frac{0,000008}{0,000009 \times 980 \times 13,6 \times 76} \sqrt{3} = 1,45 \times 10^{-10} \text{ سم}$$

مثال ٢ - أوجد عدد التصادمات في الثانية لجزيئات غاز في المثال السابق

$$\text{عدد التصادمات في الثانية} = \frac{\text{السرعة المتوسطة}}{\text{متوسط طول المسار الحر}}$$

٢٠٥

$$\frac{980 \times 13,6 \times 76}{0,0008} = \frac{\sigma}{\eta} = \frac{c}{\lambda} =$$

$$= 1,25 \times 10^{10} \text{ تصادم في الثانية}$$

مثال ٣- أوجد قطر الجزيء لغاز الأيدروجين باستخدام البيانات السابقة علماً بأن الكثافة الجزيئية

$$\text{للأيدروجين} = 2,705 \times 10^{-10}$$

الحل :

$$\frac{1}{\sqrt{2} \cdot \sigma \cdot v} = \lambda \text{ متوسط طول المسار}$$

حيث  $\sigma$  هو قطر الجزيء

$$\frac{1}{10 \times 6,45 \times 10^{10} \times 2,705 \times 3,14 \times 1,414} = \sigma$$

$$\sigma = 2,3 \times 10^{-8} \text{ سم}$$

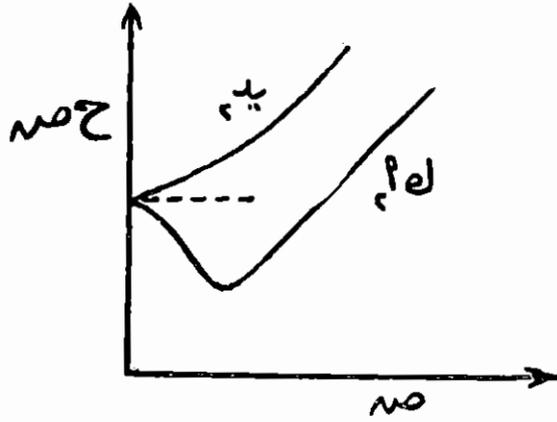


## الباب الثاني عشر

### خواص الغازات والأبخرة

#### ١٢ - ١ حيود الغازات الحقيقية عن قوانين الغاز المثالي :

تدل المشاهدات على أن قوانين الغاز المثالي لا تنطبق تماماً على الغازات الحقيقية ويتوقف حيودها عن هذه القوانين على ظروف الضغط ودرجة الحرارة . فإذا اعتبرنا مثلاً قانون بويل فإن حاصل ضرب حجم كمية معينة من غاز في ضغطه يجب أن يظل ثابتاً لا يتوقف على ضغط الغاز طالما ظلت درجة الحرارة ثابتة وقد وجد بالتجربة أن الغازات الحقيقية تعطي نتائج مختلفة كما توضحه المنحنيات المبينة بشكل (١٢ - ١) في حالة الهيدروجين تزداد قيمة  $P \cdot V$  تدريجياً بازدياد الضغط عند درجة حرارة الغرفة



(شكل ١٢ - ١)

أما في حالة ثاني أكسيد الكربون فإن قيمة  $P \cdot V$  تقل أولاً بازدياد الضغط حتى تصل نهاية صغيرة ثم تزداد قيمتها بعد ذلك باستمرار الزيادة في الضغط .

ويمكن تفسير هذا الحيود بما يأتي :

١ - توجد قوى تجاذب بين جزيئات الغاز الحقيقي تظهر أهميتها عند الضغوط الصغيرة حيث تصبح قيمتها محسوسة نسبياً .

٢ - لجزيئات الغاز الحقيقي حجم فعلي ويكون أثر هذا الحجم واضحاً تحت الضغوط العالية

عندما يصبح حجم هذه الجزيئات محسوساً بالنسبة إلى الحجم الذي يشغله الغاز ولا يمكن إهماله عندئذ .

### ١٢ - ٢ معادلة فان درفال للغازات الحقيقية : Van der Waal's equation

تعتبر معادلة فان درفال من أبسط المحاولات التي أدخلت في الاعتبار تصحيح العوامل المتسببة في حيود الغازات الحقيقية . وقد أجرى فان درفال تصحيحين الأول خاص بضغط الغاز والثاني خاص بحجمه .

من المعروف أن ضغط الغاز يرجع إلى دفع الجزيئات لجدران الإناء الحاوي له وهذا يتوقف على عدد مرات تصادم الجزيئات بالجدران في الثانية . في حالة الغاز الحقيقي يوجد بين جزيئاته قوى جاذبة ، يقع كل جزيء قريب من الجدران تحت تأثير القوى الجزيئية التي تجذبه للداخل فتقل سرعته وبالتالي يقل دفعه للجدران أي يقل ضغط الغاز ولذلك يكون الضغط المشاهد أقل من الضغط المثالي لو لم تكن هناك قوى جزيئية جاذبة .

يلزم إذن إضافة مقدار من الضغط  $p_c$  إلى الضغط المشاهد  $p$  ويعرف بالضغط الداخلي للغاز . ولما كانت القوى الجزيئية تتناسب مع مربع عدد الجزيئات في وحدة الحجم من الغاز  $(n^2)$  وأن  $p_c$  تتناسب عكسياً مع حجم الغاز  $V$  للجرام الجزيئي فيون :

$$p_c \propto n^2 \propto \frac{1}{V^2} \text{ أي أن}$$

$$p_c = \frac{a}{V^2} \text{ حيث } a \text{ مقدار ثابت .}$$

ولذلك يستبدل ضغط الغاز المثالي  $p_0$  بالمقدار  $(p + \frac{a}{V^2})$  وذلك لتصحيح وجود القوى

الجزيئية .

والتصحيح الثاني خاص بالحجم . فالحجم المشاهد لأي غاز حقيقي هو في الواقع حجم الحيز الذي تتحرك فيه الجزيئات . ولايجاد الحجم المثالي يجب طرح مقدار معين منه يتناسب مع حجم جزيئات الغاز أي أن الحجم المشاهد  $V_0$  يعدل إلى  $(V - b)$  .

وبذلك تكون الصورة النهائية للمعادلة العامة للغازات الحقيقية هي :

$$(p + \frac{a}{V^2}) (V - b) = RT \quad (12 - 1)$$

وتعرف هذه المعادلة بمعادلة فان درفال .

ولتعيين قيمة ثوابت المعادلة  $P$  ، ب عملياً نستخدم جهاز جولى أو الترمومتر الغازى ذا الحجم الثابت . ندرس تغير ضغط الغاز مع درجة حرارته وترسم ذلك بيانياً فنحصل على علاقة خط مستقيم ليكن ميله  $m$  .

من معادلة فان درفال :

$$\frac{P}{T} = \frac{P}{T_0} + m$$

$$\therefore \frac{P}{T} - \frac{P}{T_0} = m$$

تمثل هذه المعادلة خطاً مستقيماً المتغير الصادى فيه هو الضغط  $P$  والمتغير السينى هو درجة الحرارة  $T$  .

$$\text{ميل الخط } m = \frac{P}{T}$$

$$\text{ومنه } P = \left( \frac{P}{T} - m \right) T$$

وبالتعويض فى معادلة فان درفال نحصل على :

$$P = (mT - P_0) T$$

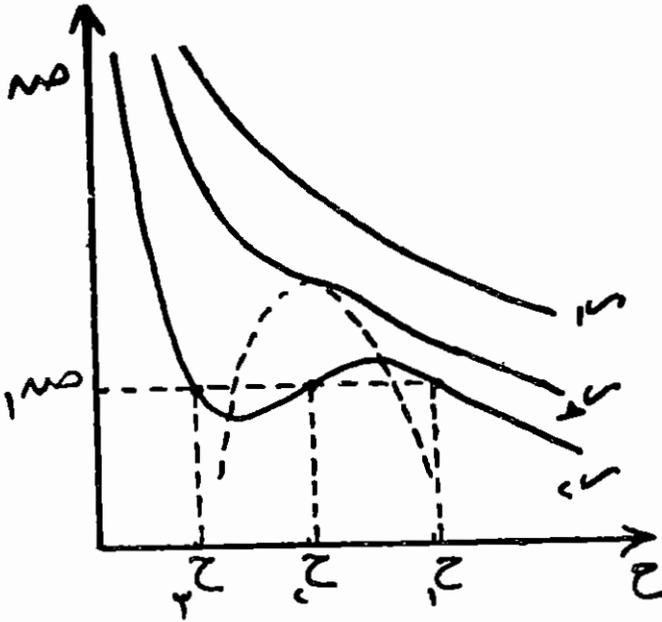
وبمعرفة حالة الغاز الابتدائية  $P_0$  ،  $m$  ، وكذلك معدل تغير ضغطه مع درجة الحرارة ( $m$ ) يمكن إيجاد الثوابت  $P$  ، ب عملياً .

### ١٢-٣ مناقشة معادلة فان درفال :

عند فك معادلة فان درفال فإننا نحصل على معادلة من الدرجة الثالثة فى الحجم  $V$  .

$$PV^3 - (P_0 + mT)V^2 + P_0V - P_0V_0 = 0$$

ول هذه المعادلة ثلاثة جذور إما أن تكون جميعها حقيقية أو أن يكون واحداً فقط حقيقياً والآخران تخيليان . فإذا رسمنا العلاقة بين الضغط والحجم لدرجات حرارة مختلفة فإننا نحصل على منحنيات كالمبيته بشكل (١٢ - ٢) . ويلاحظ وجود نقطتا نهاية صغيرة وكبرى لكل منحنى درجة الحرارة له أقل من درجة معينة تسمى بالدرجة الحرجة ،  $T_c$  ، بينما تختفى تماماً هاتان النقطتان



(شكل ١٢-٢)

للدرجات الأعلى من  $P_0$  . وهذا يعني وجود ثلاثة أحجام  $V_1$  ،  $V_2$  ،  $V_3$  لكل ضغط من المنحنيات ذات الدرجة المنخفضة بينما يوجد حجم واحد حقيقي يناظر كل ضغط بالنسبة للمنحنيات ذات الدرجة المرتفعة . وعند المنحنى الحرج تتساوى جذور المعادلة وتكون كلها حقيقية . وتكون بذلك معادلة المنحنى الحرج هي :

$$(P - P_0)^3 = \text{صفر أي}$$

$$P^3 - 3P_0P^2 + 3P_0^2P - P_0^3 = \text{صفر؟}$$

وبمطابقة هذه المعادلة بمعادلة فان درفال (١١-١) وبمساواة معاملات الحدود تحصل على :

$$3P_0^2 = 3P_0 + 3P_0^2 + 3P_0^2$$

$$P_0 = 3P_0^2 + 3P_0^2$$

$$P_0 = 3P_0^2 + 3P_0^2$$

حيث  $P_0$  ،  $P_0^2$  هما الحجم والضغط الحرج للغاز .

بحل المعادلات السابقة نحصل على إحداثيات النقطة الحرجة  $P_0 = 3P_0^2 + 3P_0^2$  .

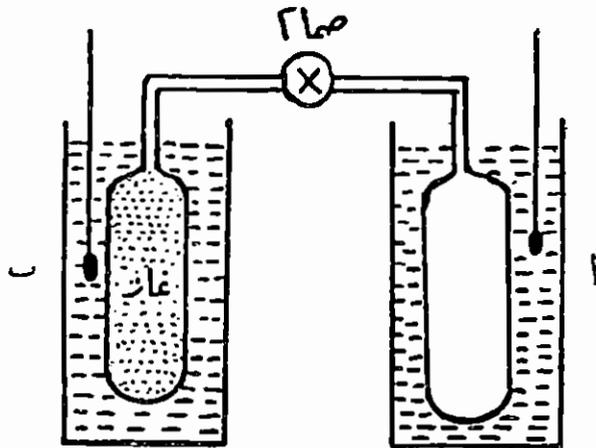
$$(٢ - ١١) \dots \dots \dots \left\{ \begin{array}{l} \text{ع} = ٣ - \text{ب} \\ \frac{\text{ب}}{\text{ب} ٢٧} = \text{ص} \\ \frac{\text{ب} ٢٨}{\text{ب} ٢٧} = \text{ص} \end{array} \right.$$

ويحساب الدرجة الحرجة لغاز مثل ثاني أكسيد الكربون من المعادلات السابقة وجد أنها تساوي ٣١١ م° بينما القيمة العملية لها حوالي ٣٢ م° وهذا دليل يؤكد صحة معادلة فان درفال وإمكان تطبيقها في حالة الغازات الحقيقية .

#### ١٢ - ٤ تحقيق وجود القوى الجزيئية عملياً :

أجرى جول التجربة الآتية على التمدد الحر لغاز حقيقي :

١. ب أسطوانتان من الحديد (شكل ١١ - ٣) يتصلان بأنبوبة يقفلها صمام . توضع كل أسطوانة في مسعر به ماء ويمكن قياس درجة حرارة الماء بدقة كبيرة بواسطة ترمومتر حساس . يوجد الغاز في الأسطوانة ب تحت ضغط كبير حوالي ٢٠ جو بينما تكون الأسطوانة ب مفرغة تماماً . عندما يفتح



(شكل ١٢ - ٣)

الصمام يتدفق الغاز من الأسطوانة ب. ليملاً الأسطوانة ب وهو بذلك يتمدد تمنداً حرّاً يبذل أثناءه شغلاً ميكانيكياً على حساب الطاقة الداخلية للغاز في الأسطوانة ب وبذلك تقل طاقة الحركة للجزيئات فتتخفض درجة حرارة الغاز . وقد تمكن جول فعلاً من تسجيل انخفاض في درجة حرارة المسعر ب مما يثبت وجود

هذه القوى الجزيئية. إذ لو كان الغاز مثاليًا لما حدث تغير في الطاقة الداخلية له نتيجة لتمدده وهذا هو ما ينص عليه قانون جول بأن الطاقة الداخلية للغاز المثالي لا تتوقف على حجمه بل تتوقف فقط على درجة حرارته .

### الشغل المبذول من الغاز عند تمدده ضد القوى الجزيئية :

سبق أن أوضحنا أن الشغل المبذول من الغاز عند التمدد الحر من الحجم ح! إلى ح٢ يساوي.

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p \, dV$$

$$\therefore \text{ش} = \int_{V_1}^{V_2} \frac{p}{V} \, dV = \int_{V_1}^{V_2} \frac{p}{V} \, dV$$

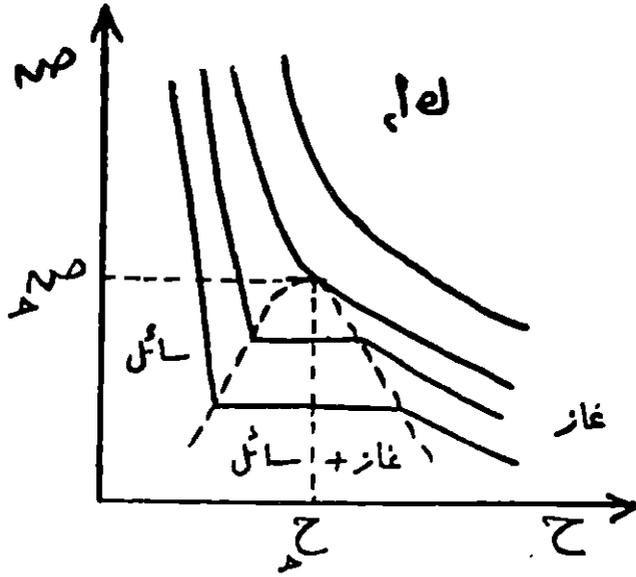
$$= \int_{V_1}^{V_2} \left( \frac{p}{V} - \frac{p}{V} \right) \, dV$$

### ١٢ - ٥ إسالة الغازات : Liquifaction of gases

من المعروف أن المادة ثلاث حالات . الصلبة - السائلة - والغازية . ومن الممكن تحويل المادة من حالة إلى أخرى بتغير درجة الحرارة . فعند تبريد غاز ما تقل طاقة الحركة لجزيئاته تدريجياً حتى تصل إلى درجة حرارة يسيل عندها الغاز . وقد أمكن إسالة كثير من الغازات بسهولة تحت ظروف من الضغط المرتفع ودرجة الحرارة المنخفضة . وقد وجد أن الغاز لا يسيل تحت تأثير الضغوط الكبيرة إلا إذا كانت درجة حرارته أقل من درجة معينة يتميز بها كل غاز عن غيره وتتوقف على طبيعته وتسمى بالدرجة الحرجة .

ولا يسيل الغاز مطلقاً مهما أثرتنا عليه من ضغوط طالما كانت درجة حرارته أعلى من هذه الدرجة الحرجة . وهذا هو ما توصل إليه أندروز من دراسة تغير ضغط غاز ثاني أكسيد الكربون مع حجمه عند درجات الحرارة المختلفة . ويبين شكل (١٢ - ٤) مجموعة المنحنيات التي حصل عليها من تجاربه حيث تمثل المنطقة المحددة بخط منتموط وجود الحالتين السائلة والغازية معاً لثاني أكسيد الكربون في حالة اتزان .

ويسمى المنحنى ذو الدرجة الثانية  $MM'$  والذي يمر بقمة هذه المساحة عنه النقطة  $C$  ،  $CC'$  بالمنحنى الحرج كما تسمى النقطة  $C$   $CC'$  بالنقطة الحرجة .



(شكل ١٢ - ٤)

ويعرف الضغط الحرج  $P_c$  بأنه الضغط الذي يلزم استخدامه عند الدرجة الحرجة لإسالة غاز ما كما يعرف بالحجم الحرج بأنه الحجم الذي يشغله جرام جزئى من الغاز عند الدرجة الحرجة والضغط الحرج .

نستنتج مما سبق أنه لإسالة غاز ما يجب أولاً تبريده لدرجة أقل من الدرجة الحرجة له حتى يستجيب للضغوط المرتفعة ويتحول من الحالة الغازية إلى الحالة السائلة . وتتوقف طريقة التبريد على الطبيعة الحرارية للغاز . وفيما يلي عرض سريع للطرق المختلفة للوصول إلى درجات الحرارة المنخفضة .

## ١٢ - ٦ الطرق المختلفة للوصول إلى درجات الحرارة المنخفضة :

### ١ - التبريد بواسطة البخار :

إذا ترك سائل ما في مكان مفتوح فإنه يتحول تدريجياً إلى الحالة البخارية بسبب انطلاق جزيئاته إلى الجو الذى يعلوه . ويلاحظ عندئذ حدوث تبريد في جسم السائل بسبب هذا البخار . ويمكن تفسير هذه الظاهرة بواسطة نظرية الحركة التى تقضى بوجود جزيئات في السائل تتحرك بسرعات مختلفة . وتتوقف السرعة المتوسطة لهذه الجزيئات على درجة حرارة السائل . فإذا اعتبرنا الجزيئات القريبة من السطح الحر للسائل فإن الجزيئات ذات السرعات الكبيرة تستطيع التغلب على القوى الجزيئية التى تربطها بجسم السائل فتحرره وتكون ما يسمى ببخار السائل . عندما يفقد السائل جزيئاته ذات طاقة الحركة الكبيرة يقل

متوسط طاقة الحركة للجزيء عما كانت عليه من قبل البحر وبذلك تنخفض درجة حرارة السائل .

ومن الاستعمالات الطبية الهامة لهذه النظرية عملية التخدير الموضعي حيث يستخدم سائل سريع التطاير مثل الأثير أو كلوريد الميثيل . عندما يوضع هذا السائل على مكان ما من الجسم فإنه يتبخر بسرعة تمتصاً حرارة التبخر من الجسم نفسه وتكفي البرودة الناشئة عن ذلك لتخدير أعصاب هذه المنطقة موضعياً وبالمثل فإن تبخر العرق من سطح جسم الإنسان يعمل على ترطيبه وتنظيم درجة حرارته خصوصاً في الأجواء الحارة حيث لا يتمكن الجسم من التخلص من الطاقة الحرارية الزائدة عن حاجته بطريقة التبريد المعتاد وذلك لتقص معدل التبريد من الجسم عندما ترتفع درجة حرارة الجو وتقترب من درجة حرارة جسم الإنسان .

وتستخدم أيضاً هذه الطريقة لتبريد مياه الشرب في بعض البلاد بوضعها في أوان فخارية مسامية يرشح منها الماء على سطحها الخارجي عندما توضع هذه الآنية في تيار هواء تزداد سرعة البحر من سطحها الخارجي وتمتص حرارة التبخر من الماء فتتخفض درجة حرارته .

وتصلح هذه الطريقة في الأجواء الحافة فقط حيث يكون معدل التبخر كبيراً .

أما في الأماكن الرطبة والقريبة من البحار يكون هذا المعدل صغيراً فلا يحدث هناك تغير يذكر في درجة الحرارة لهذه الظاهرة .

## ٢ - التبريد بواسطة المخالط المبردة :

إذا خلطت كمية من ملح الطعام مع جليد مجروش يلاحظ انخفاض في درجة حرارة المخلول عن درجة الصفر المئوي . وتفسر هذه الظاهرة بأن الملح عند ذوبانه في الماء يمتص حرارة الذوبان من الوسط المحيط أي من الجليد المجروش فتتخفض بذلك درجة حرارته عن الصفر المئوي .

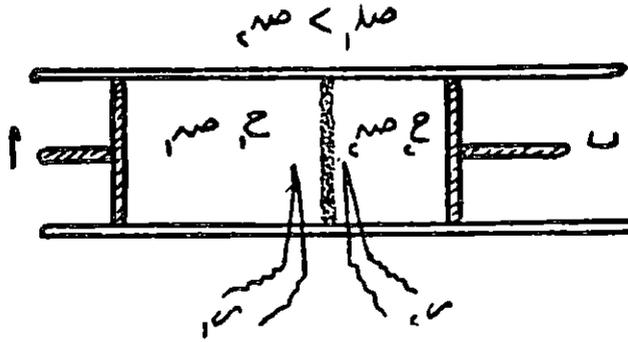
## ٣ - التبريد بواسطة التمدد الحر للغازات المعزولة حرارياً :

سبق أن تكلمنا عن التمدد الحر للغازات الحقيقية وكيفية حدوث تبريد فيها إذا كانت معزولة حرارياً (راجع تجربة جول للتمدد الحر) وقد بينا حينئذ أن الطاقة اللازمة للغاز لكي يعمل شغلا ميكانيكياً عندما يتمدد تمتص من طاقة حركة جزيئاته ولذلك يبرد .

## ٤ - التبريد بواسطة تأثير جول - كلفن :

إذا ضغط غاز وهو معزول عزلاً حرارياً ثم سمح له بالمرور خلال فتحة ضيقة أو حاجز مسامي إلى حيز يتمدد فيه ويقل ضغطه تبعاً لذلك فإنه يلاحظ انخفاض في درجة حرارته . ويسمى هذا الانخفاض بتأثير جول - كلفن نسبة إلى مكتشفه . وقد استخدم جول وكلفن أسطوانة معزولة حرارياً بها غاز

ويقلها من طرفها مكيسان  $\rho$  ، ب حرا الحركة يوجد بينهما حاجز مسامي يقلل الأسطوانة تماماً في منتصفها ( انظر شكل ١٢ - ٥ ) .



