المرحلة الاولى /قسم الفيزياء

المحاضرة الثالثة

التمدد الحراري

Thermal expansion

1. مقدمة

ان تغير درجة حرارة المادة يؤدي إلى تغيرات في الخواص الفيزيائية للمادة، ومن ابرز هذه التغيرات هو تغير ابعاد المادة.

وتسمى ظاهرة تغير ابعاد المادة نتيجة لتغير درجة حرارتها **بالتمدد الحراري***(Thermal expansion)* عدا بعض الاستثناءات مثل الماء .ومن المعروف ان معظم المواد(الصلبة , السائلة , الغازية) تتمدد عندما تزداد درجة حرارتها، ويتوقف مقدار تمدد المادة بالتسخين على مقدار قوى التماسك بين جزيئاتها، فالمادة الصلبة يكون مقدار تمددها بالتسخين صغيراً جداً نظراً لكبر قوى التماسك بين جزيئاتها، في حين ان تمدد السوائل اكبر من تمدد المواد الصلبة. أما الغازات فيكون تمددها بالتسخين اكبر بكثير من السوائل لان قوى التماسك بين جزيئات الغاز تكاد تكون معدومة .

2 – انواع التمدد الحراري *Types of Thermal Expansion*

2.1 - *تمدد الاجسام الصلبة* *Expansion of Solid*

كما ذكرنا ان تمدد الاجسام الصلبة يكون صغيرا مقارنة مع السوائل والغازات , ان رفع درجة حرارة المادة يؤدي إلى زيادة الطاقة الاهتزازية لذراتها او جزيئاتها وبزيادة سعة اهتزاز تلك الجسيمات يزداد متوسط المسافة بين الذرات او الجزيئات، وذلك يؤدي الى تغير جميع ابعاد المادة بتغير درجة الحرارة، فتزداد بزيادة درجة الحرارة وتتقلص بانخفاضها اذا كان التمدد الحراري صغيرا نسبيا مقارنة بأبعاد الجسم قبل التمدد فأن التغير في اي بعد يتناسب مع المرتبة الاولى للتغير بدرجة الحرارة كتقريب بسيط , وهذه الظاهرة تلعب دوراً رئيسياً في العديد من التطبيقات الهندسية، فعلى سبيل المثال يتم ترك فواصل للتمدد الحراري في المباني والجسور والسكك الحديدية والطرق السريعة .واذا لم يتم فعل ذلك يمكن ان يتصدع المبنى او تنهار الجسور وتلتوي السكك الحديدية بفعل التمدد الحراري للمواد.

من الممكن تعريف عدة معاملات للتمدد الحراري:

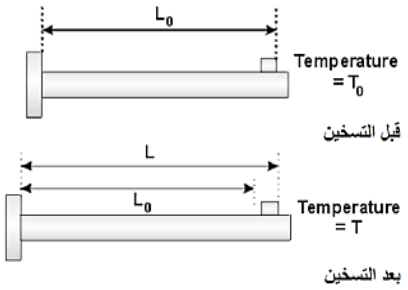
- معامل التمدد الحراري الطولي(Average coefficient of linear expansion)
- معامل التمدد الحراري السطحي(Average coefficient of surface expansion)
- معامل التمدد الحراري الحجمي(Average coefficient of volume expansion)

حيث ممكن تعريف معامل التمدد الحجمي للأجسام الصلبة والسائلة والغازية , بينما معامل التمدد الطولي يعرف فقط للأجسام الصلبة وهو العامل المستخدم بكثرة في التطبيقات الهندسية .

1.1 التمدد الطولي

ان التغير الذي يحصل في اي بعد من ابعاد المادة الصلبة كالطول والعرض والارتفاع (والذي يكون صغيرا نسبيا مقارنة مع ابعاد الجسم قبل التمدد) نتيجة لتغير درجة حرارتها يعرف بالتمدد الطولي . وقد ثبت عمليا ان الزيادة الحاصلة في طول المادة الصلبة (ΔL) والناتجة عن زيادة درجة حرارة المادة (ΔT) يتناسب طرديا مع كل من الطول الاصلي للمادة ومقدار التغير في درجة حرارتها ونوع المادة.

