الفصل السابع
الإنتروبي والإنثالبي

الإنتروبي أو **العشوائية** Entropy

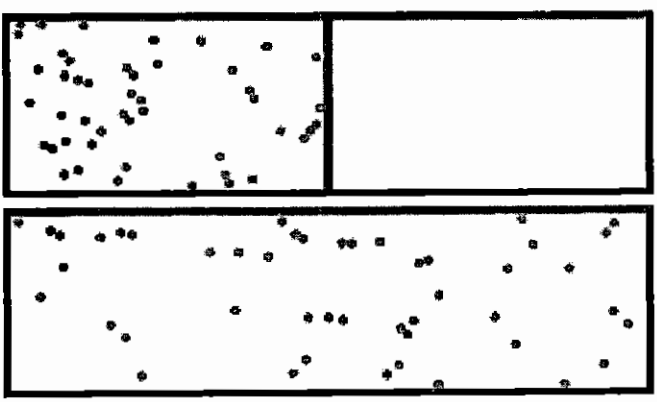
أصل الكلمة مأخوذ عن اليونانية ومعناها "تحول"، وهو مفهوم هام في التحريك الحراري، وخاصة للقانون الثاني للديناميكا الحرارية، الذي يتعامل مع العمليات الفيزيائية للأنظمة الكبيرة المكونة من جزيئات بالغة الأعداد ويبحث سلوكها كعملية تتم تلقائيا أم لا. ينص القانون الثاني للديناميكا الحرارية على مبدأ أساسي يقول: أي تغير يحدث تلقائيا في نظام فيزيائي لا بد وأن يصحبه ازدياد في مقدار الإنتروبي الخاص به.

يميل أي نظام مغلق إلى التغير أو التحول تلقائيا بزيادة الإنتروبي حتى يصل إلى حالة توزيع متساو في جميع أجزائه، مثل تساوي درجة الحرارة، وتساوي الضغط، وتساوي الكثافة وغير تلك الصفات في نظام ما. وقد يحتاج النظام المعزول الوصول إلى هذا التوازن بعضا من الوقت. مثال على ذلك: إلقاء قطرة من الحبر الأزرق في كوب ماء؛ نلاحظ أن قطرة الحبر تذوب وتنتشر رويدا رويدا في الماء حتي يصبح كل جزء من الماء متجانسا بما فيه من حبر وماء، فنقول أن إنتروبي النظام تزايدت (أي زادت العشوائية فيه، فلا يوجد به منطقة عالية التركيز وأخرى منخفضة التركيز؛ بمعني أن توزيع الحبر في الماء متساو). أي أن مجموع إنتروبي نقطة الحبر النقية + إنتروبي الماء النقي تكون أقل من إنتروبي النظام "حبر ذائب في ماء". وماذا عن عكس العملية؟ أي محاولة فصل الحبر الذائب عن الماء. فهذه العملية يتبعها خفض لإنتروبي النظام، وكما نعرف هذا لا يسير وحده طبيعيا؛ فلم نرى في الطبيعة أن يتجمع الحبر ثانيا ويحتل جزءا منفصلا في

كوب الماء. ولكننا بأداء شغل يمكن فصلهما ثانيا عن بعض، مثل: تسخين المخلوط وتقطيره مثلا. معنى ذلك أن خفض الإنتروبي لا يتم إلا باستخدام طاقة خارجية، ألا وهي التسخين والتقطير. وهذا مثلا ما نستعمله في تحلية المياه لفصل الملح عن ماء البحر وإنتاج ماء عذبا.

