

التطورات الرتيبية

الجزء الأول

تطور كميات مادة المتفاعلات والنواتج خلال تحول كيميائي في محلول مائي

الوحدة 01

GUEZOURI Aek – Lycée Maraval - Oran حلول تمارين الكتاب المدرسي

التمرين 18

ملاحظة : في هذا التمرين يجب أن يكون $[S_i] > [S]$.

استبدل التركيز الابتدائي للسكراروز : $[S_i] = 0,2 \text{ mol/L}$

استبدل الجدول :

t(mn)	0	200	400	600	800	1000	2000
S (mmol/L)	200	100	50	25	12,5	6,2	3,1
Y = [S _i] - [S] (mmol/L)							

1 - جدول التقدّم :

معادلة التفاعل	$C_{12}H_{22}O_{11} (aq) + H_2O (l) \rightarrow C_6H_{12}O_6 (aq) + C_6H_{12}O_6 (aq)$				
حالة الجملة	التقدم	كمية المادة (mol)			
الحالة الابتدائية	0	n_0	زيادة	0	0
الحالة الانتقالية	x	$n_0 - x$	زيادة	x	x
الحالة النهائية	x_{max}	$n_0 - x_{max}$	زيادة	x_{max}	x_{max}

2 - سرعة التفاعل مفهوم يتجانس مع كمية مادة مقسومة على زمن . تتناسب سرعة التفاعل في كل لحظة مع مشتق التقدّم بالنسبة للزمن ، وهو ميل المماس في اللحظة t .

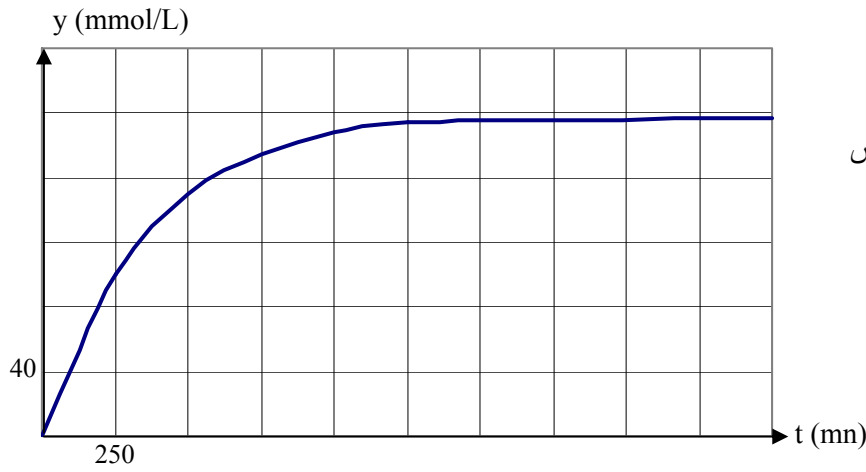
المطلوب هنا أن نبيّن أن السرعة الحجمية للتفاعل هي $\frac{dy}{dt}$.

لدينا و $[S] = \frac{n_0 - x}{V}$ ، ولدينا كذلك $y = [S_i] - [S]$ ، ومنه : $\frac{dy}{dt} = \frac{d([S_i] - [S])}{dt} = \frac{1}{V} \frac{dx}{dt}$

الكمية $y = [S_i] - [S]$ هي التركيز المولي للسكراروز في اللحظة t ، حيث : $y = \frac{n_0}{V} - \frac{n_0 - x}{V} = \frac{x}{V}$.

3 - الجدول :

t (mn)	0	200	400	600	800	1000	2000
y (mmol/L)	0	100	150	175	187,5	193,8	196,9

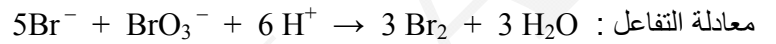


$$y = \frac{x}{V} \text{ لدينا}$$

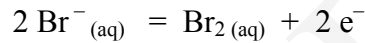
$$x(t) = V y(t) \text{ أي}$$

4 - نلاحظ أنه كلما يزداد تقدم التفاعل تتناقص السرعة الحجمية للتفاعل .

