

جامعة منتوري قسنطينة

قسم الكيمياء

كلية العلوم

الديناميكا الحرارية الكيميائية

Thermodynamique chimique

محاضرات و مسائل محلولة

السنة أولى جامعي

علوم دقيقة ، تكنولوجيا و إعلام آلي

إعداد الدكتور صالح عكال

الفصل الثالث : المبدأ الأول للترموديناميك

العمل - الحرارة - الطاقة

في هذا الفصل :

- مقدمة
- الطاقة الحرارية (الحرارة Q)
- العمل و الطاقة الميكانيكية
- المبدأ الأول للترموديناميك.
- الانتالبي (المحتوى الحراري)
- العلاقة بين C_p و C_v (علاقة ماير).
- تطبيقات المبدأ الأول على التحولات الفيزيائية للغازات المثالية
- مسائل

- يمكن تسخين محلول بعدة طرق مختلفة
- بواسطة تحريك ميكانيكي.
 - بواسطة شعلة flamme .
 - بواسطة مقاومة كهربائية.
 - تحت تأثير اشعاعات الكتر ومغناطيسية.

يتم تسخين المحلول في كل من الأربع حالات المذكورة بسبب إعطائه طاقة ولكن بأشكال مختلفة على التوالي:

- طاقة ميكانيكية و عمل ميكانيكي W .
- طاقة حرارية Q .
- طاقة كهربائية .
- طاقة اشعاعية $h\nu$

و المحلول يخزن هذه الطاقة على شكل طاقة حركية وطاقة كامنة في الجزيئات. تملك مختلف اشكال الطاقة القدرة على التحول الى بعضها البعض بطريقة مباشرة او غير مباشرة.

التحول الترموديناميكي:

هو التحول الذي لا يظهر فيه الا الطاقة الحرارية و الطاقة الميكانيكية.

1- الطاقة الحرارية (الحرارة Q)

الحرارة هي احدى اشكال الطاقة التي يمكن ان تؤدي الى رفع درجة حرارة الانصهار، التمدد و التبخر.

تقاس الحرارة بوحدات الطاقة و في النظام الدولي SI يكون الجول و عادة ما تستعمل الحرارة (cal)

مفهوم كمية الحرارة : هي عدد الغرامات من المادة التي يمكن ان تسخن أو تبرد عند تغير درجة الحرارة.

كما يمكن تعريفها كما يلي : كمية الطاقة الحرارية اللازمة لرفع ك (كغ) من المادة Δ د (كلفن)

الطاقة الحرارية تساوي : $Q=mC\Delta T$

حيث C هي السعة الحرارية الكتلية أو الحرارة النوعية و هي كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة 1 كغ من المادة 1 درجة كلفن.

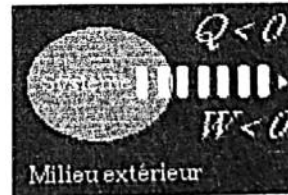
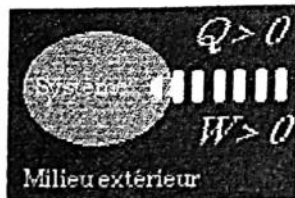
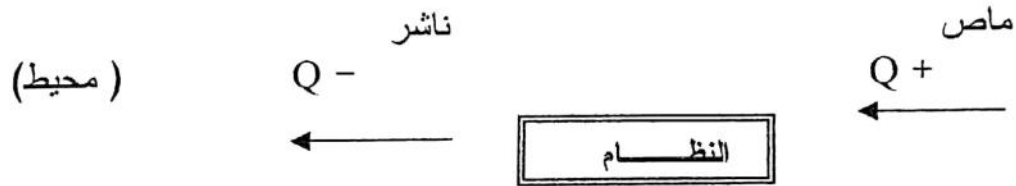
وحدة قياس الحرارة النوعية :

$$1cal=4,18J \quad \text{حيث} \quad Q=mC\Delta T \Rightarrow C=\frac{Q}{m\Delta T}=\frac{J}{Kg.K}$$

الحرارة النوعية للماء: وجد بالتجربة العملية أن الطاقة الحرارية اللازمة لرفع درجة حرارة 1 كغ من الماء 1 كلفن = 4200 جول.
ملاحظة : احيانا نتحدث عن السعة الحرارية المولارية وهي الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة 1 مول من مادة بمقدار 1 كلفن.

