# الباب الأول
# أنظمة الديناميكا الحرارية الكيميائية

## ١- مقدمة :

علم الديناميكا الحرارية هو الذي يبحث العلاقة بين الحرارة والشغل، وقد بني هذا العلم على قانونين أساسيين؛ هما: القانون الأول والثاني للديناميكا الحرارية، وبهما يمكن تفسير العديد من المشاهدات لخواص المادة، مثل: معامل التمدد الحجمي، والانضغاطي، والسعة الحرارية، وضغط البخار، والانتقال الحراري .

وقد طبق مهندسو الميكانيكا أسس علم الديناميكا الحرارية في تصميم الآلات البخارية، والتربينات، وآلالات الاحتراق الداخلية، والنفاثات، والثلاجات، كما قام المهندسون الكيميائيون بدراسات عملية لجميع العمليات التي تنساب فيها الحرارة، وحل المشاكل المتعلقة بالاتزان الكيميائي الحراري. كما أن الكيمياء الفيزيائية أخذت الجزء الأكبر في تطبيق أسس الديناميكا الحرارية في علم الكيمياء .

وطبيعة هذا العلم لا تضع فروضا خاصة لبناء أو تركيب المواد، ولكنها تختص بتحديد العلاقات بين مختلف خصائص المادة دون التعمق في دراسة بنائها أو تركيبها الداخلي، وتاريخيا أصبحت الديناميكا الحرارية علماً سبق فهم البناء الداخلي للمادة .

أما في حالة دراساتنا لبعض خواص الأعداد الكبيرة للجزيئات المتصادمة، فنسمي هذا النوع بالنظرية الحركية، وهو وصف للمادة من وجهة نظر التصادم الجزئي، وبصورة عامة وأساسية تؤكد هذه النظرية أن خواص المادة ككل ينبغي أن تفسر بدلالة الحركة الجزئية .

## ٢- أنظمة الديناميكا الحرارية Thermodynamic Systems :

يقصد بكلمة النظام system في الديناميكا الحرارية بأنه: كمية المادة المحددة بسطح مغلق. وهذا السطح كما نتخيله؛ إما أن يكون حقيقيا محدودا مثل: قاعة

المحاضرات التي يملؤها الهواء، أو تخيليا "غير محدود " مثل خط أنبوبي يمر بـه سائل متجدد التدفق، وليس من الضروري أن يكون السطح المحـدود ذا شـكل أو حجم ثابت؛ لأننا نعرف أن السوائل تأخذ شكل الوعاء الحاوي لها، مع ملاحظة أن حجمها أو كتلتها ثابتة .

ونجد أن كثيراً من المشاكل التي تصادفنا في الديناميكا الحراريـة تتطلـب أن تكون المجموعة ثابتة الكتلة ومعزولة حراريا . ويقصد بكلمة المجموعة المعزولـة هنا المحددة بسطح حقيقي، والتي لا تتغير طاقتها بالنسبة إلى الجو المحيط بهـا إذا أثرنا عليها سواء بشغل ميكانيكي، أو حرارة منسابة للمجموعة، حيث تكون كميـة الحرارة المنسابة للمجموعة تساوي صفرا أو تهمل لصغرها.

كما أن المجموعة المعزولة يمكن تعريفها بأنها المجموعة التي لا يحدث بهـا تبادل حراري بينها وما يحيط بها، ومثل ذلك الترموس الموضوع بداخله ماء بارد أو ساخن . أما المجموعة غير المعزولة فهي التي يمكن أن يتم تبادل حراري بينها وبين ما يحيط بها، لذا يمكن أن تتغير طاقتها من الجو المحيط بها ومثل ذلك البالون المنتفخ بالهواء عند وضعه بجوار الثلج .

