

CHƯƠNG III

NHIỆT HÓA HỌC

1. Các khái niệm cơ bản:

a. Hệ:

Là 1 phần của vũ trụ có giới hạn trong phạm vi đang khảo sát về phương diện hóa học. Phần còn lại của vũ trụ bao quanh hệ được gọi là môi trường ngoài (mtng) đối với hệ.

Td: 1 cốc chứa nước đầy kín: phần bên trong cốc là hệ, còn thành cốc và khoảng không gian quanh cốc là (mtng).

*. Hệ hở: là hệ có thể trao đổi năng lượng và vật chất với (mtng)

* Hệ kín: chỉ trao đổi năng lượng nhưng không trao đổi chất với (mtng)

* Hệ cô lập: không trao đổi năng lượng và vật chất với (mtng)

Td: Cốc chứa dd hóa chất đang pư không đậy nắp là hệ hở, còn pư trong bình đậy kín là hệ kín, pư trong bình cách nhiệt đậy kín là hệ cô lập.

* Hệ đồng thể: hệ chỉ có 1 pha, còn hệ chứa từ 2 pha trở lên là hệ dị thể (Hệ gồm nước lỏng nguyên chất là đồng thể, hệ gồm nước và nước đá là dị thể)

b. Thông số trạng thái và hàm trạng thái;

α. Thông số trạng thái:

Các đại lượng vật lý như: áp suất(p), thể tích(V), nhiệt độ(T), số mol chất(n) dùng để biểu diễn trạng thái của hệ được gọi là thông số trạng thái

Giữa các thông số trạng thái có 1 phương trình liên hệ:

$$\begin{array}{l} pV = nRT \\ \text{Pt trạng thái} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} p: (\text{atm}), V: (\text{lit}), T: (^\circ\text{K}) \\ R \left\{ \begin{array}{l} 0,082 \text{ l.atm.mol}^{-1} \\ 1,987 \text{ cal.mol}^{-1} \\ 8,3 \text{ j.mol}^{-1} \end{array} \right. \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Hằng số} \\ \text{khí lý} \\ \text{tương} \end{array}$$

Khi đã xác định được 3 trị số, thì trị số thứ 4 được xác định. Do đó khi biểu diễn trạng thái của hệ thường dùng 3 thông số: p, V, T

β. Hàm trạng thái:

Trạng thái của hệ thay đổi khi chỉ cần 1 thông số trạng thái thay đổi

Hàm trạng thái là 1 đại lượng có giá trị chỉ phụ thuộc vào các thông số trạng thái của hệ.

γ. Quá trình:

Xem 1 hệ ở trạng thái $(1:p_1, V_1, T_1)$, khi 1 thông số trạng thái thay đổi $\rightarrow$ trạng thái $(2:p_2, V_2, T_2) \rightarrow$ hệ đã thực hiện 1 quá trình từ trạng thái(1) $\rightarrow$ trạng thái(2)

*1 $(p_1, V_1, T_1) \rightarrow$ *2 (p_2, V_2, T_2)

- Quá trình đẳng áp: áp suất không đổi($\Delta p=0; p=\text{const}$)
- Quá trình đẳng tích: thể tích không đổi($\Delta V=0; V=\text{const}$)
- Quá trình đẳng nhiệt: nhiệt độ không đổi($\Delta T=0; T=\text{const}$)

- Quá trình đoạn nhiệt: không trao đổi nhiệt ($Q=0$)
- Quá trình thuận nghịch: khả năng xảy ra theo chiều thuận hay chiều nghịch là như nhau($\rightleftharpoons$). Quá trình chỉ xảy ra 1 chiều là qt tự nhiên ($\rightarrow$)

c. Nhiệt và công

Khi thực hiện quá trình từ trạng thái(1) đến trạng thái (2), hệ có thể trao đổi năng lượng với mtng dưới 2 dạng: nhiệt và công.

α . Nhiệt:

$$Q = mc\Delta T \quad \left\{ \begin{array}{l} m: \text{khối lượng (gam)} \\ c: \text{nhiệt dung} \\ \Delta T = T_2 - T_1 \end{array} \right.$$

$m=1\text{ g} ; \Delta T=1 \rightarrow c=Q \rightarrow c: \text{nhiệt dung riêng}$

$m=M, \Delta T= 1 \rightarrow Q= Mc = \bar{c} : \text{nhiệt dung mol}$
Có n mol chất $\rightarrow Q = n\bar{c} \Delta T$

β . Công

Công A $\left\{ \begin{array}{l} * \text{ Công thay đổi thể tích hệ} \\ * \text{ Công hóa học} \end{array} \right.$

Trường hợp chỉ có công thay đổi thể tích:

$$A = p_{\text{ngoài}} \cdot \Delta V \quad \{ \Delta V = V_2 - V_1 \}$$

- $p_{\text{ng}} = 0$ (quá trình xảy ra ở chân không) $\rightarrow A = 0$
- $\Delta V = V_2 - V_1 = 0$ (quá trình đẳng tích) $\rightarrow A = 0$
- Quá trình đẳng áp hoặc thuận nghịch:
 $p_{\text{ng}} = p_{\text{hệ}} = p \rightarrow A = p \cdot \Delta V$

Qui ước về dấu:

$Q < 0 \rightarrow$ phát nhiệt

$Q > 0 \rightarrow$ nhận nhiệt

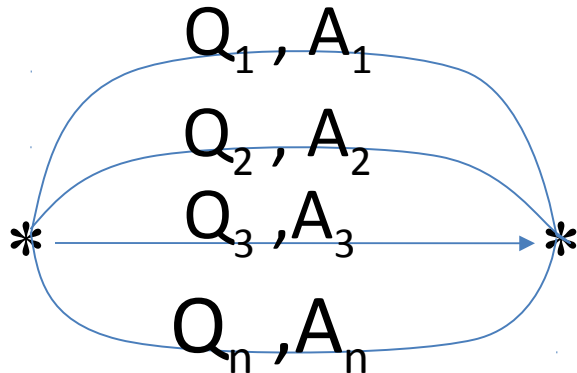
$A < 0 \rightarrow$ nhận công

$A > 0 \rightarrow$ sinh công

II. Áp dụng nguyên lý I nhiệt động lực học.

1. Nguyên lý I và nội năng

Xem hệ thực hiện quá trình từ trạng thái (1) đến trạng thái (2) có thể theo nhiều đường quá trình khác nhau:



$$Q_1 \neq Q_2 \neq Q_3 \neq Q_n$$

$$A_1 \neq A_2 \neq A_3 \neq A_n$$

$$Q_1 - A_1 = Q_2 - A_2 = Q_3 - A_3 = Q_n - A_n = \text{hs} = \Delta U$$

$$\Delta U = U_2 - U_1 \quad (U_1 \text{ và } U_2 \text{ nội năng của hệ ở trạng thái (1) và (2)})$$

$$\Delta U = Q - A$$

Nội năng U là tất cả các dạng năng lượng tích chứa bên trong hệ.

$$A = p_{\text{ng}} \cdot \Delta V \rightarrow \Delta U = Q - p_{\text{ng}} \cdot \Delta V$$

Trong trường hợp hệ thực hiện 1 chu trình:

1*2 * $\Delta U = U_2 - U_1 = Q - A = 0$
 $\rightarrow Q = A$

- $Q > 0 \rightarrow A > 0$: hệ nhận nhiệt $\rightarrow$ sinh công
- $A < 0 \rightarrow Q < 0$: hệ nhận công $\rightarrow$ phát nhiệt