اصطلاح الاشارات :

اذا امتص النظام حرارة (الحرارة تضاف للنظام) تكون اشارة كمية الحرارة موجبة $+Q$
اذا نشر النظام حرارة (الحرارة تؤخذ من النظام) تكون اشارة الحرارة سالبة $-Q$



ملاحظات هامة:

- 1- الكتل المتساوية من المواد المختلفة تحتاج الى مقادير مختلفة من الطاقة الحرارية اذا اردنا رفع درجة حرارتها نفس العدد من درجات الحرارة أي ان لكل مادة حرارة نوعية تختلف عن بقية المواد الاخرى.
- 2- عند تعيين الحرارة النوعية للمواد المختلفة وجد ان الحرارة النوعية للماء هي اكبر حرارة نوعية معروفة. ولهذا اهمية قصوى نوضحها في المثال التالي:

الحرارة النوعية للماء = 4200 جول / كغ. كلفن
الحرارة النوعية للقشرة الارضية = 840 جول/كغ. كلفن.
أي ان الحرارة النوعية للماء = 5 امثال الحرارة النوعية للقشرة الارضية.
ويعتبر هذا تفسيراً لكثير من التطبيقات العملية في حياتنا اليومية نذكر منها ما يأتي:

- (أ) وجود نسبة عالية من الماء في الكائنات الحية ، حيوانية أو نباتية ، يعمل على زيادة كمية الحرارة المخزنة فيها، و هذا يزيد قدرتها على مقاومة التغيرات الحادثة في درجة حرارة الوسط المحيط.
- (ب) وجود المدن الساحلية على شاطئ البحر

عادة ما تستعمل سعتين حراريتين هما:

- السعة الحرارية بثبوت الحجم و تعرف بـ C_v .
- السعة الحرارية بثبوت الضغط و تعرف بـ C_p .

العمل و الطاقة الميكانيكية :

التعريف الميكانيكي للعمل:

اذا تحرك جسم مسافة dx تحت تأثير قوة F فإن العمل dW يعرف كما يلي
 $dW = F_{ext} dx$ يلاحظ ان العمل يتعلق بالطريق المسلك dx و بتغير القوة خلال مدة انجاز هذا العمل و بالتالي فإن العمل ليس دالة للحالة و انما دالة للطريق
اشارات العمل :

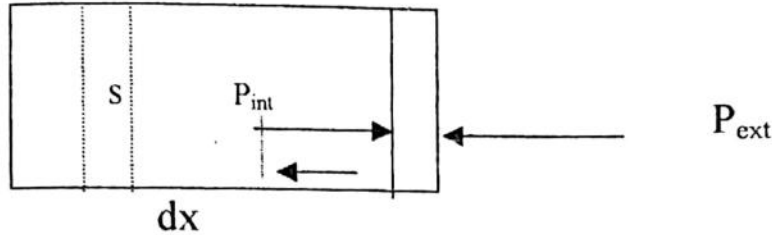
- اصطلاح على ان تكون اشارات العمل على النحو الاتي
- ان العمل المبذول على الجملة هو عمل تتلقاه الجملة من الوسط المحيط و هو عمل موجب $W > 0$ أو $+W$
 - ان العمل الذي تبذله الجملة هو عمل تفقده و هو عمل سالب $W < 0$ أو $-W$

عمل قوى الضغوط :

نعتبر عملية أنضغاط غاز محبوس داخل اسطوانة متصلة بمكبس لدينا $F_{ext} = P_{ext} \cdot S$ حيث P_{ext} هو الضغط الخارجي S مساحة المكبس

نعتبر ان المكبس بدون وزن و يتحرك بدون احتكاك
عبرة العمل تصبح $dW = P_{ext} \cdot S \cdot dx$ $\Leftarrow W = \int F_{ext} \cdot dx = \int P_{ext} \cdot S \cdot dx$ حيث ان

$$S \cdot dx = dV \Rightarrow W = - \int_{V_1}^{V_2} P_{ext} \cdot dV \dots\dots\dots(3.1)$$



ملاحظة : أدخلنا إشارة (-) على عبرة العمل حتى نبقى على اتفاق مع اصطلاح الاشارات السابق.