## ٣- حالة النظام State of System:

عند دراسة الظواهر الطبيعية ومدى تأثير درجة الحرارية ، نجد أن درجة الحرارة تدخل كمية رابعة في الحساب بجانب الكميات الـثلاث: الكتلـة والطـول والزمن . ولكي نصف حالة النظام فواضح أن هناك عوامل أخـرى تـدخل فـي تعريف الحالة مثل: النسبة بين الكتلة والحجم أو الكثافة، وعنـد وصـف الأنظمـة الأكثر تعقيداً ؛ ربما من الضروري أن تدخل قيم أخرى مثـل: درجـة التركيـز والاستقطاب والشحنة الإلكتروليتية .

لذلك نرى أن الكميات التي تحدد حالة النظام تسمى متغيرات الحالة، مثل ذلك: الضغط، والحجم، ودرجة الحرارة . كما يمكن وضـعهم فـي صـورة إحـداثيات كاريتزية .

وعندما نتحدث عن حالة النظام لابد أن نعرف أن درجة الحرارة أو الـضغط تكون واحدة لجميع نقط المجموعة . وعندما تكون المجموعة معزولة، وتم تعيـين كل من الضغط ودرجة الحرارة لجميع النقط في كل مكان للنظام، فيمكن أن نلاحظ

أن جميع الكميات ربما تتغير مع الزمن، ومعدل التغير يصغر فيصغر حتى يكـاد ينعدم، فتسمى عند ذلك هذه الحالة النهائية للنظام المعزولـة بـالاتزان الـديناميكي الحراري .

وفي مثل هذه الحالة يعرف النظام المتجانس للإحداثيات الديناميكية الحراريـة وهي متماثلة لجميع النقط . ولذا في مثل هذه الحالة نستطيع القول بـأن متغيـرات الحالة لأي نظام ديناميكية حرارية متجانس، تظل نفسها متماثلة لجميع نقاط النظام .

أما إذا كان النظام غير متجانس، كأن يكون النظام مكوناً من سائل متزن مـع بخاره، عندئذ تكون درجات الحرارة والضغط تبدو لنا متماثلة لجميع نقاط الـسائل وبخاره، كما أن الكثافة تكون أيضا متماثلة لكل نقطة من نقاط النظـام المتجـانس الموجود ضمن النظام الغير متجانس ، وبمعنى آخر: يكون السائل وبخاره في نفس درجة الحرارة والضغط، بينما كثافة السائل تكون مختلفة، كما تكون متماثلة لجميع النقاط التي يشغلها السائل من جهة، ومتماثلة أيضاً بالنسبة لجميع النقط التي يشغلها البخار من جهة أخرى .

## ٤ – العمليات Processes:

إن أي تغيير في إحداثيات الديناميكا الحرارية لمجموعة يـسمى عمليـة، وإذا تمت العملية بطريقة ما بحيث يظل الضغط ودرجة الحرارة والكثافـة لكـل جـزء متجانس من النظام منتظما فالعملية تسمى عكسية Reversible process، وهي التي يمكن تعريفها بأنها حالات متعاقبة الاتزان أو الحالات التي يكون فيها تغير الاتزان في منتهى الصغر. وإذا وجد أي انحراف عـن هـذا الانتظـام فالعمليـة تـسمى اللاعكسية Irreversible process .

وأهمية كل من العمليات العكسية واللاعكسية يظهر بوضوح في ضوء القانون الثاني للديناميكا الحرارية . والحقيقة أن العمليات اللاعكسية في الديناميكا الحرارية ليس لها معنى؛ لأن النظام لا يستطيع أن يرجع إلى حالته الأصلية .

وسوف نعطي بعض الأمثلة التي توضح العمليات العكسية واللاعكـسية . إذا كان لدينا أسطوانة مزودة بمكبس تحتوي على غاز، وضغط المكبس لأسفل بسرعة كبيرة، فإن تغير الضغط ودرجة الحرارة والكثافة للنقط التي هي أسـفل المكـبس مباشرة يكون أكبر من بقية النقط التي تليها، وتكون العمليـة لا عكـسية . ولكـي