2. Entalpi:

1 pư thường được thực hiện theo 1 trong 2 cách sau:

- * Bình kín, $V_{\text{hệ}} = V_{\text{bình}} \rightarrow$ quá trình đẳng tích ($\Delta V = 0$)
 $\Delta U = Q - A = Q - p_{\text{ng}} \Delta V = Q_V \rightarrow \Delta U = Q_V$: **nhịệt đẳng tích**
- $Q_V > 0 \rightarrow \Delta U > 0 \rightarrow$ hệ nhận nhiệt $\rightarrow U_2 > U_1$: hệ nóng lên
- $Q_V < 0 \rightarrow \Delta U < 0 \rightarrow$ hệ phát nhiệt $\rightarrow U_2 < U_1$: hệ lạnh đi
- * Bình hở, áp suất tác dụng lên hệ là áp suất khí

quyền = 1 atm $\rightarrow$ quá trình đẳng áp

$$\Delta U = Q - A = Q - p \Delta V \rightarrow Q = \Delta U + p \Delta V$$
$$Q_p = U_2 - U_1 + p(V_2 - V_1) = (U_2 + pV_2) - (U_1 + pV_1)$$

$$\text{Đặt: } H_2 = U_2 + pV_2 ; H_1 = U_1 + pV_1$$

Là Entalpi của hệ ở trạng thái (2) và (1)

$$\Delta H = H_2 - H_1 = Q_p \text{ **nhịệt đẳng áp** } \quad \text{Với } H = U + pV$$

$Q_p > 0 \rightarrow \Delta H > 0 \rightarrow$ hệ nhận nhiệt: $H_2 > H_1 \rightarrow$ hệ nóng lên

$Q_p < 0 \rightarrow \Delta H < 0 \rightarrow$ hệ phát nhiệt: $H_2 < H_1 \rightarrow$ hệ lạnh đi

3. Hiệu ứng nhiệt

Hiệu ứng nhiệt của 1 phản ứng là nhiệt trao đổi giữa pư với mtng ở điều kiện $\Delta V = 0$ hoặc $\Delta p = 0$.

* $\Delta V = 0: \rightarrow \Delta U = Q_v$: hiệu ứng nhiệt đẳng tích.

* $\Delta p = 0 \rightarrow \Delta H = Q_p$: hiệu ứng nhiệt đẳng áp.

Sự liên quan giữa ΔH và ΔU

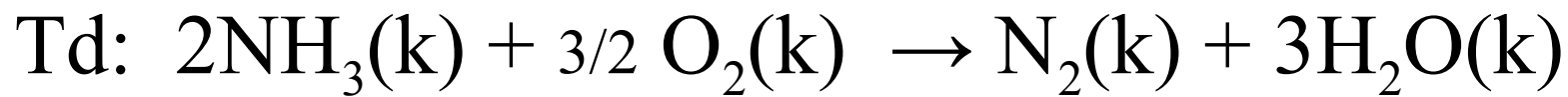
Ta có: $H = U + pV \rightarrow \Delta H = \Delta U + p\Delta V$

$$\Delta H = \Delta U + p(V_2 - V_1) = \Delta U + pV_2 - pV_1$$

$$\Delta H = \Delta U + n_2RT - n_1RT = \Delta U + (n_2 -$$

$$n_1)RT = \Delta U + \Delta n.RT \quad \Delta n = \sum \text{mol khí(sp)} - \sum \text{mol khí(tc)}$$

Còn trong quá trình: $Q_p = Q_v + \Delta n.RT$

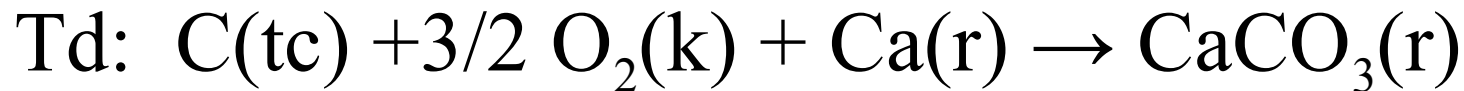


$$\Delta H = \Delta U + \Delta n.RT = \Delta U + (1+3-2-3/2)RT = \Delta U + 1/2 RT$$

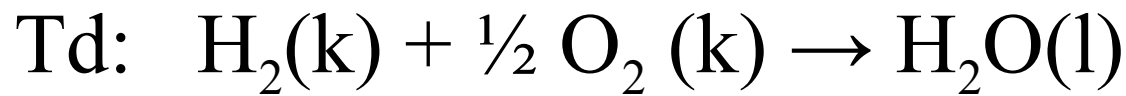
a. Nhiệt tạo thành và nhiệt phân hủy

α. Nhiệt tạo thành mol tiêu chuẩn

Là hiệu ứng nhiệt của phản ứng tạo thành 1 mol hóa chất từ các đơn chất bền ở điều kiện chuẩn ($p=1\text{atm}$, $T = 298^\circ\text{K}\{25^\circ\text{C}\}$)



$$\Delta H_{298}^{\circ} = \Delta H_{\text{tt},298}^{\circ} [\text{CaCO}_3(\text{r})]$$



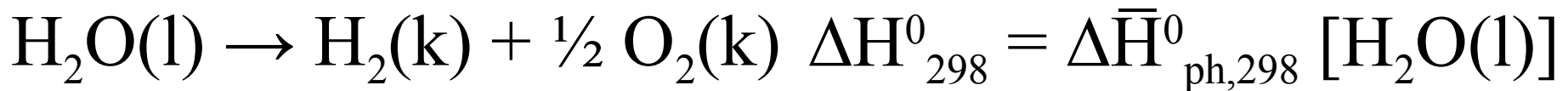
$$\Delta H^{\circ}_{298} = \Delta \bar{H}^{\circ}_{\text{tt},298} [\text{H}_2\text{O}(\text{l})]$$

$\Delta \bar{H}^{\circ}_{\text{tt},298}$ thường < 0 và $\Delta \bar{H}^{\circ}_{\text{tt},298} \downarrow \Rightarrow$ càng bền

$$\Delta \bar{H}^{\circ}_{\text{tt},298} [\text{đơn chất}] = 0$$

β . Nhiệt phân hủy mol tiêu chuẩn

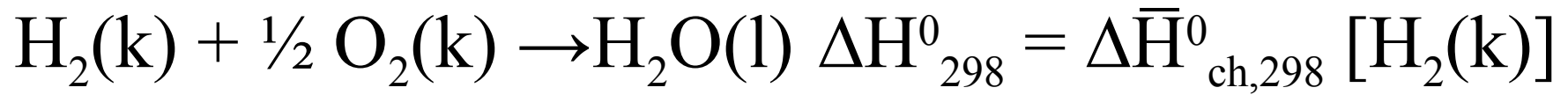
Là nhiệt trao đổi khi phân hủy hoàn toàn 1 mol hoá chất thành các đơn chất bền ở đkc



$\Delta \bar{H}^{\circ}_{\text{ph},298}$ thường > 0 và $\Delta \bar{H}^{\circ}_{\text{ph},298} \uparrow \Rightarrow$ càng bền

b. Nhiệt đốt cháy mol tiêu chuẩn.

Là hiệu ứng nhiệt của pư đốt cháy hoàn toàn 1 mol hoá chất bằng $\text{O}_2(\text{k})$, sản phẩm tạo thành là các oxyt bền của các nguyên tố tạo thành hoá chất ở đkc.