لنعتبر أن الجسم الصلب هو سلك معدني، ومع ارتفاع درجة الحرارة يزداد طول هذا السلك, ليكن L_o هو طول السلك عند درجة حرارة مقدارها T_o اي الطول الابتدائي، وبعد تسخين السلك إلى درجة حرارة T يصبح طوله النهائي L أي ان التغير في الطول ΔL والذي يمثل مقدار تمدد السلك كما في الشكل لكل تغير في درجة الحرارة ΔT يعرف بمعامل التمدد الحراري الطولي او الخطي(α).



العوامل التي يتوقف عليها التمدد الطولي هي

1 - الطول الاصلي للجسم
2 – مقدار الارتفاع في درجة الحرارة اي التغير في درجات الحرارة
3 – نوع مادة الجسم

لذا يمكن كتابة معادلة التغير في الطول على النحو التالي:

$$\Delta L \cong L_0 \times \Delta T$$
$$\Delta L = \alpha L_0 \times \Delta T \text{-----(1)}$$
$$L - L_0 = \alpha L_0 \times \Delta T$$
$$L = L_0 + \alpha L_0 \times \Delta T$$
$$L = L_0(1 + \alpha \Delta T) - - - -(2)$$

حيث(α) تمثل ثابت التناسب وتسمى بمعامل التمدد الحراري الطولي .ويعرف معامل التمدد الحراري الطولي او الخطي على انه الزيادة في طول المادة نتيجة لتغير درجة حرارة المادة بمقدار درجة حرارية واحدة. اي ان

$$\alpha = \frac{\Delta L / L_0}{\Delta T}$$

ان وحدة معامل التمدد الطولي هي مقلوب درجة الحرارة ,اي K^{-1} , $°F^{-1}$, $°C^{-1}$ و قيمة معامل التمدد الطولي (α) تعتمد على نوع المادة المستخدمة وان قيمتها ليست ثابتة ولكنها تتغير بصورة بطيئة مع درجة الحرارة لذلك قيم α في الجداول تمثل معدل القيم لمدى معين من درجات الحرارة, وللأغراض العملية يمكن اعتبار قيمة α ثابتة لمدى محدود من درجات الحرارة للمواد التي لا تعاني تغير في الطور ضمن ذلك المدى.

حالة خاصة : باعتبار أن طول الابتدائي للسلك عند درجة حرارة ابتدائية 0^0C هو L_0 وطوله عند درجة حرارة النهائيةT_0 هو L فإن:

$$L = L_0(1 + \alpha T)$$

ملاحظة : ممكن التعبير عن معامل التمدد الطولي بدلالة نصف القطر حيث في حالة الحلقة فأن الطول عبارة عن محيط الحلقة ويساوي $2\pi r$