(شكل ١٢ - ٥)

عندما يدفع المكبس  $\rho$  لكي يتحرك جهة الحاجز المسامي ، تمر جزيئات الغاز الموجود أصلاً بالأسطوانة من مسام الحاجز وذلك تحت تأثير الضغط  $\rho$  في الناحية اليسرى منه ثم تدفع حينئذ جزيئات الغاز بعد مرورها من الحاجز المكبس ب حيث يصبح الضغط في الناحية اليمنى  $\rho$  ويمكن قياس درجة الحرارة على جانبي الحاجز المسامي بواسطة ترمومتران  $\rho$  ،  $\rho$  .

وقد وجد جول وكلفن انخفاضاً في درجة حرارة الغاز عند إمراره من الحاجز وأن هذا الانخفاض يتناسب طردياً مع الفرق بين ضغطي الغاز على جانبي الحاجز أي مع (  $\rho$  -  $\rho$  ) . أي أن

$$(\rho - \rho) \cdot \theta = (\rho - \rho)$$

حيث  $\theta$  هو مقدار ثابت يميز الغاز وقد وجد عملياً أنه يتناسب مع مقلوب مربع درجة الحرارة المطلقة عند إجراء التجربة . وقد لوحظ أنه عندما أجريت التجربة عند درجات حرارة مرتفعة كان تأثير جول كلفن سالباً بمعنى أنه أحدث تسخيناً للغاز عند مروره من الحاجز وليس تبريداً . وقد استنبط جول وكلفن من ذلك أنه توجد درجة حرارة أسمياها درجة التحول (inversion temperature) لا يحدث عندها تغير في درجة حرارة الغاز عند إمراره من الحاجز المسامي بينما يحدث له تسخيناً إذا أعيد ضغطه ليمر خلال الحاجز عند درجة أعلى من هذه الدرجة وتبريداً إذا أعيدت التجربة عند درجة أقل منها .

### تفسير ظاهرة جول - كلفن :

اعتبر واحد جرام من غاز موضوع بالأسطوانة في الجانب الأيسر من الحاجز المسامي (شكل ١٢-٥) عند ضغط الغاز لكي يمر من الحاجز يكون الشغل الخارجى على الغاز مساوياً  $\rho$  ، بينما يبذل الغاز على

المكبس ب في الناحية الأخرى شغلا مساوياً ع<sub>٢</sub> ص<sub>٢</sub> . إذا كان الغاز مثالياً فإن ع<sub>١</sub> ص<sub>١</sub> = ع<sub>٢</sub> ص<sub>٢</sub> ولا يحدث عندئذ تغير في الطاقة الداخلية للغاز أي أنه لا يحدث تبريداً أو تسخيناً .

أما في حالة الغازات الحقيقية ، نفرض أن الطاقة الداخلية للغاز قبل وبعد إمراره من الحاجز المسامي هي ط<sub>١</sub> ، ط<sub>٢</sub> على الترتيب . وبتطبيق قانون بقاء الطاقة باعتبار أن الغاز داخل الأسطوانة يكون مجموعة معزولة حرارياً يكون :

$$ص<sub>١</sub> ع<sub>١</sub> + ط<sub>١</sub> = ص<sub>٢</sub> ع<sub>٢</sub> + ط<sub>٢</sub>$$

فإذا كان الشغل المبذول على الغاز ع<sub>١</sub> ص<sub>١</sub> أكبر من الشغل ع<sub>٢</sub> ص<sub>٢</sub> الذي يبذله الغاز عند دفع المكبس ب للخارج في الناحية الأخرى من الأسطوانة فإن ط<sub>٢</sub> تكون أكبر من ط<sub>١</sub> ويحدث لذلك تسخيناً نظراً لزيادة الطاقة الداخلية للغاز بعد انتقاله .

أما إذا حدث عكس ذلك بأن كان ع<sub>٢</sub> ص<sub>٢</sub> < ع<sub>١</sub> ص<sub>١</sub> يكون ط<sub>٢</sub> أقل من ط<sub>١</sub> ويحدث لذلك انخفاضاً في درجة حرارة الغاز ويوجد لكل غاز درجة حرارة تسمى بدرجة التحول تتغير بعدها ظاهرة جزل - كلفن من التبريد إلى التسخين إذا ارتفعنا عنها .

### حساب درجة التحول للغاز :

سبق أن ذكرنا أن جزيئات الغاز الحقيقي يربطها قوى تتناسب مع مقلوب مربع حجم الغاز . ينتج عن هذا الفرض أن الشغل الداخلي الذي يبذله الغاز عندما يتمدد تمدداً حراً من الحجم ع<sub>١</sub> إلى ع<sub>٢</sub> هو

$$\left( \frac{P}{E_2} - \frac{P}{E_1} \right) \text{ ويبدل هذا الشغل لرفع طاقة الموضع للجزيئات عندما تتباعد عن بعضها بعد}$$

التمدد .

∴ الشغل الكلي الخارجى والداخلي المبذول في تجربة جول - كلفن هو :

$$ش = ع<sub>٢</sub> ص<sub>٢</sub> - ع<sub>١</sub> ص<sub>١</sub> + \frac{P}{E_2} - \frac{P}{E_1}$$

ولكن في معادلة فان درفال :

$$ع ص = \frac{P}{E} + ص - \frac{b}{E}$$

أى أن :

$$ع ص = ع ص - م - \frac{P}{E} + ص + \frac{b}{E}$$

ويمكن إهمال الحد  $\frac{p}{\rho}$  حيث إن كلا من  $p$  ،  $\rho$  مقادير صغيرة يكون حاصل ضربها مهملاً وبالتعويض بدلا من  $\rho = \frac{\rho}{\rho}$

$$\therefore \rho = \rho - \rho \frac{p}{\rho} + \rho$$

$$= \rho - \left( \frac{p}{\rho} \right) \rho =$$

وبالتعويض في معادلة الشغل الكلى نحصل على

$$ش = \left( \frac{p}{\rho} - \rho \right) (\rho - \rho)$$

ولكن بما أن الضغط  $\rho$  يجب أن يكون دائماً أكبر من  $\rho$  حتى يمكن للغاز المرور خلال الحاجز المسامي فإن :

$\rho - \rho$  تكون دائماً موجبة

$$\text{أى أن إشارة الشغل } ش \text{ تتوقف على إشارة } \left( \frac{p}{\rho} - \rho \right)$$

فإذا كانت  $\frac{p}{\rho} < \rho$  كانت إشارة الشغل موجبة وبذلك تنقص الطاقة الداخلية للغاز فيحدث

تبريداً. أما إذا كانت  $\frac{p}{\rho} > \rho$  فإن إشارة ش تصبح سالبة وتزداد طاقة الغاز الداخلية مما يسبب تسخيناً.

ولا يحدث تسخين أو تبريد عندما تكون درجة الحرارة عند الدرجة الحرجة التى تحددها المعادلة :

$$\rho = \frac{p}{\rho} \quad \dots \dots \dots (١٢ - ٣)$$

وتسمى هذه الدرجة بدرجة التحول . ويلاحظ أنها أكبر من الدرجة الحرجة للغاز إذ أن النسبة بينهما  $\frac{p}{\rho}$  . وهذه النتيجة هامة جداً عند إسالة الغازات الصعبة كالأيدروجين والهليوم فيبرد أولاً الغاز حتى درجة أقل من درجة التحول ثم بواسطة تأثير جول - كلفن يستمر تبريد الغاز حتى الوصول

للدرجة الحرجة  $\gamma$  ج التي يمكن بعدها إسالة الغاز بتأثير ضغط مرتفعة .

وتستخدم نظرية جول - كلفن في الثلاثجات الكهربائية حيث يضغط غاز النشادر أو الفريون بواسطة مضخة كهربائية ثم يترك ليتمدد فجأة خلال فتحة ضيقة فتتخفض درجة حرارته ثم يجمع الغاز ويضغط ثانية داخل أنابيب معينة تحيط بغرفة التبريد . وبتكرار العملية السابقة تنخفض درجة الحرارة للثلاجة للقيمة المطلوبة وبعدها يعمل منظم درجة الحرارة الموضوع بغرفة التبريد على إيقاف التيار الكهربائي عن موتور الثلاجة .

## ١٢ - ٧ خواص الأبخرة :

يتكون البخار فوق سطح أى سائل نتيجة لتيار من جزيئات السائل يغادر سطحه ليملأ الحيز فوقه . كما يتكون تيار آخر من الجزيئات ينتقل من هذا الحيز إلى السائل نفسه ويظل تيار الجزيئات الخارج من السائل أكبر من التيار الداخلى إلى أن يتشبع الحيز ببخار السائل ونصل إلى حالة الاتزان فيتساوى عندئذ عدد الجزيئات في كل من التيارين . يسمى الضغط الناشئ عن جزيئات السائل في الحيز فوقه بضغط البخار .

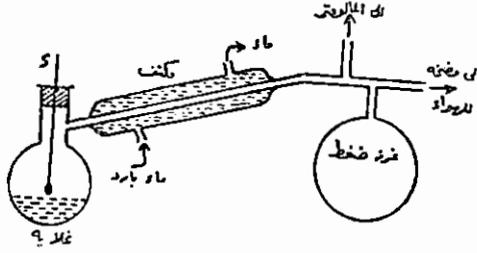
## تعيين ضغط البخار المشبع :

توجد طرق كثيرة لتعيين ضغط البخار المشبع لسائل . أبسط هذه الطرق هو استخدام فراغ توريشلى . إذا أدخلنا في هذا الفراغ قطرة من السائل المراد إيجاد ضغط البخار المشبع له تبخر ويضغط البخار الناتج على سطح الزئبق في الأنبوبة فيقل ارتفاعه فيها . وبتكرار إدخال قطرات من السائل حتى تنقل القطرة الأخيرة دون تبخر يكون الحيز فوق الزئبق قد أصبح مشبعاً بالبخار ويكون النقص في طول عمود الزئبق في الأنبوبة مساوياً لضغط البخار المشبع عند درجة حرارة التجربة .

ويمكن قياس ضغط البخار المشبع في درجات حرارة مختلفة وذلك بوضع الأنبوبة البارومترية في حمام مائى له درجة حرارة ثابتة .

ويتوقف ضغط البخار المشبع على درجة الحرارة فيزداد بارتفاعها حتى يصبح هذا الضغط مساوياً للضغط الجوي عندما تصل درجة حرارة السائل إلى نقطة الغليان ونمين فيما يلى كيفية إيجاد ضغط البخار المشبع بطريقة تغير نقطة الغليان بالضغط فوق السائل . يستخدم لإيجاد ضغط البخار المشبع لسائل خاصة ارتفاع نقطة الغليان بزيادة الضغط الواقع عليه .

ويركب الجهاز المستخدم لذلك كما في شكل (١٢ - ٦) من غلاية  $\Gamma$  يوضع بها السائل تحت الاختبار وتتصل بمكثف الغرض منه تكثيف بخار السائل ومنع وصوله لباقي أجزاء الجهاز . ويتصل المكثف



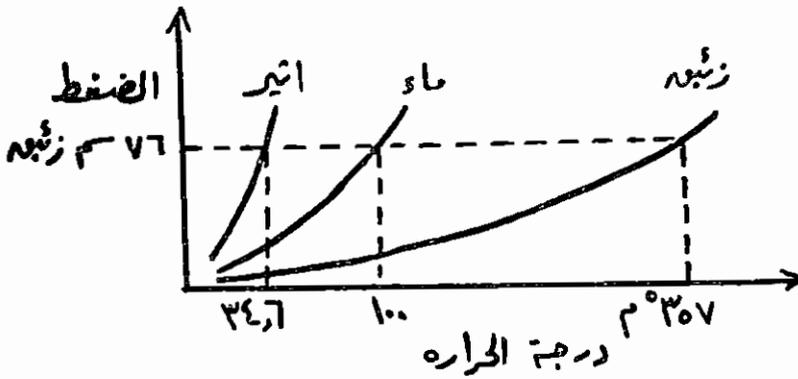
(شكل ١٢ - ٦)

بغرفة كبيرة الحجم لتنظيم الضغط داخل الجهاز والذي يمكن قياسه بواسطة مانومتر زئبقي . يضغط بعض الهواء داخل غرفة الضغط بواسطة مضخة كاسية ثم يسخن السائل في الغلاية إلى أن يبدأ في الغليان . يكون ضغط البخار المشبع عندئذ مساوياً لضغط الهواء الواقع عليه وتكون قراءة الترمومتر الموضوع فوق سطح السائل هي درجة غليانه تحت ذلك الضغط الذي تحدده قراءة المانومتر المتصل بالجهاز .

بتغيير مقدار الضغط فوق السائل وإعادة التجربة لإيجاد نقطة الغليان في كل حالة يمكن الحصول على منحنى التغير في ضغط البخار المشبع للسائل مع درجة الحرارة . ويبين شكل (١٢ - ٧) منحنيات التغير لكل من الأثير والماء والزئبق ويلاحظ أن درجة الحرارة المناظرة لضغط ٧٦ سم زئبق أي ضغط جوي تمثل درجة غليان السائل تحت الظروف الجوية الطبيعية .

#### ١٢ - ٨ الحرارة الكامنة للتصعيد وطريقة تعيينها :

تعرف كمية الحرارة اللازمة لتحويل ١ جم من السائل إلى بخار دون تغيير في درجة حرارته بالحرارة الكامنة للتصعيد . ويستخدم لتعيينها الطرق المتبعة عادة لإيجاد الحرارة النوعية للمواد وتعد الطريقة الكهروبايئة من أدق الطرق لذلك .



(شكل ١٢ - ٧)

يتركب الجهاز اللازم من أنبوبتين  $\uparrow$  ، ب شكل (١٢ - ٨) بكل منهما كمية من السائل المراد إيجاد حرارته الكامنة للتصعيد . يوجد بالأنبوبة  $\uparrow$  سلك تسخين يمكن أن يمرر به تيار كهربائي ويتصل بالأنبوبة  $\uparrow$  أنبوبة جانبية تتصل هي الأخرى بمكثف مائى وذلك لتكثيف وجمع ما يتبخر من سائل الأنبوبة  $\uparrow$  أثناء غليانه .

تبدأ التجربة بوضع الأنبوبتين في حمام ساخن لرفع درجة الحرارة إلى أن يغلى السائل في الأنبوبة ب ويتسبب البخار الساخن المتصاعد في تسخين السائل في الأنبوبة  $\uparrow$  حتى يصل إلى درجة حرارة الغليان دين أن يغلى .

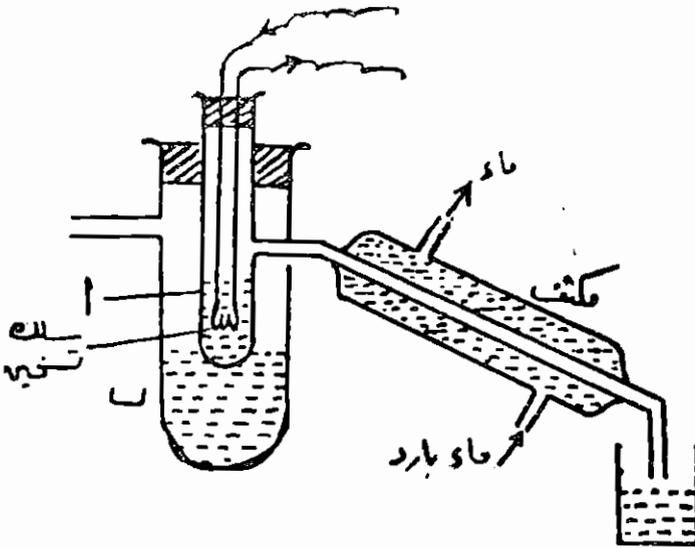
ثم يامرر تيار كهربائى ت في سلك التسخين لمدة ز ثانية يغلى السائل  $\uparrow$  بواسطة الطاقة الحرارية الناتجة عن التيار الكهربائى . فإذا كان فرق الجهد بين طرفى المقاومة  $\times$  فإن :

الشغل الكهربائى المبذول في هذا الزمن = ت .  $\times$  . ز جول

ويكافئ هذا الشغل كمية من الحرارة قدرها  $\frac{ت . \times . ز}{J}$  سعراً

حيث J هو المكافئ الكهربائى الحرارى .

هذه الكمية من الحرارة تستهلك في تحويل سائل الأنبوبة  $\uparrow$  إلى بخار دون تغيير في درجة الحرارة أى أنها تستهلك كحرارة كامنة للتصعيد . فإذا كانت كتلة البخار الذى تجمع داخل المكثف هي ك حتم



(شكل ١٢ - ٨)

وكانت الحرارة الكامنة للتصعيد هي ص سعر / جم فإن كمية الحرارة التي اكتسبها السائل ليتحول إلى بخار في نفس الدرجة تساوي ك ص وبذلك يكون :

$$ك ص = \frac{ت ح ز}{ج} \dots \dots \dots (١٢-٤)$$

ومن هذه المعادلة يمكن حساب الحرارة الكامنة لتصعيد السائل .

## ١٢ - ٩ قياس الرطوبة : Humidity

تحدد رطوبة الهواء بما فيه من بخار الماء . ويطلق لفظ الرطوبة المطلقة على كمية بخار الماء الموجودة فعلاً في وحدة الحجم من الجو .

يتوقف الإحساس بالرطوبة على درجة تشبع الجو بالبخار . فعندما يكون الجو بارداً تكني كمية قليلة من بخار الماء لتشعرك برطوبة الهواء وذلك لأن عند الدرجات المنخفضة تكني هذه الكمية القليلة من البخار لتشيعه . وبناء على هذا فالرطوبة النسبية وليست المطلقة هي التي تهتم في القياسات الميئورولوجية .

تعرف الرطوبة النسبية بالنسبة المئوية بين كمية بخار الماء الموجود في حجم معين من الهواء إلى كمية البخار اللازم لتشيع نفس هذا الحجم عند نفس درجة الحرارة . وباعتبار أن كمية البخار الموجودة متناسب طردياً مع ضغط البخار عند نفس الدرجة يصبح تعريف الرطوبة النسبية كما يأتي :

$$\text{الرطوبة النسبية} = \frac{\text{ضغط بخار الماء الموجود فعلاً في الهواء}}{\text{ضغط بخار الماء المشبع عند نفس درجة الحرارة}} \times 100$$

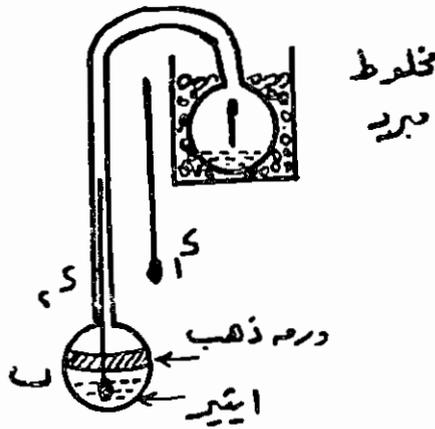
إذا بردنا الهواء تدريجياً فإننا نحصل على درجة حرارة تكون عندها كمية بخار الماء الموجودة فعلاً كافية لتشيعه عند هذه الدرجة ويطلق عليها نقطة الندى ، نسبة إلى بدء ظهور قطرات من الماء تعرف بالندى على الأجسام الباردة الملاصقة للهواء عند هذه الدرجة . ويكون بذلك ضغط بخار الماء عند درجة الغرفة مساوياً لضغط بخار الماء المشبع عند نقطة الندى تحت هذه الظروف . أي أن :

$$\text{الرطوبة النسبية} = \frac{\text{ضغط بخار الماء المشبع عند نقطة الندى}}{\text{ضغط بخار الماء المشبع عند درجة حرارة الغرفة}} \times 100$$

وبذلك يصبح إيجاد الرطوبة النسبية في الهواء قاصرة على تعيين نقطة الندى ودرجة حرارة الغرفة ومنهما توجد من الجداول ضغط البخار المشبع عند كل درجة ومن ثم نعين درجة الرطوبة النسبية من القانون .

## ١٢ - ١٠ هيجرومتر دانيال لإيجاد نقطة الندى :

يركب هيجرومتر دانيال كما في شكل (١٢-٩) من انتفاخين من الزجاج A ، ب يتصلان



(شكل ١٢ - ٩)

بأنبوبة مثنية كما هو مبين بالشكل يوجد بداخلهما كمية من سائل سريع التطاير مثل الأثير. مثبت على الفقاعة ب شريط معدني لامع (ورقة ذهب) ، الغرض منه مراقبة بدء تكثيف بخار الماء وتكوين الندى .

تبدأ التجربة بإعداد الجهاز للعمل وذلك بتحويل كل الأثير إلى الفقاعة ب مع ترك أ خالية . ثم يوضع مخلوط مبرد حول أ وبذلك يتكثف بخار الأثير داخلها فيقل الضغط داخل الجهاز ويزداد التبخر من أثير الفقاعة ب فتتخفض درجة حرارة السائل بها تدريجياً . وبملاحظة الشريط المذهب نعين بدء ظهور الندى عليه . وتتؤخذ قراءة الترمومتر الموضوع داخل الجهاز وتكون هي نقطة الندى . كما نعين درجة حرارة الغرفة باستخدام ترمومتر آخر مثبت خارجياً على الجهاز . وبمعرفة ضغط البخار المشبع عند كل من نقطة الندى ودرجة الغرفة يمكن إيجاد درجة الرطوبة النسبية .

### ١٢ - ١١ الهيجرومتر الكيمائي :

يستخدم لقياس الرطوبة المطلقة أو الرطوبة النسبية في الجو . تتلخص فكرة الهيجرومتر في إمرار حجم معين من الهواء الرطب على أنابيب تجفيف مثل أ ، ب كما في الشكل (١٢ - ١٠) تمتص كل ما بالهواء المار عليها من الرطوبة ويتعين مقدار هذه الرطوبة من وزن هذه الأنابيب قبل وبعد إمرار الهواء .

ولتعيين حجم الهواء المار داخل أنابيب التجفيف نستخدم الإناء ك المملوء بالماء . ويتصل بالأنابيب أ عن طريق أنبوبة ح يوجد بها مجفف الغرض منه منع وصول بخار الماء من الإناء ك إلى الأنابيب

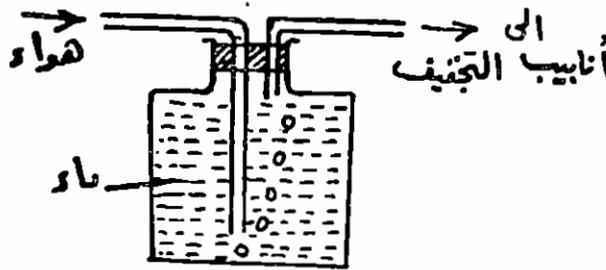


(شكل ١٢-١٠)

الموزونة . عند فتح صنبور الإناء  $\delta$  يخرج الماء ويسحب وراءه حجماً مساوياً له من الهواء يمر داخل أنابيب التجفيف . ومن معرفة حجم الإناء  $\delta$  وكتلة بخار الماء الموجودة في هذا الحجم توجد الرطوبة المطلقة في الهواء .