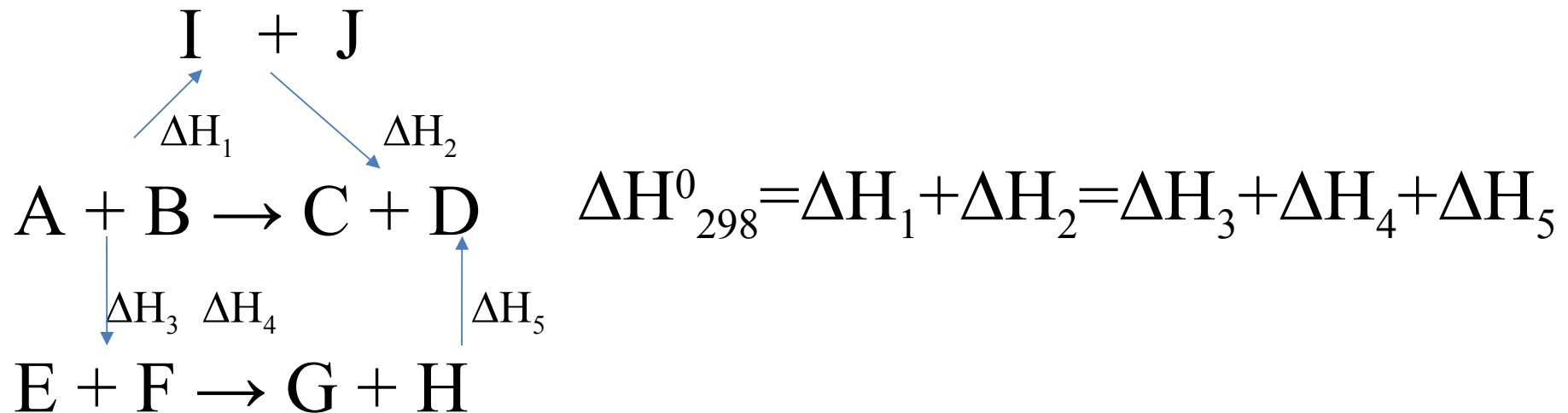


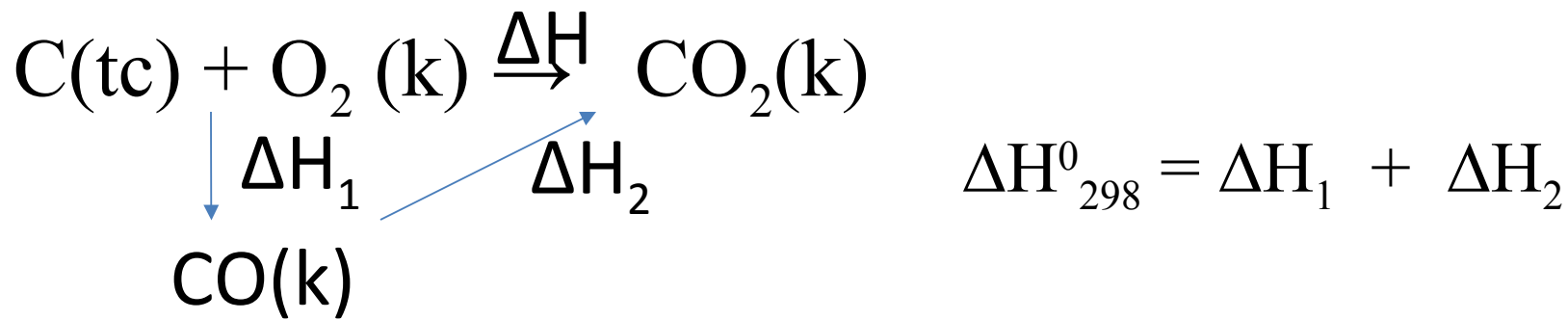
$\Delta \bar{H}^0_{\text{ch},298}$ thường < 0 và $\Delta \bar{H}^0_{\text{ch},298} [\text{đơn chất}] \neq 0$

4. Định luật Hess và hệ quả.

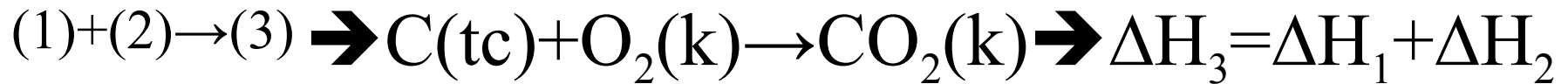
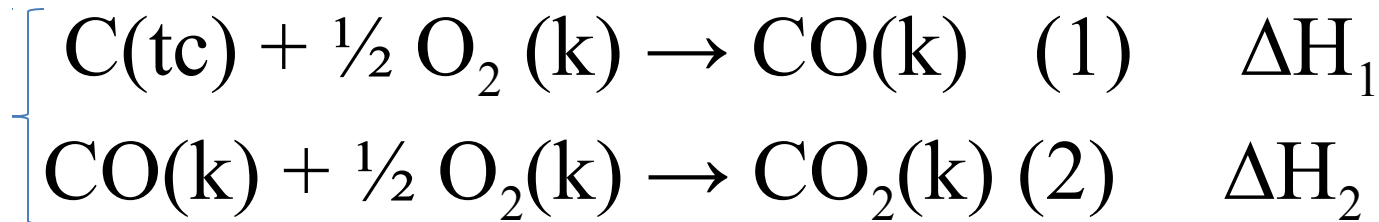
a. Định luật Hess

Một pư có thể xảy ra theo nhiều giai đoạn, hiệu ứng nhiệt tổng quát bằng tổng hiệu ứng nhiệt của các giai đoạn trung gian. Và hiệu ứng nhiệt tổng quát chỉ phụ vào trạng thái đầu và trạng thái cuối của pư



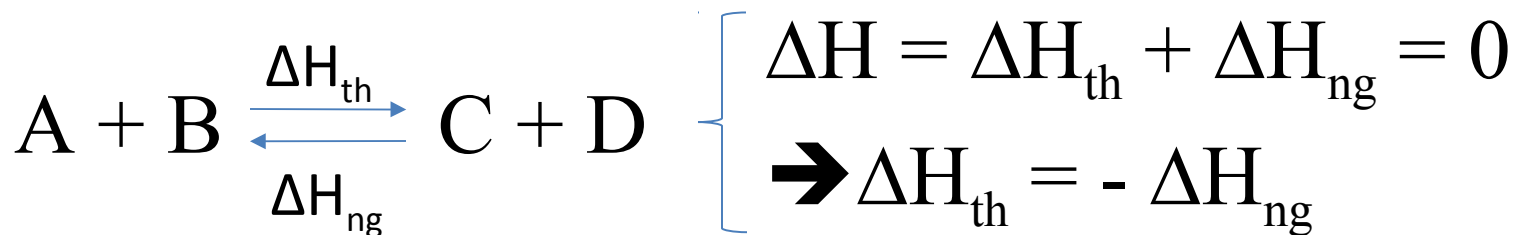


Có thể biểu diễn định luật Hess dưới dạng:

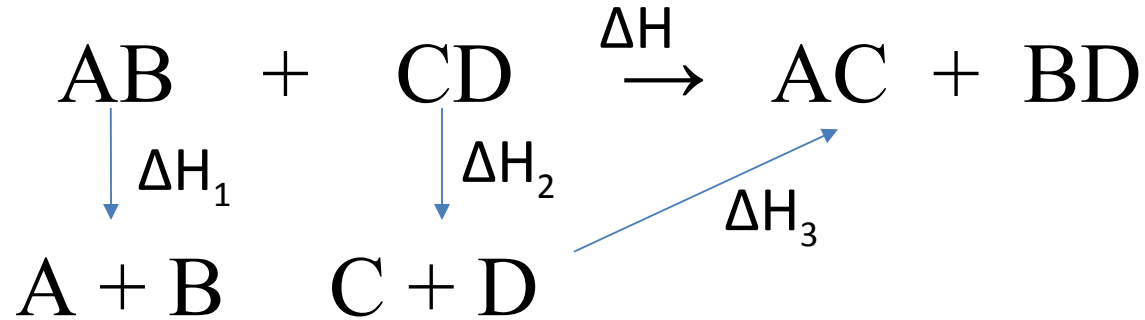


b. Hệ quả:

α . Phản ứng thuận nghịch



β. Tính hiệu ứng nhiệt của pư theo nhiệt tạo thành



$$\Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_3$$

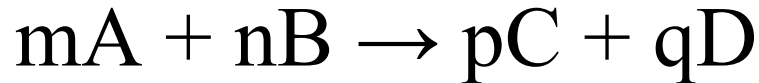
$$\Delta H_1 = -1 \cdot \Delta \bar{H}_{\text{tt},298}^0[\text{AB}]$$

$$\Delta H_2 = -1 \cdot \Delta \bar{H}_{\text{tt},298}^0[\text{CD}]$$

$$\Delta H_3 = +1 \cdot \Delta \bar{H}_{\text{tt},298}^0[\text{AC}] + 1 \cdot \Delta \bar{H}_{\text{tt},298}^0[\text{BD}]$$

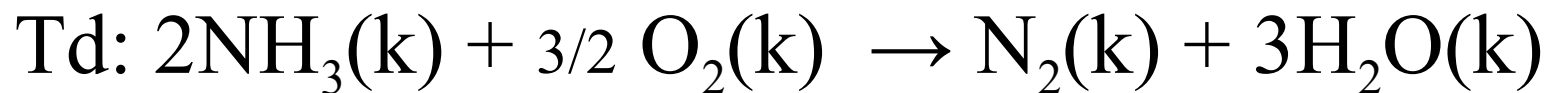
$$\Delta H = \{1 \cdot \Delta \bar{H}_{\text{tt},298}^0[\text{AC}] + 1 \cdot \Delta \bar{H}_{\text{tt},298}^0[\text{BD}]\} \\ - \{1 \cdot \Delta \bar{H}_{\text{tt},298}^0[\text{AB}] + 1 \cdot \Delta \bar{H}_{\text{tt},298}^0[\text{CD}]\}$$

Xem pư tổng quát



$$\Delta H^0_{298} = \{ m\Delta H^0_{\text{tt},298}[\text{C}] + n\Delta H^0_{\text{tt},298}[\text{D}] \} \\ - \{ p\Delta H^0_{\text{tt},298}[\text{A}] + q\Delta H^0_{\text{tt},298}[\text{B}] \}$$

$$\Delta H^0_{298} = \sum \Delta H^0_{\text{tt},298}[\text{sản phẩm}] - \sum \Delta H^0_{\text{tt},298}[\text{tác chất}]$$

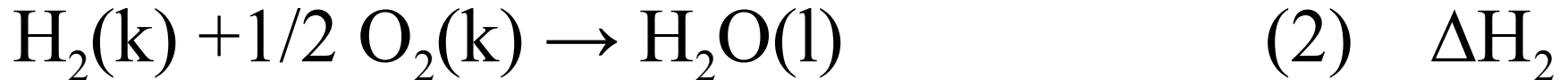
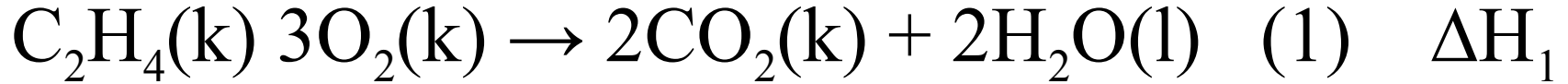


$$\Delta H^0_{298} = 3\Delta H^0_{\text{tt},298}[\text{H}_2\text{O}(\text{k})] - 2\Delta H^0_{\text{tt},298}[\text{NH}_3(\text{k})]$$

$$\Delta H^0_{298} = 3.(-241,8) - 2.(-46,2) = -633\text{kJ}$$

γ. Tính hiệu ứng nhiệt của pư theo nhiệt cháy.

Xem pư: $\text{H}_2\text{C}=\text{CH}_2(\text{k}) + \text{H}_2(\text{k}) \rightarrow \text{H}_3\text{C}-\text{CH}_3(\text{k})$



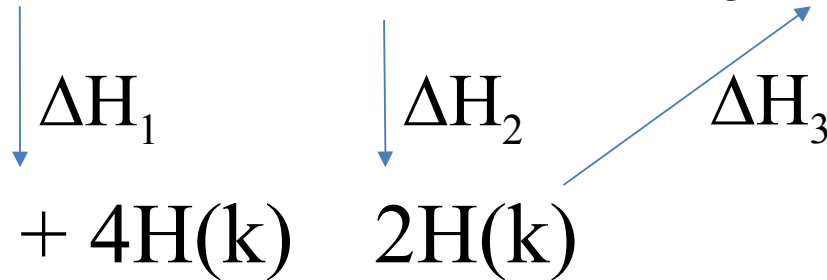
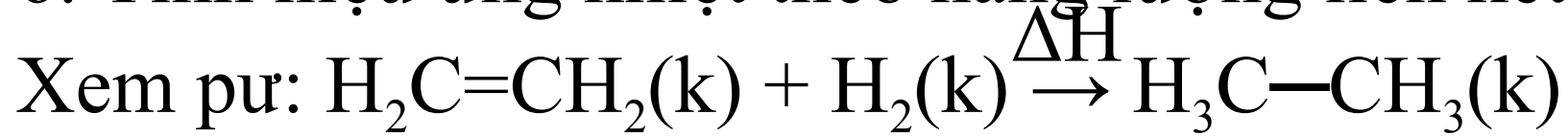
(1) + (2) – (3) → pư cần phải tính

$$\rightarrow \Delta H^\circ_{298} = \Delta H_1 + \Delta H_2 - \Delta H_3$$

$$\rightarrow \Delta H^\circ_{298} = 1 \cdot \Delta H^\circ_{\text{ch},298}[\text{C}_2\text{H}_4(\text{k})] + 1 \cdot \Delta H^\circ_{\text{ch},298}[\text{H}_2(\text{k})] \\ - 1 \cdot \Delta H^\circ_{\text{ch},298}[\text{C}_2\text{H}_6(\text{k})]$$

$$\Delta H^\circ_{298} = \sum \Delta H^\circ_{\text{ch},298}[\text{tc}] - \sum \Delta H^\circ_{\text{ch},298}[\text{sp}]$$

δ. Tính hiệu ứng nhiệt theo năng lượng liên kết.



$$\Delta H^\circ_{298} = \Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_3$$

$$\Delta H_1 = E_{\text{C}=\text{C}} + 4E_{\text{CH}}$$

$$\Delta H_2 = E_{\text{H}-\text{H}}$$

$$\Delta H_3 = -E_{\text{C}-\text{C}} + -6E_{\text{C}-\text{H}}$$

$$\Delta H^\circ_{298} = \{E_{\text{C}=\text{C}} + 4E_{\text{C}-\text{H}} + E_{\text{H}-\text{H}}\} - \{E_{\text{C}-\text{C}} + 6E_{\text{C}-\text{H}}\}$$

$$\Delta H^\circ_{298} = \sum E_{\text{đứt}} - \sum E_{\text{ráp}}$$

Xét dấu ΔH°_{298} của phản ứng:

$\Delta H^\circ_{298} < 0 \rightarrow$ pư phát nhiệt: pư dễ xảy ra.