مثال أخر طبيعي، إذا وقع كوب زجاجي من على المنضدة على الأرض فإنه يتحطم تماما (ينكسر إلي قطع صغيرة)، أي تكون إنتروبي الكوب قد زادت. فإذا إردنا إعادة الكوب إلى أصله السليم مرة ثانية، وهذا لا يحدث ذاتيا في الطبيعة، فإننا لا بد وأن نزاول شغل على النظام؛ بمعنى أننا نجمع قطع الزجاج المنكسر، ثم صهره في فرن ثم صب الزجاج المنصهر في قالب من جديد، فنحصل على الكوب مرة ثانية سليم. من هنا، اتخذت صفة الإنتروبى لنظام في الطبيعة أهميتها، فهي تحدد اتجاه سير عملية ما طبيعيا.

كذلك، لو عندنا غاز يشغل نصف الغرفة كما هو موضح بالشكل (1-7)، ثم إذا أزلنا الحاجز، وسمحنا للغاز أن يشغل الغرفة كلها، فإن إنتروبي النظام يزداد؛ أي أن العشوائية وعدم انتظام الذرات تزداد.



شكل (1-7): انتشار الغاز وزيادة العشوائية

وقد أصبح للإنتروبي كأحد الصفات الطبيعية لنظام أهمية من خلال علاقة الإنتروبي بتحول الطاقة الحرارية إلى شغل ميكانيكي، فنجدها تلعب دورا هاما في تحديد كفاءة آلات، مثل: محرك الاحتراق الداخلي ومحرك الديزل وغيرها.

مفهوم الإنتروبي

ولوصف مدلول الإنتروبي، نفترض المثال المذكور أعلاه وهو مثال الماء ونقطة الحبر الذائبة فيه فنجد أن اختلاط نقطة الحبر بالماء سهل ويتم طبيعيا. أما إذا أردنا فصل نقطة الحبر ثانيا عن الماء ليصبح لدينا ماء نقي وحبر نقي فتلك عملية صعبة ولا تتم إلا ببذل شغل. وفي هذه الحالة نقول: أن حالة المخلوط له إنتروبي كبيرة، بينما حالة الماء النقي والحبر النقي فهي حالة يكون أنتروبيتها منخفضة.

وفي الحقيقة، فإن مثل تلك العملية تصادفنا يوميا، مثل: فصل السكر عن محلول قصب السكر، حيث يتم ذلك من خلال تبخير المحلول، أي بتسخين المحلول وبذل شغل، أي بذل طاقة، لفصل السكر عن الماء.

وأيضا الكمون الكيميائي ضمن أي نظام فيزيائي أو كيميائي يميل تلقائيا إلى خفض الطاقة الداخلية للنظام إلى أقل ما يمكن لكي يصل النظام لحالة من التوازن. الإنتروبي ضمن هذا المفهوم هو مقدار تقدم عملية التحول والتوازن هذه.

وفي ضوء ما سبق، فإن الإنتروبي (entropy) هو مصطلح علمي معتمد فيزيائيا وكيميائيا، يعني درجة الاضطراب في النظام أو حالة اللاانتظام والفوضى، طرح من قبل علماء الكيمياء الحرارية الذين اسسو علم الثرمو داينامك وهم كل من لورد كلفن(وليم تومسن) و رودولف كلازيوس. وقد طرح هذا المصطلح في القانون الثاني في الديناميكا الحرارية الذي ينص على أن الإنتروبي في النظام الكيميائي المغلق تزداد مع الزمن.

ومما تجدر الإشارة إليه، أن أول من قدم فكرة الإنتروبي هو كلاوزيوس Clausius في عام 1985م. ولقد عرف كلاوزيوس الإنتروبي من خلال المعادلة الرياضية

الإنتروبي = S كمية الحرارة في المنظومة / Q درجة حرارة المنظومةT

ونشير إلي أنه لم تكن تعرف في ذلك الوقت فكرة أن الغاز يتكون من جزيئات دقيقة وأن درجة الحرارة تمثل متوسط الطاقة الحركية لهذه الجزيئات، وكانت الحرارة تعتبر كمية محفوظة تنتقل من منظومة إلى أخرى. ما كان يقصده كلاوسيوس بكمية الحرارة في المنظومة نسميه اليوم الطاقة الحرارية الداخلية Internal Heat Energy . وبما أن درجة الحرارة تظهر في معادلة كلاوزيوس كبند محدد، فهذا يعني أن المنظومة يجب أن تكون في حالة اتزان.