في حالة التمدد $P_{ext} < P_{int}$ يحدث تمدد تلقائي للجملة و بالتالي هي التي تنتج عملا $\Leftarrow W > 0$

في حالة التقلص يكون $P_{ext} > P_{int}$ $\Leftarrow W$ موجب

في حالة تحول عكوس يكون لدينا في كل لحظة $P_{ext} = P_{int} = P$ حيث P هو الضغط الداخلي للغاز

$$W = - \int P dV \Leftarrow dW = -P dV$$

وحدات العمل :

الضغط بالباسكال و الحجم بالمتر مكعب يكون العمل بالنيوتن متر و هي تكافئ الجول و هي الوحدة الدولية للعمل.

هناك وحدات اخرى وهي

P — atm

V — l للتر يكون العمل بـ l.atm

حيث $1 \text{ l.atm} = 101,321 \text{ J}$

المبدأ الأول للترموديناميك:

الطاقة الداخلية للجسم هي الطاقة التي تملكها الجسمة بفعل الكتلة، الحرارة، قوة التجاذب و التنافر بين الجزيئات و التركيب الكيميائي.

الطاقة الداخلية للجسم هي مجموع طاقتي الحركة والوضع لجميع جزيئات الجسم.

- الطاقة الداخلية للجسمة هي دالة للحالة مما يعني ان U تتعلق فقط بالحالة

الكلية للجسمة $U(T, V, n)$.

- للنظام المعزول $\Delta U = 0$

نص المبدأ الأول للترموديناميك: الطاقة المتبادلة بين النظام والوسط الخارجي على شكل عمل W و حرارة Q تساوي إلى التغيير في طاقة النظام الداخلية

$$\Delta U = U_2 - U_1$$

$$\Delta U = U_2 - U_1 = W + Q$$

$$\Delta U = W + Q$$

.....(3.2)

$$U_2 - U_1 = W_{12} + Q_{12} \text{ chemin } x$$

$$U_1 - U_2 = W_{21} + Q_{21} \text{ chemin } y$$

$$W_{12} + Q_{12} = W_{21} + Q_{21} = \text{cte} \text{ يعني}$$

ان الطاقة التي يفقدها النظام يجب أن تظهر في مكان آخر من الكون ككسب في الطاقة. إضافة بما أن الطاقة يمكن تحويلها من شكل لآخر فإن الطاقة التي يفقدها النظام يمكن أن يكتسبها

نظام آخر و في شكل آخر من الطاقة. فمثلا الطاقة التي تفقد عن احتراق البترول في محطة توليد الكهرباء يمكن أن نتحصل عليها كطاقة كهربائية أو حرارية أو ضوئية في بيوتنا.

في الكيمياء نكون مهتمين فقط بالتغيرات التي تخص النظام و ليس المحيط . بمعنى يستحيل تركيب آلة تعمل في دورات و تنتج عملا دون استهلاك طاقة.

عند حجم ثابت $V=cte$ يكون

$$dU=nCvdT \text{ أو } \Delta U=Q=\int nCvdT \dots\dots\dots(3.3)$$

الانتالبي " المحتوى الحراري " (H) ENTHALPIE

- الانتالبي مقدار شامل يتعلق بكتلة النظام أي بعدده المولي.

