**נכתב ע"י סאלח עלי, תיכון בית ירח**

**נערך ונבדק ע"י שלי ליבנה, מרכז ארצי למורי הכימיה**

**חוקי התרמודינמיקה**

**החוק הראשון של התרמודינמיקה** ∆U= qp + w
האנרגיה הפנימית של מערכת מבודדת היא קבועה.

א. התגובה מתרחשת בלחץ קבוע: qp = ∆H
 ∆U= ∆H + w

ב. התגובה מתרחשת בנפח קבוע: ∆U= qv

**החוק השני של התרמודינמיקה**

1. (סביבה) ∆S˚ + (מערכת) ∆S˚ =(יקום) ∆S˚
2. $\frac{ΔH°}{T}$- (מערכת) ∆S˚ =(יקום) ∆S˚

∆S˚(*מערכת*) = ∑S˚*(תוצרים)* - ∑S˚ *(מגיבים)*

∆S = (סביבה) - $\frac{ΔH°}{T}$

1. (יקום)G˚ = -T∆S˚∆
2. (מערכת)G˚(T) = ∆H˚ - T∆S˚∆
3. = $\frac{∆H°}{∆S°\_{(מערכת)}}$(היפוך) T
4. $∆S˚\_{(מערכת)}=\frac{ΔH°- ∆G°}{T}$
5. תגובה ספונטנית כאשר: G˚(T) < 0∆ או 0 >(יקום) ∆S˚
תגובה לא ספונטנית כאשר: G˚(T) > 0∆ או 0 <(יקום) ∆S˚
מצב שבו התגובה עוברת ממצב ספונטני ללא ספונטני: G˚(T) $=$ 0∆ או 0 $=$(יקום) ∆S˚

**הסבר על סימון:** ∆H˚ ו-∆S˚ הם ערכים שנמדדו בתנאים תקניים של 1 אטמ' וטמפרטורה של 298K. הערך של G˚∆ יכול להיות מחושב בטמפרטורות שונות לפי נוסחה ד' ולכן בחרנו לכתוב אותו כ- (G˚(T∆ ולציין בכל חישוב את הטמפרטורה בסוגריים.

