

الفصل الخامس

القانون الثاني للترموديناميك

Second Law of Thermodynamics

1-5 مقدمة: Introduction

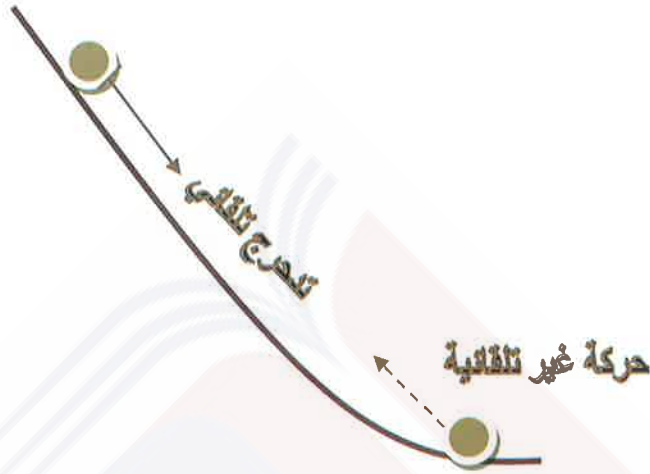
يختص القانون الثاني للترموديناميك Second Law Of Thermodynamics بالتعامل مع العمليات الكيميائية والفيزيائية التي تحصل بصورة تلقائية Spontaneously. تسمى العمليات التلقائية بالعمليات الطبيعية Natural Processes. إن عملية انتقال الحرارة من جسم حار إلى جسم بارد يمكن أن تحصل بصورة طبيعية، ولكن عملية انتقال الحرارة من جسم بارد إلى جسم حار لا يمكنها أن تحصل بصورة تلقائية ولو أنها لا تخل أو لا تنتهك القانون الأول للترموديناميك إذا كان القانون الأول يعالج موضوع حفظ الطاقة وتحويلها من شكل إلى آخر ويفسر كذلك علاقة الشغل والحرارة فإن القانون الثاني للترموديناميك يتعلق بفهم التغيرات التي تحصل بصورة تلقائية.

2-5 العمليات التلقائية والعمليات غير التلقائية

Spontaneous and Non-spontaneous Processes

هنالك العديد من الأمثلة عن العمليات التي لا تتناقض أو تخل بالقانون الأول للترموديناميك ولكنها لا يمكن أن تحصل بصورة طبيعية أو تلقائية ومن هذه الأمثلة:

- 1- لو تصورنا بأن هنالك كرة صلبة موجودة على حافة منحدر وتم إعاقه تدرجها بواسطة حاجز معين كما موضحة في الشكل 1-5.



شكل 1-5 كرة صلبة على منحدر

نلاحظ بأن تدحرج الكرة سيكون تلقائياً مجرد أن نرفع الحاجز الذي يمنع تدحرجها وأنها في النهاية ستصل إلى قاع المنحدر؛ أما إذا أردنا إعادة الكرة إلى أعلى المنحدر مرة ثانية فلا يمكن لذلك أن يحصل بصورة تلقائية ويمكن أن يحصل فقط عندما نبذل شغلا يعمل على رفعها وإعادتها إلى مكانها الأصلي.

2- إذا كانت لدينا اسطوانة مقسمة على قسمين متساويين بواسطة صفيحة ذات مسام (Diaphragm) تفصل بين غازين كما موضح بالشكل 2-5، وكان ضغط الغاز على الجانب الأيسر أعلى من ضغط الغاز عن الجانب الأيمن. إذا افترضنا بأننا أزلنا الحاجز أو الصفيحة التي تفصل بين الجانبين فإننا سنحصل على تساوي الضغط Equalization of Pressure على طول الاسطوانة. إذا ما أردنا عكس العملية والعودة إلى الحصول على ضغط عال في احد الجوانب وضغط واطئ على الجانب الآخر. فهل يمكننا عمل ذلك؟

صفيحة ذات مسام

غاز عند ضغط عال

غاز عند ضغط واطي

شكل 5-2 اسطوانة مفصولة بصفيحة ذات مسام تحتوي غازين بضغطين مختلفين

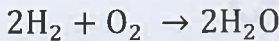
إن العملية الأولى والتي حصلنا من خلالها على تساوي بالضغط على الجانبين تسمى بالعملية التلقائية Spontaneous Process أو العملية الطبيعية Natural Process أما عملية إعادة النظام إلى حالته الأولى بعد تساوي الضغط تسمى بالعملية غير التلقائية Non-spontaneous Process أو عملية غير طبيعية unnatural Process. نلاحظ أن العملية التلقائية هي عملية غير رجوعية Irreversible. إن عكس العملية أو إعادة الضغط إلى حالته الأولى (لما قبل إزالة الحاجز) يمكن إعادة إجرائها ولكن بشرط أن يتم بذلك شكل معين لغرض الإعادة لذلك فإن مثل هذه العملية لا يمكن أن تكون تلقائية.

