

تطور تكنيك درجات الحرارة المنخفضة

يرجع تاريخ استخدام درجات الحرارة المنخفضة في حفظ الأطعمة إلى عصور الرومان ، ومنذ ذلك التاريخ إلى أن قامت النهضة الصناعية الكبرى في بعض دول غرب أوروبا. كان الصقيع الذي تذرفه السماء إبان فصل الشتاء يجد من يجمعه من الشوارع والطرق لاستخدامه في حفظ الأسماك وغيرها من الأطعمة القابلة للفساد . وكانت تبني في الأجزاء المسترة من الحديقة غرف ثلجية تعزل عن الحرارة والأرض المحفورة ، لهذا الغرض .

وحتى منتصف القرن الثامن عشر لم تكن هناك محاولات مدروسة وجادة للاهتمام بالحصول على درجات حرارة أقل من درجة حرارة الوسط المحيط ، وعندما عرّف العالم فهرنهايت تدريجه لدرجات الحرارة اتخذ أدنى درجة حرارة ممكنة يستطيع الوصول إليها بخلط حبيبات الصقيع بالملح المعتاد كصفر على تدريجه . . كان ذلك توضيحاً لأسلوب بسيط نسبياً ولكنه محدود لعملية التبريد . وعند إذابة كثير من المواد خاصة الأملاح المميأة في الماء تمتص بعض الحرارة وتنخفض درجة حرارة المحلول عن درجة حرارة المواد الأصلية . وأقل درجة حرارة يمكن التوصل إليها لأي محلول خاص ،

هى عند درجة اليوتكتي* عندما يكون كل من الثلج والمادة الجامدة الأخرى فى توازن مع المحلول . وبصفة عامة وجد أنه كلما زادت ذائبية المادة انخفضت نقطة اليوتكتي ويعطى الجدول التالى بعض الأرقام النمطية لذلك :

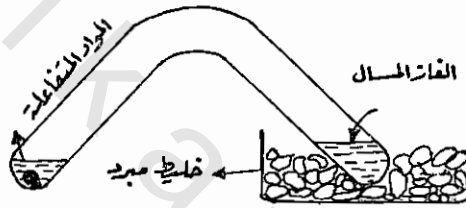
جدول (٢)

المادة	النسبة المئوية للمادة فى الماء	درجة حرارة اليوتكتي ٥ م
كلوريد الصوديوم	٢٢,٤	٢١,٢ -
كلوريد الماغنسيوم	٢١,٦	٣٣,٦ -
كلوريد الكالسيوم	٥٩,٨	٥٥, -
كلوريد الزنك	٥١,٠	٦٢, -

وفى عام ١٧٥٥ كشف جالين عن الآلة الثلجية الأولى التى كانت تعمل على أساس مختلف ، فعند تصعيد الماء يحتاج إلى مده بكمية من الحرارة الكامنة للتصعيد (التبخر) ، وعليه فإذا أمكن أن يحدث هذا التصعيد بسرعة كبيرة بحيث لا تكون هناك فرصة للماء المتخلف لكى يمتص حرارة من الوسط المحيط به ، فإنه يبرد ، وفى النهاية يتجمد ويؤول ثلجاً . ومنذ ذلك الحين فصاعداً ، بذلت كثير من المحاولات الجادة لإسالة الغازات المختلفة بإدماج أسلوبى التبريد الشديد إلى الدرجة التى يمكن التوصل إليها عملياً مع تحقيق ضغوط عالية ، وفى هذا الصدد يمكن التنبؤ بصفة خاصة إلى المجهودات الحميدة التى بذلها فاراداي عندما نجح فى توليد الغاز فى إحدى ذراعى

(٥) اليوتكتي : ذو نقطة إنصهار بالغة الحد الأدنى من حيث الانخفاض .

أنبوبة ملحومة تشبه في شكلها الحرف ٨ بينما كانت ذراعها الأخرى مغمورة في مخلوط مبرد مناسب . ومن ثم تم تحقيق ائتلاف من ضغط عال مع درجة حرارة منخفضة في قطعة واحدة من الجهاز . وباستخدام هذا التكنيك استطاع فاراداي للمرة الأولى من إرساله العديد من الغازات منها : غاز الأمونيا ، الكلور ، ثاني أكسيد الكبريت ، ثاني كبريتيد الهيدروجين .