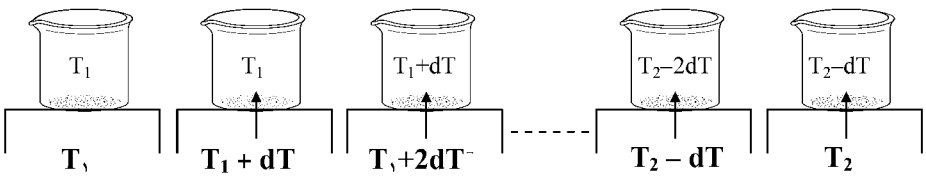
ينضغط الغاز عكسيا يجب أن تتم حركة المكـ.بس لأسـ.فل بـ.بطء كـ.ي نتجنـ.ب الاضطراب، ولكي نعطي الوقت الكافي للضغط ودرجة الحرارة ليكونا متمـ.اثلين لجميع النقط .

ولنفترض أننا سخنا دورقًا به ماء من درجة حرارة $T_1$ إلى درجة $T_2$ ، فالماء سوف يسخن بوضع الدورق فوق لهب ، فهذه العملية لا عكسية عالية؛ وذلـ.ك لأن درجة حرارة اللهب أكبر بكثير من درجة حرارة الماء . فالماء الموجود في قـ.اع الكأس والملامس للهب تكون درجة حرارته أكبر من أي نقط أخرى .

ولكي نسخن الماء عكسيا من درجة حرارة $T_1$ إلى $T_2$ يجب علينا رفع درجة الحرارة تدريجيا وببطء كالآتي :

$$T_1 + dT,\ T_1 + 2dT,\ \ldots\ldots\ T_2 - dT,\ T_2$$

مستخدمين في ذلك مستقبلات حرارية كما هو موضح بالشكل التالي:




والمستقبل الحراري (خزان حراري) عبارة عن حوض كبير به ماء كافٍ في درجة حرارة معينة، وأن انسياب أي كمية حرارية صغيرة منه إلى الدورق لن يؤثر على درجة حرارة المستقبل .

ولإجراء العملية العكسية، نحضر دورقًا به ماء، ونعين درجة حرارته ولـ.تكن $T_1$ ، ثم نضعه ملاصقًا لمستقبل حراري درجته $T_1 + dT$ وننتظر حتـ.ى نحـ.صل على اتزان حراري، فدرجة حرارة الدورق أصبحت الآن $T_1 + dT$ ، ثم نحركـ.ه نحو مستقبل حراري آخر درجته $T_1 + 2dT$ حتى نحصل على اتزان حراري عند هذه الدرجة الجديدة .

ونلاحظ أن الانتقال الحراري قد تم بفروق درجات حرارية صغيرة جدا بـ.ين المستقبل والدورق في كل حالة، وكذلك بين أجزاء الماء الموجودة فـ.ي الـ.دورق . فالماء في كل هذه المراحل في حالة اتزان، وحسب التعريف فإن العملية عكسية .

وعلى ذلك فكل العمليات الحقيقية هي لا عكسية، وذلك لأنهـ.ا تحـ.دث بـ.سبب

وجود فروق صغيرة في الضغط أو درجة الحرارة الحاصلة بين أجزاء المجموعة، أو بين المجموعة وما يحيط بها . ومع ذلك فإن مفهوم العملية العكسية مفيد ومهم في الديناميكا الحرارية .

## ٥ – درجة الحرارة وقياسها Temperature and thermometry:

فيما سبق أشرنا إلى درجة حرارة نظام دون الإشارة إلى تعريفها، أو كميتها، أو كيفية قياسها . فالشعور بالحرارة مثل إدراك القوة المؤثرة على الإنسان عندما يحمل ثقل . لذا عند دفع كرة من الحديد أو سحبها بقوة فإننا نشعر بجهد عضلي ، فإدراك القوة المؤثرة هو نفس الشعور بإدراك الحرارة سواء كان الجسم ساخناً أو بارداً، لذا توجد علاقة متبادلة بالشعور النسبي بين السخونة والبرودة ، لذلك يتحتم علينا دراسة طرق قياس درجة الحرارة .