التمرين 19



للمزيد : الثنائياتان هما : $\text{Br}_2 / \text{Br}^-$ و $\text{BrO}_3^- / \text{Br}_2$



1 - جدول التقدم

معادلة التفاعل	$5\text{Br}^- (\text{aq}) + \text{BrO}_3^- (\text{aq}) + 6\text{H}^+ \rightarrow 3\text{Br}_2 (\text{aq}) + 3\text{H}_2\text{O} (\text{l})$					
حالة الجملة	التقدم	كمية المادة (mol)				
الحالة الابتدائية	0	$n_0(\text{Br}^-)$	$n_0(\text{BrO}_3^-)$	$n_0(\text{H}^+)$	0	زيادة
الحالة الانتقالية	x	$n_0(\text{Br}^-) - 5x$	$n_0(\text{BrO}_3^-) - x$	$n_0(\text{H}^+) - 6x$	3x	زيادة
الحالة النهائية	x_{max}	$n_0(\text{Br}^-) - 5x_{\text{max}}$	$n_0(\text{BrO}_3^-) - x_{\text{max}}$	$n_0(\text{H}^+) - 6x_{\text{max}}$	$3x_{\text{max}}$	زيادة

حصول المادة معناه التركيب المولي للمزيج (كمية المادة لكل متفاعل ولكل ناتج)

عند اللحظة $t = 0$

الفرد الكيميائي	Br^-	BrO_3^-	H^+	Br_2	H_2O
كمية المادة (mol)	12	2	12	0	زيادة

عند اللحظة $t = t_{1/2}$ (زمن نصف التفاعل)

نبحث أولاً عن المتفاعل المحدد، بحيث نعلم عدد مولات كل متفاعل ونأخذ أصغر قيمة لـ x .

$$n_0(\text{Br}^-) - 5x = 0 \Rightarrow x = 2,4 \text{ mol}$$

$$n_0(\text{BrO}_3^-) - x = 0 \Rightarrow x = 2 \text{ mol}$$

$$n_0(\text{H}^+) - 6x = 0 \Rightarrow x = 2 \text{ mol}$$

المتفاعلات المحددان هما : BrO_3^- و H^+ ، ومنه $x_{\text{max}} = 2 \text{ mol}$

عند زمن نصف التفاعل تكون لدينا نصف قيمة x_{max} ، أي : $\frac{x_{max}}{2} = 1 \text{ mol}$ ، وبالتالي يكون التركيب المولي للمزيج :

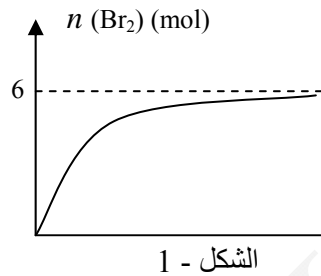
الفرد الكيميائي	Br^-	BrO_3^-	H^+	Br_2	H_2O
كمية المادة (mol)	$12 - 5 = 7$	$2 - 1 = 1$	$12 - 6 = 6$	$3 \times 1 = 3$	زيادة

$t \rightarrow \infty$

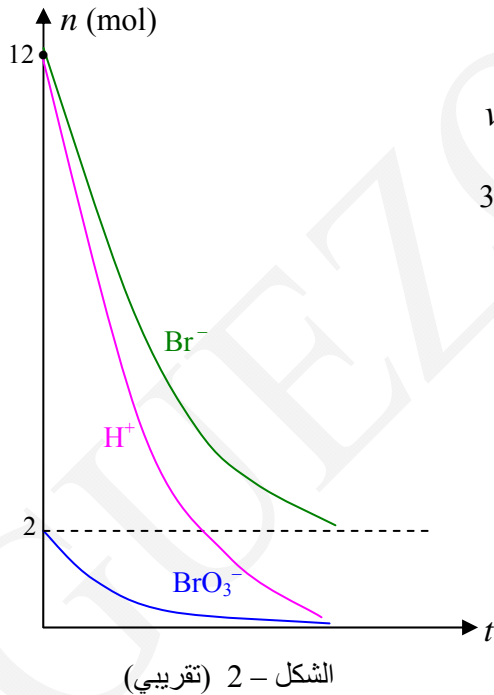
عند نهاية التفاعل يكون $x = x_{max}$ ، ويكون حينئذ التركيب المولي للمزيج :

الفرد الكيميائي	Br^-	BrO_3^-	H^+	Br_2	H_2O
كمية المادة (mol)	$12 - 10 = 2$	0	0	$3 \times 2 = 6$	زيادة