لإيجاد الرطوبة النسبية يراد أيضاً إيجاد كتلة بخار الماء الذي يشبع نفس هذا الحجم من الهواء في درجة حرارة الغرفة . لذلك تعاد التجربة مع توصيل فتحة أنابيب التجفيف بالإناء الميّن بشكل (١٢ - ١١) حيث يمر الهواء الجوى أولاً في الماء فيتشبع بخاره ثم يتقل بعد ذلك ليمر داخل أنابيب التجفيف التي تمتص منه البخار . ومن الزيادة في الوزن الناتجة عن تشبع نفس الحجم من الهواء ببخار الماء تكون

$$\text{الرطوبة النسبية} = \frac{\text{كتلة البخار الموجود في حجم معين من الهواء}}{\text{كتلة البخار الذي يشبع نفس الحجم عند نفس الدرجة}} \times 100$$



(شكل ١٢-١١)

تمارين :

- ١ - احسب كتلة لتر من الأيدروجين الرطب المجموع فوق الماء في  $15^\circ\text{C}$  إذا كان ارتفاع البارومتر  $76,5$  سم وكتافة الأيدروجين في المعدلين  $0,000089$  جم / سم<sup>٣</sup> وكتافة بخار الماء تسع أمثال كثافة الأيدروجين (ضغط بخار الماء المشبع في  $15^\circ\text{C} = 10,27$  سم زئبق) .

الحل :

الضغط الجزئي للأيدروجين الجاف =  $76,5 - 1,27 = 75,23$  سم زئبق  
 كتلة لتر أيدروجين جاف في  $15^\circ\text{م}$  وضغط  $75,23$  سم زئبق

$$\text{جم} = \frac{75,23}{76} \times \frac{273}{288} \times 1000 \times 0,00089 =$$

كتلة لتر من بخار الماء في  $15^\circ\text{م}$  وتحت ضغط  $1,27$  سم زئبق

$$\text{جم} = \frac{1,27}{76} \times \frac{273}{288} \times 1000 \times 0,00089 \times 9 =$$

ويجمع المقدارين تكون الكتلة الكلية للتر الأيدروجين الرطب

$$= 0,962 \text{ جم}$$

٢ - أوجد كتلة لتر من الهواء في  $29^\circ\text{م}$  وضغط  $75$  سم زئبق إذا كانت الرطوبة النسبية  $60\%$ ؛  
 علماً بأن ضغط البخار المشبع في  $29^\circ\text{م}$  =  $1,75$  سم زئبق ، كثافة البخار في درجة الصفر المئوي  
 وتحت ضغط  $76$  سم زئبق =  $0,816$  جم / لتر وكثافة الهواء في م . ص .  $5 = 1,293$  جم / لتر .

الحل :

ضغط البخار في الهواء =  $1,75 \times 0,6 = 1,05$  سم زئبق

ضغط الهواء الجاف =  $75 - 1,05 = 73,95$  سم زئبق .

$$\text{كتلة لتر من الهواء الجاف} = 1,293 \times \frac{273}{293} \times \frac{73,95}{76} = 1,17 \text{ جم}$$

$$\text{كتلة بخار الماء في اللتر} = 0,816 \times \frac{273}{293} \times \frac{1,05}{76} = 0,0103 \text{ جم}$$

الكتلة الكلية =  $1,17 + 0,0103 = 1,1803$  جم .

٣ - أوجد النسبة التي يتكثف بها بخار الماء من الهواء عندما تنخفض درجة حرارته من  $20^\circ\text{م}$  إلى  $5^\circ\text{م}$  علماً بأن الرطوبة النسبية عند درجة  $20^\circ\text{م}$  كانت  $60\%$  .

( ضغط البخار المشبع عند درجة  $20^\circ\text{م}$  =  $1,75$  مم زئبق وعند درجة  $5^\circ\text{م}$  =  $0,65$  مم زئبق ) .

- ٤ - أوجد كمية بخار الماء الموجود في غرفة أبعادها  $3 \times 5 \times 5$  أمتار عند درجة  $25^\circ\text{C}$  علماً بأن نقطة الندى عند درجة  $12^\circ\text{C}$  . ( ضغط البخار المشبع عند درجة  $12^\circ\text{C} = 10,43$  مم زئبق وعند درجة  $25^\circ\text{C} = 23,52$  مم زئبق) .
- ٥ - يستطيع مصباح بنزن تسخين ٢ كيلوجرام من الماء من درجة  $10^\circ\text{C}$  إلى درجة  $80^\circ\text{C}$  في ١٠ دقائق . ما هي كمية البخار التي تنتج في الساعة عند غليان الماء ؟
- ٦ - أنبوبة ضيقة منتظمة المقطع مغلقة من أحد طرفيها وتحتوي على هواء رطب تحبسه قطرة من الماء . في درجة  $15^\circ\text{C}$  كان طول عمود الهواء الرطب  $10,57$  سم ولما رفعت درجة الحرارة إلى  $60^\circ\text{C}$  أصبح طول عمود الهواء الرطب  $14,99$  سم فإذا كان الضغط الجوي أثناء التجربة  $747,8$  مم زئبق وكان ضغط بخار الماء المشبع في درجة  $15^\circ\text{C}$  هو  $12,8$  مم زئبق أوجد ضغط بخار الماء المشبع عند  $60^\circ\text{C}$  .



## الباب الثالث عشر

### الديناميكا الحرارية

Thermo - dynamics

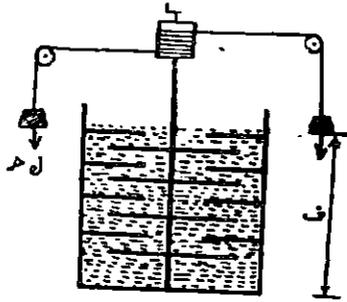
الديناميكا الحرارية هو العلم الذي يربط الحرارة بالطاقة الميكانيكية وتحويل أى منها للآخر ويعتمد هذا العلم أساساً على قانون بقاء الطاقة الذى ينص على أنه إذا حدثت تغيرات نوعية فى الطاقة داخل مجموعة معزولة فإن مجموع الطاقات المتفاعلة قبل وبعد حدوث التغير لا بد أن تتساوى . ويجب ملاحظة أن المادة ( كما أثبت أينشتين ) هى نوع من الطاقة المتجمدة ، إذ أن الجرام من المادة يمكن تحويله كلية إلى طاقة تكافئ ما قيمته عددياً مربع سرعة الضوء من الأرجات. ولذلك يجب عدم التفريل بين المادة والطاقة عند تطبيق قانون البقاء لهما .

#### ١٣ - ١ القانون الأول للديناميكا الحرارية :

يعبر هذا القانون عن العلاقة بين الشغل والحرارة . فإذا تم تحويل كمية من الطاقة الميكانيكية إلى طاقة حرارية داخل أى مجموعة معزولة فإنه يوجد تناسب بسيط بين هذه الطاقات ويسمى ثابت التناسب بالمكافئ الميكانيكى الحرارى وتقدر قيمته بـ ٤,١٨ جول / سعر . وقد كان جول هو أول من أجرى تجارب منظمة للدراسة هذا التحول وتعيين ثابت التناسب . وبالرغم من بدائية تجارب جول إلا أن الثابت الذى أوجده لا يزال يحتفظ بقيمته العلمية برغم العديد من التجارب الأكثر دقة والى أجريت بعد ذلك لتعيين هذا الثابت . ويعود السبب فى ذلك إلى كثرة التكرار الذى مكن جول من أن يحصل على متوسط صحيح للمكافئ الميكانيكى الحرارى لا يتوقف على أخطاء تجربته .

#### ١٣ - ٢ تجربة البهالات لجول .

يركب جهاز جول كما مبين فى شكل (١٣٠ - ١) من مسعر أسطوانى مثبت بجدراناه ألواح معدنية بتحريك بينها بحرية مجموعة من البهالات تتصل بمحور رأس مثبت فى نهايته أسطوانة ملفوف حولها خيط يمر طرفيه على بكرتين ويتدلى من كل طرف ثقل ك جرام . يوضع ماء بالمسعر وتقاس درجة



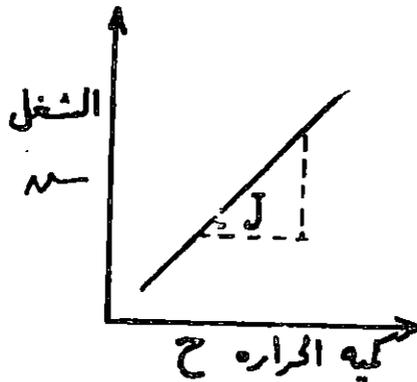
(شكل ١٣ - ١)

حرارته بواسطة ترمومتر حساس . إذا ترك الثقلان يسقطان مسافة  $h$  سم دار المحور الرأسى داخل المسعر محرّكاً البدالات التى تدعك الماء بين الألواح الثابتة ولأخرى المتحركة فيتحوّل بذلك الشغل الميكانيكى إلى طاقة حرارية بسبب الاحتكاك الحادث بين طبقات الماء المختلفة . ويتكرّر رفع الأثقال وتركها تسقط تمكن جول من تحويل كميات مختلفة من الطاقة الميكانيكية وكذلك من حساب كميات الحرارة المناظرة التى يكتسبها المسعر ومحتوياته نتيجة لذلك وقد وجد أن العلاقة خطية بين الشغل الميكانيكى  $W$  وكمية الحرارة المتولدة  $Q$  .

$$W = J \cdot Q$$

حيث  $J$  هو مقدار ثابت عبارة عن ميل الخط المستقيم الذى يربط العلاقة بين  $W$  ،  $Q$  وقد أسماه جول المكافئ الميكانيكى للحرارة . كما وجد أن قيمته تساوى ٤,١٨ جول / سعر .

وقد حسب جول الطاقة الميكانيكية من طاقة الموضع للأثقال الساقطة إذ أن فى كل مرة سقوط من الكتلتين تتحوّل كمية من الطاقة الميكانيكية قدرها  $2 \cdot m \cdot h$  ف إرجا إلى سعرات داخل الماء . فإذا



(شكل ١٣ - ٢)

تكرر رفع وإسقاط الكتل  $n$  مرات وتسبب عنها رفع في درجة حرارة المسعر ومحتوياته  $S$  درجات مئوية فإن

الطاقة الميكانيكية =  $\rho K \times v$  إرج

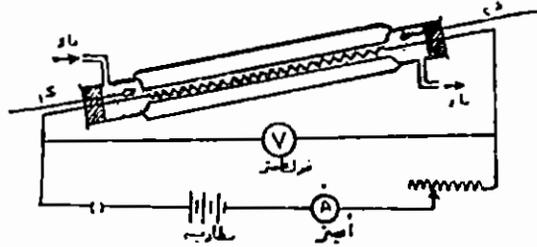
والطاقة الحرارية المكافئة =  $m \cdot S$  سعراً

حيث  $m$  هو المكافئ المائي للمسعر ومحتوياته .

### ١٣ - ٣ تجربة كالندروبارن لتعيين المكافئ الكهربائي الحراري :

وتسمى بطريقة التدفق المستمر إذ يتم فيها تحويل كمية معلومة من الطاقة الكهربائية إلى طاقة حرارية يتمصها تيار منتظم من الماء البارد يمر على سلك التسخين .

يتركب الجهاز كما في شكل (١٣ - ٣) من سلك مقاومة موضوع داخل أنبوبة زجاجية يمكن لمرار تيار بطيء من الماء بداخلها مع قياس درجتي حرارة الماء عند مدخل الأنبوبة  $\rho_s$  وعند مخرجها  $\rho_2$  . يمر تيار كهربائي في السلك بواسطة دائرة كهربائية ويقاس شدة التيار المار  $I$  بواسطة أميتر وفرق الجهد  $V$  بين طرفي السلك بواسطة فولتметр . يتولد نتيجة لذلك طاقة حرارية يكتسبها تيار الماء عند مروره على السلك فترتفع درجة حرارته . ينتظر حتى الوصول إلى حالة الاتزان الحراري ويتم ذلك عندما



(شكل ١٣ - ٣)

تثبت درجة حرارة الماء الخارج من الأنبوبة وتتكافأ عندئذ كميّتي الطاقة الكهربائية والحرارية . يقاس معدل التدفق للماء في الثانية وذلك بجمع كمية منه في زمن معين وبقياس كتلته نعين كتلة الماء التي تمر على السلك في الثانية الواحدة ولتكن  $K$  جم / ثانية .

كمية الحرارة المكتسبة من الماء في الثانية =  $K \times 1 \times (\rho_2 - \rho_s)$  سعراً .

الشغل الكهربائي المبذول في الثانية =  $V \times I$  جول / ثانية .

وبذلك نوجد المكافئ الكهربائي الحراري  $J$  من المعادلة :

ت = > J . ك (٢٤ - ١٤) ... .. (١٣ - ١) عند إجراء التجربة السابقة أهملنا كمية الحرارة التي فقدها الماء بالإشعاع للجو أثناء مروره على سلك التسخين . ولتصحیح هذا الخطأ نفرض أن كمية الحرارة المفقودة في الثانية الواحدة للجو هي ح سعر/ ثانية . وبذلك يكون معدل الشغل المبذول في الثانية مكافئاً لمعدل التسخين للماء + معدل فقد الحرارة بالإشعاع : أي أن

ت . > J (ك (٢٤ - ١٤) + ح) ... .. (٢-١٠) إذا أعيد إجراء التجربة مع تغيير كل من شدة التيار الكهربائي والتيار المائي بحيث نحفظ بحرارة الماء الخارج من الأنبوبة عند نفس الدرجة ٢٤ تصبح المعادلة في الحالة الثانية هي

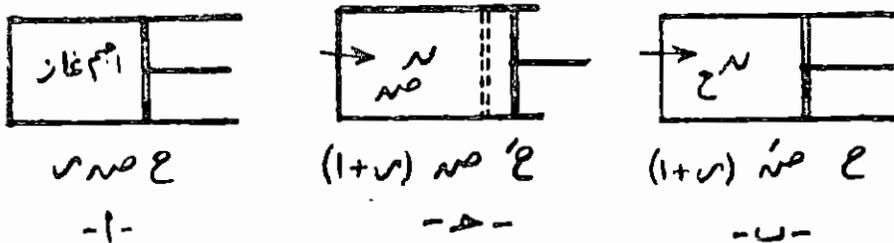
ت . > J (ك (٢٤ - ١٤) + ح) ... .. (٣ - ١٠) حيث ت ، > هما شدتا التيار وفرق الجهد على السلك في التجربة الثانية ، ك هو معدل التدفق الجديد . ويلاحظ أن كمية الحرارة المفقودة بالإشعاع في الثانية لم تتغير وذلك لأن معدل تبريد الجسم يظل ثابتاً طالما ظل الفرق بين درجة حرارته ودرجة حرارة الوسط المحيط ثابتاً ، وهذا ما ينص عليه قانون نيوتن للتبريد . وبطرح المعادلتين السابقتين (٢ - ١٣) ، (٣ - ١٣) لحذف المقدار المجهول ح نحصل على :

$$((٢ - ت) - (٣ - ت)) J = (ك - ك) (٢٤ - ١٤)$$

ومنها تتحدد قيمة المكافئ الكهربائي J وتكون قيمته في هذه الحالة مصححة لخطأ الإشعاع . وتستخدم طريقة كالندر وبارن في بعض الأحيان لإيجاد الحرارة النوعية لغاز تحت ضغط ثابت وذلك بفرض معرفة قيمة المكافئ الكهربائي الحراري .

### ١٣ - ٤ الشغل الميكانيكي الذي يبذله غاز عند التمدد الحر:

نفرض واحد جرام من غاز موضوع داخل أسطوانة يقفلها مكس ، (شكل ١٣ - ٤) ، وأن



(شكل ١٣ - ٤)

حالة الغاز الابتدائية « ٢ » من حيث الضغط والحجم ودرجة الحرارة هي على الترتيب  $C$  ،  $V$  ،  $M$  .  
 إذا ثبتنا وضع المكبس بحيث نحفظ حجم الغاز  $C$  ثابتاً ثم أعطينا الغاز كمية من الحرارة تكفي لرفع  
 درجته درجة واحدة مئوية فإن هذه الكمية تعرف بالحرارة النوعية للغاز تحت حجم ثابت  $V$  وتستخدم  
 هذه الحرارة في رفع طاقة الحركة لجزيئات الغاز وبذلك يزداد ضغطه ويصبح  $V$  وتمثل الغاز عندئذ  
 الحالة « ب » كما في الشكل حيث أصبح الضغط والحجم ودرجة الحرارة هي  $C$  ،  $V$  ،  $M$  ،  
 (١ + ٧) .

إذا بدأنا مرة أخرى من الوضع « ٢ » حيث حالة الغاز  $C$  ،  $V$  ،  $M$  ثم أعطينا كمية من الحرارة  
 تكفي لرفع درجته درجة واحدة مئوية مع ترك المكبس حرّاً الحركة في هذه الحالة لكي يظل ضغط الغاز  
 ثابتاً تكون هذه الكمية الحرارية وفقاً للتعريف هي الحرارة النوعية للغاز تحت ضغط ثابت  $P$   $V$  يزداد  
 حجم الغاز من  $C$  إلى  $C'$  وتكون حالته النهائية ممثلة بالوضع « ح » كما في الشكل .

واضح أن الغاز قد بذل شغلاً ميكانيكياً لكي يحرك المكبس للخارج حتى يظل الضغط ثابتاً .  
 لهذا الشغل مكافئ حرارى يجب تزويد الغاز به زيادة على كمية الحرارة اللازمة لرفع طاقة حركة جزيئاته  
 وبالتالي درجة حرارته درجة واحدة مئوية كما حدث في الحالة « ب » عندما ثبتنا الحجم ومنعنا الغاز من  
 التمدد . ومن هذا يتضح أن :

$$\text{المكافئ الحرارى للشغل الميكانيكى المبذول لتمدّد الغاز} + V = C = V \text{ صـ} .$$

ولتعيين مقدار هذا الشغل نفرض أن مساحة مقطع الأسطوانة المحتوية للغاز هي  $S$  سم<sup>٢</sup> وأن  
 المكبس قد تحرك مسافة  $F$  سم أثناء تمدد الغاز من الحجم  $C$  إلى الحجم  $C'$  .

$$\text{القوة المؤثرة عمودياً على المكبس} = \text{ضغط الغاز} \times \text{مساحة المكبس} .$$

$$= \text{صـ} . \text{س دابن} .$$

$$\text{الشغل الميكانيكى المبذول} = \text{القوة} \times \text{المسافة} .$$

$$= \text{صـ} . \text{س} . \text{ف إرج}$$

ولكن  $S \cdot F$  هو التغير في حجم الغاز بالتمدّد أى أن :

$$C' - C = S \cdot F$$

$$\therefore \text{الشغل الميكانيكى المبذول} = \text{صـ} (C' - C) \text{ إرجاً}$$

$$\text{ويكون المكافئ الحرارى لهذا الشغل} = \frac{\text{صـ}}{J} (C' - C) \text{ سعراً} .$$

حيث  $J$  هو المكافئ الميكانيكى للحرارة . وبتطبيق القانون العام للغازات  $C_p \text{ صـ} = \text{ث} M$  حيث  $\text{ث}$

هو ثابت الغاز للجرام يكون :

المكافئ الحرارى للشغل

$$\left[ \frac{1}{J} (C - C') \right] = \frac{1}{J} (C - C') =$$

$$\frac{\theta}{J} = \left[ \frac{\theta}{J} (1 + C - C') \right] \dots \dots \dots (13 - 4)$$

إذ أن درجة الحرارة  $C'$  أكبر من  $C$  بمقدار درجة واحدة مئوية وتصيح

$$C' = C + \frac{\theta}{J} \dots \dots \dots (13 - 5)$$

### ١٣ - ٥ التغيرات الطبيعية مع ثبوت كمية الحرارة : Adiabatic change

إذا أخذنا تغييراً على حالة مجموعة معزولة بحيث لا يدخلها أو يخرج منها أى كمية حرارية سحى تغيراً أدياباتيكيّاً فمثلاً إذا تمدد غاز مع ثبوت كمية حرارته فإن الشغل الخارجى المبذول يكون على حساب الطاقة الداخلية للغاز ولذلك تنخفض درجة حرارته . ويحدث العكس فى حالة انضغاط الغاز فترتفع درجة حرارته لازيادىاد طاقته الداخلية بما يكافئ الشغل الخارجى المبذول عليه .

#### معادلة التغير ثابت الحرارة الأدياباتيكي :

لا تصلح معادلة الغاز التام  $C = C' = \theta$  لكى تصف التغير فى حالة غاز عند ثبوت حرارته ولإيجاد هذه المعادلة نفرض ١ جم من غاز داخل مجموعة معزولة وأن حالته يمثلها  $(C, C', \theta)$  . إذا أعطينا المجموعة كمية صغيرة من الحرارة  $\theta$  فإنها تتسبب فى أن يبذل الغاز شغلا قدره  $\theta$  وتغير كذلك الطاقة الداخلية للمجموعة بمقدار  $\theta$  من القانون الأول للديناميكا الحرارية ( صورة من قانون بقاء الطاقة ) .

$$\therefore C + \frac{1}{J} \theta = C' \text{ و } \theta$$

لكن إذا كان ضغط الغاز  $C'$  والتغير الذى نتج فى الحجم هو  $\theta$  فإن  $C' = C + \frac{1}{J} \theta$  أى أن

$$C + \frac{1}{J} \theta = C' \text{ و } \theta \dots \dots \dots (13 - 6)$$

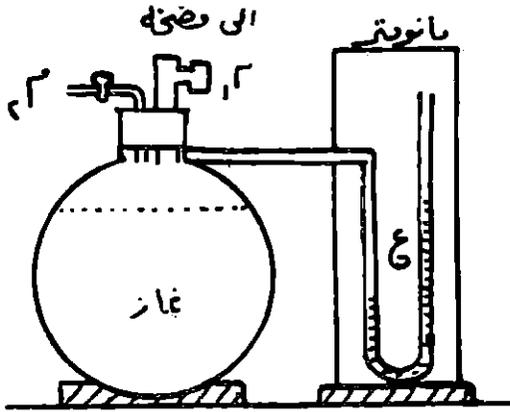


أى أن

ع ٥ ص = ثابت ..... (١٣-١٠)  
 حيث المقدار 8 = النسبة بين الحرارة النوعية للغاز تحت ضغط ثابت وتحت حجم ثابت . وتعطى  
 هذه المعادلة العلاقة بين الضغط والحجم للتغيرات ثابتة الحرارة .

تعيين قيمة  $\gamma$  عملياً :

نستخدم الجهاز المبين بشكل (١٣-٥) ويركب من إناء كبير يحتوى على الغاز تحت الاختبار  
 ويتصل بمضخة لضغط الغاز في الإناء ويقفلها صمام ١م . ويتصل كذلك بمانومتر لقياس الزيادة في ضغط  
 الغاز عن الضغط الجوى .



(شكل ١٣-٥)

إذا بدأنا التجربة وكان ضغط الغاز ص ١ ثم فتحنا الصمام ٢م المتصل مباشرة بالهواء الجوى ينخفض  
 مباشرة الضغط إلى قيمة الضغط الجوى ص ٥ . ثم يقفل في الحال الصمام بعد ذلك . بما أن تمدد الغاز عند  
 فتح الصمام يتم منع ثبوت الحرارة لذلك تنخفض الدرجة عن درجة حرارة الجو .

عندما يترك الجهاز بعض الوقت لتساوى درجتى حرارة الغاز والجوى يكون الغاز قد امتص من الجوى  
 كمية من الحرارة فيتمدد ويرتفع ضغطه من ص ٥ إلى ص ٢ . ويكون الضغط النهائى ص ٢ هو نفس ضغط  
 الغاز لو كان تمدد الغاز مع ثبوت درجة حرارته (isothermal) .