لنفرض أن لدينا نظامين معزولين، وكلاهما في حالة اتزان ديناميكي حراري . ولمعرفة ما إذا كان النظامان لهما نفس درجة الحرارة ، ما علينا إلا أن نزيل المادة العازلة الحرارية التي تفصل بين سطحي النظامين لكي يتلامسا، فإذا لم يحدث أي تغير ملحوظ في إحداثيات الديناميكا الحرارية لكل منهما، فإن النظامين يكون لهما نفس درجة الحرارة .

ولنفرض أننا لدينا ثلاثة أنظمة، وكان النظام A له درجة حرارة النظام B ، وأن النظام A له نفس درجة حرارة النظام C ، فإن النظام B له نفس درجة حرارة النظام C .

لذا عندما يكون لدينا نظامان لهما نفس درجة حرارة نظام ثالث فإن الأنظمة الثلاثة تكون لها نفس الدرجة الحرارية . وهذا التعريف يطلق عليه أحياناً القانون الصفري للديناميكا الحرارية Zeroth law of thermodynamics . وحقيقته تبدو ضعيفة في كل حالات قياس درجة الحرارة .

ومثال ذلك إذا أردنا أن نعرف ما إذا كان كأسان بهما ماء لهما نفس درجة الحرارة ، فليس من الضروري أن يكونا متلاصقين لنرى التغير في الإحداثيات الديناميكية الحرارية مع الزمن ، بل نضع ترمومترا في كل كأس، وننتظر حتى يثبت طول عمود الزئبق في الأنبوبة الشعرية فإذا تساوى، طول عمود الزئبق للترمومتر في كلتا الحالتين فإن درجة حرارة الكأسين تكون واحدة .

ويلاحظ أنه ليس من الضروري أن يكون الترمومتر المستخدم في التجربة السابقة مدرجا ، ولكن من الضروري فقط أن يثبت عمود الزئبق عند نفس النقطة بالأنبوبة الشعرية في كلتا الحالتين ، ويعرف مثل هذا الترمومتر بالكشاف الحراري Thermoscope ويستخدم فقط للمقارنة وليس لقياس درجة الحرارة عدديا .

ونعود مرة أخرى لمشكلة قياس درجة الحرارة ، فكلمة مقياس Scale معناها تحديد القيمة العددية لدرجة حرارة ما ، ومن المعروف أنه عندما ترتفع درجة حرارة جسم ما يصاحبه عادةً تغيرات في خواصه الطبيعية مثل: التغير في أبعاد الجسم (ظاهرة التعدد) ، والتغير في المقاومة الكهربائية لسلك، والتغير في القوة الدافعة الكهربائية الناتجة عن تلامس فلزين (المزدوج الحراري)، والتغير في الضغط عند ثبوت الحجم .

ولقد قيست هذه التغيرات الطبيعية بدقة كبيرة، وأصبحت وسيلة لقياس المستوى الحراري للأجسام ( أي درجة حرارتها ) . وتسمى أجهزة قياس درجة الحرارة هذه بالترمومترات Thermometer .

إن مقاييس درجة الحرارة نوعان : مقياس مطلق، ومقياس نسبي . والمقياس النسبي كالمقياس المئوي أو الفهرنهيتي، ويعتمد هذا النوع على الماء كمادة أساسية، حيث تؤخذ نقطتا التجمد والغليان كدرجتين قياسيتين .

ويقسم التغير في أي من الخواص الطبيعية المصاحبة بين هاتين الدرجتين إلى عدد معين من الأقسام، ويسمى كل قسم منها بالدرجة . وفي المقياس المئوي يكون عدد هذه الأقسام 100 قسم ما بين غليان الماء وتجمده، كما يؤخذ صفر المقياس على أنه نقطة تجمد الماء .