شكل (٢٠)
طريقة فاراداي لإسالة الغازات

وعلى الرغم من المجهودات الجبارة التي بذلها الآخرون الذين ولعوا بتكنيك إسالة الغازات . حيث استخدموا ضغوطاً أعلى ، إلا أنهم لم يوفقوا في تحقيق ذلك ، ولم يصيبوا نجاحاً بالنسبة لإسالة عدد لا بأس به من الغازات واستحال تسهيلها بتطبيق هذا التكنيك ، ومن ثم أصبحت تعرف بالغازات « الدائمة » . ولكن منذ أن نجح العالم أندراوس في إسالة غاز ثاني أكسيد الكربون عام ١٨٦٩ . تغير مفهوم درجة الحرارة الحرجة ، وأصبح ممكناً إسالة الغازات الدائمة ، وعليه يمكن تعريف درجة الحرارة الحرجة ، بأنها درجة الحرارة التي فوقها يستحيل إسالة الغاز مهما كان الضغط المستخدم كبيراً . ويبين الجدول التالي درجة الحرارة الحرجة للغازات الدائمة الرئيسية :

جدول (٣)

الغاز	درجة الحرارة الحرجة	الغاز	درجة الحرارة الحرجة
أكسجين	— ١١٨,٣٨	زينون	١٦,٦
نتروجين	— ١٤٦,٩٥	كريبتون	— ٦٣,٨
أرجون	— ١٢٢,٢٩	هيليوم	— ٢٦٧,٩٧
نيون	— ٢٢٨,٧	هيدروجين	— ٢٣٩,٩٧
أوزون	— ١٢,١	أستيلين	٣٥,٥
أول أكسيد الكربون	— ١٣٩,٠	إيثيلين	— ٩,٥
ثاني أكسيد الكربون	٣١,٠٤	ميثان	— ٨٢,١
أمونيا	١٣٣,٠	بروبان	٩٥,٦
أكسيد النتروز	٣٦,٥	ن بيوتان	١٥٣
ثاني أكسيد الكبريت	١٥٧,١٢		

ويجب ملاحظة أن الضغط الحرج هو ذلك الضغط اللازم لإسالة الغاز عند درجة حرارته الحرجة . ومن الطبيعي أن تقل الحاجة إلى الضغوط العالية اللازمة لإسالة الغاز عند درجات الحرارة المنخفضة .

وبصرف النظر عن الطرق الخاصة ذات الأهمية الأكاديمية والتي تتركز بالدرجة الأولى في محاولات الاقتراب بقدر الإمكان من درجة الصفر المطلق . وهناك طريقتان عمليتان أساسيتان يمكن استخدامهما لهذا الغرض . وتتمثل الطريقة الأولى في أن يقوم الغاز بأداء شغل تحت ظروف لا يتمكن خلالها من امتصاص كثير من الحرارة من الوسط المحيط به . فإذا ضغط