3- عند انتقال الحرارة من طرف قضيب حار إلى طرفه الآخر البارد إلى أن تصبح درجة الحرارة منتظمة على طرفي القضيب Equalization of Temperature، من المهم هنا أن نلاحظ عدم انعكاس هذه العملية تلقائياً حيث لا يمكن للقضيب المعدني الذي له درجة حرارة متساوية على الطرفين أن يصبح أحد طرفيه حاراً والآخر بارداً بصورة تلقائية. من جهة

أخرى يمكن لهذه العملية أن تعكس ولكن بطريق معين وهو السماح للحرارة بان تمر من احد طرفي القضيب إلى ماكينة يمكنها تحويل الحرارة إلى شغل بواسطة الاحتكاك ثم يعاد تحويل الشغل إلى كميته مكافئه من الحرارة والتي بدورها تنتقل إلى الطرف الآخر بحيث يبرد الطرف الذي تم اخذ الحرارة منه ويسخن الطرف الذي تم تزويد الحرارة له، وبهذا يرجع القضيب المعدني إلى حالته الأولى ولكن العملية لم تكن تلقائية (غير طبيعية).

4- إذا عدنا للشكل 5-2 وافترضنا وجود غاز الأوكسجين على احد أطراف الاسطوانة ووجود غاز النتروجين على الطرف الآخر يفصلهما الحاجز المسامي، ثم قمنا بإزالة الحاجز المسامي فسيتمزج الغازان وتحصل عملية المزج هذه بصورة تلقائية. لو فكرنا بإعادة النظام إلى حالته الأولى بحيث يكون الأوكسجين على طرف والنتروجين على الطرف الآخر وتنتهي عملية الامتزاج، إن هذه العملية سوف لن تحصل بصورة تلقائية أو طبيعية ولكننا إذا قمنا ببذل شغل على النظام لتمكنا من إعادة النظام إلى حالته الأولى. ولكن هذه العملية تتم بعملية غير تلقائية (غير طبيعيه).

5- يتفاعل غازا الهيدروجين والأوكسجين لإنتاج الماء وذلك بإمرار شرارة كهربائية في مزيج من الغازين وستكون انثالية التفاعل (ΔH) سالبه أي أن التفاعل باعث للحرارة Exothermic.



5 - 1

إن عملية إعادة تكوين الهيدروجين والأوكسجين من الماء المتكون، وباستخدام الحرارة التي تم إنتاجها من التفاعل ليس بالمستحيل ولكنها تحتاج على

كمية من الشغل يتم بذله على النظام وعليه فإن التفاعل من اليسار على اليمين هو تفاعل تلقائي في حين أن التفاعل المعاكس (من اليمين إلى اليسار) هو غير تلقائي.

المهم في الأمثلة السابقة التي تم ذكرها هو أنه من الواضح وجوب فهم العوامل التي تحسب اتجاه العملية التي بواسطتها يكون التغير تلقائياً.

إن ذلك يتطلب معرفة موقع الاتزان Position of Equilibrium لأن النظام سوف لن يتحرك تلقائياً باتجاه الاتزان (بالرغم من أن ذلك قد يحصل ببطء شديد جداً كما في المثال الخامس، حيث أن وجود الهيدروجين والأكسجين بمزيج يمكن أن ينتج الماء بصورة تلقائية ولكن ببطء شديد جداً ولكننا قمنا بتعجيل العملية بإمرار الشرارة الكهربائية).

كل هذه الأشياء تم أخذها بنظر الاعتبار في القانون الثاني للترموديناميك.

3-5 الانتروبي : Entropy

الانتروبي هي المقياس النظري لكمية الطاقة التي لا يمكن أن تتحول إلى شغل ميكانيكي في النظام الترموديناميكي ويرمز لها بالحرف S، وتعرف في بعض الأحيان بأنها مقياس لعدم انتظام النظام disorder، أو هي التي تمنع العمليات إن تكون انعكاسية. تعرف الانتروبي كذلك في بعض المصادر العلمية بأنها الجزء الحاسم في الترموديناميك الحقيقي.