$\Delta H^\circ_{298} > 0 \rightarrow$ pư thu nhiệt: pư khó xảy ra.

$\Delta H^\circ_{298} = 0 \rightarrow$ pư đoạn nhiệt: pư khó xảy ra.

Pư có ΔH càng $< 0 \rightarrow$ càng dễ xảy ra.

Td: pư: $\text{H}_2 + \text{X}_2 \rightarrow 2\text{HX}$ X(halogen)

F_2

Cl_2

Br_2

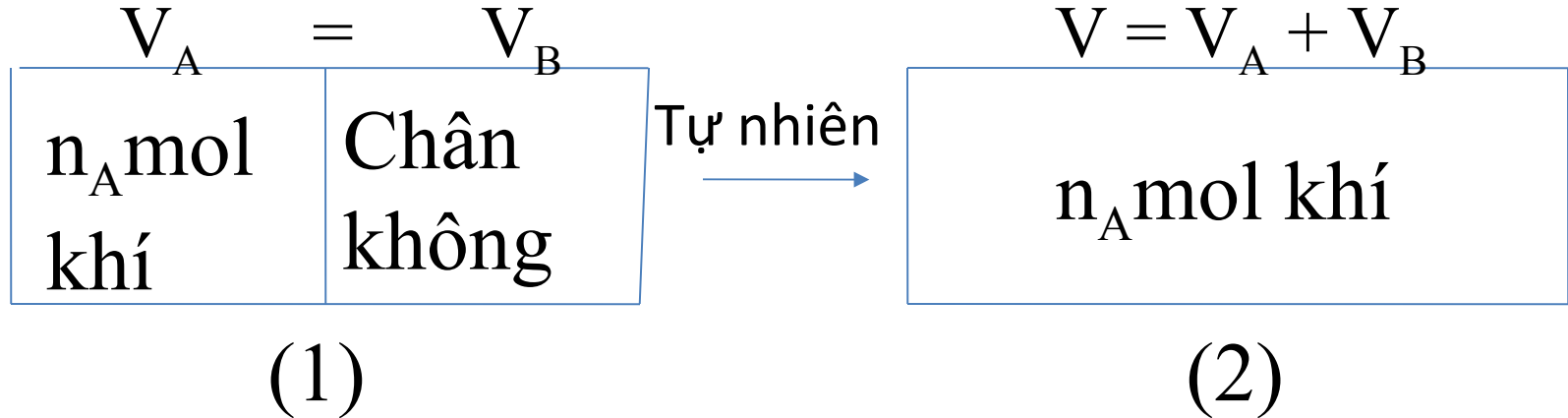
I_2



$\Delta H^\circ_{298} \uparrow \rightarrow$ pư càng khó xr

III. Nguyên lý 2 nhiệt động lực học - chiều quá trình

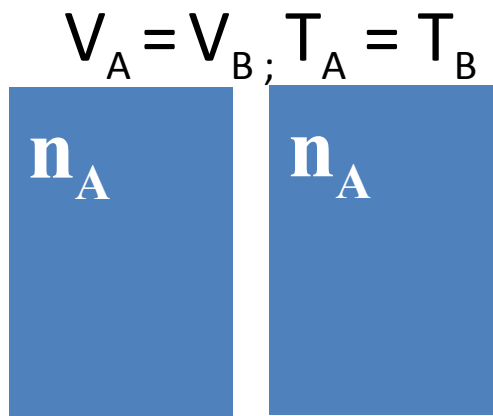
1. Nguyên lý 2 nhiệt động lực học – Entropi



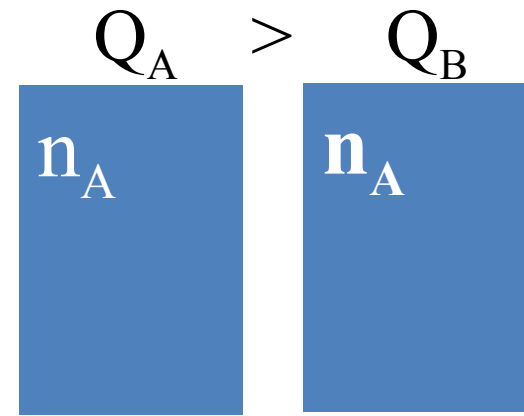
Khi hệ thực hiện quá trình từ (1) $\rightarrow$ (2) :

Độ: (tự do, xáo trộn, bất trật tự), xác suất hiện diện phân tử khí $\uparrow$

$\rightarrow$ Trong quá trình tự nhiên, hệ luôn đi từ trạng thái có độ tự do, xs hiện diện phân tử khí thấp đến trạng thái có độ tự do, xs hiện diện phân tử khí cao.

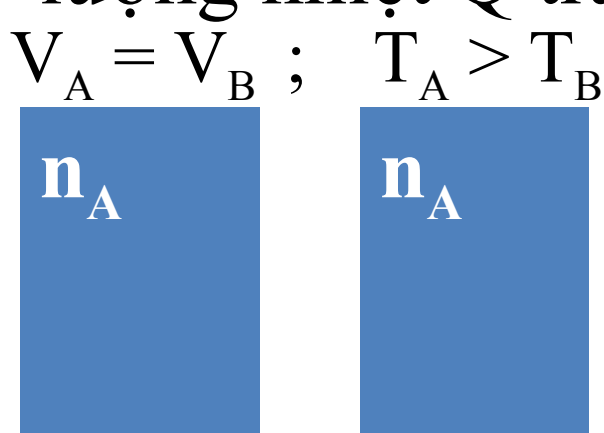


$\Delta x_{t,d}(A) = (B)$

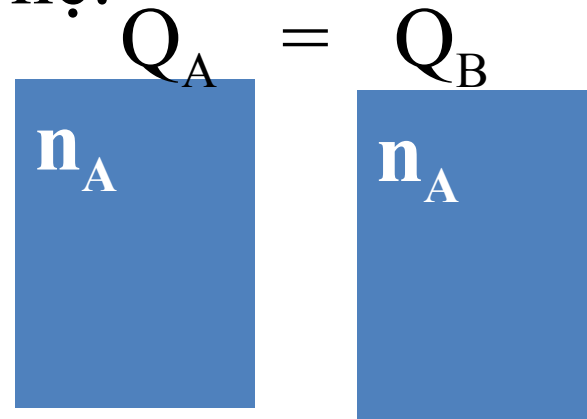


$\Delta x_{t,d}(A) \uparrow > (B)$

➔ Biến thiên của $\Delta x_{t,d}$ của hệ tỷ lệ thuận với lượng nhiệt Q trao đổi của hệ.



$\Delta t_{d}(A) > (B)$



$\Delta \Delta t_{d}(A) < (B)$

➔ $\Delta \Delta t_{d}$ của hệ tỷ lệ nghịch với nhiệt độ đang khảo sát của hệ

Vậy: Mỗi trạng thái của hệ được biểu diễn bởi 1 hàm số xác suất entropi S (entropi S là hàm số biểu diễn độ tự do, xáo trộn, bất trật tự, và xác suất hiện diện phân tử của hệ), mà biến thiên của S được cho bởi hệ thức:

$$\Delta S_{\text{hệ}} \geq \frac{Q}{T}$$

Quá trình thuận nghịch $\rightarrow \Delta S_{\text{hệ}} = Q_{\text{tn}}/T$

Quá trình tự nhiên $\rightarrow \Delta S_{\text{hệ}} > Q_{\text{ktn}}/T$

Mỗi hóa chất đều có 1 giá trị $\bar{S}^0_{298} > 0$ xác định.