- الانتالبي دالة لحالة و دالة لمتغيرات الحالة $H=H(T,P,n)$

تعرف الانتالبي رياضيا كما يلي

$$H = U + pV \dots\dots\dots(3.4)$$

بالاشتقاق نجد :

$$dH = dU + d(pV) = dU + pdV + Vdp$$

$$dH = dQ + Vdp \text{ أي}$$

من أجل تحول متساوي الحجم ($V = cte$) : $dU = dQ$ ($dV = 0$)

$$\Delta U = Q = mc_v \Delta T \dots\dots\dots(3.5)$$

$$Cv = (dU/dT)_v \dots\dots\dots(3.6)$$

من أجل تحول متساوي الضغط ($p = cte$) : $dH = dQ$ ($dp = 0$)

$$\Delta H = Q = mc_p \Delta T \dots\dots\dots(3.7)$$

$$Cp = (dH/dT)_p \dots\dots\dots(3.8)$$

* العلاقة بين C_p و C_v :

حسب علاقة الانتالبي $H=U+PV$
 لمول من غاز مثالي تكون معادلة الغاز المثالي من أجل واحد مول $PV=RT$
 بالتعويض نجد $H=U+RT$
 بالاشتقاق نجد $\frac{dH}{dT}=\frac{dU}{dT}+R$ ومنه $\frac{dH}{dT}=\frac{dU}{dT}+R\frac{dT}{dT}$
 بما ان لغاز مثالي و مهما كانت العملية $C_p=(\frac{dH}{dT})_p$ و $C_v=(\frac{dU}{dT})_v$
 تصبح العلاقة اعلاه

$$C_p=C_v+R \Rightarrow C_p-C_v=R \quad \dots\dots\dots(3.9)$$

وتعرف هذه العلاقة باسم علاقة ماير للغازات المثالية.

نضع عادة : $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$

للسوائل و الاجسام الصلبة يكون تقريبا $C_p=C_v$

- الحرارة المتبادلة اثناء تسخين أو تبريد مادة ما من الدرجة T_1 الى الدرجة T_2 هي :

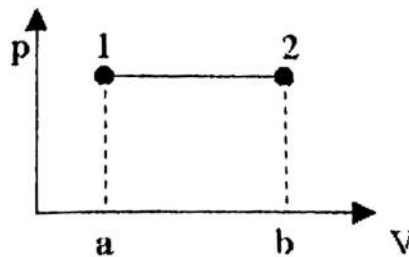
- عند حجم ثابت و لغاز مثالي (3.10) $\Delta U=Q=n\int C_v dT \dots\dots\dots$

- عند ضغط ثابت و لغاز مثالي (3.11) $\Delta H=Q_p=n\int C_p dT \dots\dots\dots$

* تطبيقات المبدأ الاول على التحولات الفيزيائية للغازات المثالية وتغيرات الحالة:

في كل حالة نقوم برسم التحول على مخطط (PV) و يسمى مخطط كلايرون.

تحول تحت ضغط ثابت : Isobare



$$PV = nRT \rightarrow V = \frac{nR}{P} T$$

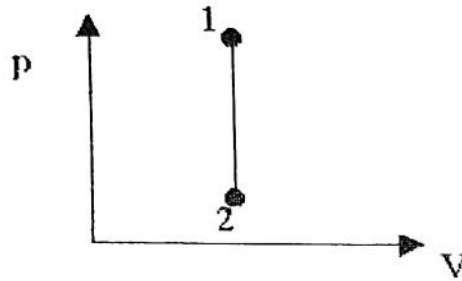
يعني أن الحجم يتعلق فقط بدرجة الحرارة. $V = kT$

$$W = -P \int_{V_1}^{V_2} dV = -P(V_2 - V_1) \dots \dots \dots (3.12) \quad \text{عبارة العمل}$$

عبارة $\Delta U, \Delta H$

$$\Delta U = W + Q = -P(V_2 - V_1) + n \int_{T_1}^{T_2} C_p dT \quad \text{و} \quad \Delta H = Q_p = n \int_{T_1}^{T_2} C_p dT$$

تحول تحت حجم ثابت : Isochore :