**דוגמאות פתורות**

**עבור כל אחד מהתגובות הבאות ענה על שאלות 1-6**

**נתונים: טבלת ערכי האנטרופיה בעמוד האחרון**

**מצב A**

2H2O2 (aq) → 2H2O (ℓ) + O2 (g)  ∆H˚= -191.1 kJ

2H2O2 (aq) 🡪 2H2O (l) + O2 (g)  ∆H˚= -191.1 KJ

**מצב B**

N2 (g) + 2O2 (g) → 2NO2 (g) ∆H˚= +66.36 kJ

N2 (g) + 2O2 (g) 🡪 2NO2 (g) ∆H˚= +66.36 KJ

**מצב C**

CH4 (g) + H2O (g) → CO2 (g) + 3H2 (g) ∆H˚= +205.8 kJ

CH4 (g) + H2O (g) 🡪 CO2 (g) + 3H2 (g) ∆H˚= +205.8

**מצב D**

N2 (g) + 3H2 (g) → 2NH3 (g) ∆H˚= -92.22 kJ

N2 (g) + 3H2 (g) 🡪 2NH3 (g) ∆H˚= -92.22 KJ

**שאלות:**

1. א. מי מבצע את העבודה: המערכת או הסביבה? נמקו את תשובותיכם.
ב. חשבו את ערכה של העבודה (w).
2. א. חשבו את השינוי באנרגיה הפנימית (∆U) כשהתגובה מתרחשת בלחץ קבוע.
ב. חשבו את האנרגיה שעוברת בצורת חום כשהתגובה מתרחשת בנפח קבוע.
ג. ציירו גרף מתאים כולל ∆U, w,qp .
3. א. מהו סימנו של (מערכת) ∆S˚? נמקו.
ב. חשבו את (מערכת) ∆S˚.
4. א. חשבו את (יקום) ∆S˚וקבעו אם התגובה ספונטנית.
ב. מהו תחום הטמפרטורה שבו התגובה ספונטנית? נמקו.
5. א. חשבו את ∆G˚(298K) לתגובה וקבעו אם התגובה ספונטנית.
ב. מהו תחום הטמפרטורות שבו התגובה ספונטנית? נמקו.
6. א. ציירו גרף של ∆G˚(T) כנגד הטמפרטורה (T).
ב. קבע את סימנו של (מערכת) ∆S˚לפי הגרף וחשבו את ערכו.
ג. קבעו את ∆H˚ מהגרף. נמקו.

**תשובות:**

**מצב A**

2H2O2 (aq) → 2H2O(ℓ) + O2 (g)  ∆H˚= -191.1 kJ

1. א. המערכת מבצעת עבודת התפשטות על הסביבה.
 מספר מולי הגז עלה מ-0 ל-1, 0$>$ (גזים). ∆n

ב.

w= -∆nRT
 = - (1 mol) × 8.31 $\frac{J}{mol×˚K} $× 298K
 = -2476 J = -2.476 kJ

1. א.

∆U= qp + w
∆U= ∆H + w
 = (-191.1 kJ) + (-2.476 kJ) = -193.576 kJ

ב.

w=o

qv= ∆U

qv= -193.576 kJ

ג.

U∆

qp = -191.1kJ

U1

U= -193.576 kJ∆

w= -2.476 kJ

u= -193.576 KJ∆

U2

1. א. מספר מולי הגז עלה מ-0 ל-1, לכן 0$>$ (מערכת). ∆S˚

ב.

∆S˚ (*מערכת*) = ∑S˚*(תוצרים)* - ∑S˚ *(מגיבים)* = 2×S˚(H2O(ℓ)) + S˚(O2 (g)) – 2×S˚(H2O2(aq))

= [(2 mol × 69.91$\frac{J}{mol×K}$) + (1 mol × 205.14$\frac{J}{mol×K}$)] - (2 mol × 109.6$\frac{J}{mol×K}$)

 = +125.76 $\frac{J}{K}$

1. א.

∆S˚ = (סביבה) - $\frac{ΔH°}{T}$= -$\frac{(-191.1 ×10^{3} J)}{298K}=641.27 \frac{J}{K} $

∆S˚ (יקום) = ∆S˚ (מערכת) + ∆S˚ (סביבה)

 = (+125.76$\frac{J}{K}$ ) + (+641.27$\frac{J}{K}$ ) = +767.04 $\frac{J}{K}$

 התגובה היא ספונטנית בטמפרטורה K298 מכיוון ש- 0 > (יקום) ∆S˚

ב. כאשר: 0 > (מערכת) ∆S˚ *ו-* ∆H˚ < 0, 0 > (יקום) ∆S˚ולכן התגובה ספונטנית בכל טמפ'.

$\frac{ΔH°}{T}=\left(+\right)-\left(-\right)=(+) $- (מערכת) ∆S˚ =(יקום) ∆S˚

1. א.

(מערכת)G˚(298K) = ∆H˚ -T∆S˚∆
 = -191.1 × $10^{3}$ J -298K × 125.76 $\frac{J}{K}$ = -228576.48 J = -228.576 kJ

ב. כאשר: 0 > (מערכת) ∆S˚ *ו-* ∆H˚ < 0, 0 ∆G˚(T) < ולכן התגובה ספונטנית בכל טמפ'.

$=\left(-\right)-T\left(+\right)=(-)$ (מערכת)G˚(T) = ∆H˚ - T∆S˚∆

1. א.