$$2\pi r - 2\pi r_0 = \alpha 2\pi r_0 \Delta T$$

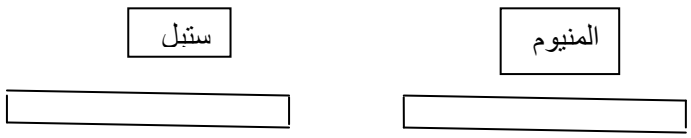
$$r - r_0 = 2r_0 \Delta T$$

اي ان $$\Delta r = \alpha r_0 \Delta T$$

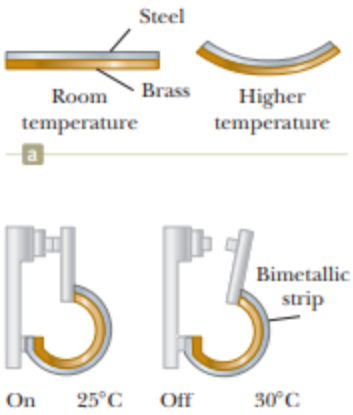
المادة	متوسط معامل التمدد الطولي $\alpha\ (^\circ C^{-1})$	المادة	متوسط معامل التمدد الحجمي $\beta\ (^\circ C^{-1})$
ألمونيوم	24×10^{-6}	كحول إثيلي	1.12×10^{-4}
النحاس الأصفر والبرونز	19×10^{-6}	بنزين	1.24×10^{-4}
النحاس	17×10^{-6}	أسيتون	1.5×10^{-4}
الزجاج (العادي)	9×10^{-6}	جلسرين	4.85×10^{-4}
الزجاج (بيركس)	3.2×10^{-6}	زئبق	1.82×10^{-4}
الرصاص	29×10^{-6}	ترينتينه	9.0×10^{-4}
الصلب	11×10^{-6}	جازولين	9.6×10^{-4}
الإنفار(سبيكة Ni-Fe)	0.9×10^{-6}	هواء عند درجة 0°C	3.67×10^{-3}
الخرسانة	12×10^{-6}	هليليوم	3.665×10^{-3}

نلاحظ من الجدول ان لكل مادة معامل تمدد طولي خاص بها مثلا اذا زادت درجة حرارة قضيب من النحاس الاصفر (البرونز Bronze) وأخر من الصلب (الستيل Steel) لهما نفس الطول وبنفس المقدار وكانت درجة حرارتهما الابتدائية واحدة فأن قضيب النحاس الاصفر سيتمدد اكثر من قضيب الصلب. استخدمت هذه الظاهرة في عمل وسيلة بسيطة تسمى شريحة المعدن الثنائي(bimetallic strip) تستخدم كثرموستات لقطع او فتح الدائرة الكهربائية

توضيح بسيط :لدينا سلكين احدهما من الستيل (Steel) والاخر من الالمنيوم كما في الشكل لهما نفس الطول الابتدائي L_0 ونفس درجة الحرارة الابتدائية والتغير في درجة الحرارة نفسه .السؤال ايهما يتمدد باتجاه الاخر اكثر من الاول؟ علما ان α للالمنيوم $24 \times 10^{-6}\ C^{-1}$ والستيل $11 \times 10^{-6}\ C^{-1}$



لو طلب درجة الحرارة التي يلتقي عندها السلكين علما ان الفجوة بينهم $0.5\mu m$



مثال(1):

يبلغ طول مقطع سكة حديد من الفولاذ(steel) 30 m في درجة الحرارة 0°C. ما مقدار طولها النهائي عند درجة الحرارة 40 °C، علما ان معامل التمدد الطولي للحديد $11 \times 10^{-6}°C^{-1}$

$$L = L_0(1 + \alpha\Delta T)$$

$$= 30m(1 + 11 \times 10^{-6}°C^{-1} \times 40°C)$$

$$= 30.013m$$

طريقة ثانية

$$\Delta L = L_0 \times \alpha \times \Delta T$$

$$= 30\text{m} \times 11 \times 10^{-6}°C^{-1} \times 40$$

$$= 0.013m$$

$$L = L_0 + \Delta L = 30m + 0.013m = 30.013m$$

مثال(2):

قضيبان معدنيان متساويان في الطول ومساحة المقطع. القضيب الاول من الفولاذ معامل تمدده ($11x10^{-6}°C^{-1}$) واما الثاني فهو من النحاس ومعامل تمدده الطولي ($17x10^{-6}°C^{-1}$)احسب الزيادة التي تطرأ على كل من القضيبين عندما يتعرضان لتغير في درجة الحرارة من(5^oC) الى (30^oC) ، علماً ان. الطول الأصلي لكل قضيب (10 m).