2 - أ) عند اللحظة t يكون $n(\text{Br}_2) = 3x$ ، وعندما ينتهي t نحو ∞ يكون $x = x_{max}$ ، وبالتالي يكون السلم في الشكل - 1 :



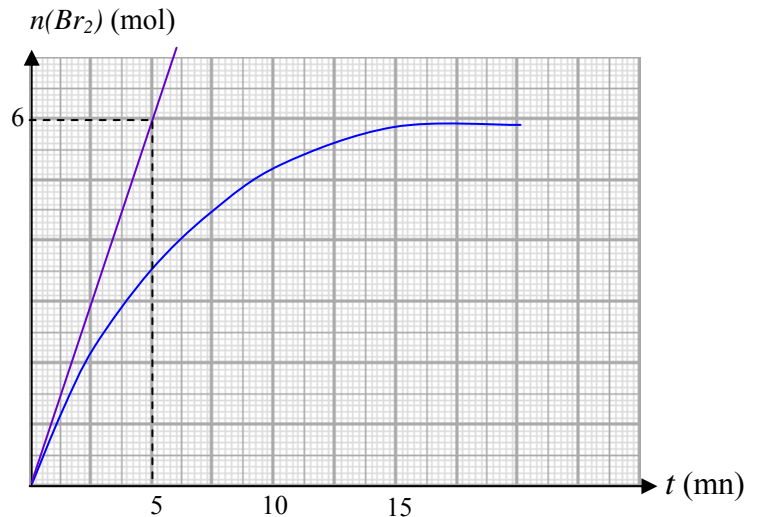
ب) تمثيل $g(t)$ ، $h(t)$ ، $k(t)$ (الشكل - 2)



الشكل - 2 (تقريبي)

$$v = \frac{1}{V} \frac{dx}{dt} = \frac{1}{V} \frac{d \frac{n(\text{Br}_2)}{3}}{dt} = \frac{1}{3V} \frac{d n(\text{Br}_2)}{dt}$$

إذن لحساب سرعة التفاعل ، نحسب ميل البيان $n(\text{Br}_2) = f(t)$ ونقسمه على $3V$



$$v = \frac{1,2}{0,3} = 4 \text{ mol.L}^{-1} \text{mn}^{-1} \text{ : ومنه السرعة هي : } \frac{6}{5} = 1,2 \text{ : هو : } t = 0 \text{ عند اللحظة}$$

التمرين 20

1- النواتج هي : شوارد المغنيزيوم (Mg^{2+}) وثنائي الهيدروجين (H_2)

- 2

كمية مادة حمض كلور الهيدروجين : $n(HCl) = n(H^+) = C V = 0,1 \times 0,2 = 2,0 \times 10^{-2} \text{ mol}$

$$n(Mg) = \frac{m}{M} = \frac{9 \times 10^{-2}}{24,3} = 3,7 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

3 - المتفاعل المحد :

المعادلة	$Mg(s)$	+	$2 H^+(aq)$	\rightarrow	$Mg^{2+}(aq)$	+	$H_2(g)$
$t = 0$	$3,7 \times 10^{-3}$		$2,0 \times 10^{-2}$		0		0
t	$3,7 \times 10^{-3} - x$		$2,0 \times 10^{-2} - 2x$		x		x

نعدم عدد مولات كل متفاعل في اللحظة t ونحسب قيمة x في كل معادلة .

$$3,7 \times 10^{-3} - x = 0 \Rightarrow x = 3,7 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

$$2,0 \times 10^{-2} - 2x = 0 \Rightarrow x = 1,0 \times 10^{-2} \text{ mol}$$

المتفاعل المحد هو المغنيزيوم لأن $3,7 \times 10^{-3} < 1,0 \times 10^{-2}$

4 - العبارة الحرفية للتقدم بدلالة P_{H_2} :

لدينا $P_{H_2} = P - P_{atm}$ ، ولدينا قانون الغازات المثالية $P_{H_2} V = n RT$ ، حيث n كمية مادة ثنائي الهيدروجين في اللحظة t والذي

يساوي التقدم x . وبالتالي نكتب : $(P - P_{atm}) V = x RT$ ، مع العلم أن V هو حجم غاز الهيدروجين في اللحظة t .