الحاجة إلي الإنتروبي

الطاقة تتحول من صورة إلى أخرى ولكنها لا تستهلك، أي لا تفنى، فمثلا يمكن للطاقة أن تتحول إلى شغل ديناميكي أو إلى حرارة (هذا ما ينص عليه القانون الأول للديناميكا الحرارية وكذلك ما ينص عليه قانون بقاء الطاقة) خلال عمل محرك يعمل بالبنزين فإنه يستخدم الطاقة المخزونة في الوقود في تحريك السيارة (شغل ميكانيكي) ويطرد بعض الحرارة مع غاز العادم. ونظرا لأن حركة أجزاء السيارة وحركة السيارة نفسها تتحول بالاحتكاك إلى حرارة، فنجد أن الطاقة التي كانت أصلا مخزونة في الوقود تتحول أخيرا إلى حرارة تنتشر في الجو، بصرف النظر عن تحول بعضها إلى طاقة الوضع كصعود جبل أو طاقة خزنت بعضها في بطارية السيارة. وهكذا، نجد أن الطاقة لا تفنى وإنما "تتحول من صورة إلى أخرى. لهذا نحتاج إلى كمية نعرف بها "إمكانية إنتاج شغل" من الطاقة حيث أن كمية الطاقة وحدها لا تعطينا كمية الشغل المستفاد من الطاقة.

فعلى سبيل المثال، يوجد في محيطات العالم طاقة مخزونة هائلة. ولكن نظرا لأن درجة حرارة البحار تساوي تقريبا درجة حرارة الجو، فلا يمكننا الاستفادة من الطاقة المخزونة في البحار. لهذا يصبح من المناسب طبقا للمعادلة (1):

فعلى سبيل المثال يوجد في محيطات العالم طاقة مخزونة هائلة. ولكن نظرا لأن درجة حرارة البحار تساوي تقريبا درجة حرارة الجو ، فلا يمكننا الاستفادة من الطاقة المخزونة في البحار

تعريف فرق الإنتروبي

بالاستعانة "بالتغير في كمية حرارة δQ_{rev} النظام ودرجة الحرارة T . وفي المعادلة السابقة، فإن ds تعني تغير الإنتروبي وهو عبارة عن نسبة الحرارة المنتقلة δQ_{rev} بين وسطين إلى درجة الحرارة المطلقة.

ولقد صاغ العالم رودولف كلاوزيوس معادلة الإنتروبي هذه وتبين له أنه يمكن تحويل كمية من الحرارة إلى شغل ميكانيكي خلال دورة حيث تنتقل الحرارة من درجة حرارة عالية إلى وسط ذو درجة حرارة منخفضة، وأنه كلما زادت درجة الحرارة الابتدائية في آلة كلما زادت كمية الشغل المكتسبة من فرق درجتي الحرارة الابتدائية والنهائية. كما يتضح ذلك في دورة كارنوت.

وفي مثالنا السابق عن محرك احتراق داخلي يشتعل الوقود داخل أسطوانة المحرك وتصل درجة حرارة الغاز المحترق بين 2000 و2500 درجة مئوية ويخرج من المحرك وتكون درجة حرارته النهائية قد انخفضت إلى نحو 800 درجة مئوية، ويخرج كغاز عادم. وباستخدام معادلات كلاوزيوس يمكننا تقدير كمية الشغل الناتج الذي يعطيه المحرك على أفضل الشروط.

الطاقة التي زودنا بها المحرك عن طريق الوقود كان لها إنتروبي منخفض بينما حرارة العادم فلها إنتروبي عالي. وعن طريق تعيين الفرق بينهما يمكننا

حساب الشغل المكتسب. وطبقا للقانون الثاني للديناميكا الحرارية يقول أنه في دورة عكوسية يكون الإنتروبي ثابتا، بينما في دورة غير عكوسية فلا بد له من أن يزداد. هذا مايقوله القانون الثاني للديناميكا الحرارية.