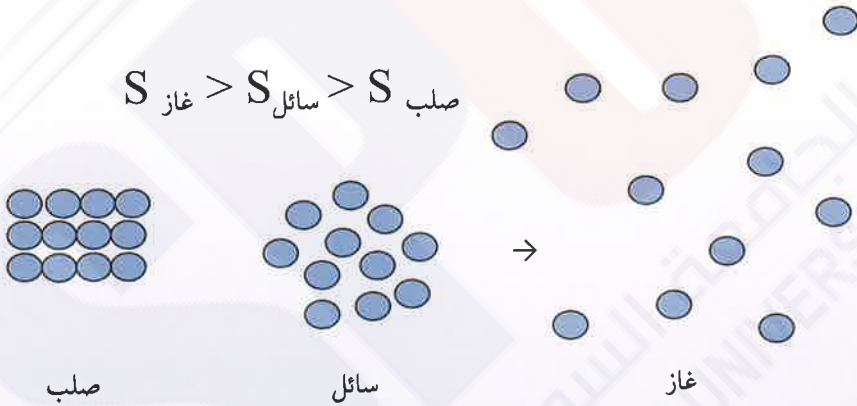
في النظام المعزول تحدد قيمة التغير بالانتروبي ΔS isolated system حسب طبيعة العملية، إذا كانت تلقائية أو غير تلقائية أو كان النظام في حالة اتزان و كما يأتي:

عند التغير التلقائي $\Delta S_{\text{isolated system}} > 0$

عند التغير غير التلقائي $\Delta S_{\text{isolated system}} < 0$

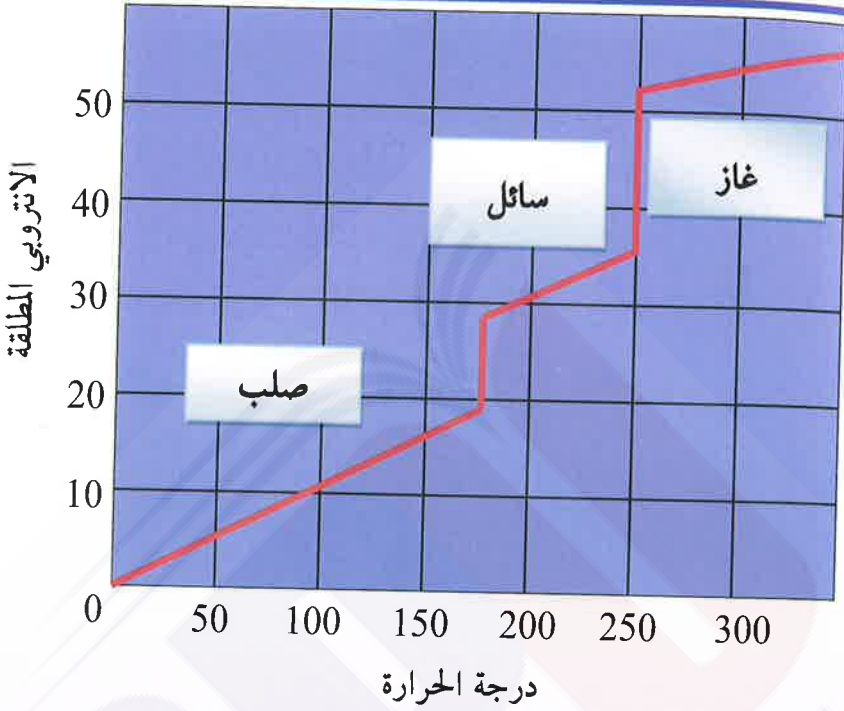
عند الاتزان $\Delta S_{\text{isolated system}} = 0$

عند مقارنة قيمة الانتروبي لمادة معينة في حالتها الغازية والسائلة والصلبة، تكون قيمة الانتروبي في الحالة الغازية كبيرة جدا عند مقارنتها مع الحالة الصلبة، ويعود ذلك الى طبيعة ترتيب دقائق المادة في كل حالة من حالاتها. الشكل 3-5 يوضح ترتيب دقائق المادة في الحالة الغازية والسائلة والصلبة.