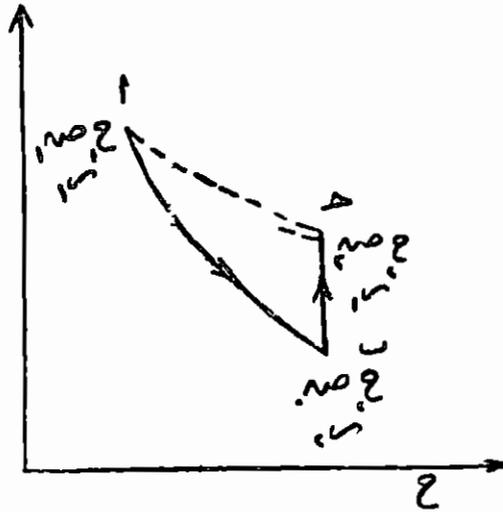
ويمكن تمثيل تغيرات حالة الغاز على منحنى ح ص كما في شكل (١٣-٦) تمثل النقطة ١ كتلة  
 معينة من الغاز حجمها ع ٢ أقل من حجم الإناء وضغطها ص ٢ < ص ٥ . إذا تمدد فجأة هذا الحجم

من الغاز لكي يملأ الإناء تماماً فإننا نصل للنقطة ب حيث الضغط ص. ( ضغط جوي ) ودرجة الحرارة  $١٣ > ١٤$ .

ويترك الغاز لمدة لتصل إلى الاتزان الحراري فإن ضغط الغاز يرتفع إلى ص ونصل للنقطة ج حيث درجة الحرارة هي نفس درجة حرارة الجو .

بما أن درجة حرارة كل من الحالتين ١ ، ج واحدة ينطبق لذلك قانون بويل :

$$١ ص ١ ع = ٢ ص ٢ ع$$



(شكل ١٣ - ٦)

وبما أن التغير من ١ إلى ج تغير أدياباتيكي تكون معادلة لتغير هي :

$$١ ص ١ ع = ٢ ص ٢ ع$$

ويحذف ١ ص ، ٢ ص من المعادلتين السابقتين نحصل على :

$$\left( \frac{١ ص}{٢ ص} \right) = \frac{١ ص}{٢ ص}$$

$$\therefore \text{لو صم} - ١ \text{ لو صم} = ٨ \text{ [ لو صم} - ١ \text{ لو صم} ]$$

$$\therefore ٨ = \frac{\text{لو صم} - ١ \text{ لو صم}}{\text{لو صم} - ١ \text{ لو صم}} \dots \dots \dots (١١ - ١٣)$$

وباعتبار أن الضغط داخل الإناء عند بدايه التجربه هو

$$\text{صم} = \text{صم} + ١ \text{ ع}$$

وإن الضغط النهائي داخله بعد التمدد الأدياباتي هو

$$\text{صم} = \text{صم} + ٢ \text{ ع}$$

حيث  $\text{ع}_١$  ،  $\text{ع}_٢$  هما الزيادة في قراءة المانومتر عن الضغط الجوي .

وبالتعويض في المعادلة (١١ - ١٣) نحصل على

$$\begin{aligned} & \frac{\text{لو صم} - \left( \frac{\text{١ ع}}{\text{صم}} + ١ \right) \cdot \text{لو صم}}{\left( \frac{\text{٢ ع}}{\text{صم}} + ١ \right) \cdot \text{لو صم} - \left( \frac{\text{١ ع}}{\text{صم}} + ١ \right) \cdot \text{لو صم}} = \gamma \\ & \frac{\left( \frac{\text{١ ع}}{\text{صم}} + ١ \right) \text{ لو}}{\left( \frac{\text{٢ ع}}{\text{صم}} + ١ \right) \text{ لو} - \left( \frac{\text{١ ع}}{\text{صم}} + ١ \right) \text{ لو}} = \end{aligned}$$

وبفك اللوغاريتم وأهمال الحدود الصغيره تؤول المعادلة إلى

$$(١٢ - ١٣) \quad \frac{\text{١ ع}}{\text{٢ ع} - \text{١ ع}} = \frac{\frac{\text{١ ع}}{\text{صم}}}{\frac{\text{٢ ع}}{\text{صم}} - \frac{\text{١ ع}}{\text{صم}}} = \gamma$$

وبقياس كل من الارتفاعين  $\text{ع}_١$  ،  $\text{ع}_٢$  يمكن حساب قيمة الثابت  $\gamma$  .

مرونة الغاز عند ثبوت الدرجة وعند ثبوت الحرارة :

من تعريف المرونة الحجمية B

$$B = \frac{\text{الإجهاد}}{\text{الانفعال}} = \frac{\frac{S}{V}}{\frac{S}{V}} = \frac{S}{V}$$

حيث  $V$  ،  $S$  هما حجم وضغط الغاز الابتدائيين ،  $\Delta V$  هو النقص في الحجم الناتج عن الزيادة في الضغط بمقدار  $\Delta S$  .

عند ثبوت درجة الحرارة ينطبق قانون بويل

$$V = \text{ثابت}$$

$$\therefore V + \Delta V = V + \Delta V = \text{صفر}$$

$$\therefore \frac{V}{V} = \frac{V + \Delta V}{V + \Delta V}$$

$$\text{وتكون المرونة عند ثبوت الدرجة هي } B = \frac{S}{V} \times V = S$$

أما إذا كانت المجموعة معزولة وكمية الحرارة هي الثابتة فإن :

$$V = \text{ثابت}$$

$$\therefore V + \Delta V = V + \Delta V = \text{صفر}$$

$$\therefore \frac{V}{V} = \frac{V + \Delta V}{V + \Delta V}$$

وتكون المرونة الحجمية عند ثبوت الحرارة هي :

$$B = \frac{S}{V} = \frac{S}{V} = \frac{S}{V}$$

أي أن النسبة بين المرونة للغاز عند ثبوت الحرارة إلى مرونته عند ثبوت الدرجة تساوي النسبة بين الحرارة النوعية للغاز تحت ضغط ثابت إلى الحرارة النوعية له تحت حجم ثابت .

**انتقال الصوت والتغير الادياباتيكي :**

ترتبط سرعة الصوت  $c$  في أي وسط بمعامل مرونته الحجمية  $B$  وكثافته  $\rho$  بالمعادلة الآتية :

$$(13 - 13) \dots \dots \dots \frac{\overline{v}}{\rho} \sqrt{\dots} = \frac{B}{\rho} \sqrt{\dots} = c$$

وعند تطبيق هذه المعادلة في حالة الهواء الجوى واستخدام مرونة الهواء عند ثبوت الدرجة أى بالتعويض بدلا من B بقيمة الضغط الجوى  $v$  وجد أن مرعة الصوت تقل كثيراً عن قيمتها المقاسة عملياً ( ٣٤٠ متر في الثانية ) وقد فسر ذلك التناقض عن أن انتقال الصوت في الوسط يحدث تضاعفات وتخلخلات سريرة يتبع معها تغير في درجة الحرارة .

أى أن هذه التغيرات ادياباتيكية ولا يصح عندئذ استخدام معامل المرونة عند ثبوت الدرجة ولكن يجب استخدام المعامل عند ثبوت الحرارة . أى أن تستبدل المرونة بالمقدار  $v$  .

$$(14 - 13) \dots \dots \dots \frac{\overline{v}}{\rho} \sqrt{\dots} = c \therefore$$

ويجوز هذا التعديل أمكن فعلا الحصول على قيمة محسوبة للسرعة تطابق القيمة العملية المقاسة .

مثال ١ : أوجد التغير في درجة حرارة غاز الهليوم عندما يتمدد مع ثبوت الحرارة ( ادياباتيكيًا ) إلى ثمانية أمثال حجمه الأصلي علماً بأن درجة حرارته الابتدائية  $15^\circ$  . (  $\frac{5}{3} = 8$  )

باستخدام المعادلتين :  $c^2 = \text{ثابت}$

$$c = \text{ث م}$$

نحصل على  $c^2 = 1 - 8$  ثابت

درجة الحرارة الابتدائية للغاز  $v = 288$  درجة مطلقة

$$\therefore c^2 = - 1 - 8, 1 = - 288 \cdot 2$$

حيث  $c^2 = 2 = 8$  ،  $v = 288$  هى درجة الحرارة النهائية

$$\therefore 1 - 8 \left( \frac{1}{8} \right) \times 288 = 288$$

$$= \frac{2}{3} \left( \frac{1}{8} \right) \times 288 =$$

$$= 72 \text{ درجة مطلقة}$$

$$= 201^\circ$$

مثال ٢ : يتمدد ١ جم من الهواء عند درجة حرارة  $216^\circ$  م مع ثبوت الحرارة إلى خمسة أمثاله

حجمه الأصلي . أوجد الشغل المبذول في هذا التمدد باعتبار أن الهواء غاز مثالي .

$$\text{علماً بأن : } 8 = 1, 4$$

$$\text{، ثابت الغاز للجرام} = 2, 88 \times 10^6 \text{ ارج / م}^\circ$$

$$\text{باستخدام المعادلة } c^2 = 1 - 8 = \text{ثابت}$$

$$\therefore 25 = 548 \left( \frac{1}{6} \right)^{0.4} = 315 \text{ مطلقه}$$

الشغل المبذول في التمدد باعتبار الغاز مثالياً

$$= 2 \text{ ج} - 1 \text{ ج} = 1 \text{ ج}$$

$$= 2 \text{ ج} - 1 \text{ ج} = 1 \text{ ج}$$

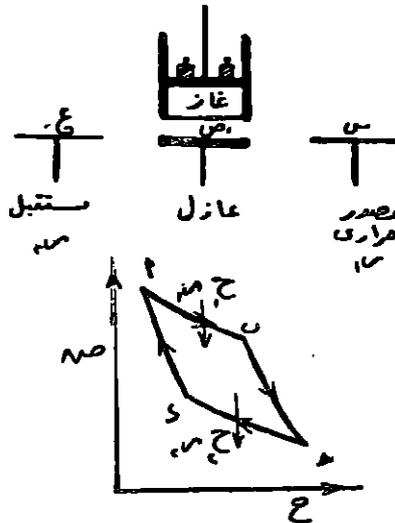
$$= 670 \times 10 \text{ أوج}$$

### ١٣ - ٦ القانون الثاني للديناميكا الحرارية :

يعالج القانون الثاني للديناميكا الحرارية تحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية وواضح أن لذلك التحويل أهمية كبيرة لدى الانسان إذ يستطيع لو أمكنه ذلك أن يستغل لفائدته الحرارة الناشئة عن حرق أنواع الوقود المختلفة والموجوده بوفرة على شكل خام طبيعي في باطن الأرض . لقد سبق أن أوضحنا عند الكلام على القانون الأول للديناميكا الحرارية أنه من الممكن تحويل الطاقة الميكانيكا تحويلاً تاماً إلى طاقة حرارية ولكن هل يمكن تحويل كمية من الطاقة الحرارية تماماً إلى طاقة ميكانيكية ؟ إن هذا التساؤل يجيب عليه القانون الثاني للديناميكا الحرارية .

### آلة كارنو الحرارية : Carnot's heat engine

الآلة الحرارية هي الجهاز الذي يتولى تحويل الحرارة إلى شغل مثال ذلك آلة السيارة والقطار وغيرها . وقد وضع العالم الفرنسي كارنو نموذج لعمل آلة حرارية مثالية استخدم فيها غازاً مثالياً كمادة تشغيل للآلة .



(شكل ١٣-٧)

تتكون آلة كارنو الحرارية (شكل ١٣ - ٧) من أسطوانة ومكبس محكم يتحرك بحرية داخلها . جدران الأسطوانة والمكبس مصنوعة من مادة عازلة حراريًا بينما تكون قاعدة الأسطوانة مصنوعة من مادة جيدة التوصيل الحراري لكي تنتقل خلالها الحرارة من أو إلى الغاز المثالي ( مادة التشغيل ) الموجودة داخلها . نفرض أننا بدأنا والغاز في حالة معينة من الحجم والضغط ودرجة الحرارة وإنما أحدثنا في حالته سلسلة مغلقة من التغيرات ولكن عدنا به في النهاية إلى نفس نقطة البداية . لتكن هذه التغيرات على أربعة مراحل كما يأتي :

١ - نضع الأسطوانة على مصدر حراري س درجة حرارته مرتفعة ولتكن  $١٤٠$  . تكون حالة الغاز ممثلة بالنقطة 'ع' (ع ١ ص ١٤٠) على منحنى ع ص الميّن يشكل (١٣ - ٧) . نرفع بعض الأثقال من على مكبس الأسطوانة لكي تسمح للغاز بالتمدد للنقطة ب مع ثبوت درجة الحرارة . يمتص الغاز كمية حرارة ح١ من المصدر لمعادلة تأثير التمدد .

٢ - ترفع الأسطوانة بعد ذلك من على المصدر الساخن س وتوضع على حامل ص ذو قاعدة معزولة حراريًا فيصبح بذلك الغاز معزولاً عزلاً تاماً . ثم نرفع المزيد من الأثقال من على المكبس فيحدث تمدد آخر للغاز حتى النقطة د ويكون ذلك مع ثبوت كمية الحرارة . تنخفض بسبب هذا التمدد الأدياباتيكى درجة الحرارة من  $١٤٠$  إلى  $٢٤٠$  .

٣ - نضع الأسطوانة بعد ذلك على مستقبل حراري درجته  $٢٤٠$  وتضاف بعد ذلك بعض الأثقال على المكبس ليتم ضغط الغاز تحت درجة حرارة ثابتة إلى لنقطة د وتطرد بذلك الحرارة الزائدة ح٢ والتي نتجت عن ضغط الغاز إلى المستقبل .

٤ - نرفع أخيراً الأسطوانة وتوضع على العازل ثم يضاف مزيد من الأثقال فينضغط الغاز مع ثبوت كمية حرارته فترتفع درجته من  $٢٤٠$  إلى  $١٤٠$  ونعود بذلك إلى نقطة البداية ب حيث حالة الغاز هي ع١ ص١٤٠ .

ويسمى الشكل المغلق ب د ح ك بحلقة كارنو وبإلقاء نظرة إلى حلقة كارنو نلاحظ أن مادة التشغيل قد مرت على أربعة مراحل . اثنتان فيها أجرينا مع ثبوت كمية الحرارة والاثنتان الأخرتان أجرينا مع ثبوت درجة الحرارة . ك لاحظ أن الغاز قد بذل شغلاً ليتمدد من النقطة ب إلى النقطة د . وهذا التمدد يتبعه انخفاض في سرجه الحرارة ولكن شرط المنحنى ب د هو ثبوت درجة الحرارة لذلك فإن الغاز يمتص من المصدر الحراري كمية من الحرارة ح١ وبالمثل عند ضغط الغاز من النقطة د إلى ب حيث درجة الحرارة  $٢٤٠$  فإن الحرارة ح٢ الناشئة عن انضغاط الغاز تذهب على شكل عامد للمستقبل . أما بالنسبة للتغيير من ب إلى د ومن د إلى ب فإنهما قد تما مع ثبوت كمية الحرارة لأن الغاز في كلتا الحالتين كان معزولاً عزلاً حراريًا تاماً ويتساوى هنا الشغلان المبذولان لعمل كل من التغييرين وذلك لأن الأول قد خفض درجة حرارة الغاز من  $١٤٠$  إلى  $٢٤٠$  بينما رفع الثاني الدرجة من  $٢٤٠$  إلى  $١٤٠$  دون سماح لأي حرارة ما بالتسرب .

ويتضح مما سبق أن كمية من الحرارة ح<sub>١</sub> - ح<sub>٢</sub> قد اختفت وظهرت في صورة أخرى على شكل شغل مبذول أثناء الدورة . وعلى ذلك فإن هذا الشغل لا بد أن يكافئ الحرارة المختفية ح<sub>١</sub> - ح<sub>٢</sub> أي أن ش = ح<sub>١</sub> - ح<sub>٢</sub> . . . . . (١٣ - ٥)

وهذا يوضح عمل الآلة الحرارية حيث تتحول الحرارة إلى شغل مفيد وذلك باستخدام مصدر ساخن ومستقبل بارد ينص من الأول كمية حرارة خ<sub>١</sub> يستغل جزء فقط منها على شكل مفيد ويقذف الباقي على شكل عادم .

وتقاس كفاءة الآلة الحرارية بالنسبة بين كمية الشغل الذي يمكن استخلاصه بواسطتها إلى كمية الحرارة التي امتصتها الآلة من المصدر أي أن

$$\text{كفاءة الآلة الحرارية } \mu = \frac{\text{ش}}{\text{ح}} = \frac{\text{ح}_1 - \text{ح}_2}{\text{ح}_1} = \frac{\text{ح}_1 - 1}{\text{ح}_1} \dots \dots (١٣ - ٦)$$

أي أنه كلما نقصت كمية الحرارة (العادم) ح<sub>٢</sub> التي تستغنى عنها الآلة دون فائدة كلما ازدادت كفاءة الآلة حتى تصل إلى القيمة  $\mu = 1$  عندما تصبح كمية الحرارة ح<sub>٢</sub> مساوية للصفر أي عندما لا يوجد عادم على الإطلاق ، وتكون عندها كل كمية الحرارة الممتصة من المصدر قد تحولت إلى طاقة ميكانيكية . ومن الواضح أن هذه الحالة مثالية ولا يمكن حلوثها في الواقع إذ أن جميع الآلات الحرارية الواقعية لها كفاءة أقل من الوحدة ( $\mu < 1$ ) .

وتتوقف النسبة  $\left( \frac{\text{ش}}{\text{ح}} \right)$  على كل من درجة الحرارة للمصدر ، ودرجة الحرارة للمستقبل

للعادم . إذ أن كمية الحرارة الممتصة من المصدر تتناسب طردياً مع درجة حرارته المطلقة وتصبح بذلك الكفاءة الآلية .

$$\mu = 1 - \frac{\text{ح}_2}{\text{ح}_1} = 1 - \frac{\text{ح}_2}{\text{ح}_1}$$

أي أنه كلما اقتربت درجة حرارة المصدر من درجة حرارة المستقبل للعادم كلما اقتربت النسبة  $\frac{\text{ح}_2}{\text{ح}_1}$  من الوحدة وتقترب كذلك كفاءة الآلة من الصفر . بينما إذا نقصت درجة حرارة المستقبل  $\text{ح}_2$  حتى تصل إلى درجة الصفر المطلق فإن الآلة تصبح عندها تامة الكفاءة أي أن ( $\mu = 1$ ) .

وقد وضع كلوزياس نصاً للقانون الثاني كما يلي :

« لا يمكن بأي حال من الأحوال تحويل كمية من الحرارة إلى شغل آلى دون أن يتم في نفس الوقت

نقل كمية من الحرارة من جسم ساخن إلى آخر بارد .

وفي كلمات أخرى :

« لا يمكن لأي آلة تعمل ذاتياً دون أن تساعدها أى طاقة حيوانية أن تنقل كمية من الحرارة من مستوى منخفض إلى آخر أعلى منه حررياً » .

تمارين :

١ - يلزم ٥٤٠ سعر / جم لتحويل الماء في درجة ١٠٠°م إلى بخار في نفس الدرجة عندما يكون الضغط الجوي ٧٦ سم زئبق . كم من هذه الطاقة يستخدم في التغلب على الضغط الجوي وكم منها يذهب إلى البخار علماً بأن الحجم النوعي لبخار الماء في ١٠٠°م هو ١٦٧١ سم<sup>٣</sup> / جم .

$$(J = 4,18 \times 710 \text{ أرج / سعر} ) .$$

٢ - آلة حرارية تستخدم بخاراً درجة حرارته ١٨١°م وكان العادم هو ماء متكثف في درجة ١٠٠°م أوجد الكفاءة الآلية .

٣ - ما هي كمية الزبد ( القيمة الحرارية له ٦٠٠٠ سعر للجرام ) اللازم تزويدها كطاقة لرجل يزن ٨٠ كيلوجراماً يريد أن يصعد تلة ارتفاعه ١٠٠ متر .

$$( \text{عجلة الجاذبية الأرضية } 980 \text{ سم / ثانية}^2 ) .$$

٤ - ما الارتفاع في درجة حرارة مياه شلال عند سقوطها من ارتفاع ٥٠ متراً ؟

٥ - الحرارة النوعية لغاز تحت حجم ثابت وتحت ضغط ثابت هي على الترتيب ٠,١٥٨ ، ٠,٢٣٧ ، ٠,٢٣٧ سعر / جم / درجة . أوجد حجم الجرام من هذا الغاز في المعدلين علماً بأن المكافئ الميكانيكي للحرارة ٤,٢ جول / سعر .