تعيين الإنتروبي

تعتبر إنتروبي نظام ثرموديناميكي من الكميات التي لا يمكن قياسها بسهولة. ولكن يمكن التغلب على ذلك عن طريق التنسيق بين الطرق العملية والطرق النظرية، فنحصل على قيم للإنتروبي قريبة من الحقيقة. فعند درجة حرارة منخفضة يبين لنا نموذج ديباي أن السعة الحرارية الذرية C_v للمواد الصلبة تتناسب مع مكعب درجة الحرارة T^3 ، وأنها تصل إلى الصفر عند درجة الصفر المطلق وذلك في حالة البلورة المنتظمة. ونستطيع قياس السعة الحرارية لمادة عمليا عند درجات حرارة مختلفة حتى درجات حرارة منخفضة جدا.

تعطي منحنيات بيانية قيم الحرارة النوعية C_p/T واعتمادها على درجة الحرارة Tللمواد عندما تكون في نفس الطور. وتُمد البيانات المعينة عمليا عند درجات حرارة منخفضة إلى درجة الصفر المطلق باستخدام نموذج ديباي.

نرمز للإنتروبي عند درجة الصفر المطلق بالرمز S_0 وعندها تكون مساوية للصفر. ولتعيين الإنتروبي عند درجة حرارة معينة، نقوم بتعيين المساحة تحت منحنى الإنتروبي الذي عيناه بين الصفر المطلق ودرجة الحرارة المطلوبة، فتكون مساوية لها. ومع أن نموذج ديباي يعطي C_v بدلا عن C_p، فإن الفرق بينهما عند درجات حرارة قريبة من الصفر المطلق (0 كلفن) يكون صغيرا جدا ويمكن اهماله. نرمز للقيمة المطلقة لإنتروبي مادة في حالتها القياسية عند درجة الحرارة المرجعية 298.15 كلفن (25) بالرمز $S°_{298}$. ويزداد الإنتروبي بزيادة درجة الحرارة، ويختل بعض الشيء عند درجة تحول طوري، ويكون التغير في الإنتروبي ($\Delta S°$)

عند درجة تحول الطور العادية مساويا لحرارة التحول مقسومة على درجة حرارة التحول. وطبقا لتعريف النظام الدولي للوحدات يقاس الإنتروبي بوحدة (جول/مول.كلفن) أي جول/مول/كلفن.

مثال حسابي

نقوم بإضافة 1 كيلوجرام ماء بارد، درجة حرارته 10 مئوية مع 1 كيلوجرام ماء دافئ تبلغ درجة حرارته 30 مئوية، فيختلطان في الحال وينتج لدينا 2 كيلوجرام ماء تبلغ درجة حرارته 20 درجة مئوية. يحدث الخلط في التو والحال لأن الإنتروبي الابتدائي (151 + 437 = 588) كان أقل من الإنتروبي النهائي (594 = 297 + 297). ولا يمكن عكس تلك العملية لأن إنتروبي مخلوط الماء (2 كيلوجرام) الذي يبلغ 594 جول/كلفن لا بد وأن يهبط عند الفصل إلى 588 جول/كلفن، وهذا يتعارض مع القانون الثاني للديناميكا الحرارية.

الإنتروبي .. هو القانون الثاني

المادة ساكنة ما لم يثرها عامل خارجي يحفز ذراتها على الحركة والسرعة والتصادم ببعضها، واذا زال المؤثر الخارجي تعود إلى وضعها المتناظر المتجانس بعد فترة زمنية محددة.