الغاز فإن درجة حرارته ترتفع ، وإذا سمح لهذا الغاز المضغوط بالتمدد في اسطوانة لها مكبس ، فإنه عند تمدده يحرك المكبس وعندئذ يؤدي شغلاً ، ومن ثم يبرد وتنخفض درجة حرارته . وعملياً يتحتم أن يستعيد الغاز بعد انضغاطه سيرته الأولى ويكتسب درجة حرارة الغرفة قبل أن يسمح له بدفع المكبس وإلا انخفضت عملية التبريد برمتها . ولقد كانت هذه الطريقة هي براءة الاختراع التي سجلها العالمان سيمتز في عام ١٨٥٧ ، وسرلثاى في عام ١٨٨٥ . كما طبقها العالم كلود بعد ذلك بحوالى قرن في وحدة عملية لفصل الهواء . ومن خلال الملاحظات التي أبداها كل من جول وطومسون عام ١٨٥٢ تم استنباط المبدأ الآخر الذى يمكن استخدامه في تكييف إسالة الغازات . وإذا دفع غاز تحت ضغط قسراً لينساب من خلال اختناق ، مثل سدادة مسامية ، أو فتحة ضيقة جداً أو صمام مفتوح جزئياً ، فإن الغاز يتعرض لتغير في درجة الحرارة . ويعرف هذا التأثير بتأثير جول - طومسون . وبالنسبة للغاز التام ينعدم هذا التأثير تماماً . ولكن بالنسبة لأى غاز حقيقى فإن الأمر يختلف عن الغاز التام في نقطتين ، أولاًهما ، وجود قوى جذب بين جزيئات الغاز ، وتأثير هذه القوى عند تمدد الغاز ، إذ يتحتم بذل شغل مضاد للتغلب على هذه القوى مما يترتب عليه برودة الغاز . وثانيتهما ، شغل جزيئات الغاز الحقيقى لحيز محدود ، مع نزعتها للحفاظ على مسافات بين بعضها بعضاً ، ونتيجة لذلك فإنه عندما يتمدد الغاز ترتفع درجة حرارته بعض الشيء . وبإدماج هاتين النقطتين نحصل على تأثير جول - طومسون .

وعند درجات الحرارة التي لا تزيد كثيراً عن درجة حرارة التكثف ، يسود تأثير جول - طومسون . وعند درجات الحرارة العالية بدرجة كافية فإن تأثير التسخين يكون مرجحاً عن تأثير التبريد . وتعرف درجة الحرارة التي يجب أن يبرد الغاز إليها للحصول على تأثير التبريد عند تمدد جول -

طومسون بدرجة الحرارة الانعكاسية .

وسوف يتضح أنه يمكن استخدام تأثير جول - طومسون لتبريد جميع الغازات إلى درجات حرارة تقل عن درجة حرارة الغرفة فيما عدا الهيدروجين ، والهليوم والنيون ولكن من ناحية أخرى يمكن استخدام التأثير في حالة هذه الغازات الثلاثة ، وذلك بتبريدها جزئياً بوسائل أخرى إلى ما دون درجة حرارتها الانعكاسية ، أى بتبريد النيون إلى - ٣° م ، الهيدروجين إلى - ٦٦° م كانا يملآن الهليوم إلى - ٢٣٣° م .

وفى عام ١٨٧٧ نجح عاملان كانا يعملان مستقلين في إسالة غاز الأكسجين ، وذلك باستخدام طرق متباينة تماماً . فقد قام أحدهما بتبريد الأكسجين إلى - ٢٩° م بواسطة وسط مبرد ، تنشأ برودته عن تصعيد (تبخير) غاز ثانى أكسيد الكبريت ثم ضغطه إلى ٢٠٠ ضغط جوى ثم بإعتاق هذا الضغط الهائل فجأة سال الأكسجين حيث شوهدت غلالة من سديم (ضباب رقيق) هذا الغاز المسال ، ومما هو جدير بالذكر أن هذا العامل قد لاحظ هذه الظاهرة نفسها عند استخدام غاز أول أكسيد الكربون ، وغاز الأسيتيلين ، وغاز أوكسيد النترول لكن انعدمت هذه الظاهرة في حالة غاز الهيدروجين . واستخدم العامل الآخر أسلوباً يعرف الآن باسم « طريقة الشلال » وفيه تتقدم عملية التبريد إلى درجات حرارة أقل فأقل خلال سلسلة من المراحل التى تستخدم مبردات مختلفة . ومن ثم فقد نجح في إسالة غاز الأكسجين المضغوط إلى ٣٢٠° م . ضغط جوى بتبريده - في وسط من ثانى أكسيد الكربون المسال - إلى - ١٤٠° م . وثانى أكسيد الكربون المسال بدوره ، تم الحصول عليه بتبريده في وسط من ثانى أكسيد الكبريت المسال . وفى عام ١٨٨٣ تمكن العالم روبلسكى من إسالة غاز الهيدروجين للمرة الأولى ، عندما قام بتبريده تحت ضغط إلى درجة حرارة الأكسجين المسال ، ثم سمح له بالتمدد سريعاً . وتشبه هذه الطريقة مثلتها التى استخدمت