٦ - رصاصة تسير أفقياً وتصادم حائلاً فتستقر في حالة سكون . إذا كانت درجة الحرارة الابتدائية للرصاصة ٢٥°م ودرجة انصهارها ٤٧٥°م وحرارتها النوعية ٠,٠٥ ، والحرارة الكامنة لانصهارها ٤١,٥ سعر / جم . ما هي أقل سرعة يجب أن تسير بها الرصاصة لكي تنصهر بأكملها عند تصادمها مع الحائل ؟

٧ - أوجد الشغل المبذول عند تمدد ١,٥ لتر من غاز إلى حجم ٦ لترات إذا كان الضغط الابتدائي له ٧٦ سم زئبق .

$$( 8 = 1,741 \text{ ، ثابت الغاز الجرام } = 2,88 \times 710 )$$

## الباب الرابع عشر

### القصور الحرارى ( الأنتروپيا )

١٤ - ١ حساب الشغل المبذول أثناء دورة كارنو :

عند حساب الشغل المبذول على مادة تشغيل آلة كارنو ( الغاز الموجود بالأسطوانة ) أو بواسطتها نستخدم المعادلة ( سبق إثباتها )

$$ث = \int_{ص} ع . د ع$$

فإذا اعتبرنا التغيرين المثلثين بالخطين ١ ب ، د ع في دورة كارنو ، وهما تغييران في ضغط الغاز وحجمه مع ثبوت درجة حرارته ( أيسوثرمال ) ينطبق عليهما قانون بويل . وبذلك يكون

$$(١-١٤) \dots \dots \left\{ \begin{array}{l} ع_١ ص_١ = ع_٢ ص_٢ \\ ع_٣ ص_٣ = ع_٤ ص_٤ \end{array} \right.$$

أما التغييران المثلثان بالخطين ب د ، ع ١ فهما تغييران كل منهما أدياباتي ولذلك تنطبق عليهما المعادلات :

$$(٢-١٤) \dots \dots \left\{ \begin{array}{l} ع_٢ ص_٢^{\gamma} = ع_٣ ص_٣^{\gamma} \\ ع_٤ ص_٤^{\gamma} = ع_١ ص_١^{\gamma} \end{array} \right.$$

ويكون الشغل المبذول أثناء التغير الأيسوثرمالى ١ ب الذى يتم عند درجة حرارة ثابتة  $١٣$  هو

$$ث = (١-ب) = \int_{١} ٢ ص د ع = ع_١ ص_١^{\gamma} \int_{١} ٢ \frac{د ع}{ع}$$

$$= ث ١٣ \text{ لو } \left( \frac{٢ ع}{١ ع} \right)$$

وبالمثل

الشغل المبذول في التغير الأيسوثرمالى من د إلى ع عندما تكون درجة الحرارة  $٢٣$  هو

$$ث = (د-ع) = ث ٢٣ \text{ لو } \left( \frac{٤ ع}{٣ ع} \right)$$

ويكون الشغل الكلي الايسوثرمالي هو

$$\text{شغل (ايسوثرمال)} = \text{ث } ١٣ \text{ لو } \frac{٢\mathcal{E}}{١\mathcal{E}} + \text{ث } ٢٣ \text{ لو } \frac{٤\mathcal{E}}{٣\mathcal{E}} \dots \dots (٣-١٤)$$

ولكن من المعادلتين (١-١٤) ، (٢-١٤) نحصل على

$$\frac{١٣}{٢٣} = \frac{\text{ث } ١٣}{\text{ث } ٢٣} = \frac{٢\mathcal{E} \text{ ص } ٢}{٣\mathcal{E} \text{ ص } ٣} = \frac{١\mathcal{E} \text{ ص } ١}{٤\mathcal{E} \text{ ص } ٤}$$

وكذلك

$$\frac{٢\mathcal{E} \text{ ص } ٢}{٣\mathcal{E} \text{ ص } ٣} = ١ = \frac{١\mathcal{E} \text{ ص } ١}{٤\mathcal{E} \text{ ص } ٤}$$

وبما أن  $\gamma > ١$  لذلك لكي تتحقق المعادلات السابقة يجب أن يكون

$$\frac{٢\mathcal{E}}{٣\mathcal{E}} = \frac{١\mathcal{E}}{٤\mathcal{E}}$$

وبذلك يصير الشغل الايسوثرمالي

$$\text{ث } ١٣ \text{ لو } \left(\frac{٢\mathcal{E}}{١\mathcal{E}}\right) + \text{ث } ٢٣ \text{ لو } \left(\frac{١\mathcal{E}}{٢\mathcal{E}}\right) =$$

$$\text{ث } (١٣-٢٣) \text{ لو } \left(\frac{٢\mathcal{E}}{١\mathcal{E}}\right) \dots \dots (٤-١٤)$$

أما الشغل الأدياباتي المبذول خلال العملية من ب إلى ح فهو

$$\text{شغل (ب-ح)} = \mathcal{E} \left[ \text{ص } ٢ - \frac{٢}{\gamma} \text{ ص } ٣ \right] = \mathcal{E} \left[ \frac{٢}{\gamma} \text{ ص } ٣ - \text{ص } ٢ \right]$$

$$= \left[ \gamma^{-١} \mathcal{E} - \gamma^{-١} \mathcal{E} \right] \frac{٢\mathcal{E} \text{ ص } ٢}{(\gamma-١)}$$

$$= \left[ (٢\mathcal{E} \text{ ص } ٢ - ٣\mathcal{E} \text{ ص } ٣) \right] \frac{١}{(\gamma-١)}$$

$$= \left[ (٣\mathcal{E} \text{ ص } ٣ - ٢\mathcal{E} \text{ ص } ٢) \right] \frac{١}{(١-\gamma)}$$

$$\left[ (٢٣ - ١٣) \text{ ث} \right] \frac{1}{(1-\gamma)} =$$

$$\therefore \text{ثمه (ب-د)} = \frac{\text{ث}}{(1-\gamma)} (٢٣ - ١٣)$$

وبالمثل

$$\text{ثمه (د-ا)} = \frac{\text{ث}}{(1-\gamma)} (١٣ - ٢٣)$$

وبجمع المعادلتين السابقتين نجد أن مجموع الشغل الاديباتي المبذول خلال دورة كارنو يساوى صفرًا . . ويكون الشغل الكلي المبذول خلال الدورة بأكملها هو ما يساويه الشغل الايسوثيرمالي ويساوى هذا الشغل مساحة دورة كارنو  $\int_{\text{ب}}^{\text{د}} \text{ح} > \int_{\text{د}}^{\text{ب}} \text{ح}$  على منحني الحجم والضغط .

$$\therefore \text{ الشغل الكلي} = \text{ث} (٢٣ - ١٣) \text{ لو} \left( \frac{٢٢}{١٢} \right) \dots \dots (١٤ - ٥)$$

= مساحة دورة كارنو

ويساوى هذا الشغل أيضاً كمية الحرارة المستهلكة خلال الدورة .

فإذا فرضنا أن كمية الحرارة التي امتصتها آلة كارنو خلال التغير عند الدرجة الساخنة  $١٣$  هو  $\text{ح}$  وأن كمية الحرارة التي أطلقت على شكل عادم خلال التغير عند الدرجة  $٢٣$  هو  $\text{ح}٢$  تكون كمية الحرارة التي استخدمت في عمل الشغل المفيد المحدد بالمعادلة  $(١٤ - ٥)$  هو  $(\text{ح} - \text{ح}٢)$  ، أي أن

$$\therefore \text{ح} - \text{ح}٢ = \text{ث} (٢٣ - ١٣) \text{ لو} \left( \frac{٢٢}{١٢} \right)$$

$$\therefore \frac{٢٣ - ١٣}{١٣} = \frac{\text{ح} - \text{ح}٢}{\text{ح}}$$

$$\therefore \frac{٢٣}{١٣} - ١ = \frac{\text{ح} - \text{ح}٢}{\text{ح}}$$

$$\therefore \frac{\text{ح} - \text{ح}٢}{٢٣} = \text{صفر}$$

ويمكن وضع المعادلة السابقة على الصورة

$$\left[ \frac{S}{V} = \text{صفر} \dots \dots \dots (١٤-٦) \right]$$

والتكامل هنا مأخوذ على دورة كاملة . وسوف نطلق على الحرارة المستهلكة  $S$  ح مقسوماً على درجة الحرارة المطلقة المناظرة  $V$  القصور الحرارى أو الانثروبيا . ويلاحظ من المعادلة السابقة أن تكامل القصور الحرارى في دورة كارنو يكون مساوياً للصفر . فإذا رمزنا للانثروبيا بالرمز  $S$  تصير المعادلة

$$\left[ S = \text{صفر} \right]$$

أى أن  $S = \text{صفر}$  ثابت وهذا يدل على أن الانثروبيا أو القصور الحرارى يظل ثابتاً لا يتغير لدورة كارنو

## ١٤ - ٢ انثروبيا الدورات الانعكاسية عامة :

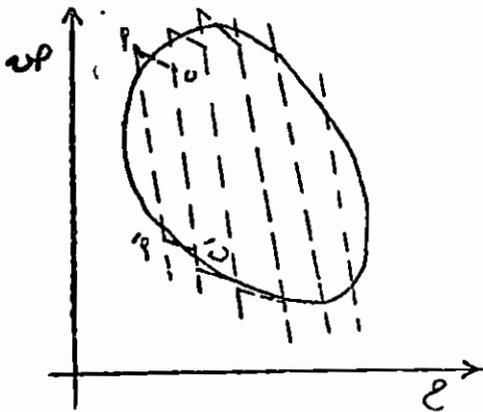
كما سبق فرى أن التغير في الانثروبيا لدورة كارنو الانعكاسية يساوى صفراً ، أى أن

$$\text{صفر} = \frac{٢S}{٢V} - \frac{١S}{١V}$$

اعتبر الآن دورة من التغيرات يمثلها المنحنى المغلق بشكل (١٤ - ١)

ويبين تغير الضغط والحجم أثناء الدورة الانعكاسية.

ونفرض أن الدورة قد تمت بتشغيل عدد لا نهائى من دورات كارنو تعمل بمصادر حرارية يختلف كل منها عن الآخر بكمية صغيرة ويتوالى تشغيلها بوضع أسطوانة الغاز لآلة كارنو على المصدر الحرارى ثم عمل التغيرات في الضغط كما سبق شرحه عند الكلام عن دورة كارنو ، فنحصل على الدورة  $١-٢-٣-٤$  ثم نقل الآلة إلى المصدر الثانى ونكرر العمل فنحصل على دورة ثانية وهكذا . ويتجسيع



(شكل ١٤-١)

عمل مثل هذه الدورات يكون الشغل الآلى المفيد، والتي تم خلال الدورة كلها مساوياً مساحتها .  
 وإذا فرضنا أن  $\mathcal{C}_1$  ،  $\mathcal{C}_2$  ، . . . هي كميات الحرارة التي امتصتها آلة كارنو من المصادر  
 الحرارية ذات الدرجة  $1^\circ$  ،  $2^\circ$  ، . . . على الترتيب وأن  $\mathcal{C}_1$  ،  $\mathcal{C}_2$  ، . . . هي كميات  
 الحرارة المرفوضة على شكل عادم إلى المستقبلات الحرارية ذات الدرجة  $1^\circ$  ،  $2^\circ$  ، . . . على الترتيب  
 وبتطبيق مبدأ كارنو بأن الانتروبيا تظل ثابتة خلال التغيرات الدينامية مثل  $P$  ،  $P^{-1}$  نحصل  
 على :

$$\dots = \frac{\mathcal{C}_2}{2^\circ} = \frac{\mathcal{C}_1}{1^\circ} = \dots = \frac{\mathcal{C}_2}{2^\circ} = \frac{\mathcal{C}_1}{1^\circ}$$

وهذا يعطى للدورة بأكملها :

$$\frac{\mathcal{C}_2}{2^\circ} = \frac{\mathcal{C}_1}{1^\circ} = \dots = \frac{\mathcal{C}_2}{2^\circ} = \frac{\mathcal{C}_1}{1^\circ} \quad (14-6)$$

أى أن القصور الحرارى أو الانتروبيا تظل ثابتة لا تتغير لتسى دورة انعكاسية تماماً كما هو الحال  
 بالنسبة لدورة كارنو .

### ١٤ - ٣ المعنى الفيزيقي للأنتروبيا :

الانتروبيا دالة من دوال الحالة للنظام مثلها مثل الضغط واحجم ودرجة الحرارة أى أنها دالة تفاضلية  
 تامة . يمكن تكاملها وإيجاد قيمة لها .

وبالرغم من ذلك فلا يوجد لدينا أى مقياس معملى يمحّن بواسطته قياس قيمتها مباشرة كبقاى  
 دوال الحالة للنظام . وإنما يمكن فقط حساب قيمتها من العلاقة =

$$\mathcal{C}_2 = \mathcal{C}_1 \frac{2^\circ}{1^\circ} = \dots \dots \dots (14-7)$$

وإذا حاولنا تعريف الانتروبيا بدلالة حركية النظام فإنه يمكن اعتبار أن القصور الحرارى هو  
 مقياس لدرجة الفوضى فى هذا النظام . فمثلا عند تبريد غاز مع ثبوت حجمه فإننا نزيل منه  
 طاقة حرارية كانت مخزونة بداخله وبذلك تقل الانتروبيا وكذلك تقل حركية الجزيئات وبالتالي تقل  
 درجة الفوضى فى حركة هذه الجزيئات . وواضح أنه فى حالة السوائل تكون درجة الفوضى الحركية  
 للجزيئات أقل منها فى حالة الغازات . وباستمرار التبريد يتحول السائل إلى جسم صلب يكون قصوره  
 الحرارى أقل منه فى حالة السيولة وهكذا تتناقص درجة الفوضى بدرجة الحرارة حتى نصل إلى درجة الصفر

المطلق حيث تسكن تماماً كل الحركات في النظام ونصل إلى حالة منتهى الترتيب أى أن درجة الفوضى تكون مساوية للصفر .

نستخلص من هذا المبدأ لتالى المعروف بنظرية نرنست للحرارة : Nernst heat theorem  
« يتلاشى القصور الحرارى لأى نظام إذا تواجد فى درجة الصفر المطلق »

#### ١٤ - ٤ مبدأ نقصان الطاقة وزيادة القصور الحرارى :

لقد أثبتنا أنه لدورة كارنو الانعكاسية ينعدم التغير فى الانثروبيا ، أى أن .

$$\text{صفر} = \frac{٢ح}{٢م} - \frac{١ح}{١م}$$

$$\text{أو} \quad \frac{٢م - ١م}{١م} = \frac{٢ح - ١ح}{١ح} \quad . . . (١٤ - ١)$$

وعندما يكون تشغيل آلة كارنو بين الدرجتين  $١م$  ودرجة الصفر المطلق أى أن  $٢م = \text{صفر}$  تكون كمية الحرارة المرفوضة على شكل عادم إلى المستقبل مساوية للصفر أى أن كل كمية الحرارة  $١ح$  التى امتصها الآلة الحرارية من المصدر الحرارى قد استهلكت فى عمل شغل آلى مفيد وتكون كفاءة الآلة حينئذ مساوية للواحد الصحيح .

عند تطبيق مبدأ كارنو على الآلات الحرارية العملية نجد أن هناك دائماً مصادر تفقد بسببها بعض الطاقة الحرارية كالاتكاك مثلاً أو أى وسط مقاوم لحركة الآلة . مثل هذه الطاقة المفقودة دون فائقة آلية تنقص من كفاءة الآلة العملىة . وكلما ازداد الفقد نقصت الكفاءة . وتسمى مثل هذه الآلة العملية بالآلة الحرارية اللا انعكاسية (irreversible)

$$\text{كفاءة الآلة الحرارية المثالية (كارنو)} = \frac{٢ح - ١ح}{١ح} = \frac{٢م - ١م}{١م}$$

$$\text{كفاءة الآلة الحرارية الواقعية} = \frac{١ح - ٢ح - س}{١ح}$$

حيث  $س$  هى كمية الحرارة المفقودة بالاحتكاك والتى تسبب لا انعكاسية الآلة .  
 . . . بالنسبة للآلة الواقعية تكون

$$\frac{٢ح - ١ح}{١ح} \text{ أقل من } \frac{٢م - ١م}{١م}$$

$$\text{أى أن } \left( \frac{٢٢}{١٣} - ١ \right) \text{ أقل من } \left( \frac{٢٤}{١٤} - ١ \right)$$

$$\therefore \frac{٢٢}{١٣} - ١ \text{ أقل من } \frac{٢٤}{١٤} - ١$$

$$\therefore \frac{٢٤}{١٤} - \frac{٢٢}{١٣} \text{ أقل من الصفر}$$

$$\therefore \frac{١٣}{١٤} - \frac{١٣}{٢٢} \text{ أقل من الصفر}$$

$$\text{أى أن } \frac{١٣}{١٤} - \frac{٢٢}{٢٢} \text{ أكبر من الصفر}$$

أى أن ٢ - ١ أكبر من الصفر . . . . . (٩ - ١٤)

من ذلك نستنتج أن التغيير في الانتروبيا لأي آلة حرارية لا انعكاسية لا يساوى الصفر وهذا يعنى أن استمرار تشغيل مثل هذه الآلات يزيد باستمرار من درجة الفوضى في النظام الذى تعمل فيه .

وعلى ذلك إذا علمنا أن جميع الآلات الحرارية التى تعمل في عالمنا هذا هى آلات لا انعكاسية لذلك فإنه باستمرار التشغيل يزداد القصور الحرارى شيئاً فشيئاً ويعتبر ذلك أحياناً القانون الثانى للديناميكا الحرارى وينص على :

« تؤول الانتروبيا في نظامنا الكونى إلى نهاية عظمى »

أو :

« تؤول إلى الصفر كمية الطاقة التى يمكن الاستفادة منها في هذا الكون عندما تصل درجة الفوضى

فيه إلى نهاية عظمى » .

ويجدر بالذكر هنا أن تشغيل أى آلة حرارية يستلزم نقل كمية من الحرارة من المصدر الساخن إلى المستقبل . ولما كانت السعات الحرارية للمصادر مهما كان نوعها ساعات محدودة ، لذلك تنخفض باستمرار درجة حرارة المصادر بينما تزداد باستمرار درجة حرارة المستقبلات . ولذلك تقرب درجات حرارة المصادر والمستقبلات من بعضها حتى تساوى في النهاية عندما تصل درجة الفوضى في النظام الكونى نهاية عظمى وعندئذ لن يمكن تشغيل أية آلة حرارية مهما كان نوعها فيصل الكون إلى نهايته أى إلى حالة السكون الأعظم .

واستناداً إلى هذه النتيجة العلمية أمكن الاستدلال على أن بدء الخليقة كان منذ عدد محدود من السنين وإلا كنا قد وصلنا إلى حالة منتهى القوضى أى السكون الأعظم .

### ١٤ - ٥ انثروبيا الغاز التام :

نفرض أن كمية من غاز مثالي تكون مادة التشغيل في دورة كارنو وإن الآلة تنتج شغلا قدره  $\mathcal{E}$  ثم عندما يستهلك قدر من الحرارة  $\mathcal{H}$  من المصدر الساخن ذي الدرجة  $\mathcal{M}$  وأن التغير المصاحب في الطاقة الداخلية للنظام (الغاز) هو  $\mathcal{U}$  .

من القانون الأول للديناميكا الحرارية والذي يركز على مبدأ بقاء الطاقة

$$\mathcal{H} = \mathcal{U} + \mathcal{E} \quad \text{ش} \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad (١٤ - ١٠)$$

ويلاحظ أن  $\mathcal{E}$  ش مقاسة بنفس وحدات  $\mathcal{H}$  ،  $\mathcal{U}$  حتى تكون المعادلة متجانسة بعدياً .

بالقسمة على درجة الحرارة المطلقة  $\mathcal{M}$  نحصل على التغير في انثروبيا الغاز

$$\therefore \mathcal{E} = \mathcal{H} = \frac{\mathcal{U} + \mathcal{E} \text{ ش}}{\mathcal{M}} \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad (١٤ - ١١) :$$

ولكن معدل التغير في الطاقة الداخلية للنظام مع درجة حرارته عند ثبوت الحجم هو الحرارة النوعية تحت حجم ثابت  $\mathcal{V}$  ، أن أن

$$\mathcal{U} = \mathcal{V} \cdot \mathcal{E} \quad \mathcal{M}$$

وكذلك سبق أن أثبتنا أن

$$\mathcal{E} \text{ ش} = \mathcal{V} \cdot \mathcal{E} \quad \mathcal{H}$$

∴ و التعويض في المعادلة (١٤ - ١١) نحصل على

$$\mathcal{E} = \mathcal{V} \cdot \mathcal{E} + \frac{\mathcal{U} \text{ ش}}{\mathcal{M}}$$

ولكن  $\mathcal{E} = \mathcal{V} \cdot \mathcal{E} \quad \mathcal{H}$

$$\therefore \mathcal{E} = \mathcal{V} \cdot \mathcal{E} + \frac{\mathcal{U} \text{ ش}}{\mathcal{M}}$$

أيضاً  $\mathcal{V} = \mathcal{H} - \mathcal{E} \quad \mathcal{H}$

$$\mathcal{E} = \mathcal{V} \cdot \mathcal{E} + (\mathcal{V} - \mathcal{H}) \cdot \mathcal{E} \quad \mathcal{H}$$

$$\mathcal{V} \cdot \mathcal{E} = \mathcal{V} \cdot \mathcal{E} + (\mathcal{V} - \mathcal{H}) \cdot \mathcal{E} \quad \mathcal{H}$$

$$\mathcal{V} \cdot \mathcal{E} = \mathcal{V} \cdot \mathcal{E} + (\mathcal{V} - \mathcal{H}) \cdot \mathcal{E} \quad \mathcal{H}$$

وبالتكامل

$$\therefore \text{ع} = (ص. ح) = ص \text{ لو } ص. ح. ص + ١ - ٢ \text{ ع} + ١ \text{ ع}$$

$$\text{حيث } \gamma = \frac{ص}{ح} = ١ \text{ ع} \text{ هو ثابت التكامل .}$$

وبالمثل يمكن إيجاد دالة الانتروبيا بدلالة الضغط ودرجة الحرارة

$$\text{ع} = (ص. ح) = ص \text{ لو } ص - ص \text{ لو } ص + ١ \text{ ع}$$

وكذلك بدلالة الضغط والحجم

$$\text{ع} = (ح. ص) = ح \text{ لو } ح - ح \text{ لو } ح + ١ \text{ ع}$$

كما يمكن إيجاد العلاقة بين ثوابت التكامل  $\gamma_1$  ،  $\gamma_2$  ،  $\gamma_3$  على الصورة :

$$\gamma_1 = \gamma_2 - \gamma_3 \text{ لو } \theta$$

$$\gamma_2 = \gamma_3 - \gamma_1 \text{ لو } \theta$$

ويترك إثبات ذلك كتمرين للطالب

مثال : أوجد التغير في الانتروبيا عندما يتحول جرام واحد من الجليد في درجة الصفر المئوي إلى بخار في درجة ١٠٠ م° .

الحل :

أولاً : التغير في الانتروبيا بالانصهار فقط

$$\Delta S = \frac{Q}{T} = \frac{80}{273} = 0,293$$

ويلاحظ هنا أن كمية الحرارة التي استخدمت لإحداث التغير وهي  $Q$  هي نفسها الحرارة الكامنة لانصهار الجليد ٨٠ سعر / جم .

ثانياً : لكي ترتفع درجة حرارة الجرام من الماء من الصفر للمئوي وحتى ١٠٠ م° نحتاج لكمية حرارة

$$Q = \text{ح} = \text{الكتلة} \times \text{الحرارة النوعية} \times \text{فرق درجات الحرارة}$$

$$= \text{ك} \times \text{ص} \times \text{س}$$

ويكون التغير في الانتروبيا خلال هذا التغير هو

$$S = 2 \int_1^2 \frac{1}{\sqrt{u}} du = 2 \left[ \sqrt{u} \right]_1^2 = 2(\sqrt{2} - 1) \approx 2(1.414 - 1) = 0.828$$

$$= \frac{373}{273} \times 1.0 \times 1 = 1.366$$

$$= 0.1355 \times 2,303 = 0.312$$

$$= 0.312 \text{ سعر/م}^3$$

ثالثاً : التغير في الانتروبيا عندما يتحول الجرام ماء في درجة ١٠٠ م إلى بخار في نفس الدرجة هو .

$$S = \frac{540}{373} = 1.448 \text{ سعر/م}^3$$

وقد اعتبرنا  $S$  ح هنا هي الحرارة الكامنة للتصعيد وهي ٥٤٠ سعر/جم وبجمع التغيرات الثلاثة في الانتروبيا نحصل على التغير الكلي المطلوب  $S = 2,053$  سعر/م<sup>3</sup>

### تمرين

نقطة انصهار الرصاص ٣٢٧ م وحرارته الكامنة للانصهار هي ٥.٨٦ سعر/جم أوجد التغير في القصور الحراري عندما ينصهر ٤ جم جزئىء من الرصاص علماً بأن الوزن الذرى له ٢٠٧ (الجواب : ٨,١ سعر/م)

### ١٤ - ٦ المعادلة الأولى للطاقة :

نفرض أن التغيرات  $S$  ح ،  $S$  ص والتي تحدث في نظام ما تتم عن طريق تغيرات في الحجم  $S$  ح ودرجة الحرارة  $S$  م . من القانون الأول للديناميكا الحرارية .

$$S = S + S + S \dots \dots \dots (14-12)$$

فإذا تغيرت بالزيادة درجة الحرارة بمقدار  $S$  م بينما ظل الحجم  $S$  ح ثابتاً يكون التغير المناظر في الطاقة الداخلية  $S$  ط هو

$$S = S \left( \frac{S}{S} \right) = S$$

وعلامة التفاضل هنا (  $S$  ) تدل على تفاضل جزئى والرمز  $S$  أسفل القوس يدل على أن الحجم قد

حفظ ثابتاً أثناء التغير .