$$(1) \quad x = (P - P_{atm}) V \frac{1}{RT} \quad \text{العبارة هي :}$$

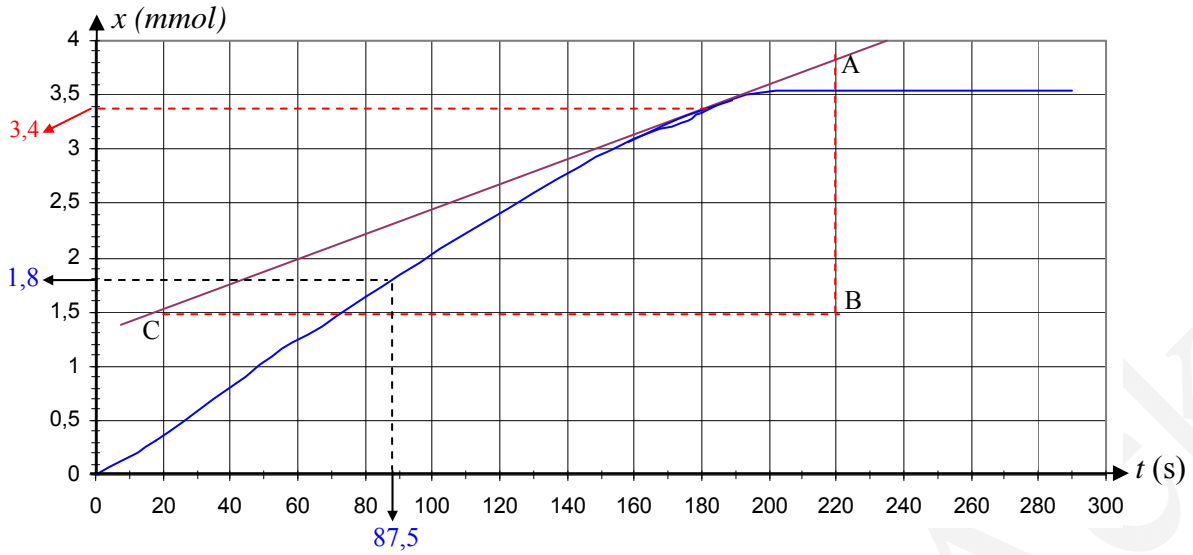
5 - ننشئ جدولاً به قيم التقدم والزمن ، بالتعويض في العبارة (1) ، علماً أن $V = 500 - 200 = 300 \text{ mL} = 3,0 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ ،

$$x = (P - P_{atm}) \times 1,23 \times 10^{-7} \quad \text{وبالتالي} \quad T = 20 + 273 = 293 \text{ K}$$

من أجل القيمة الأولى لدينا $P = P_{atm}$ ، وبالتالي $x = 0$

من أجل القيمة الثانية لدينا $P - P_{atm} = 2,5 \times 10^3 \text{ Pa}$ ، وبالتالي $x = 3,1 \times 10^{-4} \text{ mol}$ ، وهكذا بالنسبة للقيم الباقية .

$t(s)$	0	18	52	71	90	115	144	160	174	193	212	238	266	290
$x(\text{mmol})$	0	0,31	1,10	1,45	1,84	2,32	2,83	3,10	3,24	3,50	3,54	3,54	3,54	3,54



6 - من البيان لدينا $x_{\max} \approx 3,6 \text{ mmol}$ ، وبالتالي $\frac{x_{\max}}{2} = 1,8 \text{ mmol}$ ، وهذه القيمة توافق الزمن $t_{1/2} = 87,5 \text{ s}$

7 - السرعة الحجمية للتفاعل في اللحظة $t = 180 \text{ s}$:

$$v = \frac{1}{V} \frac{\Delta AB}{\Delta CB} = \frac{1}{0,2} \frac{2,4 \times 10^{-3}}{206} = 5,8 \times 10^{-5} \text{ mol.L}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$$

8 - من البيان لدينا عند $t = 180 \text{ s}$ تكون $x = 3,4 \text{ mmol}$ ، ونعلم أن $n(\text{H}_2) = x$

نحسب الحجم المولي للغازات في درجة الحرارة 293°K ، أي حجم 1 mol .

$$PV_0 = nRT \Rightarrow V_0 = \frac{nRT}{P} = \frac{1 \times 8,31 \times 293}{1,009 \times 10^5} = 2413 \times 10^{-5} \text{ m}^3 = 24,13 \text{ L}$$