لإسالة الأكسجين . ولذلك فلقد حصل فقط على غلالة كثيفة من سديه الغاز . ولكن لم يكد يحل عام ١٨٩٨ حتى نجح ديور في جمع كمية كافية من الهيدروجين السائل . وذلك للقيام باختبارات معملية . بهدف الوقوف على خواصه . أما غاز الهليوم الذى كان لا يزال حتى ذلك الحين أكثر صعوبة من الهيدروجين في إسالته . فقد تمكن أونز من الحصول عليه مسالاً في عام ١٩٠٨ وتتلخص طريقته في تبريد الهليوم المضغوط في هيدروجين سائل ثم السماح له بالتمدد .

من غير المستطاع إعطاء تقرير كامل امفصل عن جميع الأعمال الرائدة التى تمت وأجريت في هذا الميدان بواسطة الرواد الأول . ولكن مما تتحتم الإشارة إليه أنه في خلال الفترة من ١٨٨٠ - ١٨٩٠ تمكن كل من روبولوسكى . وأولسزيسكى من الحصول لأول مرة على كميات كبيرة من الأكسجين السائل . كما نجحاً أيضاً في الحصول على أول أكسيد الكربون سائلاً وجامداً (صلباً) . وأيضاً على غاز النروجين في حالته السائلة والجامدة (الصلبة) كما تمكنا من إسالة غاز الأثبلين . واستخدما أحياناً في هذا السبيل طريقة « الشلال » مع تمدد الغاز .

ثمة سمة أخرى اتسم بها العمل في مجال إسالة الغاز . إذ يصعب الحفاظ على الغازات السائلة بحالتها الراهنة . حيث تنساب الحرارة من الوسط المحيط بالغاز المسال مما نجم عنه مشاكل خطيرة . هددت مسعى هؤلاء الرواد الأول الذين أخذوا على عاتقهم فتح الباب أمام هذا المجال الجديد . ويعتبر نجاح ديور في إنجاز دثار مفرغ تماماً لوعاء تم تصميمه أصلاً عام ١٨٨٧ ، قفزة كبيرة على طريق النجاح في هذا السبيل . وتوجد حالياً أمثلة متنوعة لأوعية ديور بمتحف العلوم . في جنوب كينسينجتون بلندن .

ومن غرائب الصدف أن بدأت الوحدات الصناعية الأولى في التشغيل

على نطاق تجارى لإنتاج الأكسجين بطريقة التقطير تحت درجات حرارة منخفضة في نفس الوقت تقريباً في كل من إنجلترا . وألمانيا وفرنسا ، وقام اثنان من العلماء بالاستفادة من طريقة تبريد جول - طومسون وكذلك بتطبيق المبادلات الحرارية ذات التيارات المتقابلة التي اقترحها سيمتر عام ١٨٥٧ كما استخدم العالم كلاود نفس هذه المبادلات الحرارية مع تطبيق دورة مركبة للاستفادة من كل من الكفاءة المرتفعة لقاعدة الشعل الخارجى عند درجات الحرارة المرتفعة والكفاءة المرتفعة لقاعدة « جول - طومسون » عند درجات الحرارة المنخفضة وينبى الإشارة إلى أنه بالإضافة إلى المشاكل التي نشأت عند اقتراح تصميم الجهاز الأمثل للتبريد والتبادل الحرارى فقد كان مطلوباً كذلك تطوير المعدات المناسبة للتقطير الكفاء عند درجات حرارة منخفضة للغاية بغرض فصل الغازات من الهواء المسال .