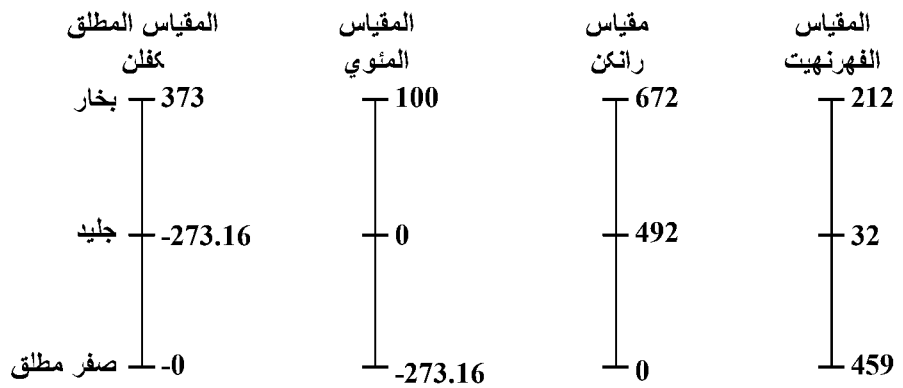
أما في المقياس الفهرنهيتي فيقسم نفس هذا التغير إلى ١٨٠ قسما، وتقابل درجة تجمد الماء ونقطة غليانه على هذا المقياس الدرجتين 32°F و212°F على الترتيب، فأصبحت الدرجة على المقياس المئوي $\frac{9}{5}$ من الدرجة على المقياس الفهرنهيتي؛ فالعلاقة بين الدرجة المئوية $t_C^o$ والدرجة الفهرنهيتية $t_F^o$ تعطى بالمعادلة :

$$t_F = \frac{9}{5}\, tC + 32°F$$

ولقد عرف كفلن المقياس المطلق لدرجة الحرارة، والذي لا يتوقف على طبيعة المادة القياسية، واعتبر أن الطاقة الحرارية المخزونة داخل الجسم هي نفسها التي يجب أن تحدد مستواه الحراري، واعتبر درجة الصفر على المقياس المطلق هي الدرجة التي عندها تتلاشى كمية الطاقة المخزنة داخل الجسم .

وقد وجد أن هذه الدرجة تناظر درجة 273.16°C على المقياس المئوي، وتحدد العلاقة بين الدرجة المئوية $t_C^o$ والدرجة المطلقة كلفن .

والشكل التالي يبين المقاييس المختلفة في الديناميكا الحرارية :




كما يوجد مقياسان آخران شائعا الاستعمال في النظام الهندسي والحياة اليومية في معظم دول العالم . درجة الحرارة رانكين $T_R$ rinkine وتكتب °R التي تتناسب مع درجة حرارة كلفن حسب العلاقة الآتية :

$$TR = \frac{9}{5} T$$

كما يمكن ربط درجة الحرارة رانكين مع الفهرنهيتية بالعلاقة:

$$t_F = T_R - 459.67°$$

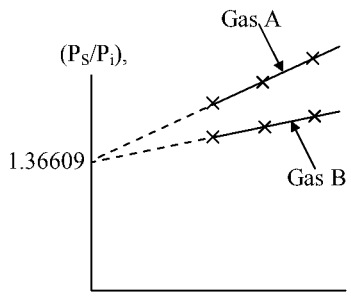
**الترمومتر الغازي ذو الحجم الثابت :**

الترمومتر الغازي ذو الحجم الثابت هو أحد الترمومترات التي تستخدم فيه الخاصية الفيزيائية، وهي التغير في ضغط أحد الغازات عند ثبوت الكتلة والحجم، التي تقترب حالتها من حالة الغاز المثالي عندما ترتفع درجة الحرارة ، وهذا النوع من الترمومترات يتميز عن الترمومترات الزئبقية إذ يمكن بواسطته قياس درجات الحرارة بين °200م إلى °1500م .

وسوف نقوم الآن بإثبات أن الدرجة المئوية تناظر الـ صفر المطـ ق . لـ ذلك نفرض أن $P_S$ و $P_i$ هما الضغطان الواقعان عند ثبوت الحجم عند نقطتـ ي البخـ ار والتجمد، وكانت درجتي الحرارة عند هذه النقط هي $T_S$ و $T_i$.

بفرض تكرار سلسلة من قياسات الضغوط لكميات مختلفة لغـ از الترمـ ومتر، وعلى سبيل المثال، لابد أن نبدأ بكتلة الغاز الموجودة في الترمومتر بحيث يكـ ون الضغط عند نقط التجمد $P_i$ = 1000 mm زئبق ودرجة حرارة الترمومتر ترتفـ ع أي درجة البخار ويقاس $P_S$ .