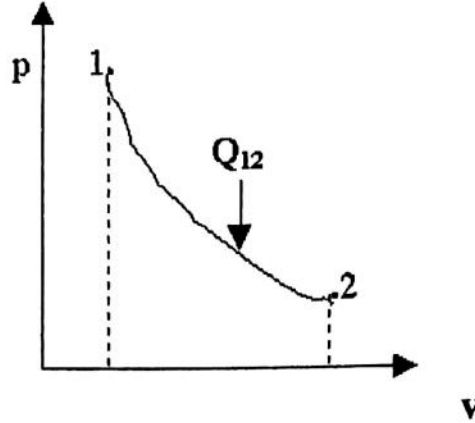


$$V = cv \Rightarrow \Delta V = 0 \Rightarrow W = 0$$

$$\Delta U = Q_v = n \int C_v dT \quad \text{ومنه}$$

عندما تكون C_v غير متعلقة بدرجة الحرارة تكون $\Delta U = n C_v (T_2 - T_1)$

تحول عند درجة حرارة ثابتة أو تحول متساوي الدرجة : Isotherme :



$$T=cte \Rightarrow PV=cte$$

$$W = -\int PdV \quad \text{عبارة العمل}$$

$$PV=nRT \Rightarrow P = \frac{nRT}{V} \quad \text{من اجل غاز مثالي}$$

$$W = -nRT \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = -nRT \ln \frac{V_2}{V_1} \dots \dots \dots (3.13) \quad \text{تصبح عبارة العمل}$$

- في حالة التمدد النظام يبذل شغلا ويقدم للوسط الخارجي

$$W < 0 \Leftrightarrow \ln \frac{V_2}{V_1} > 0 \Leftrightarrow V_2 > V_1$$

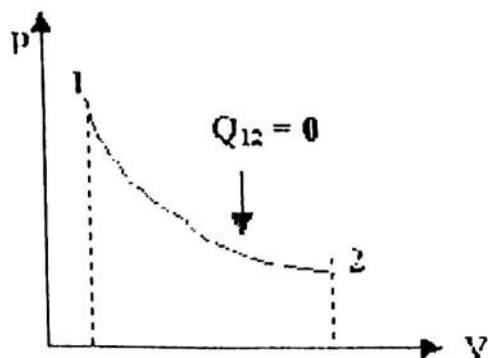
- في حالة انقلص النظام يستقبل الطاقة أي يتم بذل شغل على النظام من الوسط المحيط.

$$V_2 < V_1 \Rightarrow \ln \frac{V_2}{V_1} < 0 \Rightarrow W > 0$$

عبارة الطاقة الداخلية والانتالبي

$$Q = -W = nRT \ln \frac{V_2}{V_1} \quad \text{ومنه } T=cte \Rightarrow \Delta U=0, \Delta H=0$$

التحول الكظوم (الاديباتيكي): Adiabatique



- اثناء هذا التحول لا يتم تبادل حراري مع الوسط الخارجي $Q=0$.
- عند التحول الكظوم العمل المتبادل مع الوسط الخارجي يساوي الى التغير في الطاقة الداخلية $dU = dU'$

$$dU = -P_{ext}dV = -PdV \quad \text{و} \quad dU = nC_v dT$$

لغاز مثالي و لتحول عكوس $nC_v dT = -PdV = -nRT \frac{dT}{T}$ ومنه بعد المساواة

$$C_v dT = -RT \frac{dT}{T}$$

$$(C_p - C_v) = R \Rightarrow \frac{C_p}{C_v} = \frac{C_p}{C_v} - 1 = \gamma - 1$$

لدينا سابقا من علاقة ماير

بالرجوع الى العلاقة اعلاه $\frac{dT}{T} = -\frac{R}{C_v} \frac{dT}{T}$ وبتعويض قيمة $\frac{R}{C_v} = \gamma - 1$ نجد:

$$\ln T = -(\gamma - 1) \ln T + \ln k \quad \text{بالتكامل} \quad \frac{dT}{T} = -(\gamma - 1) \frac{dT}{T}$$

$$\ln T + \ln T^{\gamma-1} = \ln k \Rightarrow \ln T \cdot T^{\gamma-1} = \ln k \Rightarrow T \cdot T^{\gamma-1} = k$$