الحل:

لقضيب الفولاذ

$$\Delta L = \alpha L_o \Delta T = 11 \times 10^{-6}°C^{-1} * 10m * 25\,^oC = 0.00275\ m$$

لقضيب النحاس

$$\Delta L = \alpha L_o \Delta T = 17 \times 10^{-6}°C^{-1} * 10m * 25\,^oC = 0.00425\ m$$

واجب (1)

عند درجة حرارة الغرفة (25^oC) وجد أن قطر كرة مصمتة من الحديد (4cm) وأن القطر الداخلي لحلقة حديدية (3.95cm)، احسب درجة الحرارة التي يجب أن تسخن إليها الحلقة حتى تكاد تمر الكرة منها. علما ان معامل التمدد الطولي للحديد ($3x10^{-3}\ 1/^oC$).

واجب(2) عمود زجاج بيركس مصقول طولـه10cm عندما كانت درجة حرارة الغرفة 20^0C. إذا رفعت درجة حرارة هذا العمود إلى80^0C،ما مقدار

1. الاستطالة.
2. الطول الجديد للسلك بعد رفع درجة حرارته من $20\ ^0C$ إلى$80\ ^0C$

علما ان

معامل التمدد الطولي لزجاج البايركس هو 3.2×10^{-6}

واجب (3)

صممت المقاطع الخرسانية (Concrete)لاحد الطرق السريعة بحيث يكون طول كل مقطع 25m وقد صبت المقاطع وجففت عند درجة حرارة 10 ℃ ماهي اقل مسافة يجب تركها بين تلك المقاطع لمنع التقوس اذا وصلت درجة الحرارة الى 50 ℃ . علما ان معامل التمدد الطولي يساوي $12x10-6\ ℃^{-1}$

1.2 التمدد السطحي

ان تغير مساحة السطوح مع تغير درجة حرارتها يعرف بالتمدد السطحي او تمدد المساحة ويعرف معامل التمدد السطحي(Surface Expansion) (γ) على انه مقدار الزيادة في المساحة لوحدة المساحة الاصلية عند ارتفاع درجة الحرارة درجة مئوية واحدة ويكون مقدار التغير في وحدة الطول الناتج عن تأثير تغير درجة الحرارة متساويا في جميع الاتجاهات في المادة بشرط ان تكون المادة الصلبة متجانسة الخواص ,اي يكون لها نفس الخواص في جميع الاتجاهات اي ان المسافة بين اي نقطتين في المادة تتغير بالمقدار نفسه . ومن الجدير بالذكر ان معامل التمدد السطحي يعادل ضعف معامل التمدد الطولي. لمقدار التغير في درجة الحرارة.

العوامل التي يتوقف عليها التمدد السطحي :

1 – المساحة الاصلية للجسم .

2 – مقدار الارتفاع في درجة حرارة الجسم

3 – نوع مادة الجسم

ويعطى التغير في مساحة الجسم ΔS مع التغير في درجة الحرارة ΔT بالمعادلة التالية :

$\Delta S = S_0 \gamma \Delta T$--------(1)

$\gamma = \frac{\Delta S / S_0}{\Delta T}$

وحدة γ هي لكل درجة حرارة اي ان $°C^{-1}, °F^{-1}, K^{-1}$

$S - S_0 = S_0 \gamma \Delta T$-------(2)

$A = S_o + \gamma S_o \Delta T \rightarrow S = S_o(1 + \gamma \Delta T)$-------(3)

حيث $\gamma = 2\alpha$ (فقط للأجسام الصلبة)
(S)المساحة السطحية للجسم بعد التسخين، (S_o) المساحة السطحية للجسم قبل التسخين