Hóa chất có $S \uparrow \rightarrow$ độ tự do $\uparrow$

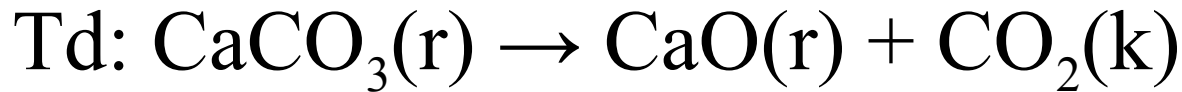
Với 1 hóa chất: $S_k > S_l > S_r$

2. Tính biến thiên entropi của 1 phản ứng.

Xem pư: $m\text{A} + n\text{B} \rightarrow p\text{C} + q\text{D}$

$$\Delta S^\circ_{298} = \{ p\bar{S}^\circ_{298}[\text{C}] + q\bar{S}^\circ_{298}[\text{D}] \} - \{ m\bar{S}^\circ_{298}[\text{A}] + n\bar{S}^\circ_{298}[\text{B}] \}$$

$$\Delta S^\circ_{298} = \sum S^\circ_{298}[\text{sp}] - \sum S^\circ_{298}[\text{tc}]$$

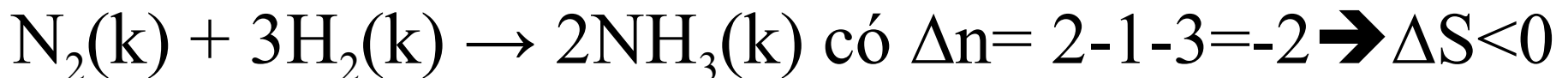


$$\Delta S^\circ_{298} = 1.\bar{S}^\circ_{298}[\text{CaO}(\text{r})] + 1.\bar{S}^\circ_{298}[\text{CO}_2(\text{k})] - 1.\bar{S}^\circ_{298}[\text{CaCO}_3(\text{r})]$$

$$\Delta S^\circ_{298} = 39,7 + 213,7 - 88,7 = 164,7 \text{ kJ/}^\circ\text{K}$$

* Có thể dự đoán dấu của ΔS dựa vào Δn của pư:

$\Delta n > 0 \rightarrow \Delta S > 0$; $\Delta n < 0 \rightarrow \Delta S < 0$; $\Delta n = 0 \rightarrow$ tính cụ thể



3. Xét dấu ΔS của pư:

Một pư có: $\left\{ \begin{array}{l} \Delta S > 0 \rightarrow \text{dễ xảy ra.} \\ \Delta S = 0 \rightarrow \text{khó xảy ra.} \\ \Delta S < 0 \rightarrow \text{khó xảy ra.} \end{array} \right.$ $\Delta S \uparrow \rightarrow \text{dễ xảy ra}$

4. Chiều của pư

Nguyên lý 1 và 2 riêng lẻ không kết luận được pư xảy ra được hay không. Do đó phải kết hợp 2 nguyên lý

Việc kết hợp 2 nguyên lý $\rightarrow$ hàm trạng thái: $G = H - TS$

G: hàm Gibbs, nl tự do, thể đẳng nhiệt đẳng áp

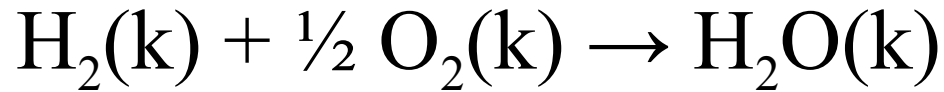
Khi hệ thực hiện quá trình từ (1) $\rightarrow$ (2) ta có:

$$\Delta G = G_2 - G_1 = (H_2 - TS_2) - (H_1 - TS_1)$$

$$\Delta G = (H_2 - H_1) - T(S_2 - S_1) = \Delta H - T\Delta S$$

$$\Delta G^\circ_T = \Delta H^\circ_T - T\Delta S^\circ_T$$

$\Delta\bar{G}^{\circ}_{tt,298}$ [hóa chất] là ΔG°_{298} của pư tạo thành 1 mol hóa chất từ các đơn chất bền ở đkc.



$$\Delta G^{\circ}_{298} = \Delta\bar{G}^{\circ}_{tt,298}[\text{H}_2\text{O}(\text{k})]$$

$$\cdot \Delta\bar{G}^{\circ}_{tt,298}[\text{đơn chất}] = 0$$

Xem pư: $m\text{A} + n\text{B} \rightarrow p\text{C} + q\text{D}$

$$\Delta G^{\circ}_{298} = \{p\Delta\bar{G}^{\circ}_{tt,298}[\text{C}] + q\Delta\bar{G}^{\circ}_{tt,298}[\text{D}]\} \\ - \{m\Delta\bar{G}^{\circ}_{tt,298}[\text{A}] + n\Delta\bar{G}^{\circ}_{tt,298}[\text{B}]\}$$

$$\Delta G^{\circ}_{298} = \sum \Delta\bar{G}^{\circ}_{tt,298}[\text{sp}] - \sum \Delta\bar{G}^{\circ}_{tt,298}[\text{tc}]$$

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

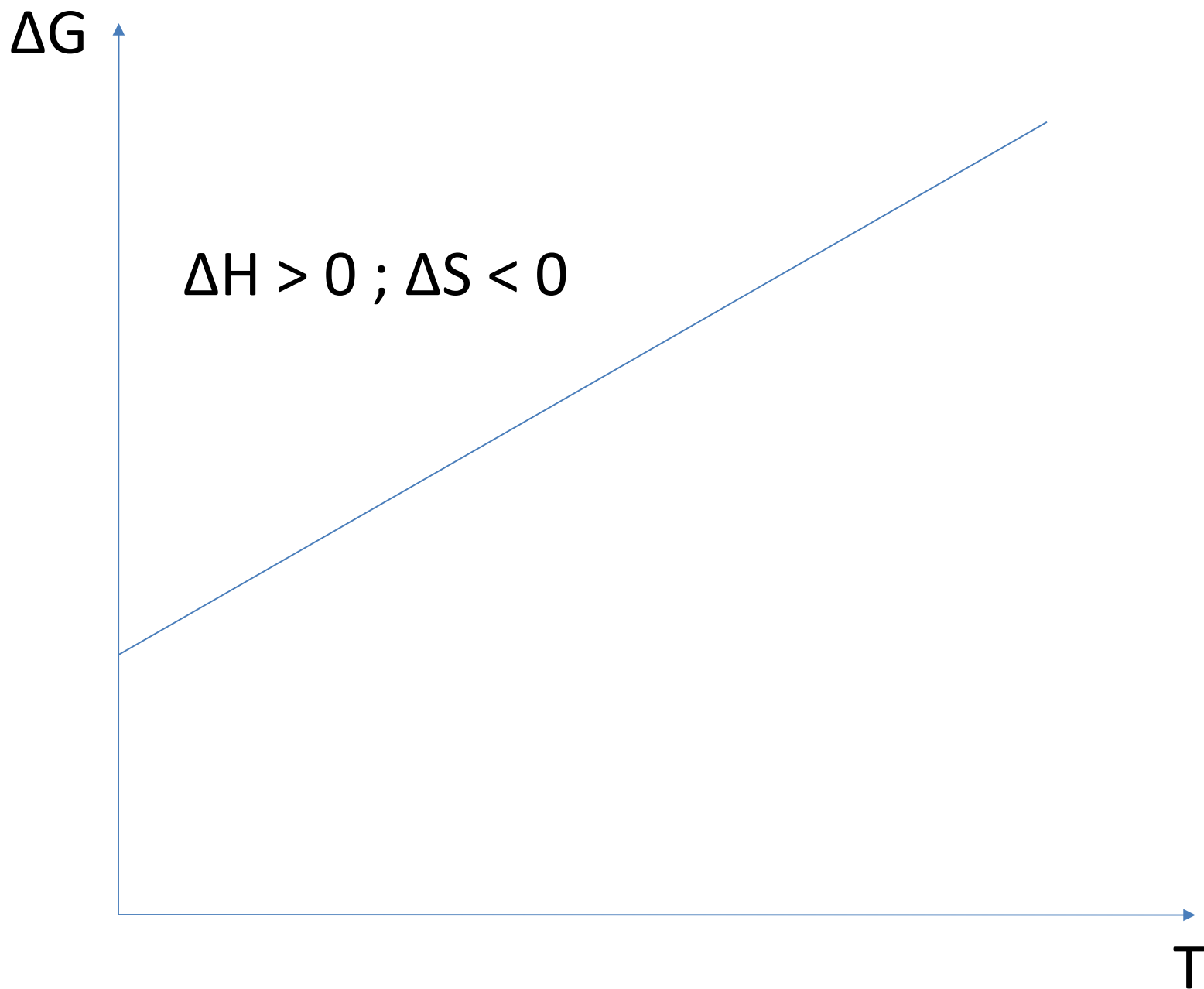
* $\Delta H < 0, \Delta S > 0 \rightarrow \Delta G < 0$: pư tự xảy ra theo chiều thuận