حجم ثنائي الهيدروجين هو V_{H_2} حيث $n(\text{H}_2) = \frac{V_{\text{H}_2}}{V_0}$ ، وبالتالي : $V_{\text{H}_2} = 24,13 \times 3,4 \times 10^{-3} = 82 \times 10^{-3} \text{ L}$

$$[\text{Mg}^{2+}] = \frac{3,4 \times 10^{-3}}{0,2} = 1,7 \times 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1} \text{ ، ويكون التركيز المولي } n(\text{Mg}^{2+}) = x = 3,4 \text{ mmol}$$

التمرين 21

ملاحظة : في البيان المرفق مع التمرين ، على الترتيب $[\text{I}_2]$ (mmol/L) وليس mol/L .

1 - نبرّد الجزء الذي نريد معايرته من أجل إيقاف التفاعل فيه (أي إيقاف تكوّن ثنائي اليود) ، وذلك للتمكن من معايرة فقط الكمية التي تكون موجودة في لحظة التبريد .

2 - الثنائيتان هما : $\text{S}_2\text{O}_8^{2-} / \text{SO}_4^{2-}$ و I_2 / I^-

3 - النوع الكيميائي المرجع هو شاردة اليود I^-

التعليق : رقم تأكسد عنصر اليود ارتفع من (-1) في I^- إلى (0) في I_2

4 - النوع الكيميائي المؤكسد هو شاردة البيروكسوثنائي كبريتات $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$.

التعليق : رقم تأكسد عنصر الكبريت في $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ هو x حيث : $2x - 16 = -2$ ، ومنه : $x = 7$

رقم تأكسد عنصر الكبريت في SO_4^{2-} هو x' حيث : $x' - 8 = -2$ ، ومنه : $x' = 6$ (رقم التأكسد انخفض)

5 - المعادلتان النصفيتان الإلكترونيتان هما : $\text{S}_2\text{O}_8^{2-} + 2 \text{e}^- = 2 \text{SO}_4^{2-}$ معادلة الإرجاع



6 - كميات المادة الابتدائية للمتفاعلات :

$$n(S_2O_8^{2-}) = n(K_2S_2O_8) = C_1 V_1 = 1,5 \times 10^{-2} \times 0,5 = 7,5 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

$$n(I^-) = n(KI) = C_2 V_2 = 0,5 V_2$$

7 - جدول التقدم

معادلة التفاعل	$2 I^-_{(aq)} + S_2O_8^{2-}_{(aq)} \rightarrow I_{2(aq)} + 2 SO_4^{2-}_{(aq)}$				
حالة الجملة	التقدم	كمية المادة (mol)			
الابتدائية	0	$n(I^-)$	$n(S_2O_8^{2-})$	0	0
الانتقالية	x	$n(I^-) - 2x$	$n(S_2O_8^{2-}) - x$	x	$2x$
النهائية	x_{max}	$n(I^-) - 2x_{max}$	$n(S_2O_8^{2-}) - x_{max}$	x_{max}	$2x_{max}$

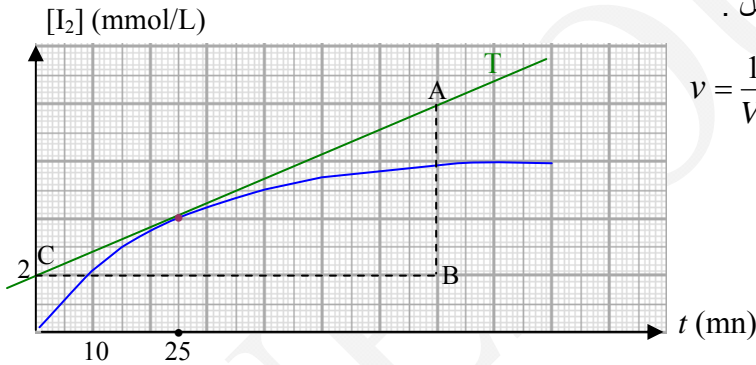
لكي نتأكد أن x يتغير بنفس الطريقة التي يتغير بها $[I_2]$ بدلالة الزمن ، نجد العلاقة بين x و $[I_2]$.