1.3 - التمدد الحجمي

ان الابعاد الخطية للجسم تتغير بتغير درجة الحرارة فلابد أن يتغير الحجم ومساحة السطح كذلك .أي أن حجم المادة يتغير اذا تغيرت درجة حرارة المادة بنفس طريقتي التمدد الطولي والسطحي , والتغير في الحجم مع ثبات الضغط يتناسب مع الحجم الابتدائي V_i ومع التغير في درجة الحرارة طبقا للمعادلة

$$\Delta V = \beta V_i \Delta T$$

حيث β هي متوسط معامل التمدد الحجمي للأجسام الصلبة وهو يساوي تقريبا ثلاث أمثال متوسط التمدد الطولي أي أن $\beta = 3\alpha$ هذا بفرض أن معامل التمدد الطولي واحد في جميع الاتجاهات. ويعود ذلك الى أن الجسم المتجانس له نفس الخواص في جميع الاتجاهات أي يتمدد في ابعاده الثلاثة بالمقادير نفسها اي يتمدد باتجاه الطول والعرض والارتفاع

ويعرف معامل التمدد الحجمي β على انه التغير النسبي في حجم المادة الصلبة نتيجة لتغير درجة حرارتها درجة واحدة. ان معامل التمدد الحجمي هو $\beta = \frac{\Delta V / V_0}{\Delta T}$

ان حجم المادة النهائي ممكن الحصول عليه من المعادلة التالية :

$$V = V_0(1 + \beta \Delta T)$$

مثال(3) :

معامل التمدد الخطي (الطولي) لكرة معدنية (sphere) هو $9 \times 10^{-6}\ ^{\circ}C^{-1}$ فاذا كان القطر الداخلي للكرة المعدنية عند درجة حرارة 20 °C هو 2.2 cm والقطر النهائي 2.8cm ,فماهي درجة الحرارة النهائية للكرة؟

الحل

$$\Delta V = \beta V_0 \Delta T$$
$$V - V_0 = \beta V_1 \Delta T = (3\alpha) \times V_1 \times \Delta T$$
$$V = \frac{4}{3}\pi r^3 = \frac{4}{3} \times 3.14 \times (1.4)^3 = 11.48\ cm^3$$
$$V_0 = \frac{4}{3} \times 3.14 \times (1.1)^3 = 5.57 cm^3$$

$$\Delta V = 11.48\ - 5.57 = 5.91 cm^3$$
$$\therefore 5.91 = 3 \times 9 \times 10^{-6}\ \times 5.57 \times (\Delta T)$$
$$\Delta T = \frac{5.91}{27 \times 10^{-6} \times 5.57} = 0.039\ \times 10^6$$
$$T - T_0 = 0.039 \times\ 10^6 = 39 \times 10^3$$

$$T = 20\ + 39 \times\ 10^3 = 39020℃$$

او طريقة ثانية

$$\Delta(r^3) = (3\alpha) \times ({r_0}^3) \times \Delta T$$

واجب : اذا كان حجم كرة من الالمنيوم $30cm^3$ عند درجة حرارة 30 °C, والحجم النهائي هو $30.5cm^3$. ماهي درجة الحرارة النهائية للكرة اذا علمت ام معامل التمدد الطولي او الخطي 24×10^{-6}

2 - تمدد السوائل

من المعروف ان السوائل لا تملك شكل محددا حيث تأخذ شكل الاناء الذي تحتويه وحجمها ثابت لذلك فأن التمدد الحراري الوحيد هو التمدد الحجمي, حيث يتغير حجم السائل عندما تزداد درجة الحرارة باستثناء الماء الذي يشذ عن باقي السوائل كما موضح لاحقا وبصورة عامة ان معامل تمدد الحجمي للسوائل أكبر من معامل التمدد الحجمي للمواد الصلبة لنفس التغير في درجات الحرارة حيث بزيادة درجة الحرارة تزداد المسافة بين الذرات والجزيئات وبما انه المسافة بين الذرات والجزيئات اكبر من الحالة الصلبة لذلك تمددها اكبر . ان الزيادة في حجم السائل التي نشاهدها زيادة ضاهرية بسبب تمدد الوعاء الذي يحتويها اولا ,واذا

اردنا ان نحسب الزيادة الحقيقية في حجم السائل يجب أخذ الزيادة في حجم الوعاء في الحسبان, وبسبب صغر معامل التمدد الحجمي للمواد الصلبة فأننا نهمل هذه الزيادة في حجم الوعاء.