ومنه

باجراء تعديلات على المعادلة الاخيرة يمكن الوصول الى معادلات اخرى

$$PV^\gamma = k$$

.....(3.14)

$$T.P^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = k$$

.....(3.15)

$$T.V^{\gamma-1} = k$$

.....(3.16)

عبارة العمل في التحول الكظوم

$$PV^\gamma = \text{cte} = K$$

$$W = -\int P dV = -\int_1^2 K \frac{dV}{V^\gamma} = \frac{1}{\gamma-1} \left[\frac{K}{V^{\gamma-1}} \right]_{V_1}^{V_2}$$

$$K = PV^\gamma \Rightarrow W = \frac{1}{\gamma-1} \left[\frac{PV^\gamma}{V^{\gamma-1}} \right]_{V_1}^{V_2}$$

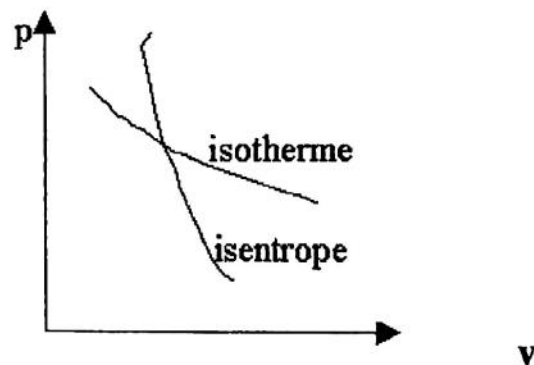
$$W = \frac{1}{\gamma-1} (P_2 V_2 - P_1 V_1) \dots \dots \dots (3.17)$$

عبارة ΔU :

بما أن $Q=0$ فإن $W=Q$

$$\Delta U = nC_V(T_2 - T_1) = \frac{nR}{\gamma-1}(T_2 - T_1) = W \dots \dots \dots (3.18)$$

المقارنة بين ميل التحول الكظوم والتحول المتساوي الدرجة:



لتحول متساوي الدرجة

$$PV = nRT = K$$

$$\frac{d(PV)}{dV} = \frac{dK}{dV} = 0$$

$$\frac{d(PV)}{dV} = P \frac{dV}{dV} + V \frac{dP}{dV} = 0 \Rightarrow P + V \frac{dP}{dV} = 0 \Rightarrow \frac{dP}{dV} = -\frac{P}{V} = \text{tg} \alpha \dots \dots \dots (3.19)$$

للتحول الكظوم

$$PV^\gamma = K$$

$$\frac{d(PV^\gamma)}{dT} = 0 \Rightarrow \frac{dP}{dT} - P \frac{dT}{dT} + V^\gamma \frac{dP}{dT} = \gamma P V^{\gamma-1} + V^\gamma \frac{dP}{dT} = 0 \Rightarrow \frac{dP}{dT} = -\gamma \frac{P}{V} = -\gamma \beta \quad (3.20)$$

$$\frac{\gamma \beta}{\gamma \alpha} = \gamma \Rightarrow \gamma \beta > \gamma \alpha \dots \dots \dots (3.21)$$

نستنتج أن ميل التحول الكظوم أكبر من ميل التحول المتساوي الدرجة.

المردود الطاقوي : يعرف المردود الطاقوي للحلقة بأنه نسبة العمل الناتج إلى الحرارة المقدمة .