∆G˚(T) (kJ)

K298

T (K)



∆H˚= -191.1 kJ

-228.576 kJ



ב. שיפוע הקו = (מערכת) -∆S˚
 השיפוע שלילי לכן 0 <(מערכת) .∆S˚

∆S˚ = (מערכת) $\frac{ΔH°- ∆G°}{T}= \frac{\left(-191.1 × 10^{3}J\right)- (-228.576 × 10^{3}J)}{298K}=125.76 \frac{J}{K}$

ג. כשהטמפ' היא 0K, נק' החיתוך עם ציר y מייצגת את ∆H˚ מכיוון ש- G˚(0K) = ∆H˚∆.

**מצב B**

N2 (g) + 2O2 (g) → 2NO2 (g) ∆H˚= +66.36 kJ

N2 (g) + 2O2 (g) 🡪 2NO2 (g) ∆H˚= +66.36 KJ

1. א. הסביבה מבצעת עבודת דחיסה על המערכת.
 מספר מולי הגז ירד מ-3 ל-2, $=-1 $ (גזים). ∆n

ב.

w= -∆nRT
 = - (-1 mol) × 8.31 $\frac{J}{mol×K} $× 298K
 = +2476 J = +2.476 kJ

1. א.

∆U= qp + w
∆U= ∆H + w
 = (+66.36 kJ) +2.476 kJ = +68.836 kJ

ב.

w=o

qv= ∆U

qv= +68.836 kJ

ג.

U∆

w= +2.476 kJ

U2

U= +68.836 kJ∆

qp = +66.36kJ

U1

1. א. מספר מולי הגז ירד מ-3 ל-2, לכן 0$< $(מערכת). ∆S˚

ב.

∆S˚ (*מערכת*) = ∑S˚*(תוצרים)* - ∑S˚ *(מגיבים)*= 2×S˚(NO2 (g)) – [S˚(N2 (g)) + 2×S˚(O2 (g))]

= (2 mol × 240.06$\frac{J}{mol×K}$) – [(1 mol × 191.61$\frac{J}{mol×K}$) + (2 mol × 205.14$\frac{J}{mol×K}$)]

 = -121.77 $\frac{J}{K}$

1. א.

∆S˚ = (סביבה) - $\frac{ΔH°}{T}$= -$\frac{(+66.36 ×10^{3} J)}{298K}=-222.68 \frac{J}{K} $

∆S˚ (יקום) = ∆S˚ (מערכת) + ∆S˚ (סביבה)

 = (-121.77$\frac{J}{K}$ ) + (-222.68$\frac{J}{K}$ ) = -344.45 $\frac{J}{K}$

התגובה לא ספונטנית בטמפרטורה K298 מכיוון ש- 0 < (יקום) ∆S˚

ב. כאשר: 0 < (מערכת) ∆S˚ *ו-* ∆H˚ > 0, 0 < (יקום) ∆S˚ולכן התגובה לא ספונטנית באף טמפ'.

$\frac{ΔH°}{T}=\left(-\right)-\left(+\right)=(-)$- (מערכת) ∆S˚ =(יקום) ∆S˚

1. א.

(מערכת)G˚(298K) = ∆H˚ - T∆S˚∆
 = 66.36 × $10^{3}$ J - 298K × -121.77 $\frac{J}{K}$ = 102647 J = 102.65 kJ

 ב. כאשר: 0 < (מערכת) ∆S˚ *ו-* ∆H˚ > 0, 0 ∆G˚(T) >ולכן התגובה לא ספונטנית באף טמפ'.

$=\left(+\right)-T\left(-\right)=(+)$ (מערכת)G˚(T) = ∆H˚ -T∆S˚∆

1. א.

∆G˚(T) (kJ)



+102.65 kJ



∆H˚= +66.36 kJ

T (K)

298K

ב. שיפוע הקו = (מערכת) -∆S˚
 השיפוע חיובי לכן 0 >(מערכת) .∆S˚

∆S˚ = (מערכת) $\frac{ΔH°- ∆G°}{T}= \frac{\left(+66.36 × 10^{3}J\right)- (+102.65 × 10^{3}J)}{298K}=-121.77 \frac{J}{K}$

ג. כשהטמפ' היא 0K, נק' החיתוך עם ציר y מייצגת את ∆H˚ מכיוון ש- G˚(0K) = ∆H˚∆.