مثال(4) : جد كمية الماء التي ستنسكب من وعاء مصنوع من مادة البايركس سعته $250\ cm^3$ مملوء تماما بالماء اذا تغيرت درجة حرارته من $25\ ^oC$ الى $65\ ^oC$. علما ان معامل التمدد الحجمي للزجاج يساوي $0.09 \times 10^{-4}\ ℃^{-1}$ وللماء $2.1 \times 10^{-4}\ ℃^{-1}$

الحل :

عند تغير درجة الحرارة من25^oC الى $65\ ^oC$ فأن كلا من الوعاء الزجاجي والماء سوف يتمددان . ان مقدار الماء الذي سوف ينسكب سيكون مساويا الى الفرق بين حجمي الماء والوعاء الزجاجي الذي يحتويه بعد التسخين .

$$\Delta T = 65 - 25 = 40\ ℃$$

$$\Delta V_g = \beta_g \times V_{0g} \times \Delta T$$

$$= 0.09 \times 10^{-4} C^{-1} \times 250 cm^3 \times 40℃$$

$$= 0.09 cm^3$$

$$\Delta V_W = \beta_W \times V_{0W} \times \Delta T$$

$$= 2.1 \times 10^{-4} \times 250 cm^3 \times 40℃$$

$$= 2.1 cm^3$$

اذا حجم الماء المسكوب هو:

$$\Delta V_w - \Delta V_g = 2.1 - 0.09 = 2.01\ cm^3$$

مثال (5)

مليء خزان بنزين السيارة الذي حجمه يساوي 60 L بالبنزين تماما حينما كانت درجة الحرارة $25℃$ ثم تركت السيارة تحت اشعة الشمس ساعات الى ان اصبحت درجة حرارة الخزان$45\ ℃$. احسب حجم البنزين المتوقع ان ينسكب من الخزان (اهمل تمدد الخزان), علما ان معامل التمدد الحجمي للبنزين β هو

$$9.6 \times 10^{-4} ℃^{-1}$$

الحل:

$$\Delta V = V_0 \beta \Delta T$$

$$= 60L \times 9.6 \times 10^{-4} ℃^{-1} (45 - 25)℃$$

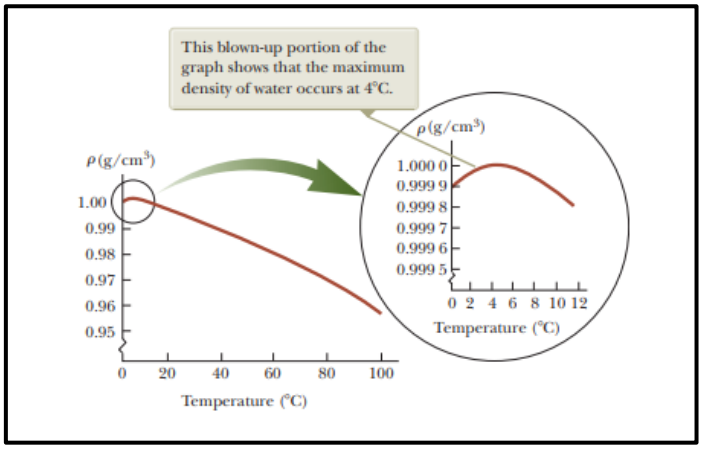
حجم البنزين المنسكب= 1.152 L

واجب

وعاء زجاجي حجمه $500cm^3$ ملىء بالزيت عند درجة حرارة 30 °C رفعت درجة الحرارة الى 100°Cفتمدد الزيت والوعاء لينسكب جزء من الزيت كم حجم الجزء المنسكب من الزيت علما ان معامل التمدد الحجمي للزجاج 5×10^{-5} والزيت 12×10^{-5}