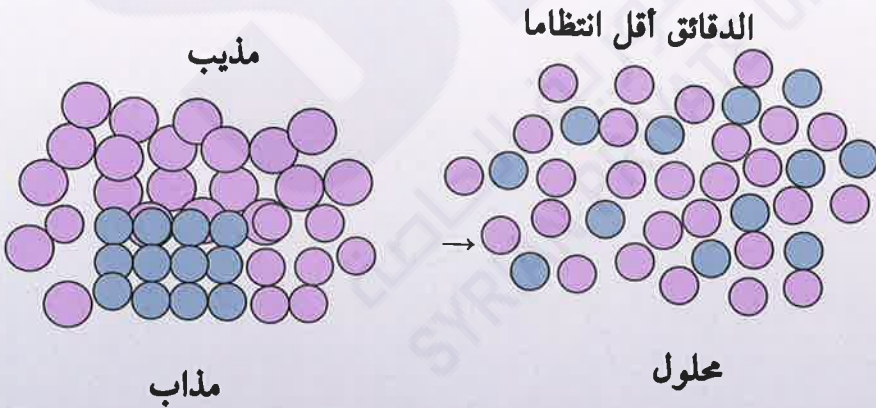
شكل 3-5 ترتيب دقائق المادة في الحالة الصلبة والسائلة والغازية

الانتروبي تزداد بزيادة درجة الحرارة، وهذا ما سيتم التطرق إليه بالتفصيل في الفقرات القادمة ان شاء الله، والشكل 4-5 يوضح الزيادة في الانتروبي المطلقة لمادة من المواد في الحالة الصلبة والسائلة والغازية وبدرجات حرارية مختلفة.



شكل 4-5 زيادة الانتروبي المطلقة مع زيادة درجة الحرارة

الشكل 5-5 يوضح بان دقائق المادة تصبح اقل انتظاما في المحلول، وهذا يعني حصول زيادة في الانتروبي عند إذابة المذاب في المذيب.



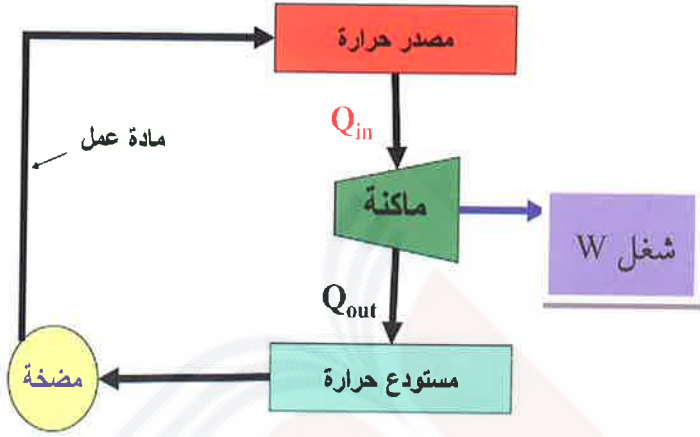
شكل 5-5 ترتيب دقائق المذاب والمذيب

4-5 الدورة الثرموديناميكية : Thermodynamics' Cycle

الماكينة الحرارية Heat Engine عبارة عن آلة تأخذ الحرارة من مستودع حار وتحوله إلى شغل (لا تتحول الحرارة بصورة تامة إلى شغل)، ونقل الجزء غير المتحول من الحرارة إلى مستودع بارد، ويتم ذلك خلال دورة كاملة تسمى الدورة الثرموديناميكية Thermodynamics, Cycle.

تتكون الدورة الثرموديناميكية من خمسة عناصر أساسية (لاحظ الشكل 5-6):

- 1- مادة التشغيل Working Substance وتمثل الوسط الذي تنتقل الطاقة من خلاله في الدورة.
- 2- المصدر الحراري Heat Source ويمثل الجزء الذي يقوم بتجهيز الطاقة الحرارية.
- 3- المستقبل الحراري Heat Receiver ويسمى كذلك المستودع الحراري ويمثل الجزء الذي يمتص الحرارة الفائضة.
- 4- المضخة Pump وتمثل الجزء الذي يقوم بتدوير مادة التشغيل ويعمل كصمام بين الضغط الواطيء والعالي.
- 5- الماكينة Engine وتمثل آلة تقوم بتحويل الطاقة الحرارية لمادة التشغيل الى طاقة ميكانيكية مفيدة.



شكل 5-6 أساس عمل الدورة الترموديناميكية

نلاحظ من الشكل (5-6) ان الحرارة تنتقل من المستودع الحار إلى الماكينة التي تحول هذه الحرارة إلى شغل، وبما ان كمية الحرارة المتحوّلة إلى شغل هي اقل من الحرارة الواردة من المستودع الحار، فان الفائض ينتقل كحرارة إلى المستودع البارد. من خلال المضخة يتم إعادة مادة العمل، التي انخفضت درجة حرارتها، إلى المستودع الحار وبذلك تكتمل الدورة.