المردود = العمل الناتج / الحرارة المكتسبة

$$\eta = \frac{W_{fourni}}{Q_{prélevée}} = \frac{W}{Q} \dots \dots \dots (3.22)$$

جدول يلخص أهم التحولات الترموديناميكية

ΔH	ΔU	Q	W	نوع التحول
$\Delta H = n \int_1^2 C_p dT$	$\Delta U = Q_v$	$Q_v = n \int_1^2 C_v dT$	0	تحول متساوي الحجم Isochore (v=cte)
$\Delta H = Q_p = \int_1^2 n C_p dT$	$\Delta U = Q_p + W$	$Q_p = \int_1^2 n C_p dT$	$W = -P \int_1^2 dV$	تحول متساوي الضغط Isobare (P=cte)
0	0	$Q = -W$	$W = -nRT \ln \frac{V_2}{V_1}$	تحول متساوي الدرجة Isotherme (T=cte)
$\Delta H = n \int_1^2 C_p dT$	$\Delta U = W$	0	$W = \frac{1}{\gamma-1} (P_2 V_2 - P_1 V_1)$	تحول كظوم Adiabatique (Q=0)

بالنسبة للحلقة يكون

$$Q_{cvt,c} = \sum Q = -W_{cvt,c} \quad \Delta U_{cvt,c} = 0$$

$$\Delta H_{cvt,c} = 0$$

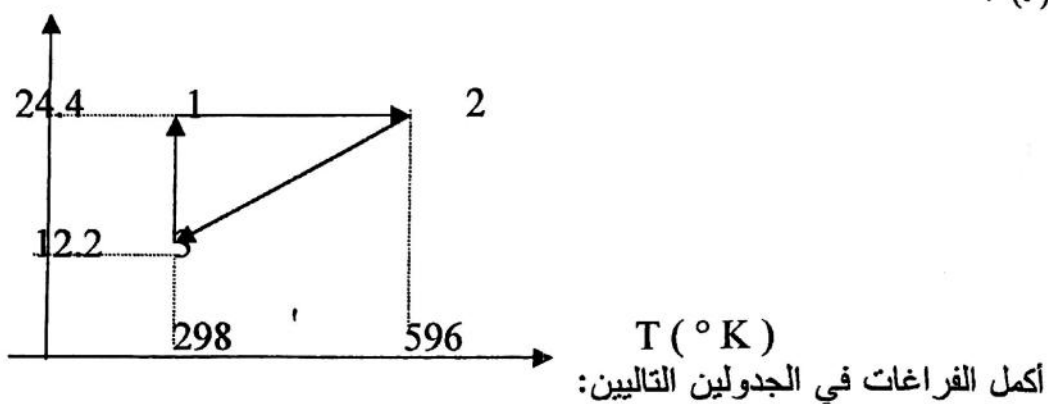
ملاحظة : $\frac{\Delta H}{\Delta U} = \gamma$

مسائل :

3-1- في عملية ما طبق 500J من الشغل على نظام يعطي 200J من الحرارة ، ما هي قيمة ΔU العائدة لهذا النظام.

3-2- إذا اضيف 1000Kcal من الحرارة الى 1.2 لتر من الاكسجين في اسطوانة تحت ضغط ثابت يساوي 1 جو يتزايد الحجم حتى 1.5 لتر . احسب ΔU العائدة لهذه العملية.

3-3- وضع غاز مثالي أحادي الذرة قدره مول واحد خلال الدورة الانعكاسية المبينة في الشكل
V (l)



المرحلة	الضغط (جو)	الحجم (لتر)	د. الحرارة (كلفن)
1		24.4	298
2			596
3		12.2	

الخطوة	Q (cal)	W (cal)	ΔU (cal)	ΔH (cal)
2 - 1				
3 - 2				
1 - 3				

$$C_p = 5/2R$$

$$R = 2 \text{ cal/mol.k} \quad \text{يعطى :}$$

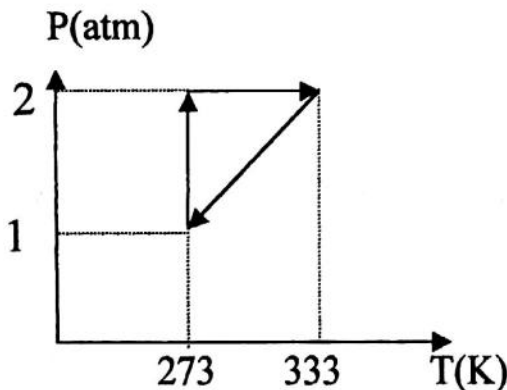
- 3-4-** يخضع 1 مول من غاز مثالي للتحويلات المعكوسة التالية
- أنضغاط عند درجة حرارة ثابتة من الحالة A الى الحالة B
 - تمدد كظوم من الحالة B الى الحالة C
 - تسخين تحت ضغط ثابت يعيده الى الحالة A