* $\Delta H > 0, \Delta S < 0 \rightarrow \Delta G > 0$: pư tự xảy ra theo chiều nghịch

* $\Delta H < 0, \Delta S < 0$: $\left\{ \begin{array}{l} |\Delta H| > |T\Delta S| \rightarrow \Delta G < 0: \text{pư tự xr } (\rightarrow). \\ |\Delta H| < |T\Delta S| \rightarrow \Delta G > 0: \text{pư tự xr } (\leftarrow). \\ |\Delta H| = |T\Delta S| \rightarrow \Delta G = 0: \text{pư } (\rightleftharpoons) \end{array} \right.$

* $\Delta H > 0, \Delta S > 0$: $\left\{ \begin{array}{l} |\Delta H| > |T\Delta S| \rightarrow \Delta G > 0: \text{pư tự xr } (\leftarrow) \\ |\Delta H| < |T\Delta S| \rightarrow \Delta G < 0: \text{pư tự xr } (\rightarrow) \\ |\Delta H| = |T\Delta S| \rightarrow \Delta G = 0: \text{pư } (\rightleftharpoons) \end{array} \right.$

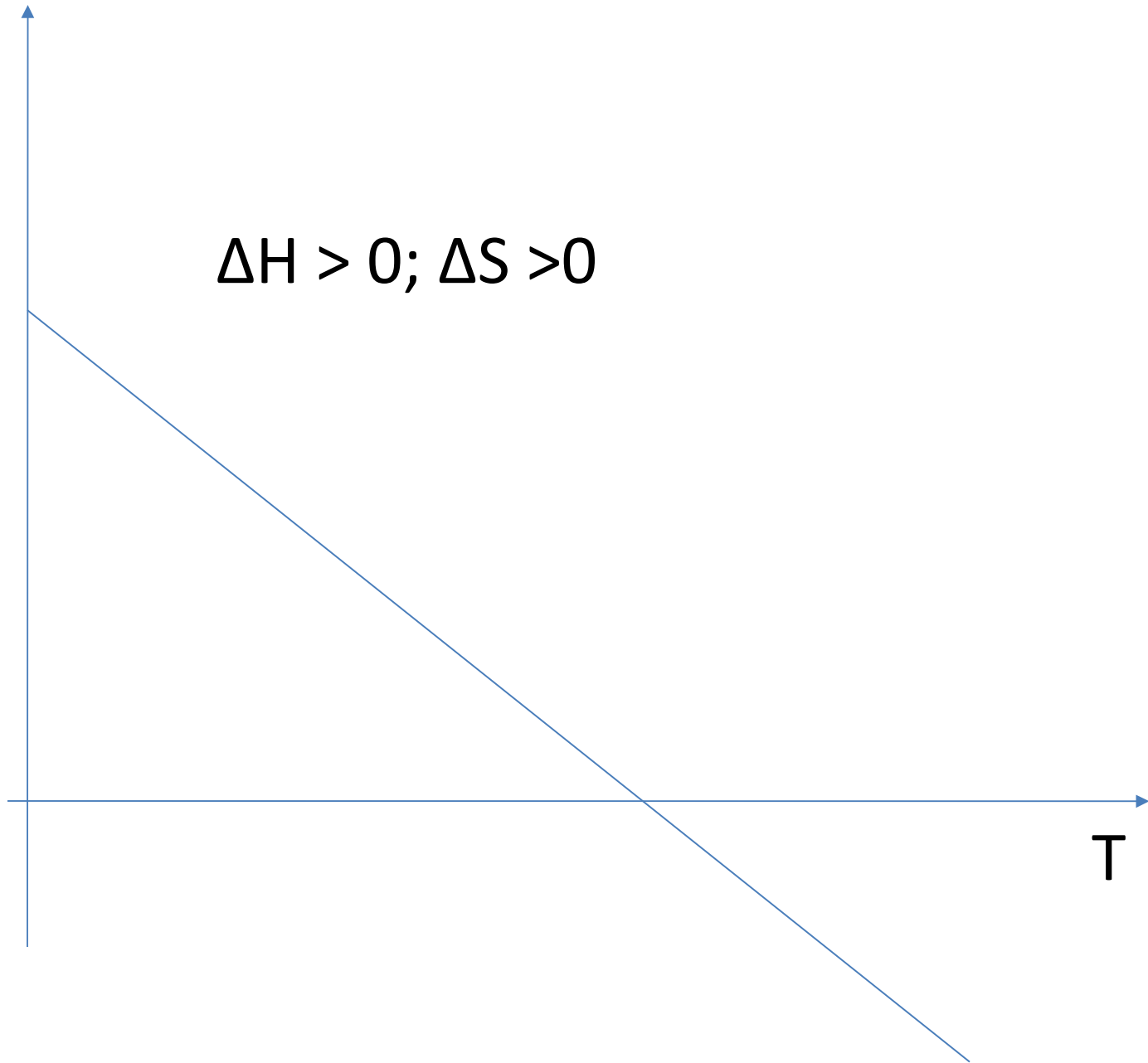
Vẽ đường biểu diễn ΔG theo T ta có:



ΔG

$\Delta H > 0; \Delta S > 0$

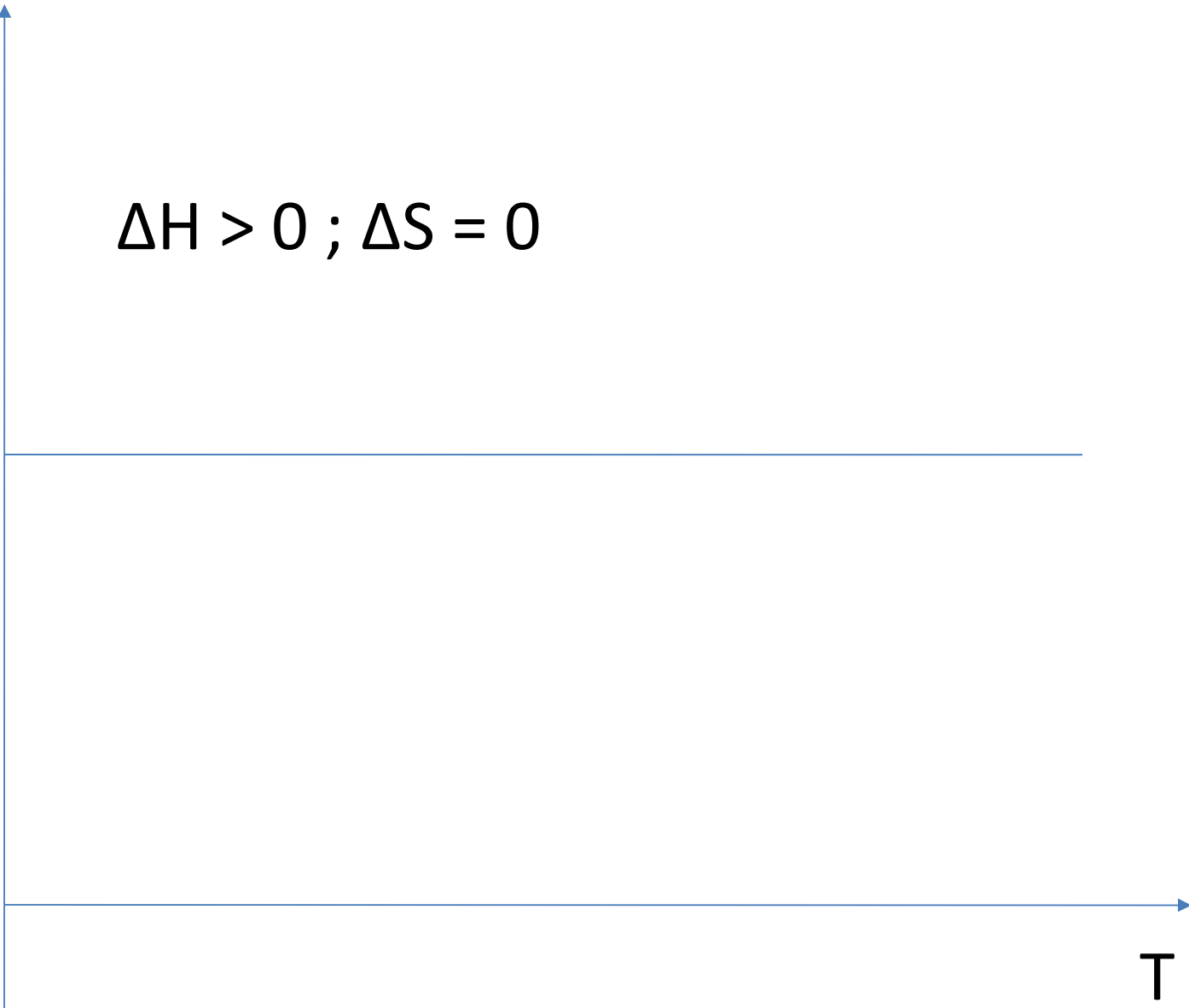
T



ΔG

$\Delta H > 0 ; \Delta S = 0$

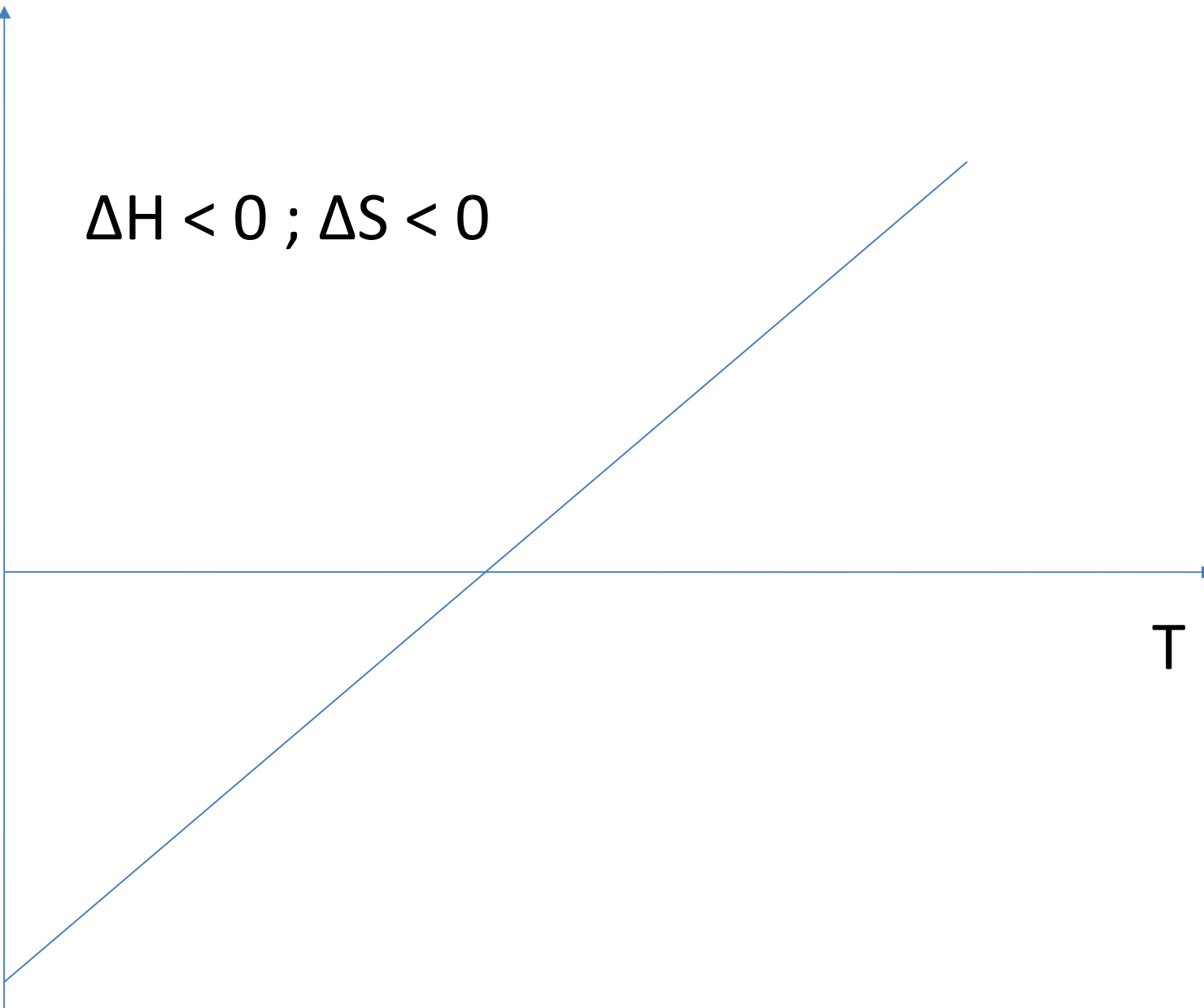
T



ΔG

$\Delta H < 0 ; \Delta S < 0$

T



The graph shows a linear relationship between Gibbs free energy change (ΔG) and temperature (T). The vertical axis is labeled ΔG and the horizontal axis is labeled T . A straight line with a positive slope starts at a negative value on the ΔG axis and crosses the T axis at a positive temperature. The text $\Delta H < 0 ; \Delta S < 0$ is located in the upper left quadrant of the graph.