5-5 القانون الثاني للترموديناميك : Second Law of Thermodynamics

يسمى القانون الثاني للترموديناميك بقانون الانتروبي The Law of Entropy وهذا القانون اثار جدلا واسعا بين العلماء ويعد القانون الثاني للترموديناميك مفندا قويا لنظرية التطور. لا يوجد مجال في هذا الكتاب للتوسع اكثر من ذلك سوى اشارة بسيطة وهي ان نظرية التطور تدعي تطور خلق الانسان مع مرور الزمن، في حين ان القانون الثاني للترموديناميك وبحسابات رياضية دقيقة يثبت ان انتروبي الكون تميل الى الزيادة اي ان الكون يسير في اتجاه

اللاتنظام. ان انتروبي الكون وحسب القانون الثاني للترموديناميك لا يمكن ان تقل، فهي اما ان تزداد، وهذا ما يحصل في العمليات غير الانعكاسية، او ان تبقى كما هي، كما في العمليات الانعكاسية، لاحظ الشكل 5-7 والذي يمثل الشكل التخطيطي للقانون الثاني للترموديناميك.



إذا كانت العملية انعكاسية (رجوعية) $S_f = S_i$

إذا كانت العملية غير انعكاسية (لا رجوعية) $S_f > S_i$

شكل 5-7 الشكل التخطيطي للقانون الثاني للترموديناميك

يعبر عن القانون الثاني للترموديناميك بعدة صيغ، ومن هذه الصيغ الآتية:

اولا: صيغة كلاسيوس (1888-1822) Clausius Statement:

تنص صيغة كلاسيوس على الآتي:

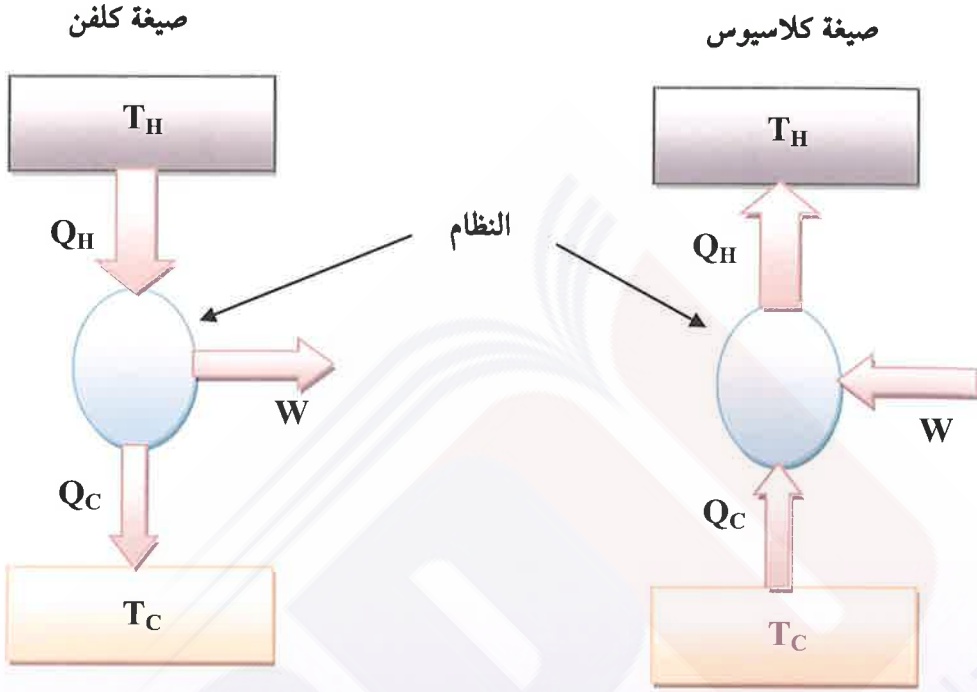
(لا يمكن في دورة ترموديناميكية نقل الحرارة من مستودع بارد إلى مستودع

حار ما لم يتم بنفس الوقت تحويل كمية من الشغل إلى حرارة).

الشكل 5-8 يعبر عن صيغة كلاسيوس، حيث نلاحظ عدم امكانية نقل

الحرارة من مستودع بارد إلى مستودع حار دون إدخال شغل محدد لغرض اتمام

العملية. التطبيق العملي لذلك هو الثلاجة المنزلية او أجهزة التبريد.