وكلما ازدادت سرعة الذرات والجزيئات المكونة للحيز كلما ازدادت وارتفعت درجات الحرارة بسبب تصادم هذه الذرات ببعضه. وكما ذكرنا سابقا، فإن الحرارة شكل من أشكال الطاقة، ولذلك تخضع لقانون حفظ الطاقة. وكلما زاد الاحتراق يزيد انتاج الطاقة لازدياد الانتروبي، ولا يمكن تحول الطاقة من شكل إلى آخر إن لم يرافق هذا التحول ازدياد الانتروبي. ونتيجة لهذا التحول وهذا التفاعل تنتج طاقة وتنتج مخلفات لا فائدة منها، ولذلك يتم التخلص منها في مكبات خاصة لانها نفايات؛ ومنها النفايات النووية والذرية.

قانون الإنتروبي يسيطر على القوانين الأخرى

الإنتروبي تحدد إتجاه تدفق الطاقة الحرارة والشغل من نظام إلى آخر وهي تتحرك من الساخن الى البارد لتحقق التجانس وفق النظام المحدد، مما حدا بـ "آرثر أدينجتون" ليقول بأن هذا القانون قانوناً ميتافيزقياً أسمى لكل الكون. وهكذا فسر "باول ديفز" انتصار التوازن الرائع والتناسق على المادية بقوله: "أينما نظرنا في الكون من المجرات المندفعة بعيداً وإلى أعمق أعماق الذرة فإننا نواجه الترتيب والنظام".

ليس صحيحا أن الإنتروبي نوعا من المقياس للفوضى، لأن الإنتروبي يزيد مع زيادة النظام، فالإنتروبي دليل على النظام وليس على الفوضى والعشوائية والعبث. والعشوائية لا يمكن أن تستفيد من نظام، لان مفهوم العشوائية مناقض لمفهوم النظام هذا الكون ومواده واشكاله، وهذه الطاقة واشكالها ليس أبديا.

فقانون الإنتروبي للديناميكا الحرارية ينص على أنه "لا توجد هناك عمليات تحول في الطاقة دون أن يتحول جزء من هذه الطاقة إلى شكل لا يمكن الاستفادة منه، أي لا بد من ضياع جزء من هذه الطاقة."

وللإشارة إلى مقدار هذه الطاقة التي لا يمكن الاستفادة منها استخدم العلماء مصطلح الإنتروبي، وبهذا يؤكد هذا القانون الفيزيائى أن جميع التغيرات والتبدلات الحادثة والجارية في الكون تسير نحو زيادة الإنتروبي. أي نحو زيادة التحلل والتفكك، أي أن الكون يسير نحو الموت. كما يؤكد الفيزيائيون بهذا أن الكون يسير نحو الموت الحراري، وذلك لأن انتقال الحرارة من الأجسام الحارة (من النجوم) إلى الأجسام الباردة (الكواكب والغبار الكوني مثلا) لن يستمر بموجب هذا القانون إلى الأبد ولكنه سيتوقف يوما ما عندما تتساوى حرارة جميع الأجرام والأجسام في الكون. وعندما يتوقف انتقال الحرارة بين الأجسام ستتوقف التفاعلات جميعها، وهذا معناه موت الكون.

فهذه هى نهاية الكون، يتسع الكون مع الزمن ثم ينكمش إلى الوراء حتى يعود إلى نقطة البداية. كما قال الله تعالى: "يَوْمَ نَطْوِي السَّمَاءَ كَطَيِّ السِّجِلِّ لِلْكُتُبِ كَمَا بَدَأْنَا أَوَّلَ خَلْقٍ نُعِيدُهُ وَعدًا عَلَيْنَا إِنَّا كُنَّا فَاعِلِينَ" سورة الأنبياء – الآية 104

نستنتج مما سبق :

لا بد من وجود مؤثر ومسبب، ولذلك فان الادعاء بأن النظام والترتيب اللذين نشاهدهما ليسا نتيجة لتدخل خارجي غير صحيح، ولا يوجد تعليل وتفسير ذلك الا وجود قوة فوق الطبيعية خارقة للطبيعة.