**מצב C**

CH4 (g) + H2O (g) → CO2 (g) + 3H2 (g) ∆H˚= +205.8 kJ

CH4 (g) + H2O (g) 🡪 CO2 (g) + 3H2 (g) ∆H˚= +205.8 KJ

1. א. המערכת מבצעת עבודת התפשטות על הסביבה.
 מספר מולי הגז עלה מ-2 ל-4, 0$>$ (גזים). ∆n

ב.

w= -∆nRT
 = - (2 mol) × 8.31 $\frac{J}{mol×˚K} $× 298K
 = -4953 J = -4.953 kJ

1. א.

∆U= qp + w
∆U= ∆H + w
 = 205.8 KJ + (-4.953 kJ) = +200.85 kJ

ב.

w=o

qv= ∆U

qv= +200.85 kJ

ג.

U∆

w= -4.953 kJ

U2

qp = +205.86kJ

U= +200.85 kJ∆

U1

1. א. מספר מולי הגז עלה מ-2 ל-4, לכן 0$>$ (מערכת). ∆S˚

ב.

∆S˚ (*מערכת*) = ∑S˚*(תוצרים)* - ∑S˚ *(מגיבים)*= S˚(CO2 (g)) + 3S˚(H2 (g)) – [S˚(CH4(g)) + S˚(H2O(g))]

 = [(1 mol × 213.74$\frac{J}{mol×K}$) + (3 mol × 130.68$\frac{J}{mol×K}$)]
 – [(1 mol × 186.26$\frac{J}{mol×K}$) + (1 mol × 188.83$\frac{J}{mol×K}$)]

 = +230.69$ \frac{J}{K}$

1. א.

∆S˚ = (סביבה) - $\frac{ΔH°}{T}$= -$\frac{(+205.8 ×10^{3} J)}{298K}=-690.60 \frac{J}{K} $

∆S˚ (יקום) = ∆S˚ (מערכת) + ∆S˚ (סביבה)

 = (+230.69$\frac{J}{K}$ ) + (-690.60$\frac{J}{K}$ ) = -459.91 $\frac{J}{K}$

 התגובה לא ספונטנית בטמפרטורה K298 מכיוון ש- 0 < (יקום) ∆S˚

$\frac{ΔH°}{T}=\left(+\right)-\left(+\right) $- (מערכת) ∆S˚ =(יקום) ∆S˚

 התגובה ספונטנית בטמפ' גבוהה.

ב.

∆S˚ = 0 *(יקום)*

T *(היפוך)* = $\frac{ΔH°}{ΔS˚מערכת} $=$ \frac{+205.81×10^{3}J}{+230.69 \frac{J}{K}}$ = 892.15K

אם : 0 < (מערכת) ∆S˚ *ו-* ∆H˚ > 0, אז : 0 > (יקום) ∆S *כאשר* T > 958.95K

*תחום ספונטניות:* T > 892.15K

1. א.

(מערכת)G˚(298K)= ∆H˚ -T∆S˚∆
 = 205.81 × $10^{3}$ J -298K × 230.69$ $ $\frac{J}{K}$ = 137064 J = 137.06 kJ

 ב.

$=\left(+\right)-T\left(+\right)=\left(-\right) גבוהה בטמפ'$ (מערכת)G˚(T) = ∆H˚ - T∆S˚∆

*מהי* T *שעבורה:*∆G˚(T) = 0

T *(היפוך)* = $\frac{ΔH°}{ΔS˚מערכת} $=$ \frac{+205.81×10^{3}J}{+230.69 \frac{J}{K}}$ = 892.15K

 *תחום ספונטניות:* T > 892.15K

1. א.