شكل 5-8 صيغة كلاسيوس وصيغة كلفن للقانون الثاني للترموديناميك

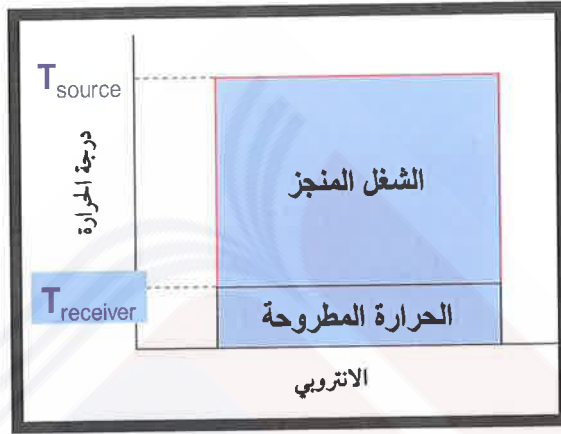
ثانيا: صيغة اللورد كلفن (1907-1824) Lord Kelvin Statement

تنص صيغة لورد كلفن على الآتي:

(في الدورة الترموديناميكية لا يمكن ان تنتقل الحرارة من المستودع الحار وتتحول إلى شغل بدون ان يتم تحويل جزء من الحرارة الى مستودع بارد).

جاءت هذه الصيغة، كذلك، استنادا إلى التجربة. لكي تحول ماكينة ما الحرارة بصورة مستمرة إلى شغل بدون احداث تغيرات في أجزاء النظام الأخرى، يجب في هذه الحالة أخذ الحرارة من مصدر له درجة حرارة عالية بحيث تحول قسما من تلك الحرارة إلى شغل مكافئ والقسمة الثاني ينقل إلى حوض

درجة حرارته أوطأ، لاحظ الشكل 5-8. الشكل 5-9 يوضح كمية الحرارة المطروحة إلى المستودع البارد وهي الحرارة التي لم تتحول إلى شغل.



شكل 5-9 كمية الحرارة المطروحة في الدورة الترموديناميكية

يسمى جزء الحرارة الممتصة عند درجة الحرارة العالية والمحول إلى الشغل المكافئ، كفاية الماكينة (Efficiency) علما بأنه ليست هناك ماكينة صنعت لحد الآن لها كفاءة تامة (100%) وهذا التعبير يعد احد تعاريف قانون الترموديناميك الثاني وسيتم التطرق اليه فيما بعد.

استنادا إلى ما جاء بالفقرة 3 من 2-5 من أن الحرارة تنتقل من طرف القضيب المعدني الحار إلى طرفه البارد تلقائيا إلى أن تصبح درجة حرارة القضيب منتظمة، فان الاستنتاج العام الذي يستنتج بهذا الخصوص من أن العملية التلقائية لا يمكن أن تكون عملية رجوعية، لذا يمكن تطبيق الاستنتاج لعمليات فيزيائية تلقائية أخرى مثل تمدد الغاز من وعاء عالي الضغط إلى آخر واطىء الضغط وانتشار الغاز بغاز آخر وتنافذ المحلول المركز في الماء وتحويل الطاقة الكهربائية إلى حرارة وإنتاج الحرارة بواسطة الاحتكاك وهكذا.

يجب تطبيق الاستنتاجات أيضا على العمليات التلقائية الكيميائية، فمثلا

الذوبان التلقائي لقطعة صغيرة من فلز الخارصين في محلول كبريتات النحاس بموجب المعادلة الآتية محررة كمية معروفة من الحرارة:



ويمكن عكس هذا التفاعل بإمرار تيار كهربائي بين فلز النحاس المتكون ومحلول كبريتات الخارصين وبذلك يعاد توليد فلز الخارصين وكبريتات النحاس، ولكي تعكس العملية بصورة تامة، يجب تحويل الحرارة التي تحررت في التفاعل الأصلي بصورة تامة إلى طاقة كهربائية.

يمكن القول بأن جميع العمليات الطبيعية أو التلقائية، أي العمليات التي تحدث بدون تأثير خارجي، هي عمليات غير رجوعية بسلوها الترموديناميكي ويعد هذا أيضاً واحداً تعاريف قانون الترموديناميك الثاني.

إن العملية التلقائية هي التي تحدث بمعدل محدود أو متناهي الصغر لذلك يتوقع بأنها عملية غير رجوعية طالما تحدث التغيرات الرجوعية الترموديناميكية بصورة بطيئة ومتناهية الصغر. التغير بالانتروبي كما في المعادلة الآتية:

$$ds = \frac{dQ}{T} \quad 5-3$$

يعتمد الحد الرياضي على الحالة الابتدائية (A) والحالة النهائية (B) للنظام ولا يعتمد على الطريق الذي يسلكه النظام إلى الوصول إلى الحالة (B) ولذلك يمكن كتابة المعادلة 3-5 على النحو الآتي:

$$\Delta S = S_B - S_A = \int_A^B \left(\frac{dQ}{T} \right)_{\text{رجوعي}} \quad 5-4$$

يعد التغير في الانتروبي قياس فقدان سعة النظام لانجاز شغل معين، فإذا كان التغير بالانتروبي عالياً فإن فقدان سعة النظام لانجاز شغل يكون عالياً. تمثل المعادلة 3-5 التعريف الرياضي لقانون الترموديناميك الثاني. تقدر وحدة

الانتروبي بوحدة الحرارة مقسومة على وحدة درجة الحرارة، أي وحدة الطاقة مقسومة على وحدة درجة الحرارة، بمعنى آخر جول درجة مطلقة⁻¹ أو سعره درجة مطلقة⁻¹.