2.1 - السلوك الشاذ للماء

يزداد حجم السوائل بصفة عامة عند ارتفاع درجة الحرارة الا ان الماء يشذ عن هذه القاعدة. كما نرى من منحني الكثافة مع درجة الحرارة . مع ارتفاع درجة الحرارة من صفر الى 4°C ينكمش حجم الماء وتزداد كثافته وتصل الى اعظم قيمة وهي $1000kg/m^3$ عند 4 °C, وعند درجة حرارة اعلى من 4 °C يتمدد الماء مع زيادة درجة الحرارة وتقل كثافته . ويمكن استخدام التمدد الحراري الغير معتاد للماء في تفسير تجمد مياه المستنقعات عند السطح وليس عند القاع. فعندما تهبط درجة حرارة الجو من7 °C الى 6 °C يبرد الماء عند السطح ومن ثم يقل الحجم وهذا يعني ان الماء عند السطح اكبر كثافة من الماء الذي اسفله نظرا لأنه لم يبرد ليقل حجمه. نتيجة لذلك يهبط الماء من السطح الى الاسفل ويرتفع الماء الدافئ من الاسفل الى السطح ليبرد, عندما تكون درجة حرارة الجو بين 4 °C و0 °C يتمدد الماء كلما قلت درجة حرارته ليصبح اقل كثافة من الماء الذي اسفله. وبالتالي تتوقف عملية الخلط بين طبقات الماء العلوية والسفلية. ومن الطبيعي ان يتجمد الماء عند السطح . وعندما يتجمد الماء يظل الجليد فوق السطح لأنه اقل كثافة من الماء ويتراكم الجليد على السطح بينما يظل الماء قرب القاع عند درجة حرارة 4 °C . ولو لم يكن الامر كذلك لما استطاعت الاسماك وغيرها من اشكال الحياة ان تعيش في البحار التي تتجمد مياهها في الشتاء.



3 - تمدد الغازات

تمدد الغازات اكبر من تمدد السوائل واكثر من المواد الصلبة بسبب ضعف القوى الجزيئية بين جزيئاتها , حيث عند اكتساب الغاز كمية من الحرارة وارتفاع درجة حرارته فأن ذرات الغاز تتحرك مبتعدة عن بعضها وبالتالي فأن الغازات تتمدد بشكل كبير. اي ان حجم الغاز يتغير تغيرا كبيرا اذا تغيرت درجة حرارته عند ثبوت الضغط عليه وان معامل التمدد الحجمي للغازات يكاد تكون ثابتة وقد ثبت ان تمدد الاناء الحاوي على الغاز بتأثير الحرارة يكون صغيرا جدا قياسا لتمدد الغاز نفسه لذلك يهمل تمدد الاناء .

ان معامل التمدد الحجمي للغاز يعبر عنه بالمعادلة التالية

$$\Phi = \frac{\Delta V / V_0}{\Delta T}$$

ويجدر الاشارة الى ان حجم الغاز عند درجة الحرارة $0°C$ ضروري جدا لان معامل التمدد الحجمي كبير جدا. اذا كانت V_1 , V_2 تمثل حجم الغاز عند T_1 , T_2 فأنه لا يصح تطبيق المعادلة

$$V_2 = V_1(1 + \Phi\Delta T)$$

بل يجب ان يشار الى القيم V_1 , V_2 نسبة الى V_0 اي الحجم عند $0°C$ اي نسبة الى الظروف القياسية اي ان

$$V_2 = V_0(1 + \Phi\Delta T)$$

$$V_1 = V_0(1 + \Phi\Delta T)$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1 + \Phi\Delta T}{1 + \Phi\Delta T}$$