ومنذ ذلك الحين فصاعداً حدثت تطورات مطردة في تصميم وحدات فصل الغازات عند درجات الحرارة المنخفضة خاصة في البلدان الصناعية الغربية . وستجرى مناقشة الأسس المتبعة لفصل مكونات الهواء بتفصيل أكبر في أحد الفصول التالية . ويشار عادة إلى العلم الكامل الذى يتناول العمليات التي تجرى عند درجات حرارة منخفضة باصطلاح التبريدات « أى نشوء المبرد الثلجى » وهو اصطلاح معرب يقابل المصطلح اللاتينى الأصل وينال هذا العلم بالإضافة إلى النواحي الهندسية المرتبطة به اهتمام عديد من الهيئات العلمية والهندسية المتخصصة في العالم أجمع . وهناك عديد من الظواهر التي تحدث عند درجات الحرارة المنخفضة التي يعنى بها علم هندسة التبريد سيشملها البحث في فصلين آخرين .

وفي نهاية هذا الفصل سوف نورد بعض الملاحظات الموجزة حول طرق قياس درجات الحرارة المنخفضة عملياً .

نظراً لتجمد الزئبق عند درجة - ٣٨.٩ مئوية لذلك لا تصلح أهم

أجهزة قياس درجة الحرارة التي تستخدم الزئبق في وعاء من الزجاج (الترمومترات) لقياس درجات الحرارة المنخفضة التي يشملها هذا العلم . وتوجد أداة عامة تصلح لقياس درجات الحرارة التي تتراوح بين درجة الحرارة العادية ودرجة - ٢٧٠ مئوية وهي الترمومتر الغازي ذو الحجم الثابت . وتركب هذا الترمومتر من أداء قياس للضغط مثل أنبوبة « بوردون » تتصل بمستودع ترمومتر عن طريق أنبوبة شعرية . ثم تملأ المجموعة بكاملها بغاز له نقطة غليان منخفضة كالهليوم ، ويحفظ بالغاز عند حجم ثابت . ثم يقاس ضغطه وهو دالة تتناسب مع درجة الحرارة المطلقة . وتعمل الأداة عند درجات الحرارة المنخفضة عن النقطة الحرجة للغاز كترمومتر للضغط الغازي أى أداء القياس الضغط التجارى لسائل بمعلومية العلاقة بين ضغط بخاره ودرجة الحرارة . ومن الواضح أن التغيرات في درجة الحرارة على طول الأنبوبة الشعرية التي لا تغمس داخل السائل البارد ينشأ عنها أخطاء في أثناء القياس ما لم تستخدم أداة مناسبة للتعويض . كما يراعى التحفظ وعدم اعتبار جميع الغازات ذات سلوك مثالي يخضع للعلاقة المثالية بين الضغط ودرجة الحرارة ، ومن ثم يستدعى الأمر الاهتمام بالتصحيحات المطلوبة لدقة القياس . وبمراعاة ما سبق يمكن اعتبار هذا الجهاز أداة دقيقة جداً لقياس درجات الحرارة مع التدريب على استخدامها .

ويشيع استخدام ترمومترات المقاومة الكهربائية في الوحدات الصناعية ، حيث يتطلب الأمر الخدمة الشاقة والاستخدام المتكرر عن الاهتمام بالثقة المطلقة . وتعتمد هذه الأداة على التغير في المقاومة الكهربائية لفلز ما مع درجة الحرارة ويمكن استخدامه على مدى كبير من درجات الحرارة . ويمكن استخدام ترمومتر المقاومة الكهربائية للبلاتين حتى درجة حرارة - ٢٥٩ مئوية ، والرصاص حتى - ٢٦٤ م والأندريوم حتى - ٢٦٩,٨ مئوية وهو أداة رخيصة الثمن بسيطة الاستخدام مع تمتعها بالحساسية والتحمل .

وهناك الازدواجات الحرارية حيث يتولد جهد كهربائي بين زوج من الفلزات المختلفة عندما تكون إحدى الوصلتين عند درجة حرارة ثابتة والأخرى عند درجة الحرارة المطلوب قياسها . ولكن يعيب الازدواجات الحرارية عدم توافر الدقة التي تتمتع بها ترمومترات المقاومة الكهربائية كما تقل حساسيتها عند درجات الحرارة المنخفضة . وتستخدم أحياناً مع وضع الوصلة ذات درجة الحرارة الثابتة عند درجة حرارة التروجين السائل .