ثالثا: صيغة بولتزمان (1906 - 1844) Boltzman Statement

تنص صيغة بولتزمان على:

(في العملية الاديباتيكية لنظام معين، لا يمكن ان تقل الانتروبي. لذلك فان مستوى عال من الترتيب غير محتمل).

الصيغة التي جاء بها بولتزمان لا تختلف عن الصيغ المذكورة سابقا، حيث انها تؤكد كذلك على ان هنالك زيادة في انتروبي النظام وهو مقياس لعدم انتظام النظام.

رابعا: صيغة سيرز وزمانسكي: Sears and Zemansky

تنص هذه الصيغة على:

(من المستحيل ان يتم تحويل 100% من الحرارة الى شغل ميكانيكي).

ان صيغة سيرز وزمانسكي تم التطرق اليها ضمنا في الصيغ السابقة والتي توضح عدم امكانية تحويل الحرارة بصورة تامة الى شغل ميكانيكي.

5-6 الانتروبي كدالة للحالة و الانتروبي الغاز المثالي

The Entropy as a state Function and the Entropy of Ideal Gas

استناداً إلى قانون الترموديناميك الأول وعند ثبوت درجة الحرارة فإن:

$$dU = \overset{\text{رجوعي}}{d}Q + \overset{\text{رجوعي}}{d}w \quad 5-5$$

$$\overset{\text{رجوعي}}{d}w = dU_{\text{رجوعي}} - \overset{\text{رجوعي}}{d}Q \quad 5-6$$

عند إدخال المعادلة 3-5 بالمعادلة 5-6 ينتج الآتي:

$$\delta w_{\text{عمل}} = (dU + Tds) \quad 5-7$$

بما أن (q) تفاضلي غير تام Inexact differential، ولكن عند تقسيمها على درجة الحرارة يصبح المقدار تفاضلا تاما Exact differential لذلك تعد الانتروبي دالة من دوال الحالة. والآن يمكن كتابة تعبير رياضي موحد لقانوني الثرموديناميك الأول والثاني وكالاتي:

$$dU = \delta Q + \delta w \quad \text{القانون الأول}$$

$$\delta Q = Tds \quad \text{القانون الثاني}$$

$$dU = Tds - PdV \quad \text{القانون الموحد} \quad 5-8$$

تطبق المعادلة 5-8 أو القانون الموحد على الأنظمة التي تنجز شغلا من نوع (PV) فقط.

إذا كانت (U) دالة لكل من (S) و (V)، أي:

$$U(S, V)$$

فإن:

$$dU = \left(\frac{\partial U}{\partial S} \right)_V dS + \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_S dV \quad 5-9$$

وعند مقارنة المعادلتين 5-8 و 5-9، يمكن استنتاج ما يأتي:

$$\left(\frac{\partial U}{\partial S} \right)_V = T \quad 5-10$$

$$\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_S = -P \quad 5-11$$

إن المعادلتين 10-5 و 11-5 تعطي تفسيراً للمتغيرات المركزة أو المكثفة وهما الضغط (P) ودرجة الحرارة (T) بدلالة المتغيرات الشاملة أو الممتدة للنظام وهي الطاقة (U) والانتروبي (S) والحجم (V).

مول واحد من الغاز المثالي (PV = RT) واستناداً إلى قانون الترموديناميك الأول والثاني وإذا كان النظام ينجز شغل (PV) فقط يمكن دمج المعادلات الآتية وكالاتي:

$$dU = dQ - PdV \quad 5-12$$

$$dQ = dU - RT \frac{dV}{V} \quad \text{القانون الأول}$$

$$\frac{dq}{T} = dS \quad \text{القانون الثاني}$$

ونحن نعلم بان:

$$dU = C_v dT \quad 5-13$$

وبتعويض المعادلة 5-13 بمعادلة القانون الأول ثم قسمة المعادلة الناتجة

على (T) ينتج الآتي:

$$\frac{dQ}{T} = C_v \frac{dT}{T} + R \frac{dV}{V} \quad 5-14$$

والآن تعوض معادلة القانون الثاني بالمعادلة 5-14 لنحصل على:

$$dS = C_v \frac{dT}{T} + R \frac{dV}{V} \quad 5-15$$

تكامل المعادلة 5-15 بين الحالة الابتدائية للنظام (A) والحالة النهائية (B) يؤدي إلى المعادلة المتكاملة 5-16:

$$\Delta S = S_B - S_A = C_v \ln \frac{T_B}{T_A} + R \ln \frac{V_B}{V_A} \quad 5-16$$