وبالمثل إذا ازداد الحجم بمقدار  $\delta C$  مع تثبيت درجة الحرارة  $\delta M$  يكون التغير الجزئي في الطاقة الداخلية هو

$$\delta C = \left( \frac{\partial C}{\partial \delta C} \right) \delta C$$

وبذلك يمكن كتابة التغير الكامل في الطاقة الداخلية للنظام عندما يتغير كل من الحجم ودرجة الحرارة على الصورة

$$\delta C = \left( \frac{\partial C}{\partial \delta C} \right) \delta C + \left( \frac{\partial C}{\partial \delta M} \right) \delta M \quad \dots \dots \dots (14-13)$$

وبالتعويض في معادلة (14-12) نحصل على

$$\delta C = \left( \frac{\partial C}{\partial \delta M} \right) \delta M + \left[ \delta C + \left( \frac{\partial C}{\partial \delta C} \right) \delta C \right] \delta C \quad \dots (14-14)$$

وإذا أعطيت الحرارة  $\delta C$  مع تثبيت الحجم (أى أن  $\delta M = 0$ ) يكون

$$\delta C = \left( \frac{\partial C}{\partial \delta M} \right) \delta M \quad \delta C = \delta M$$

وبالتعويض في المعادلة (14-14) نحصل على المعادلة التفاضلية العامة للقانون الأول في

الديناميكا الحرارية عندما تكون المتغيرات من دوال الحالة هي الحجم  $\delta C$  ودرجة الحرارة  $\delta M$ .

$$\delta C = \left( \frac{\partial C}{\partial \delta M} \right) \delta M + \left[ \delta C + \left( \frac{\partial C}{\partial \delta C} \right) \delta C \right] \delta C \quad \dots \dots (14-15)$$

وللتعبير عن القانون الثاني الذى يعرف الانتروبيا نقسم على درجة الحرارة

$$\delta C = \left[ \frac{\delta C}{\delta M} + \left( \frac{\partial C}{\partial \delta C} \right) \frac{1}{\delta M} \right] \delta M + \frac{\delta C}{\delta M} \delta C = \delta C = \frac{\delta C}{\delta M} \delta M \quad \dots$$

(14-16) .....

وباعتبار أن دالة الانتروبيا تتغير بدلالة الحجم ودرجة حرارة

$$\delta C = \left( \frac{\partial C}{\partial \delta M} \right) \delta M + \left( \frac{\partial C}{\partial \delta C} \right) \delta C = \delta C$$

وبمقارنة المعادلتين السابقتين نجد أن

$$\frac{E^2}{V} = E \left( \frac{E}{V} \right)$$

(١٧-١٤) ... ..

$$\frac{V}{V} + \left( \frac{E}{E} \right) \frac{1}{V} = \left( \frac{E}{E} \right)$$

ونظراً لأن  $V$  موجبة دائماً لذلك نستنتج مباشرة من المعادلة (١٤-١٦) أن القصور الحراري يزداد دائماً كلما ازدادت درجة حرارة النظام مع ثبوت حجمه .

ولإيجاد معادلة تربط تغير الطاقة الداخلية  $E$  مع الحجم  $V$  عند ثبوت درجة الحرارة  $T$  نفاضل المعادلة (١٤-١٧) بالنسبة لدرجة الحرارة والحجم فنحصل على :

$$\begin{aligned} \left( \frac{E}{E} \right) \frac{1}{V} &= \frac{E^2}{V E} \\ \frac{V}{V} - \frac{E^2}{E V} \cdot \frac{1}{V} + \left( \frac{E}{E} \right) \frac{1}{V} &= \frac{E^2}{E V} \\ \left( \frac{V}{V} \right) \frac{1}{V} + \end{aligned}$$

$$\frac{E^2}{E V} = \frac{E^2}{V E} \quad \text{لكن}$$

$$\frac{E^2}{V E} = \left( \frac{E}{V} \right) \frac{E}{E} = \left( \frac{E}{E} \right) \frac{E}{E} \quad \text{أيضاً}$$

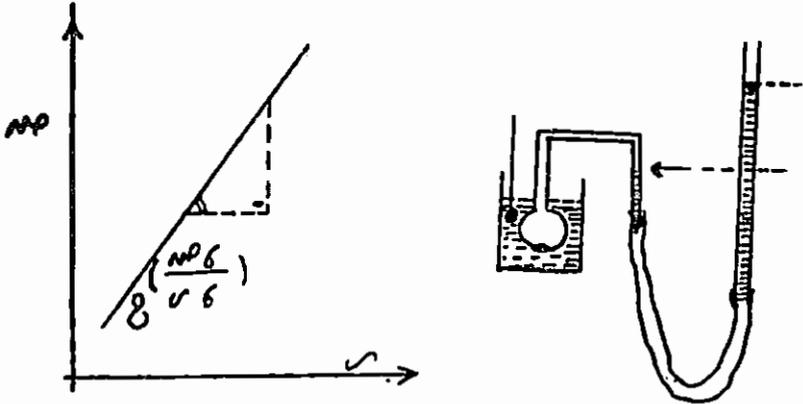
بالتعويض في المعادلة السابقة وبالاختصار نحصل على

$$(١٤-١٨) \dots \dots \dots V - \left( \frac{E}{V} \right) V = \left( \frac{E}{E} \right)$$

وتعرف هذه المعادلة بالمعادلة الأولى للطاقة حيث يمكن بواسطتها تعيين معدل تغير الطاقة الداخلية للنظام عن طريق قياس معدل تغير الضغط مع درجة الحرارة وكميات يمكن قياسها عملياً .

فمثلاً في حالة غاز يتغير ضغطه مع درجة حرارته مع تثبيت حجمه كما في جهاز جولي (شكل ١٤-٢) نجد أن رسماً بيانياً بين الضغط  $V$  ودرجة الحرارة  $E$  يعطى خطأً مستقيماً ميله هو الكمية

$$E \left( \frac{V}{V} \right)$$



(شكل ١٤-٢)

وبالتعويض من المعادلة (١٤-١٨) في المعادلة (١٤-١٧) نحصل على

$$P \left( \frac{V}{V_0} \right) = P_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)$$

وباعتبار مادة لها معامل تمدد موجب نجد أن الضغط يزداد بزيادة درجة الحرارة أى أن

$$\left( \frac{P}{V} \right) < \text{صفر}$$

أى أن انتروبيا النظام يزداد بزيادة الحجم مع ثبوت درجة الحرارة . .

وبالتعويض من المعادلة (١٤-١٨) في معادلة (١٤-١٦) نحصل على المعادلة التفاضلية

للقانون الثانى فى الديناميكا الحرارية عندما تكون المتغيرات هى الحجم ودرجة الحرارة ، أى أن

$$dS = \frac{P}{T} dV + \frac{C_V}{T} dT \dots \dots \dots (١٤-١٩)$$

١٤ - ٧ المعادلة الثانية للطاقة .

تعطى هذه المعادلة تغير الطاقة الداخلية للنظام مع الضغط عندما تكون درجة الحرارة ثابتة . نعتبر هنا متغيرات الحالة هما الضغط ودرجة الحرارة ثم نوجد قيم باقى دوال الحالة كالطاقة الداخلية والانتروبيا والحجم بدلا لهما . أى أن

$$dS = \frac{C_P}{T} dT + \left( \frac{P}{T} \right) dV \dots \dots \dots (١٤-٢٠)$$

$$(١٤-٦١) \dots \dots \dots \epsilon \left( \frac{C_6}{V_6} \right) + \epsilon \left( \frac{C_6}{V_6} \right) = \epsilon$$

$$(١٤-٦٢) \dots \dots \dots \epsilon \left( \frac{C_6}{V_6} \right) - \epsilon \left( \frac{C_6}{V_6} \right) = \epsilon$$

من القانون الأول للديناميكا الحرارية وبالتعويض من المعادلات (١٤-٢٠) ، (١٤-٦١)

$$\epsilon = \frac{1}{V} + \frac{\epsilon}{V}$$

$$\therefore \epsilon \left[ \left( \frac{C_6}{V_6} \right) + \left( \frac{C_6}{V_6} \right) \right] \frac{1}{V} = \epsilon$$

$$\left[ \left( \frac{C_6}{V_6} \right) + \left( \frac{C_6}{V_6} \right) \right] \frac{\epsilon}{V} +$$

$$\epsilon \left[ \left( \frac{C_6}{V_6} \right) \frac{\epsilon}{V} + \left( \frac{C_6}{V_6} \right) \frac{1}{V} \right] = \epsilon$$

$$(١٤-٦٣) \dots \dots \dots \left[ \left( \frac{C_6}{V_6} \right) \frac{\epsilon}{V} + \left( \frac{C_6}{V_6} \right) \frac{1}{V} \right] +$$

بمقارنة المعادلتين المماثلتين (١٤-٢٢) ، (١٤-٢٣) وبمساواة المعاملات نحصل على :

$$\left( \frac{C_6}{V_6} \right) \frac{\epsilon}{V} + \left( \frac{C_6}{V_6} \right) \frac{1}{V} = \left( \frac{C_6}{V_6} \right)$$

$$\left( \frac{C_6}{V_6} \right) \frac{\epsilon}{V} + \left( \frac{C_6}{V_6} \right) \frac{1}{V} = \left( \frac{C_6}{V_6} \right)$$

بمفاضلة المعادلة الأولى بالنسبة لدرجة الحرارة والثانية بالنسبة للضغط نحصل على

$$\left( \frac{C_6^2}{V_6^2} \right) \frac{1}{V} + \left( \frac{C_6}{V_6} \right) \frac{1}{V} = \frac{C_6^2}{V_6^2}$$

$$\left( \frac{C_6^2}{V_6^2} \right) \frac{\epsilon}{V} + \left( \frac{C_6}{V_6} \right) \frac{\epsilon}{V} =$$

$$\left(\frac{E_6}{V_6}\right) \frac{1}{V} + \left(\frac{P_6}{V_6 - V_6}\right) \frac{1}{V} = \frac{E_6}{V_6 - V_6}$$

$$\left(\frac{E_6}{V_6 - V_6}\right) \frac{V}{V} +$$

وبمساواة المعادلتين السابقتين نحصل على المعادلة الثانية للطاقة

$$\left(\frac{E_6}{V_6}\right) \frac{V}{V} - \left(\frac{E_6}{V_6}\right) \frac{V}{V} = \left(\frac{P_6}{V_6 - V_6}\right)$$

(١٤ - ٢٤) . . . . .

وتعطي هذه المعادلة معدل تغير الطاقة الداخلية  $P$  مع الضغط عند ثبوت درجة الحرارة وذلك عن

طريق قياس معاملات التغير  $\left(\frac{E_6}{V_6}\right) = \left(\frac{E_6}{V_6}\right)$  ويعبر الأول عن التمدد الحجمي

عند ثبوت الضغط والثاني عن انضغاط النظام عند ثبوت درجة حرارته

$$\text{معامل التمدد الحجمي } \alpha = \left(\frac{E_6}{V_6}\right) \frac{1}{E} \text{ مع ثبوت الضغط}$$

$$\text{معامل الانضغاط } \kappa = \left(\frac{E_6}{V_6}\right) \frac{1}{E} - \text{ مع ثبوت درجة الحرارة}$$

#### ١٤ - ٨ معادلات ماكسويل في الديناميكا الحرارية :

نستخدم عادة لتعريف أى نظام فى حالة اتزان ديناميكى حرارى بعض المتغيرات التى يطلق عليها دوال الحالة *functions of state* مثل الضغط والحجم ودرجة الحرارة والانتروبيا ونضيف الآن إلى هذه الدوال أربعة دوال أخرى لها أهمية فيزيقية فى تعريف حالة النظام كما أنها تيسر لنا حساب معدلات التغير للدوال الحالة بالنسبة لبعضها البعض خاصة لتلك المتغيرات التى لا يوجد لها وسيلة قياس مباشرة فى المعمل .

أولاً - الطاقة الداخلية أو الذاتية للنظام ( $P$ ) : *Intrinsic energy*

وتعرف من معادلة القانون الأول للديناميكا الحرارية

أساسيات الميكانيكا

$$\begin{aligned} \text{ط} &= \text{ح} - \text{ص} \cdot \text{و} \cdot \text{ع} \\ \text{م} &= \text{س} - \text{ع} \cdot \text{ص} \cdot \text{و} \cdot \text{ع} \end{aligned}$$

وعندما يكون الحجم ثابتاً يكون التغير  $\text{و} = \text{ص}$  وبذلك يكون معدل تغير الطاقة الداخلية

$$\text{بالنسبة للانتروبيا} \left( \frac{\text{ط}}{\text{ع}} \right) = \text{م} \text{ أى مساوياً للدرجة الحرارة المطلقة .}$$

كذلك إذا أجرى تغير أدياباتي على النظام تكون الانتروبيا ثابتة ويكون بذلك  $\text{و} = \text{ص}$  فنحصل على

$$\text{ص} = \left( \frac{\text{ط}}{\text{ع}} \right)$$

وهذه المعادلة تعطي معدل تغير الطاقة الداخلية مع الحجم عند ثبوت الانتروبيا .

وبمفاضلة المعادلة الأولى بالنسبة للحجم والثانية بالنسبة للانتروبيا وبمساواة

$$\frac{\text{ط}^2}{\text{ع}^2} = \frac{\text{ط}^2}{\text{ع}^2}$$

نحصل على المعادلة الأولى لماكسويل على الصورة

$$(14-26) \dots \dots \dots \left( \frac{\text{ص}}{\text{ع}} \right) = \left( \frac{\text{م}}{\text{ع}} \right)$$

ثانياً - الطاقة الحرة أو دالة هيلمهولتز : Free energy

تعرف الطاقة الحرة أو الطليقة ( ف ) بالمعادلة

$$(14-27) \dots \dots \dots \text{ف} = \text{ط} - \text{م} \cdot \text{و}$$

وبمفاضلة المعادلة

$$\text{و} \cdot \text{ف} = \text{و} \cdot \text{ط} - \text{و} \cdot \text{م} \cdot \text{و} = \text{و} \cdot \text{م}$$

$$\text{و} \cdot \text{ف} = \text{و} \cdot \text{ط} - \text{و} \cdot \text{م} \cdot \text{و} = \text{و} \cdot \text{م}$$

$$\text{و} \cdot \text{ف} = \text{و} \cdot \text{ط} - \text{و} \cdot \text{م} \cdot \text{و} = \text{و} \cdot \text{م}$$

وتكون بذلك متغيرات دالة هيلمهولتز هما درجة الحرارة  $\text{و}$  والحجم  $\text{ع}$  ويمكن كتابة التغير  $\text{و} \cdot \text{ف}$

على الصورة

$$\text{و} \cdot \text{ف} = \text{و} \cdot \left( \frac{\text{ف}}{\text{ع}} \right) + \text{م} \cdot \left( \frac{\text{ف}}{\text{و}} \right)$$

وبمساواة معاملات المعادلتين السابقتين نحصل على

$$- \frac{1}{T} = \left( \frac{\partial F}{\partial E} \right)_M, \quad - \frac{1}{T} = \left( \frac{\partial F}{\partial M} \right)_E$$

وبمفاضلة المعادلة الأولى بالنسبة للحجم والثانية بالنسبة لدرجة الحرارة ومساواتهما نحصل على :

$$\left( \frac{\partial E}{\partial M} \right)_E = \left( \frac{\partial E}{\partial E} \right)_M \quad \dots \dots \dots (14-28)$$

وتعرف هذه بمعادلة ماكسويل الثانية في الديناميكا الحرارية .

**ثالثاً - المحتوى الحرارى أو الانتالبي (هـ) : Heat Content**

تعرف دالة الانتالبي أو المحتوى الحرارى هـ بالمعادلة

$$H = E + PV \quad \dots \dots \dots (14-29)$$

ولا تتوقف هذه الدالة (وهي من دوال الحالة في النظام) على مسار التغير وحتى الوصول إلى حالة النظام القائمة . بمفاضلة المعادلة

$$\begin{aligned} dH &= dE + PdV + VdP \\ &= TdS - Md\mu + PdV + VdP \\ &= dE + PdV + Md\mu + VdP \end{aligned}$$

وإذا اعتبرنا متغيرات دالة الانتالبي هما الانتر وبيبا  $\mu$  والضغط  $P$  يكون أسوة بما سبق :

$$\left( \frac{\partial H}{\partial \mu} \right)_E = -M, \quad \left( \frac{\partial H}{\partial E} \right)_M = 1$$

وبمفاضلة المعادلة الأولى بالنسبة للضغط والثانية بالنسبة للانتروبييا وبمساواتهما

$$\left( \frac{\partial E}{\partial \mu} \right)_E = -M \quad \dots \dots \dots (14-30)$$

وهذه هي ثالث معادلات ماكسويل في الديناميكا الحرارية .

**رابعاً - الجهد الحرارى أو دالة جيب (ج) : Gibb's function-Thermal potential**

تعرف دالة جيب أو الجهد الحرارى ج بالمعادلة

$$G = E - TS + PV \quad \dots \dots \dots (14-31)$$

وهي أيضاً من دوال الحالة للنظام ولا تتوقف على مسار التغيرات التي تؤدي بالنظام إلى حالته القائمة بمفاضلة المعادلة .

$$\begin{aligned} \therefore \quad \mathcal{G} = \mathcal{H} - \mathcal{U} + \mathcal{P} - \mathcal{V} + \mathcal{W} + \mathcal{X} + \mathcal{Y} + \mathcal{Z} \\ = - \mathcal{U} + \mathcal{P} + \mathcal{W} + \mathcal{X} + \mathcal{Y} + \mathcal{Z} \end{aligned}$$

وتكون المتغيرات هنا هما الضغط ودرجة الحرارة . وكما سبق يمكن الحصول على المعاملات التفاضلية الجزئية للدالة جيب :

$$\mathcal{G} = \left( \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial \mathcal{U}} \right)_{\mathcal{P}, \mathcal{V}, \mathcal{W}, \mathcal{X}, \mathcal{Y}, \mathcal{Z}} \quad \mathcal{U} = \left( \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial \mathcal{U}} \right)_{\mathcal{P}, \mathcal{V}, \mathcal{W}, \mathcal{X}, \mathcal{Y}, \mathcal{Z}}$$

ولكن قيمة  $\mathcal{U}$  ج تفاضلية تامة لأن  $\mathcal{G}$  من دوال الحالة لذلك بمفاضلة المعادلة الأولى بالنسبة لدرجة الحرارة والثانية بالنسبة للضغط وبمساواتهما

$$\therefore \quad \left( \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial \mathcal{U}} \right)_{\mathcal{P}, \mathcal{V}, \mathcal{W}, \mathcal{X}, \mathcal{Y}, \mathcal{Z}} = \left( \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial \mathcal{U}} \right)_{\mathcal{P}, \mathcal{V}, \mathcal{W}, \mathcal{X}, \mathcal{Y}, \mathcal{Z}} \quad \dots \dots ( ١٤ - ٣٢ )$$

وهذه هي معادلة ماكسويل الرابعة .

وبما سبق نرى أن دوال الحالة  $\mathcal{H}$  ،  $\mathcal{F}$  ،  $\mathcal{G}$  لا تعبر عن طريق التغير في النظام وإنما تعرف العلاقات التي تربط هذه المتغيرات ببعضها داخل النظام الواحد عندما يكون في حالة اتزان ديناميكي حراري . ويستوى في ذلك النظام الفيزيقي أو الكيميائي أو أي نظام شبيه .

## الباب الخامس عشر

### تطبيقات في الديناميكا الحرارية

١٥ - ١ الفرق بين الحرارة النوعية تحت ضغط ثابت وتحت حجم ثابت :

نفرض نظاماً كيميائياً تتغير فيه دالة الانتروبيا بدلالة متغيرين من متغيرات الحالة هما درجة الحرارة والحجم .

$$\therefore \quad \left( \frac{\partial E}{\partial T} \right)_V = C_V \quad \text{و} \quad \left( \frac{\partial E}{\partial V} \right)_T = P$$

وبالضرب في درجة الحرارة  $T$

$$\therefore \quad T C_V = T \left( \frac{\partial E}{\partial T} \right)_V + P T \left( \frac{\partial E}{\partial V} \right)_T$$

ولكن من تعريف الحرارة النوعية تحت حجم ثابت

$$T C_V = \left( \frac{\partial E}{\partial T} \right)_V = C_V$$

وأيضاً من معادلة ماكسويل الثانية في الديناميكا الحرارية

$$\left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_V = \left( \frac{\partial^2 E}{\partial T \partial V} \right)$$

$$\therefore \quad T C_V = C_V + T P \left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_V \quad \dots \quad (1-15)$$

وتعرف هذه بمعادلة  $T C_V = C_V + P T \left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_V$  الأولى .

وبالمثل إذا أحدثنا تغييراً في النظام عن طريق المتغيرين الضغط ودرجة الحرارة يتغير الانتروبيا تبعاً لذلك .

$$\therefore \quad \left( \frac{\partial E}{\partial T} \right)_P = C_P \quad \text{و} \quad \left( \frac{\partial E}{\partial P} \right)_T = -V$$

وبالضرب في  $v$

$$\therefore v \cdot m = v \cdot m \cdot \left(\frac{v}{v_0}\right)^m + v \cdot m \cdot \left(\frac{v}{v_0}\right)^m \cdot v$$

ولكن أيضاً من تعريف الحرارة النوعية تحت ضغط ثابت

$$\therefore v \cdot m = v \cdot m \cdot \left(\frac{v}{v_0}\right)^m = v \cdot m \cdot \left(\frac{v}{v_0}\right)^m$$

ومن معادلات ماكسويل

$$\left(\frac{v}{v_0}\right)^m = \left(\frac{v}{v_0}\right)^m$$

$$\therefore v \cdot m = v \cdot m \cdot \left(\frac{v}{v_0}\right)^m \quad \dots \quad (10-2)$$

وتسمى هذه بمعادلة  $v \cdot m$  الثانية .

وبمساواة معادلتى  $v \cdot m$  نحصل على :

$$v \cdot m \cdot \left(\frac{v}{v_0}\right)^m = v \cdot m \cdot \left(\frac{v}{v_0}\right)^m + v \cdot m \cdot \left(\frac{v}{v_0}\right)^m \cdot v$$

ويحل المعادلة نحصل على

$$v \cdot m = \frac{v \cdot m}{(v - v_0)} \cdot \left(\frac{v}{v_0}\right)^m \cdot v$$

$$+ \frac{v \cdot m}{(v - v_0)} \cdot \left(\frac{v}{v_0}\right)^m \cdot v \quad \dots \quad (10-3)$$

ولكن بما أن درجة الحرارة  $v$  من دوال الحالة أى أن  $v$  و  $m$  تفاضل تام يمكن إيجاد تغير درجة الحرارة بدلالة المتغيرين الضغط والحجم كما يلي

$$v \cdot m = v \cdot m \cdot \left(\frac{v}{v_0}\right)^m + v \cdot m \cdot \left(\frac{v}{v_0}\right)^m \quad \dots \quad (10-4)$$

وبمساواة معاملات المعادلتين (10-3)، (10-4) نحصل على

$$\frac{C}{V} \left( \frac{V}{C} \right) = \frac{V}{C} \left( \frac{C}{V} \right)$$

$$\frac{C}{V} \left( \frac{V}{C} \right) = \frac{V}{C} \left( \frac{C}{V} \right)$$

وتعطي أى من المعادلتين السابقتين الفرق بين الحرارتين النوعيتين  $V$  و  $C$

$$(15-10) \dots \dots \frac{C}{V} \left( \frac{V}{C} \right) \cdot \frac{V}{C} \left( \frac{C}{V} \right) = V - C$$

ونظراً لأن كلا من الحجم والضغط يزداد دائماً مع زيادة درجة الحرارة أى أن  $\frac{C}{V}$  وكذلك  $\frac{V}{C}$

دائماً موجبة لذلك تكون  $V - C$  دائماً موجبة

أى أن  $V - C$  دائماً أكبر من  $V - C$  . ولتعيين قيمة الفرق  $V - C$  بدلالة ثوابت فيزيائية يمكن قياسها بالمعمل نستخدم العلاقة الدورية ، وهى علاقة رياضية يكثر استخدامها فى الديناميكا الحرارية .