∆G˚(T) (kJ)

∆H˚= +205.8 kJ



137.06 kJ



892.15K

298K

T (K)

ב. שיפוע הקו = (מערכת) -∆S˚
 השיפוע שלילי לכן 0 <(מערכת) .∆S˚

∆S˚ = (מערכת) $\frac{ΔH°- ∆G°}{T}= \frac{\left(+205.8 × 10^{3}J\right)- (+137.06 × 10^{3}J)}{298K}=+230.67 \frac{J}{K}$

ג. כשהטמפ' היא 0K, נק' החיתוך עם ציר y מייצגת את ∆H˚ מכיוון ש- G˚(0K) = ∆H˚∆.

**מצב D**

N2 (g) + 3H2 (g) → 2NH3 (g) ∆H˚= -92.22 kJ

N2 (g) + 3H2 (g) 🡪 2NH3 (g) ∆H˚= -92.22 KJ

1. א. הסביבה מבצעת עבודת דחיסה על המערכת.
 מספר מולי הגז ירד מ-4 ל-2, 0$< $ (גזים). ∆n

ב.

w= -∆nRT
 = - (-2 mol) × 8.31 $\frac{J}{mol×K} $× 298K
 = +4953 J = +4.95 kJ

1. א.

∆U= qp + w
∆U= ∆H + w
 = (-92.22 kJ) +4.95 kJ = -87.27 kJ

ב.

w=o

qv= ∆U

qv= -87.27 kJ

ג.

U∆

U1

qp = -92.22kJ

U= -87.27 kJ∆

U2

w= +4.95 kJ

1. א. מספר מולי הגז ירד מ-4 ל-2, לכן 0$< $(מערכת). ∆S˚

ב.

∆S˚ (*מערכת*) = ∑S˚*(תוצרים)* - ∑S˚ *(מגיבים)* = 2×S˚(NH3 (g)) – [S˚(N2 (g)) + 3×S˚(H2 (g))]

= (2 mol × 192.45$\frac{J}{mol×K}$) – [(1 mol × 191.61$\frac{J}{mol×K}$) + (3 mol × 130.68$\frac{J}{mol×K}$)]

 = -198.75 $\frac{J}{K}$

1. א.

∆S˚ = (סביבה) - $\frac{ΔH°}{T}$= -$ \frac{(-92.22 ×10^{3} J)}{298K}=+309.46 \frac{J}{K} $

∆S˚ (יקום) = ∆S˚ (מערכת) + ∆S˚ (סביבה) = (-198.75$\frac{J}{K}$ ) + (+309.46$\frac{J}{K}$ ) = 110.71 $\frac{J}{K}$

 התגובה ספונטנית בטמפרטורה K298 מכיוון ש- 0 > (יקום) ∆S˚

ב. $\frac{ΔH°}{T}=\left(-\right)-\left(-\right) $- (מערכת) ∆S˚ =(יקום) ∆S˚

 התגובה ספונטנית בטמפ' נמוכה.

∆S = 0 *(יקום)*

T *(היפוך)* = $\frac{ΔH°}{ΔS˚מערכת} $=$ \frac{-92.22×10^{3}J}{-198.75\frac{J}{K}}$ = +464K

אם : 0 < (מערכת) ∆S˚ *ו-* ∆H˚ < 0, אז : 0 > (יקום) ∆S *כאשר* T < 464K

*תחום ספונטניות:* T < 464K

1. א.

(מערכת)G˚(298K) = ∆H˚ -T∆S˚∆
 = -92.22 × $10^{3}$ J - 298K × (-198.75$\frac{J}{K}$) = -32992.5 J = -33 kJ

 ב.

$=\left(-\right)-T\left(-\right)=\left(-\right) נמוכה בטמפ'$ (מערכת)G˚(T) = ∆H˚ - T∆S˚∆

*מהי*  T*שעבורה:*∆G˚(T) = 0

T *(היפוך)* = $\frac{ΔH°}{ΔS˚\_{מערכת}}$ = $\frac{-92.22×10^{3}J}{-198.75\frac{J}{K}}$ = +464K

*תחום ספונטניות:* T < 464K

1. א.