- تسخين تحت ضغط ثابت يعيده الى الحالة A

- 1 - مثل هذه التحولات على مخطط (P,V)
 - 2 - احسب قيم V_A, V_B, V_C, T_B, T_C
 - 3 - احسب لكل تحول W,Q و التغير في الطاقة الداخلية ΔU بالجول
- المعطيات: $P_A = 2 \text{ atm}, P_B = 10 \text{ atm}, P_C = 2 \text{ atm}, T_A = 300 \text{ }^\circ\text{K}, C_v = \frac{3}{2} R$
 $R = 0.082 \text{ l.atm/mol.}^\circ\text{K} = 8.31 \text{ J/mol.}^\circ\text{K}$

- 3-5-** يخضع 1 مول من غاز مثالي عند درجة الحرارة T و ضغط P الى تحول متساوي درجة الحرارة متبوع بتحول متساوي الضغط و خلال هاتين العمليتين فان الضغط ينخفض الى النصف ودرجة الحرارة تتضاعف. يعاد الغاز الى حالته الابتدائية بتبريد متساوي الحجم الى درجة الحرارة T/2 متبوع بتحول كظوم علما ان التحولات الأربعة معكوسة.
1. مثل هذه الدورة على مخطط كلايرون (P,V) و على المخطط (T,V).
 2. احسب بالحريرة وبدلالة درجة الحرارة فقط: Q, W, $\Delta H, \Delta U$ و للدورة.
 3. يعطى: $C_v = \frac{3}{2} R, R = 2 \text{ cal / mol.}^\circ\text{K}, \ln 2 = 0.69$

- 3-6-** يخضع 1 مول من غاز مثالي الى جملة من التحولات العكوسة الموضحة على المخطط (PT) الموالي.



- 1- احسب المتغيرات P, V, T للإحداثيات A, B, C ثم مثل التحولات السابقة على مخطط (PV)
- 2- احسب من أجل التحولات الثلاثة و للحلقة تغيرات الطاقة الداخلية ΔU والعمل W والحرارة Q وتغيرات الأنتالبي ΔH بالجول مدونا النتائج في جدول

يعطى $R = 0.082 \text{ l.atm/mol.k} = 8.31 \text{ j/mol.k}, \gamma = 1.4$

مثل هذه التحولات على مخطط (P,V) .
 خلال هذه الدورة الغاز ينجز عملا قدره 500 حريرة ، علما أن المردود الحراري
 لهذه الدورة معرف ب

$$\rho = W/Q \text{ الملتقة } \rho \text{ و هو يساوي } 25\%$$

أحسب العمل لكل تحول W_{AB}, W_{BC}, W_{CA}
 إذا علمنا أن الحجم ينقص إلى النصف خلال عملية انضغاط الغاز ، أحسب درجات
 الحرارة T_A, T_B, T_C يعطى $\gamma = 1.4$

3-8- يتمدد مول واحد من الأكسجين من حجم 10 لترات عند درجة حرارة 25 م°
 إلى 50 لتر عند 100 م°. احسب الحرارة المستهلكة و الشغل المبذول و التغير في
 الطاقة الداخلية للمنظومة أثناء هذه العملية إذا أجري هذا التمدد بطريقتين
 ا. سخن الغاز عند حجم ثابت إلى 100 م° ثم مدد انعكاسيا وفق درجة حرارة مساوية
 إلى حجم 50 لتر

ب. مدد الغاز انعكاسيا وفق درجة حرارة متساوية إلى حجم 50 لتر ثم سخن تحت
 حجم ثابت إلى 100 م°
 افترض السلوك المثالي للغاز

$$C_p = 7.6 \text{ cal/mol.}^\circ\text{K} \quad \text{يعطى}$$