#### العلاقة الدورية : Teh cyclic relation

نفرض أن مادة ما تكون نظاماً يتغير فيه الضغط مع الحجم ودرجة الحرارة وفقاً لمعادلة الحالة

$$C = C(V, P)$$

بالتفاضل نحصل على

$$dC = \left( \frac{\partial C}{\partial V} \right) dV + \left( \frac{\partial C}{\partial P} \right) dP$$

وعندما يكون التغير فى الحجم ودرجة الحرارة مع ثبوت الضغط  $C$  يكون  $dC = 0$  وتختصر

المعادلة السابقة لتعطي المعادلة الدورية :

$$\left( \frac{\partial C}{\partial V} \right) = - \left( \frac{\partial C}{\partial P} \right) \cdot \left( \frac{\partial P}{\partial V} \right)$$

أى أن

$$1 = \left( \frac{\partial C}{\partial V} \right) \cdot \left( \frac{\partial V}{\partial C} \right) \cdot \left( \frac{\partial C}{\partial P} \right)$$

ويجب أن نلاحظ هنا دورية كتابة المتغيرات  $v$  ،  $g$  ،  $v$  في المعادلة .  
 وتطبيق المعادلة الدورية في المعادلة (١٥ - ٥) لإيجاد  $v - v$  نحصل على

$$v - v = g - v \left( \frac{g}{v} \right) \dots \dots (١٥ - ٦)$$

لكن من تعريف معامل الانضغاط الايسوترمالي وهو مقلوب معامل المرونة الحجمي عند ثبيت درجة الحرارة :

$$\text{معامل الانضغاط الايسوترمالي} = - \frac{1}{g} \left( \frac{g}{v} \right)$$

وكذلك من تعريف معامل التمدد الطولي  $\alpha$  (مع معرفة أن معامل التمدد الحجمي ثلاثة أمثال معامل التمدد الطولي) ويقاس تحت ضغط جوي ثابت

$$\alpha = \frac{1}{v} \left( \frac{g}{v} \right)$$

وبالتعويض في المعادلة (١٥ - ٦) نحصل على

$$v - v = g \times \frac{1}{\alpha v} - \times v =$$

$$(١٥ - ٦) \dots \dots \dots \frac{v g \alpha}{\alpha} = v - v$$

وتعطي هذه المعادلة الفرق بين الحرارة النوعية تحت ضغط وتحت حجم ثابت . وليس من الميسر تعيين الحرارة النوعية للمادة تحت حجم ثابت عندما تكون المادة في حالتها الصلبة أو السائلة ولذلك فأهمية العلاقة السابقة تكمن في أنها تيسر لنا إيجاد تلك القيمة مباشرة وذلك بقياس  $v$  لنفس المادة مع استخدام تلك العلاقة لإيجاد  $v$  .

## ١٥ - ٢ تغير الحالة :

### المعادلة الأولى للحرارة الكامنة :

عند نقطة الانصهار فقط يتواجد طورى المادة الصلب والسائل في حالة اتزان ديناميكي حرارى . لذلك إذا رسمنا منحى تغير الضغط والحجم عندما تكون درجة الحرارة ثابتة وذات قيمة أقل من الدرجة الحرجة فإننا نحصل على منحى مثل  $s$   $s$  يكون الجزء الأفقى منه  $h$  ممثلاً لمرحلة التحول من حالة



٢ ب لكي تتحول تماماً من حالة السيولة عند ١ إلى حالة البخار عند ٢ تكون هذه الحرارة مساوية للحرارة الكامنة للتصعيد ص / سم<sup>٣</sup> .

$$\text{ويكون الشغل المبذول } \mathcal{W} = \mathcal{H}_2 - \mathcal{H}_1$$

$$= \text{مساحة الدورة}$$

حيث  $\mathcal{H}_2$  هي كمية الحرارة المرفوعة من الآلة على شكل عادم .  
ويمكن حساب الشغل  $\mathcal{W}$  من مساحة الدورة حيث

$$\mathcal{W} = \mathcal{V}(\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2)$$

$\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2$  هما الحجمان النوعيان للسائل والبخار ( انظر شكل ١٥ - ١ ) .

$$\text{من مبدأ كارنو: } \frac{\mathcal{H}_2 - \mathcal{H}_1}{\mathcal{H}_1} = \frac{\mathcal{V}_2 - \mathcal{V}_1}{\mathcal{V}_1}$$

$$\text{أي أن: } \frac{\mathcal{W}}{\mathcal{H}} = \frac{\mathcal{V}_2 - \mathcal{V}_1}{\mathcal{V}_1}$$

$$\therefore \frac{\mathcal{W}}{\mathcal{H}} = \frac{\mathcal{V}(\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2)}{\mathcal{V}}$$

$$\therefore \frac{\mathcal{W}}{\mathcal{H}} = \frac{\mathcal{V}}{\mathcal{V}_1} (\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2) \dots \dots \dots (١٥ - ١)$$

وتعرف هذه بمعادلة كلايرون - كلوزيوس الأولى للحرارة الكامنة ومن هذه المعادلة يتضح أنه إذا كانت المادة ذات معامل تمدد موجب أي أنها تزداد في الحجم بالحرارة تكون  $\mathcal{E}_2$  أكبر من  $\mathcal{E}_1$  .

وبذلك يكون معدل تغير الضغط مع درجة الحرارة موجباً أي أن

$$\frac{\mathcal{W}}{\mathcal{H}} \text{ كبر من الصفر}$$

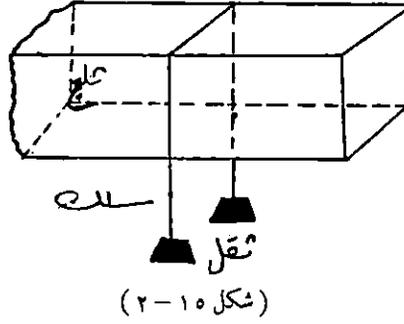
بزيادة الضغط على المادة تزداد درجة حرارة انصهارها بينما يحدث عكس ذلك في حالة

مادة مثل الجليد حيث يقل الحجم النوعي عندما ينصهر الجليد ويتحول إلى ماء .

أي أنه في حالة الماء يكون

$$\frac{\mathcal{W}}{\mathcal{H}} \text{ أقل من الصفر}$$

لذلك بزيادة الضغط على الجليد تنخفض درجة انصهاره ولهذا السبب يقطع سلك رفيع مثبت في طرفيه ثقلان ويستند السلك على لوح من الثلج ، يقطع هذا السلك الثلج كما يقطع السكين في قطعة من الزبد ( انظر شكل ١٥ - ٢ )



وتفسير ذلك هو أن النقط تحت السلك مباشرة تكون واقعة تحت ضغط يسبب الأثقال المعلقة على طرفي السلك . لذلك تنخفض درجة انصهار الجليد عن الصفر المئوي عند هذه النقط . ولما كانت درجة حرارة لوح الثلج هي الصفر لذلك ينصهر الثلج تحت السلك بسبب انخفاض نقطة الانصهار تحته ولذلك يمر السلك خلال الثلج الجامد بكل سهولة ويقسمه إلى قسمين .

### ١٥ - ٣ المعادلة الثانية للحرارة الكامنة :

عند معالجة المعادلة الأولى للحرارة الكامنة اعتبرنا تأثير الضغط على درجة حرارة التحول واعتبرنا أن الحرارة الكامنة للتحول ثابتة لا تعتمد على درجة الحرارة . أما في المعادلة الثانية يدرس تغير الحرارة الكامنة مع درجة الحرارة بدلالة الحرارة النوعية لطوري المادة قبل وبعد التحول .

نفرض أن تغيراً يتم من الحالة السائلة إلى الحالة البخارية لواحد جرام من المادة . يستلزم ذلك حرارة كامنة قدرها  $v$  سعراً / جم .

$$\text{التغير في الإنتروبيا نتيجة للتحول} = \frac{S}{M} = \frac{v}{M}$$

$$\therefore \frac{v}{M} = \frac{v_1}{M_1} - \frac{v_2}{M_2}$$

حيث  $M_1$  ،  $M_2$  يمثلان القصور الحراري للبخار والسائل على الترتيب .

بمفاضلة المعادلة السابقة بالنسبة لدرجة الحرارة  $M$  نحصل على

$$\frac{ص}{م} - \frac{ص}{م} \frac{س}{س} = \frac{س}{م} - \frac{س}{م}$$

وبضرب الطرفين في م

$$(٩-١٥) \dots \dots \frac{ص}{م} - \frac{ص}{م} \frac{س}{س} = \frac{س}{م} - \frac{س}{م} \dots \dots$$

لكن

$$س \cdot م = ح$$

كذلك من تعريف الحرارة النوعية

$$١٧ \text{ للبخار} = \frac{س}{م} \frac{ح}{س} = \frac{س}{م} \cdot م$$

$$٢٧ \text{ للسائل} = \frac{س}{م} \frac{ح}{س} = \frac{س}{م} \cdot م$$

وبالتعويض في معادلة (٩ - ١٥) نحصل على المعادلة الثانية للحرارة الكامنة .

$$(١٠-١٥) \dots \dots \dots ١٧ - ٢٧ = \frac{ص}{م} - \frac{ص}{م} \frac{س}{س}$$

وتعرف أحياناً هذه المعادلة بمعادلة كلايرون - كلوزيوس الثانية .

مثال ١ :

أوجد التغير في نقطة غليان الماء نتيجة لزيادة الضغط فوقه بمقدار ١ سم زئبق علماً بأن ١ جم ماء عندما تتحول إلى بخار تشغل حجماً قدره ١٦٧٤ سم<sup>٣</sup> والحرارة الكامنة للتصعيد ص = ٥٤٠ سعر/جم .

الحل :

من معادلة الحرارة النوعية

$$\frac{س}{م} \cdot (١٤ - ٢٤) = \frac{ص}{م}$$

يجب قبل حل المسألة مراعاة أن تكون وحدات طرفي المعادلة متجانسة لذلك نضرب الطرف الأيمن في المكافئ الميكانيكي الحرارى J ويساوى ٤,٢ × ١٠<sup>٧</sup> لارج لكل سعر .

داين / سم<sup>٢</sup>  
سم<sup>٣</sup>

التغير في الضغط  $\Delta P = 1 \times 13,6 \times 980$

التغير في الحجم نتيجة التحول  $E_2 - E_1 = (1 - 1674)$

بالتعويض في المعادلة نحصل على التغير في نقطة الغليان  $\Delta T$

$$980 \times 13,6 \times 1 \times \frac{1673 \times 373}{540 \times 710 \times 4,2} = \Delta T$$

$$\Delta T = 0,36 \text{ م}^{\circ}$$

مثال ٩ :

أوجد الحرارة النوعية للبخار المشبع علماً بأن الحرارة النوعية للماء في درجة ١٠٠ م هي ١,٠١ سعر / جم / م<sup>١</sup> والحرارة الكامنة للبخار ٥٣٩ سعر / جم وأن معدل تغير الحرارة الكامنة مع درجة الحرارة - ٠,٦٠٤ -

الحل :

يستخدم هنا المعادلة الثانية للحرارة الكامنة

$$\frac{L}{M} - \frac{L}{M} = \Delta T - \Delta T$$

$$\frac{539}{373} - 0,604 = 1,01 - \Delta T$$

$$\Delta T = 1,07 \text{ سعر / جم / م}^{\circ}$$

وهي الحرارة النوعية للبخار

#### ١٥ - ٤ الظواهر الكهروحرارية :

عندما يمر تيار كهربى في موصل عليه فرق في الجهد قدره  $\Delta T$  فولت يكون معدل بذل الشغل الكهربى هو حاصل ضرب التيار في الجهد . وإذا ما عكس اتجاه التيار في الموصل يكون الشغل المبذول بنفس المعدل ويظل موجباً أى لا تتغير إشارته . من هذا نستنتج أن تحول الطاقة الكهربائية إلى حرارة يتم في اتجاه واحد أى أنه غير انعكاسى ، ولذلك لا يجوز في هذه الحالة تطبيق قوانين الديناميكا الحرارية الخاصة بالدورات الانعكاسية .

ولحل مثل هذه المشاكل يمكننا اتباع أحد الأسلوبين التاليين :

١ - نفترض أن فقد الطاقة الكهربائية نتيجة لمقاومة الموصل هو كمية صغيرة جداً ومهملة وبذلك يمكن اعتبار الظواهر الكهروحرارية تم بطريقتة انعكاسية وتنطبق عليها عندئذ قوانين الديناميكا الحرارية .

٢ - أن نستخدم طريقة انعدام الانحراف في الدائرة الكهربائية والتي تكون فيها القوى الدافعة الكهربائية المتولدة حرارياً في الدائرة متزنة مع قوى دافعة معادلة تواضع من الخارج . وعندما يمر تيار صغير في الدائرة يمكن اعتبار أن الطاقة المفقودة على شكل حرارة خلال مقاومة الموصل (وتساوى المقاومة  $\times$  مربع شدة التيار) كمية صغيرة من الدرجة الثانية وبذلك يمكن إهمالها .

### ١٥ - ٥ التفاعل الكيميائي داخل عمود كهربائي :

اعتبر عموداً كهربائياً تم فيه التفاعلات الكيميائية بشكل انعكاسي مع ثبوت الضغط ودرجة الحرارة . نفرض أن  $\mathcal{E}_1$  ،  $\mathcal{E}_2$  هما الحجم الابتدائي والنهائي للمواد المتفاعلة داخل العمود وأن الشغل الذي يبذله هذا النظام الكيميائي هو .

$$\mathcal{W} = (\mathcal{V} \cdot \mathcal{E}_1 + \mathcal{W} \cdot \mathcal{K})$$

حيث  $\mathcal{W}$  هي القوة الدافعة الكهربائية المتولدة ،  $\mathcal{K}$  هي الشحنة المارة في العمود ،  $\mathcal{V} \cdot \mathcal{K}$  هو الشغل الكهربائي الذي يبذله النظام .

الشغل المبذول لإمرار شحنة  $\mathcal{K}$  عبر فرق في الجهد  $\mathcal{W}$  مع تغير في الحجم من  $\mathcal{E}_1$  إلى  $\mathcal{E}_2$

$$= \mathcal{V}(\mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1) + \mathcal{W} \cdot \mathcal{K}$$

نفرض كمية صغيرة من الحرارة  $\mathcal{H}$  تمر في العمود وأن التغير في الطاقة الداخلية له هو  $\mathcal{U}$  بتطبيق القانون الأول للديناميكا الحرارية

$$\mathcal{H} = \mathcal{U} + \mathcal{V}(\mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1) + \mathcal{W} \cdot \mathcal{K} \dots \dots \dots (15-11)$$

نفرض أن الطاقة الداخلية  $\mathcal{U}$  تتغير بغير درجة الحرارة  $\mathcal{M}$  وكمية الشحنة المارة  $\mathcal{K}$  في العمود ونهمل هنا التغير الطفيف في حجم المواد المتفاعلة بداخله .

$$\mathcal{H} = \mathcal{U} + \mathcal{M} \left( \frac{\mathcal{U}}{\mathcal{M}} \right) + \mathcal{V} \left( \frac{\mathcal{U}}{\mathcal{V}} \right) + \mathcal{W} \cdot \mathcal{K}$$

أيضاً  $\mathcal{H} = \mathcal{M} \cdot \mathcal{S}$  حيث  $\mathcal{S}$  هو الانتروبيا

وبالتعويض في (١٥ - ١١) نحصل على

$$m \cdot \theta = m_1 \left( \frac{\theta}{m_1} \right) + m_2 \left( \frac{\theta}{m_2} \right) + \theta$$

$$\therefore \theta = \frac{1}{m} \left[ \theta + \left( \frac{\theta}{m_1} \right) \right] + \frac{1}{m_2} \left( \frac{\theta}{m_2} \right)$$

تعطى المعادلة السابقة تغير الانثروبيا بتغير درجة الحرارة والشحنة ويمكن كتابتها على الصورة

$$\theta = m_1 \left( \frac{\theta}{m_1} \right) + m_2 \left( \frac{\theta}{m_2} \right) + \theta$$

وبمساواة المعاملات وبمعرفة أن

$$\frac{m_1^2}{m_1 m_2} = \frac{m_2^2}{m_1 m_2}$$

نحصل على المعادلة :

$$\left[ \frac{\theta}{m} + \left( \frac{\theta}{m_1} \right) \right] \frac{1}{m} = \left[ \left( \frac{\theta}{m_2} \right) \right] \frac{1}{m_2}$$

$$\left( \frac{\theta}{m_1} \right) \frac{1}{m} - \frac{\theta}{m_2} \frac{1}{m} = \frac{\theta}{m_2} \frac{1}{m}$$

$$\frac{\theta}{m} - \left( \frac{\theta}{m_1} \right) \frac{1}{m} +$$

$$\dots \dots \dots \theta - \left( \frac{\theta}{m_1} \right) = \left( \frac{\theta}{m_2} \right) \quad (15-12)$$

وتعطى هذه المعادلة معدل تغير القوة الدافعة الكهربائية للعمود مع درجة الحرارة بدلالة التغير في طاقته الداخلية مع مرور الشحنة ك داخله .

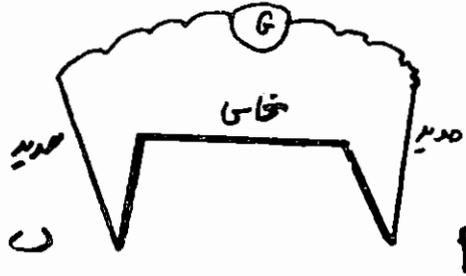
### ١٥ - ٦ الظاهرة الكهر حرارية لسيك :

اعتبر ازدواجاً حرارياً مكوناً من سلكين من مادتين مختلفتين كالنحاس والحديد مثلاً ، متصلين على شكل وصلتين ١ ، ٢ بينهما جلفاً نومتر حساس كما هو مبين بالشكل (١٥-٣) .

إذا احتفظنا بالوصلة ١ باردة ورفعنا درجة حرارة الوصلة ٢ نلاحظ انحرافاً بالجلفانومتر نتيجة لسريان تيار كهربى من النحاس إلى الحديد عند الوصلة الساخنة ، ويعرف هذا التيار بالكهرحرارى . كما

تعرف الظاهرة باسم مكتشفها سيك .

تعريف : يعرف أثر سيك Sbeck Effect بأنه القوة الدافعة الكهربائية المتولدة في ازدواج حرارى عند تسخين إحدى وصلتيه مع حفظ الوصلة الأخرى باردة . وتتوقف القوة الدافعة الكهروحرارية على مادتي الازدواج الحرارى وكذلك الفرق بين درجتى حرارة الوصلتين .



(شكل ١٥ - ٢)

وقد رتب سيك الفلزات على شكل سلسلة بحيث إذا تكون ازدواج حرارى من أى فلزين منهما فإن التيار يمر من الأول إلى الذى يليه في السلسلة خلال الوصلة كما وجد أن القوة الدافعة الكهروحرارية تزداد كلما ازداد بعد الفلزين عن بعضهما في هذه السلسلة .

تستخدم الازدواجات الحرارية كأجهزة حساسة لقياس درجة الحرارة ( ترموترات ) كما تستخدم في الكشف عن الإشعاعات الحرارية كما في جهاز الترموبيل .

### قانون الازدواج الحرارى :

وجد عملياً أن إدخال فلز ثالث في دائرة ازدواج حرارى مكون من فلزين معينين لا يؤثر على القوة الكهروحرارية للازدواج وإنما يكون العامل المؤثر الوحيد هو الفرق بين درجة حرارة الوصلة الساخنة ودرجة حرارة الوصلة الباردة . وقد وجد أن ما يحكم الدائرة الكهروحرارية هما القانونان التاليان .

### ١ - قانون الفلزات المتوسطة :

وينص على أنه إذا كانت  $\mathcal{E}_1$  ،  $\mathcal{E}_2$  هما القوتين الدافعتين الكهروحراريتين لازدواجين حراريين مصنوعين من فلزين (  $\mathcal{P}$  ،  $\mathcal{B}$  ) ، (  $\mathcal{B}$  ،  $\mathcal{C}$  ) على الترتيب تكون القوة الدافعة الكهروحرارية لازدواج (  $\mathcal{P}$  ،  $\mathcal{C}$  ) مساوياً  $\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2$  بشرط أن تكون للازدواجات جميعها نفس الفرق بين درجتى حرارة وصلتها .

## ٤ - قانون درجات الحرارة المتوسطة :

وينص على أنه إذا كانت  $١٢$  ،  $٢٢$  هما القوتين الدافعتين الكهربيتين لزوج حرارى معين عندما تكون درجتا حرارة وصلتيه هما  $(١٤ ، ٢٤)$  ،  $(٢٤ ، ٣٤)$  على الترتيب فإن القوة الدافعة الكهروحرارية لهذا الازدواج عندما تكون درجتا حرارة وصلتيه  $(١٤ ، ٣٤)$  هي :  $(١٢ + ٢٢)$

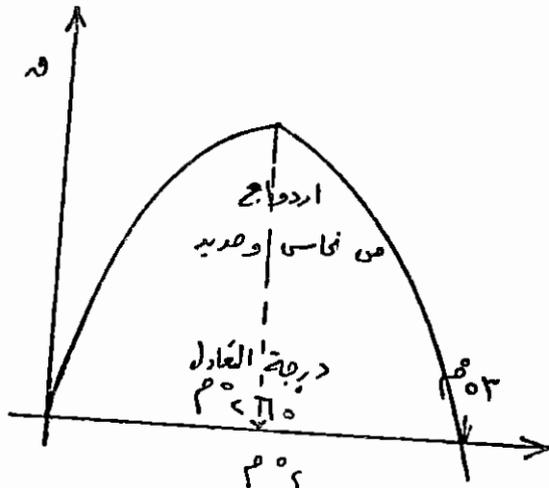
## تغير القوة الدافعة الكهروحرارية مع الفرق بين درجتا الوصلتين :

إذا احتفظنا بدرجة حرارة وصلة ازدواج حرارى (وليكن من نحاس وحديد) ثابتة ورفعنا درجة حرارة الوصلة الثانية تدريجياً نلاحظ ازدياد شدة التيار الكهروحرارى طردياً عندما تكون فروق درجتا حرارة الوصلتين صغيرة. أما إذا زادت فروق درجات الحرارة زيادة كبيرة تصل القوة الدافعة الكهروحرارية إلى نهاية عظمى كما في شكل (١٥ - ٤).

وتسمى عندئذ درجة حرارة الوصلة الساخنة بدرجة التعادل Neutral temperature قيمتها ثابتة بالنسبة لأى ازدواج حرارى وتتوقف على نوع مادى الازدواج

وعند الاستمرار فى رفع درجة حرارة الوصلة الساخنة بعد درجة التعادل نجد أن القوة الدافعة الكهروحرارية قد أخذت فى النقصان حتى تتلاشى تماماً عند درجة حرارة معينة تسمى بدرجة الانقلاب Inversion temperature إذ بزيادة درجة الحرارة بعد تلك الدرجة ينعكس اتجاه التيار فى الازدواج أخذاً فى الازدياد مع درجة الحرارة .