ثم نسرب جزءاً من الغاز الموجود بالترمومتر إلى أن يختزل الضغط $P_i$ إلى 800 mm زئبق، ثم نقيس مرة أخرى $P_S$ . هذه العملية تكرر عـ دة مـ رات لقـ يم مختلفة منخفضة، ونسجل قيم $P_i$ في كل حالة مع نظيرتها $P_S$ ، ثم تحسب النـ سبة $(P_S / P_i)$ لكل قيمة $P_i$ ، ثم نرسم العلاقة بين $P_i$ و $(P_S / P_i)$ كمـ ا فـ ي الـ شكل التالي:




**قيمة $(P_S / P_i)_v$ تكون واحدة لجميع الغازات**

ونلاحظ ان النسب ليست كلها واحدة، ولكن إذا رسمت كما في الشكل الـ سابق كدالة لـ $P_i$ فالنقاط جميعها تقع على منحنى أملس، والذي يصبح مـ ستقيما كلمـ ا اقترب من قيمة $P_i = 0$ .

والتجربة بالطبع لن نستطيع إجراءها بكل الطـ رق حتـ ى صـ فرية الـ ضغط الابتدائي ، لكن الجزء الخطي من المنحنى يمكن مده إلى المحور الصادي، ويمثـ ل بالخط المنقط غير المستمر .

والمنحنى العلوي في الشكل السابق يمثل سلسلة من القياسات لغاز A (ولـ يكن الهيدروجين) في الترمومتر. كذلك يكرر عمل التجربة للغاز B (وليكن الهيليـ وم) في الترمومتر، فنحصل على المنحنى السفلي للغاز B . تختلف النـ سبة $(P_S / P_i)$ لكل غاز عندما تختلف قيمة $P_i$ .

إلا أنه وجد عمليا أن المنحنيات الممتدة تتلاقى جميعها في نقطة على محـور الصادات، مهما اختلفت الغازات التي أجريت عليها التجارب والموجودة بـ المحور: والقيمة العددية لنقطة التقاطع المشتركة على محور الصادات تساوي:

$$1.36609 \pm 0.00004$$

والآن يمكن تعريف نسبة درجتي الحرارة $T_S/T_i$ بأنها القيمة المحدودة للنسبة $(P_S / P_i)$ عندما تؤول $P_i$ إلى الصفر:

$$\frac{T_S}{T_i} = \lim_{Pi \to 0} (PS / Pi)v = 1.36609$$

إضافة إلى ذلك فإن الفرق بين درجتي الحرارة يوضح بالمعادلة:

$$T_S - T_i = 100°K$$

ولمعرفة الدرجات الحرارية الأخرى خلال مدى درجة حرارة البخار والجليد تجرى سلسلة من القياسات للضغط P لتلك الدرجة ولمختلف قيم $P_i$، وتحسب النسبة $(P_S / P_i)_v$ ، وبعد المنحنى الناتج إلى النقطة $P_i = 0$ ، ومن تعريف النسبة :

$$\frac{T}{T_i} = \lim_{Pi \to 0} (P / Pi)v$$

وبما أن قيمة $T_i$ معلومة عند تلك النقطة، فيمكن حساب درجة الحرارة T . لذا فدرجات الحرارة المعرفة بهذه الطريقة لا تتوقف على خواص أي غاز معين، مع أنها تعتمد على خصائص سلوك الغازات ككل، وبالتالي لا تكون غير معتمدة كلية على خواص مادة معينة . لذا يمكن تعريف درجة الحرارة المئوية t بواسطة المعادلة:

$$t = T - T_i = T - 273.16$$

وهذا يؤدي بالطبع إلى نتيجة:

$$t_S = 100°C \quad , \quad t_i = 0°C$$

فدرجة الحرارة المئوية يناظرها نقطة الصفر على المقياس المطلق، أي أن:

$$t = -273.16°C$$

ونلاحظ جيدا أن درجة الحرارة التي عرفت بواسطة المقياس المطلق لا تعتمد على أي فروض عن ضغط أو حجم الغاز الذى أصبح صفراً عند الصفر المطلق،

كما أنها لا تعتمد على افتراض وجود غاز مثالي ، ولا تستلزم أي بيان عن غياب جميع الجزيئات المتحركة عند الصفر المطلق ، ولا تتطلب تحقيق الوصول إلى درجة الصفر المطلق أو أقل منها .