تؤيد المعادلة 5-16 بأن الكمية رجوعي $\left(\frac{dQ}{T}\right)$ تفاضل مضبوط

أو تام والانتروبي دالة من دوال الحالة. وبما أن المعادلتين $P_A V_A = RT_A$ و $RT_B = P_B V_B$ تصف الحالتين الابتدائية والنهائية لغاز المثالي فإن:

$$\frac{V_B}{V_A} = \frac{T_B P_A}{T_A P_B} \quad 5-17$$

وبتعويض هذه المعادلة بالمعادلة 5-16 ينتج الآتي:

$$\Delta S = S_B - S_A = C_v \ln \frac{T_B}{T_A} + R \ln \frac{T_B}{T_A} - R \ln \frac{P_B}{P_A} \quad 5-18$$

ولمول واحد من الغاز المثالي:

$$C_p = C_v + R$$

أو

$$C_v = C_p - R$$

تصبح المعادلة 5-18 على النحو الآتي:

$$\Delta S = S_B - S_A = C_p \ln \frac{T_B}{T_A} - R \ln \frac{T_B}{T_A} + R \ln \frac{T_B}{T_A} - R \ln \frac{P_B}{P_A} \quad 5-19$$

$$\Delta S = S_B - S_A = C_p \ln \frac{T_B}{T_A} + R \ln \frac{P_B}{P_A} \quad 5-20$$

هناك ثلاث حالات خاصة وهي:

أ- ليس هنالك تغير في العملية بثبوت درجة الحرارة، لذلك $T_A = T_B$ ونتيجة لذلك تبسط المعادلتين 5-16 و 5-20 كما يأتي:

$$\Delta S_T = R \ln \frac{V_B}{V_A} \quad 5-21$$

$$\Delta S_T = -R \ln \frac{P_B}{P_A} \quad 5-22$$

$$\Delta S_T = R \ln \frac{V_B}{V_A} = -R \ln \frac{P_B}{P_A} \quad 5-23$$

تعني (ΔS_T) أن التغير بالانتروبي يتم بثبوت درجة الحرارة.

إذا كان (V_B) أكبر من (V_A) (أي في عملية التمدد) تكون قيمة (ΔS) موجبة ولذلك يصاحب تمدد الغاز المثالي بثبوت درجة الحرارة زيادة بانتروبي الغاز وبالتشابه يصاحب الانضغاط بثبوت درجة الحرارة للغاز المثالي نقصانا بالانتروبي.

ب- في العمليات الايزوبارية (العمليات التي تحصل عند ضغط ثابت) يصبح $P_B = P_A$ وعندئذ تختزل المعادلة 5-20 إلى الآتي:

$$\Delta S_P = C_p \ln \frac{T_B}{T_A} \quad 5-24$$

تبين المعادلة 5-24 أن زيادة درجة الحرارة بثبوت الضغط يصاحبها زيادة في انتروبي الغاز المثالي.

ج- في العمليات الايزوكورية Isochoric (العمليات التي تحصل عند حجم ثابت) تختزل المعادلة 5-18 إلى ما يأتي:

$$\Delta S_V = C_v \ln \frac{T_B}{T_A} \quad 5-25$$

تبين المعادلة 5-25 أن زيادة درجة الحرارة بثبوت الحجم يصاحبها زيادة في انتروبي الغاز المثالي.

الجدول 5-1 يوضح قيم التغير بالانتروبي في العمليات الترموديناميكية المختلفة.

جدول 5-1 قيم الانتروبي في العمليات الترموديناميكية

العملية	التغير بالحرارة	التغير بالانتروبي
ايزوثيرمية	$dQ_{rev} = nRT \frac{dV}{V}$	$\Delta S = \int_1^2 \frac{dQ_{rev}}{T} = nR \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right)$
ايزوكورية	$dQ_{rev} = nC_v dT$	$\Delta S = \int_1^2 \frac{dQ_{rev}}{T} = nC_v \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right)$
ايزوبارية	$dQ_{rev} = nC_p dT$	$\Delta S = \int_1^2 \frac{dQ_{rev}}{T} = nC_p \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right)$