ويجب ملاحظة أن درجتى حرارة التعادل والانقلاب تعبران عن فروق فى الدرجة بين حرارة الوصلتين



شكل (١٥ - ٤)

الازدواج فمثلاً إذا كانت درجة حرارة الوصلة الباردة صفرًا وكانت درجة التعادل  $٢٦٥^\circ\text{م}$  فإنه برجع درجة حرارة الوصلة الباردة إلى  $١٠٠^\circ\text{م}$  مثلاً تصير درجة التعادل عندئذ  $٣٦٥^\circ\text{م}$  وهكذا .

### جهد التلامس :

عندما تتلامس مادتان كهربياً يتولد فرق في الجهد عبر سطح تلامسهما قد يصل إلى بضعة فولتات وقد فسرت النظريات الحديثة في علم الجوامد هذه الظاهرة على أساس اختلاف مستويات مناطق الطاقة المسموحة *Allowed energy bands* في تلك المادتين وذلك بالنسبة للإلكترونات التوصيل . إذ تتدفق الإلكترونات من أحدهما إلى الأخرى ( حسب ترتيب وضعهما في السلسلة الكهربائية ) حتى يتساوى ارتفاع مستويات الطاقة الممتلئة بالإلكترونات عند سطح التلامس ويمكن تشبيه ذلك بصورة ما بحالة الأنابيب المستطرفة وارتفاع السوائل بداخلها .

### معامل بلتية : Peltier Coefficient

نفرض ازدواجاً من وصليتين  $\mu$  ،  $\nu$  ونفرض أن جهد التلامس عند أى من الوصليتين هو  $\pi$  ويطلق عليه أحياناً معامل بلتية .

نفرض أننا أمرنا تياراً كهربياً  $I$  أمبير في الازدواج . شكل (١٥ - ٥) .



شكل (١٥ - ٥)

بالنسبة للوصلة التي يمر فيها التيار في اتجاه فرق الجهد  $\pi$  يكون الشغل المبذول على المادة مساوياً  $\pi I$  ويظهر على شكل حرارة لذلك تسخن تلك الوصلة .

أما بالنسبة للوصلة الأخرى التي يمر فيها التيار عكس اتجاه فرق الجهد يكون الشغل المبذول هو  $-\pi I$  بإشارة سلبية أى أن طاقة حرارية تمتص من الوصلة مما يسبب تبريدها .

ويلاحظ أن هذه العملية انعكاسية *reversible* بمعنى أننا إذا عكسنا اتجاه التيار في الازدواج تصبح الوصلة الساخنة باردة والعكس بالنسبة للوصلة الأخرى .

إذا اعتبرنا شكل (١٥ - ٥) حيث يكون الازدواجان دائرة مغلقة درجة حرارتها واحدة ، يكون جهد التلامس عند  $\mu$  مساوياً للمقدار ومضاد في الاتجاه لجهد التلامس عند الوصلة  $\nu$  وبذلك لا يمر أى تيار في الدائرة .

نفرض الآن أننا حفظنا درجتى حرارة الوصلتين P ، B عند  $١٣٧$  ،  $٢٧٤$  درجة كلفن على الترتيب ، مع اعتبار الازدواج نظاماً معزولاً أى لا يوجد أى انتقال للحرارة منه أو إليه . ونفرض أيضاً أن جهدي التلامس ( أى معامل بلتييه ) عند الدرجتين  $١٣٧$  ،  $٢٧٤$  هما  $\pi (١٣٧)$  ،  $\pi (٢٧٤)$  على الترتيب .

عند مرور شحنة صغيرة  $س$  ك فى الدائرة ينتج تغير فى كمية الحرارة بمقدار  $س ح$  وتغير فى انروبيا النظام بمقدار  $س ع$  وتتحدد هذه الكميات وفقاً لقوانين الديناميكا الحرارية كما يأتى :

$$س ح = س ط + \pi (١٣٧) س ك - \pi (٢٧٤) س ك$$

$$\frac{س ح}{س} = ع$$

$$\therefore س ع = \frac{س ط}{س} + \frac{\pi (١٣٧) س ك}{١٣٧} - \frac{\pi (٢٧٤) س ك}{٢٧٤} \quad (١٣-١٥)$$

ولكن نظراً لعدم تغير للطاقة الداخلية « ط » للنظام يكون  $س ط = صفر$  وكذلك ينعدم التغير فى انروبيا النظام لأنه انعكاسى .  $\therefore س ع = صفر$  وبذلك تصير المعادلة السابقة

$$\frac{\pi (٢٧٤) س ك - \pi (١٣٧) س ك}{٢٧٤ - ١٣٧} = \frac{\pi (٢٧٤) س ك}{٢٧٤} = \frac{\pi (١٣٧) س ك}{١٣٧}$$

إذاً اعتبرنا أن  $ع$  هى القوة الدافعة الكهروحرارية للازدواج يكون

$$\dots \dots \dots (١٣٧-٢٧٤) \frac{\pi (١٣٧) س ك}{١٣٧} = \pi (١٣٧) س ك - \pi (٢٧٤) س ك = ع س \quad (١٤-١٥)$$

إذاً حفظنا  $١٣٧$  ثابتة وغيرنا تدريجياً  $٢٧٤$  نجد أن القوة الدافعة الكهروحرارية تتناسب طردياً مع الفرق بين درجتى حرارة الوصلتين وهذه حقيقة علمية سبق ذكرها وقد ثبت صحتها عندما يكون الفرق بين الدرجتين صغيراً حيث يمكن اعتبار النظام معزولاً .

ولإيجاد قيمة معامل بلتييه نكتب المعادلة السابقة بصورة تفاضلية كما يأتى :

$$ع س = \frac{\pi}{س}$$

$$\dots \dots \dots \frac{\pi}{س} = \frac{ع س}{س} \quad \text{أى أن} \quad (١٥-١٥)$$

أى أننا نحصل على قيمة معامل بلتية عند درجة الحرارة  $\mu$  كلفن من ميل منحنى القوة الدافعة الكهروحرارية مع الفرق بين درجتى الوصلتين حيث يساوى الميل  $\frac{\mathcal{E}}{\mu}$  ويكون بذلك معامل بلتية عند  $\mu$ .

$$\mu = \frac{\mathcal{E}}{\mu} \dots \dots \dots (16-15)$$

وبلاحظ أن ميل المعامس للمنحنى عند درجة التعادل يساوى صفراً وهذا يعنى انعدام قيمة معامل بلتية عند هذه الدرجة.

١٥ - ٧ ظاهرة تومسون : The Thomson effect

وجد تومسون أنه كلما حدث ميل حرارى Temperature gradient داخل موصل كهربى تتولد قوة دافعة كهربية بين طرفيه . فإذا كان  $\mu$  كلفن هو الفرق بين درجتى حرارة نقطتين لى موصل كهربى تكون القوة الدافعة الكهروحرارية المتولدة بينهما هى  $\sigma$  .  $\mu$  حيث  $\sigma$  ثابت يميز المادة ويسمى بمعامل تومسون . وبلاحظ هنا أيضاً أن هذه الظاهرة انعكاسية reversible

اعتبر شحنة ك عم فى موصل . يكون الشغل الكهربى المبذول لنقل الشحنة بين نقطتين الفرق بين درجتيهما هى  $\mu$  هو ك .  $\sigma$  .  $\mu$  ( حاصل ضرب الشحنة فى فرق الجهد )

ويأجرا التكامل على الموصل كله بين الدرجتين  $\mu_1, \mu_2$  .  
 . الشغل الكلى المبذول = الحرارة المتولدة فى الموصل كله

$$= \int_{\mu_1}^{\mu_2} \sigma \mu \cdot \mu \cdot d\mu$$

ويمكننا الآن تطبيق كل من ظاهرتى بلتية وتومسون على حالة النظام المعزول المكون من ازدوج حرارى . كمية الحرارة الانعكاسية  $\mathcal{E}$  ح فى الازدواج هى

$$\mathcal{E} = \pi(\mu_2) \cdot \mu_2 - \pi(\mu_1) \cdot \mu_1 - \int_{\mu_1}^{\mu_2} \sigma \mu \cdot \mu \cdot d\mu$$

$$\dots \dots \dots (17-15)$$

حيث  $\sigma$  ،  $\rho$  هما معاملي تومسون للمادتين اللتين يتكون منهما ذراعا الازدواج الحراري .  
 وإذا كانت  $\mathcal{E}$  هي القوة الدافعة الكهلهحرارية في الدائرة يكون

$$\mathcal{E} = C \cdot \mathcal{E} \cdot K$$

$$\therefore \mathcal{E} \cdot K = \mathcal{E} \cdot 2\pi \cdot K - \mathcal{E} \cdot K + \mathcal{E} \cdot \frac{2\pi}{100} \cdot (P\sigma - \rho\sigma) \cdot K$$

$$\therefore \mathcal{E} = (100 - 2\pi) \cdot K + \frac{2\pi}{100} \cdot (P\sigma - \rho\sigma) \cdot K \dots (15-18)$$

فإذا حفظنا درجة حرارة الوصلة الأولى ثابتة عند  $m_1$  وغيرنا من  $m_2$  مع تسميتها  $m$ ، ثم بإجراء التفاضل بالنسبة إلى  $m$  للمعادلة السابقة نحصل على :

$$\frac{\mathcal{E}}{m} = \frac{\pi K}{100} + (P\sigma - \rho\sigma) \dots (15-19)$$

ويتضح من هذه المعادلة أن :  $\frac{\mathcal{E}}{m}$  لا يساوي  $\frac{\pi K}{100}$

وبتطبيق القانون الثاني للديناميكا الحرارية على حالة الازدواج باعتباره آلة حرارية انعكاسية يتلشى

$$\text{التغير في الانتروبيا أي أن } \frac{\mathcal{E}}{m} = \mathcal{E} = \text{صفر}$$

$$\therefore \frac{\mathcal{E}}{m} = \text{صفر} = \left( \frac{\pi}{100} - \frac{2\pi}{100} \right) K + \frac{2\pi}{100} \cdot (P\sigma - \rho\sigma) \cdot K$$

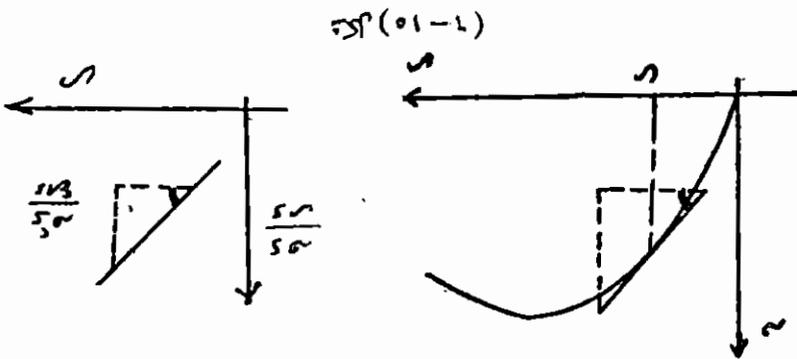
وبوضع  $m = 100$  ،  $m = 200$  ،  $m = 100$  تصبح المعادلة السابقة :

$$\text{صفر} = \frac{P\sigma - \rho\sigma}{100} + \frac{\pi}{100} - \frac{2\pi}{100}$$

ويمكن وضع المعادلة على الصورة :

$$(15-20) \quad \left( \frac{\rho\sigma - P\sigma}{100} \right) = \left( \frac{\pi}{100} \right) \cdot \frac{K}{m}$$

وبالتفاضل نحصل على :



(۱-۱۰) شکل (۱-۱۰) در بالا به این ترتیب نشان داده شده است که در اینجا  
 یک خط افقی و یک خط عمودی را در نظر بگیرید که در بالا به این ترتیب نشان داده شده است.

$$\therefore \frac{s}{5} - s = \frac{s}{5} \quad (۱-۱۰)$$

$$= \frac{s}{5} \left( \frac{s}{5} \right)$$

$$= \frac{s}{5} \left( \frac{s}{5} \right)$$

$$\therefore (s - s) = \frac{s}{5} - \frac{s}{5}$$

$$\frac{s}{5} = \frac{s}{5}$$

$$\frac{s}{5} = \frac{s}{5} + s - s \quad (۱-۱۰)$$

## تمارين محلولة ومسائل

- ١ - أوجد الشغل المبذول بواسطة غاز يخضع لمعادلة فان درفال عندما يتمدد تمدداً انعكاسياً  
ايسوثرمالياً من  $\epsilon_1$  إلى  $\epsilon_2$ .

الحل :

$$\text{الشغل المبذول} = \int_{\epsilon_1}^{\epsilon_2} p \, d\epsilon = \text{ص. س.}$$

معادلة فان درفال هي :

$$p = \frac{R\theta}{\epsilon - b} - \frac{a}{\epsilon^2}$$

$$\therefore \text{الشغل} = \int_{\epsilon_1}^{\epsilon_2} \left[ \frac{R\theta}{\epsilon - b} - \frac{a}{\epsilon^2} \right] d\epsilon = \text{ص. س.}$$

$$= R\theta \ln \frac{\epsilon_2 - b}{\epsilon_1 - b} + \frac{a}{\epsilon_1} - \frac{a}{\epsilon_2}$$

- ٢ - أثبت أن الشغل المبذول على ١ جرام جزئىء من غاز تام عند ضغطه انعكاسياً من  $\epsilon_1$  إلى  $\epsilon_2$  هو :

$$\text{ش} = R\theta \ln \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}$$

ثم أوجد الحرارة المتولدة عن تغيير حالة الغاز من  $\epsilon_1$  ص. س. إلى  $\epsilon_2$  ص. س.

الحل : يترك كتبرين للطالب .

- ٣ - تغيير الطاقة الداخلية ط لغاز مع الضغط ودرجة الحرارة وفقاً للمعادلة :

$$p = \frac{R\theta}{\epsilon - b}$$

حيث  $\beta$  ثوابت . فإذا علم أن معامل التمدد الحجمى  $\beta$  يعطى بالمعادلة  $\beta = \frac{1}{\epsilon}$

ومعامل انضغاط الغاز  $\mu$  يعطى بالمعادلة  $\mu = \frac{1}{\epsilon}$  ، أوجد الحرارة النوعية تحت حجم ثابت

الحل :

$$\left(\frac{p}{V}\right) = \left(\frac{E}{V}\right) = \text{ع} \quad \text{الحرارة النوعية تحت حجم ثابت ع}$$

من معادلة الطاقة :

$$\left(\frac{p}{V}\right) - p = \text{ع} = \left(\frac{p}{V}\right)$$

ومن العلاقة الدائرية في الديناميكا الحرارية

$$\left(\frac{p}{V}\right) \left(\frac{E}{V}\right) = \left(\frac{p}{V}\right)$$

لكن من تعريف معامل التمدد الحجمي :

$$\left(\frac{E}{V}\right) \frac{1}{E} = \frac{1}{V} = \beta$$

ومن تعريف الانضغاط

$$\left(\frac{E}{V}\right) \frac{1}{E} = \frac{1}{V} = \alpha$$

بالتعويض

$$\frac{p}{V} = \left(\frac{p}{V}\right) \quad \therefore$$

$$\frac{p}{V} - p = \text{ع} \quad \therefore$$

٤ - إذا علم أن معامل الانضغاط  $\alpha$  ومعامل التمدد الحجمي  $\beta$  لمادة ما يعطيان بالعلاقين .

$$\frac{p}{V} = \alpha \quad \beta = \frac{p}{V}$$

أوجد معادلة الحالة :

الحل :

معادلة الحالة على الصورة التفاضلية هي :



$$٧ - \text{ اثبت أن } \left( \frac{p}{m} \right)_{ص} - \left( \frac{p}{m} \right)_{ص\beta} = \text{ صفر}$$

حيث  $\beta$  ،  $m$  هما معامل التمدد الحجمي والانضغاط على الترتيب .

الحل :

$$\left( \frac{p}{m} \right)_{ص} \frac{1}{T} = m \quad , \quad \left( \frac{p}{m} \right)_{ص\beta} \frac{1}{T} = \beta$$

بمفاضلة المعادلة الأولى بالنسبة للضغط والثانية بالنسبة لدرجة الحرارة

$$\frac{p}{m} \frac{1}{T} + \left( \frac{p}{m} \right)_{ص} \left( \frac{p}{m} \right)_{ص} \frac{1}{T^2} = \left( \frac{p}{m} \right)_{ص\beta} \frac{1}{T} \quad \therefore$$

$$\frac{p}{m} \frac{1}{T} - \left( \frac{p}{m} \right)_{ص} \left( \frac{p}{m} \right)_{ص} \frac{1}{T^2} = \left( \frac{p}{m} \right)_{ص\beta} \frac{1}{T}$$

بجمع المعادلتين :

$$\text{ صفر} = \left( \frac{p}{m} \right)_{ص} + \left( \frac{p}{m} \right)_{ص\beta} \quad \therefore$$

٨ - اشرح أن معادلة الحالة لمادة ما هي

$$E = E_0 - p + \dots$$

وأن طاقتها الداخلية تتغير مع الضغط ودرجة الحرارة وفقاً للمعادلة :

$$T = T_0 - p + \dots$$

حيث  $p$  ،  $T$  ،  $E$  ،  $T_0$  ،  $E_0$  ثوابت .

١ - أوجد الحرازين النوعيتين  $\alpha$  و  $\beta$  ،  $\nu$   $E$  للمادة

٢ - أوجد المحتوى الحراري (الانثالي) للمادة .

الحل : يترك للطلاب .

٩ - الطاقة الداخلية لواحد جرام جزىء من غاز تام هي :

$$ط = ث [ (م - ٢) - ٢ ] \text{ لو } (م - ٢)$$

حيث ٢ ثابت .

أوجد  $٧$  و  $٧$  ،  $٧$  وكذلك النسبة بينهما

الحل :

$$\frac{ث م}{م - ٢} = ١ - \frac{١}{م - ٢} \times ث - ث = \left( \frac{٦ ط}{٦ م} \right) = ٧$$

لكن من معادلة الغاز التام :

$$٧ = ث م$$

$$\therefore ٧ + ٧ = ث + ث م$$

فإذا كان ضغط الغاز ثابتاً يكون  $٧ = ٧ = ٧$

$$\therefore ٧ + ٧ = ث + ث م$$

ويكون بذلك القانون الأول في الديناميكا الحرارية

$$٧ + ٧ = ث + ث م$$

$$\therefore ٧ + \left( \frac{٦ ط}{٦ م} \right) = ٧ = \left( \frac{٧ ط}{٦ م} \right)$$

$$\therefore ٧ + \frac{٦ ط}{٦ م} = ٧$$

$$\frac{٦ ط}{٦ م} =$$

وتكون النسبة  $\gamma$  هي :

$$\frac{٦}{٦} = \frac{٧}{٧} = \gamma$$

١٠ - الطاقة الداخلية لجرام جزئىء من غاز تام تعطى بالمعادلة

$$ط = ط_0 + \nu P + \frac{1}{2} \nu^2$$

حيث  $ط_0$  ،  $P$  ،  $\nu$  ثوابت

١ - أوجد أنثروبيا الغاز بدلالة الحجم ودرجة الحرارة .

٢ - أوجد معادلة التغير الادياباتي على مستوى إحدائياته الحجم ودرجة الحرارة .

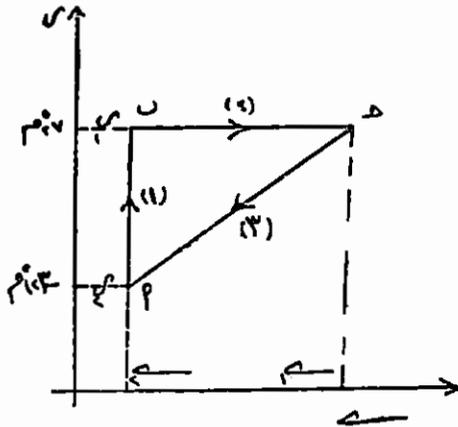
٣ - ما التغير فى درجة الحرارة عندما يتمدد الغاز تمدداً حرّاً لضعف حجمه إذا كانت درجة الحرارة الابتدائية  $١٥^\circ م$  ،  $\gamma = ١.٣٣$  .

الحل : يترك للطالب .

١١ - أحدثت ثلاثة تغيرات على حالة مادة ما بحيث عادت فى النهاية إلى حالتها الابتدائية . فإذا كان التغير الأول ادياباتياً والثانى ايسوثيرمائى ارسم مسحن التغير فى مستوى تكون إحدائياته هى الانثروبيا ودرجة الحرارة . ثم أوجد كفاءة الدورة علماً بأنها تمت بين درجتى الحرارة  $٢٧^\circ م$  و  $١٢٣^\circ م$  .

الحل :

فؤ حالة التغير الادياباتى تظل قيمة الانثروبيا ثابتة (  $\nu = \text{صفر}$  ) ولذلك يظهر التغير على شكل خط  $P$  ب يوازى محور درجة الحرارة .



وعندما يكون التغير ايسوثيرمالي تثبت درجة الحرارة فيظهر التغير على شكل خط ب > يوازي محور الانترويا .

ولا كانت الدورة مغلقة يكون التغير الثالث ممثلا بالخط > ٩ .

$$\text{كفاءة الآلة} = \frac{\text{الشغل المبذول}}{\text{الحرارة الممتصة}} = \frac{\text{ش}}{\text{ح}}$$

لكن الشغل الآلي ش = مساحة الدورة =  $\frac{1}{4} (13 - 14) (15 - 16)$

والحرارة الممتصة ح خلال التغير الايسوثيرمالي (٢)

$$13 = (15 - 16)$$

$$\therefore \text{الكفاءة} = \frac{13 - 14}{13 \times 2} = \frac{123 + 27}{300 \times 2} \times 100 = 20\%$$

١٢ - أوجد انترويا غاز طاقته الداخلية لا تتوقف على الحجم ومعادلة الحالة هي :

$$P = \left( \frac{1}{V} + 1 \right) T$$

حيث ١ مقدار ثابت .

الحل : يترك للطالب .

١٣ - اثبت أن النسبة بين معاملي التمدد الادياباتي والايسوباري ( عند ثبوت الضغط ) تساوي :

$$\frac{\gamma}{\gamma - 1} \text{ حيث } \gamma \text{ هي النسبة } \frac{v}{v_0}$$

$$14 - \text{إذا علم أن : } \left( \frac{v_6}{v_6} \right) = \frac{v_6}{v_6}$$

اثبت أن :

$$v - v_0 = \gamma v_0 \left( \frac{p - p_0}{p_0} \right) \left( \frac{v - v_0}{v_0} \right)$$

حيث  $v$  ،  $v_0$  ،  $\gamma$  هما الحرارتين النوعيتين تحت ضغط ثابت وتحت حجم ثابت .

١٥ - قطعة من النحاس تزن ١٠ جم تقع تحت ضغط ١٠ كجم/سم<sup>٢</sup> عند درجة الصفر المئوي . احسب كمية الحرارة المتولدة أثناء الضغط إذا كان ايسوثيرماليا ثم أوجد الارتفاع في درجة الحرارة عندما يكون الضغط ادياباتيا .

( معامل تمدد النحاس  $10^{-6} \times 45$  وكثافته النسبية ٨,٨ )