لذا فدرجات الحرارة المطلقة يمكن تعيينها بقياسات معتمدة على الغازات الحقيقية ، مستخدمين الطريقة المذكورة سابقاً . وإذا أمكن استخدام غاز مثالي في ترمومتر غازي، فإن طريقة المد تكون عند ذلك غير ضرورية .

ويمكن إجراء قياسات عند أي ضغط $P_i$ ؛ ولهذا السبب توصف درجات الحرارة المطلوبة أحيانا (بدرجات حرارة الغاز المثالي) ، ولكن درجات الحرارة يمكن تعيينها حتى في حالة عدم وجود الغاز المثالي .

* * *

## الأســـــــــئلة

1 – نفرض أنه بدلاً من تعريف درجة الحرارة t كدالة خطية لـ بعض الخواص الحرارية x ستعرف درجة الحرارة t* كدالة لوغارتمية حيث:

$$t^* = a \ln x + b$$

(a) افرض أن x هي طول عمود السائل 1 في ترمومتر ، ونفرض أن $1i = 5$ cm و $1S = 25$ cm و $t_i^* = 0°$ و $t_S^* = 100°$ . أوجد المسافة بالسنتمترات بين التقسيم $t^* = 0°$ و $t^* = 10°$ وبين $t^* = 90°$ و $t^* = 100°$ .

(b) ضغط غاز مثالي عند حجم ثابت يعطي بالمعادلة:

$$P = K T$$

حيث T درجة الحرارة المطلقة و K مقدار ثابت . اذا أخذ الضغط P كدالة ترمومترية x في المعادلة أعلاه. أوجد قيمة t* عندما $T = 0°$ .

2 – الجدول التالي يحتوي القيم المشاهدة للضغط P لغاز في ترمومتر غازي ذي حجم ثابت عند درجة حرارة مجهولة T ، لمجموعة قيم للضغط $P_i$ عند درجة الجليد . أوجد قيمة النسبة $P / P_i$ كلما اقتربت $P_i$ من الصفر . ثم أوجد درجة الحرارة المجهولة .

| $P_i$ (مم زئبق) | 100.0 | 200.0 | 300.0 | 400.0 |
|---|---|---|---|---|
| P (مم زئبق) | 127.9 | 256.5 | 385.8 | 516.0 |

3 – (a) أوجد درجة حرارة الجليد والبخار على مقياس رانكين أو المقياس المطلق للفهرنهيت والذي فيه $T_S - T_i = 180°$ .

(b) أوجد درجة الصفر المطلق على مقياس فهرنهيت حيث $T_S - T_i$ $= 180°, t_i = 32°$ .

4 – درجة الحرارة المئوية على المقياس عينت بواسطة ترمومتر مقاومته من البلاتين تسمى الدرجة البلاتينية $t_{Pt}$ ، وتعرف من المعادلة كما يلي :

$$tPt = 100 \frac{R - R_i}{R_S - R_i}$$

حيث $R, R_S, R_i$ مقاومات الترمومتر عند نقطة الجليد والبخار ودرجة البلاتين ومقاومة المقاومة البلاتينية هي $10^4$ أوم عند نقطة الجليد و 13.861 أوم عند نقطة البخار و 26.270 أوم عند نقطة الكبريت (حيث $t = 444.6°C$ على المقياس العالمي) .

(a) أوجد درجة حرارة البلاتين لنقطة الكبريت .

(b) أوجد درجة حرارة البلاتين التي عندنا تكون المقاومة 21 أوم .

(c) أوجد درجة الحرارة العالمية التي عندما تكون المقاومة 21 أوم

* * *