∆G˚(T) (kJ)

298K

464K

T (K)



-33 kJ



∆H˚= -92.22 kJ

ב. שיפוע הקו = (מערכת) -∆S˚
 השיפוע חיובי לכן 0 >(מערכת) .∆S˚

∆S˚ = (מערכת) $\frac{ΔH°- ∆G°}{T}= \frac{\left(-92.22 × 10^{3}J\right)- (-33 × 10^{3}J)}{298K}=-198.73 \frac{J}{K}$

ג. כשהטמפ' היא 0K, נק' החיתוך עם ציר y מייצגת את ∆H˚ מכיוון ש- G˚(0K) = ∆H˚∆.

**תרגול**

ענו על השאלות המופיעות בדוגמאות לגבי כל אחת מהתגובות הבאות:

**מצב A**

1. HgS (s) + O2 (g) → Hg (ℓ) + SO2 (g) ∆H˚= -238.63 kJ
2. N2H4 (ℓ) + 2H2O2 (ℓ) → N2 (g) + 4H2O (g) ∆H˚= -642.36 kJ
3. 2NH4NO3 (s) → 2N2 (g) + 4H2O (g) + O2 (g) ∆H˚= -236.16 kJ

**מצב B**

1. 3O2 (g) → 2O3 (g) ∆H˚= +285.4 kJ
2. N2(g) + 2H2 (g) → N2H4 (ℓ) ∆H˚= +50.63 kJ

**מצב C**

1. CH4 (g) + CO2 (g) → 2CO(g) + 2H2 (g) ∆H˚= +247.26 kJ
2. Fe2O3(s) + 3H2(g) → 2Fe (s) + 3H2O (g) ∆H˚= +98.74 kJ
3. SiO2 (s) + 2C (גרפיט) + 2Cl2 (g) → SiCl4 (g) + 2CO (g) ∆H˚= +32.84 kJ

**מצב D**

1. 2H2S(g) + SO2 (g) → 3S(s) + 2H2O (ℓ) ∆H˚= -233.57 kJ
2. NH3(g) + HCl (g) → NH4Cl (s) ∆H˚= -176.01 kJ
3. 4HCl(g) + O2 (g) → 2H2O (ℓ) + 2Cl2 (g) ∆H˚= -202.42 kJ
4. C2H4 (g) + 3O2 (g) → 2CO2 (g) + 2H2O (ℓ) ∆H˚= -1306.42 kJ

**נתונים**

|  |  |
| --- | --- |
| S˚ ($\frac{J}{mol×°K})$ |  חומר |
| 82.4 | HgS (s) |
| 205.14 | O2 (g) |
| 76.02 | Hg (ℓ) |
| 248.22 | SO2 (g) |
| 121.21 | N2H4 (ℓ) |
| 109.6 | H2O2 (ℓ) |
| 191.61 | N2 (g) |
| 240.06 | NO2 (g) |
| 188.83 | H2O(g) |
| 69.91 | H2O(ℓ) |
| 151.08 | NH4NO3 (s) |
| 238.93 | O3 (g) |
| 130.68 | H2 (g) |
| 186.26 | CH4 (g) |
| 213.74 | CO2 (g) |
| 197.67 | CO (g) |
| 87.4 | Fe2O3 (s) |
| 27.28 | Fe (s) |
| 41.84 | SiO2 (s) |
| 5.74 | C (גרפיט) |
| 223.07 | Cl2 (g) |
| 330.6 | SiCl4 (g) |
| 205.79 | H2S (g) |
| 248.22 | SO2 (g) |
| 31.8 | S (s) |
| 192.45 | NH3 (g) |
| 186.91 | HCl (g) |
| 94.6 | NH4Cl (s) |
| 219.56 | C2H4 (g) |