لدينا من جدول التقدم : $n(I_2) = x$ ، ومنه : $[I_2] V = x$ ، حيث V هو حجم المزيج وقيمته 1L ، وبالتالي $[I_2] = x$

إذن التقدم والتركيز المولي لثنائي اليود يتطوران بنفس الكيفية .

8 - نحسب ميل المماس T والذي يمثل السرعة الحجمية للتفاعل .

$$v = \frac{1}{V} \frac{dx}{dt} = \frac{d[I_2]}{dt} = \frac{2 \times 3 \times 10^{-3}}{7 \times 10} = 8,5 \times 10^{-5} \text{ mol.L}^{-1} \cdot \text{mn}^{-1}$$



9 - من البيان نستنتج التركيز المولي لثنائي اليود ،

$$n(I_2) = [I_2] \cdot V = 6 \times 10^{-3} \times 1 = 6 \times 10^{-3} \text{ mol} \quad \text{وهو } [I_2] = 6 \times 10^{-3} \text{ mol/L} \text{ ، ومنه كمية مادة ثنائي اليود:}$$

لو كان المتفاعل المحد هو $S_2O_8^{2-}$ لكننا وجدنا كمية مادة ثنائي اليود $7,5 \times 10^{-3} \text{ mol}$ ، أي عدد مولات $S_2O_8^{2-}$ التي حسبناها سابقا .

إذن المتفاعل المحد هو شوارد اليود .

10 - زمن نصف التفاعل هو الزمن الموافق لنصف قيمة التقدم النهائي (أو الأعظمي للتفاعلات التامة)

$$\text{من البيان التقدم الأعظمي } x_{max} = 6 \times 10^{-3} \text{ mol} \text{ ومنه } \frac{x_{max}}{2} = 3 \times 10^{-3} \text{ mol} \text{ . الزمن الموافق على البيان هو } t_{1/2} = 15 \text{ mn}$$

11 - بما أن المتفاعل المحد هو شاردة اليود فإن $n(I^-) - 2x_{max} = 0$ ، ومنه $n(I^-) = 2 \times 6 \times 10^{-3} = 1,2 \times 10^{-2} \text{ mol}$

$$\text{ولدينا } n(I^-) = 0,5 C_2 \text{ ، ومنه : } C_2 = 2,4 \times 10^{-2} \text{ mol/L}$$

التمرين 22

المركب العضوي 2-كلور - 2 - ميثيل بروبان هو $\text{CH}_3-\overset{\text{Cl}}{\underset{\text{CH}_3}{\text{C}}}-\text{CH}_3$. من أجل اختصار الكتابة نمثله بـ $\text{R}-\text{Cl}$ ، حيث الجذر الألكيلي R هو $-\text{C}(\text{CH}_3)_3$

نكتب المعادلة إذن : $\text{R}-\text{Cl}_{(aq)} + \text{H}_2\text{O}_{(l)} \rightarrow \text{R}-\text{OH}_{(aq)} + \text{Cl}^-_{(aq)} + \text{H}^+_{(aq)}$

1 - يمكن متابعة هذا التحول عن طريق قياس الناقلية لأن في المزيج المتفاعل توجد شوارد ، وهي Cl^- و H^+ ، ونعلم أن الشوارد هي المسؤولة عن الناقلية الكهربائية للمحاليل .

2 - التركيز الكتلي لـ $\text{R}-\text{Cl}$ هو $S = 4 \text{ g/L}$

التركيز المولي هو التركيز الكتلي مقسوم على الكتلة المولية الجزيئية ، أي $C = \frac{S}{M}$

كمية مادة $\text{R}-\text{Cl}$ هي $n(\text{R}-\text{Cl}) = [\text{R}-\text{Cl}] \cdot V = \frac{S}{M} \cdot V = 2 \times 10^{-3} \times \frac{4}{92,5} = 8,6 \times 10^{-5} \text{ mol}$

الماء موجود بزيادة ، حيث لدينا الحجم المضاف هو $80 \times \frac{95}{100} = 76 \text{ mL}$. ونعلم أن الكتلة الحجمية للماء هي 1 g/mL

إذن كتلة الماء المضافة هي 76 g ، وهذا يوافق $n(\text{H}_2\text{O}) = \frac{76}{18} = 4,22 \text{ mol}$ ، وهي كمية كبيرة بالنسبة لكمية $\text{R}-\text{Cl}$

3 - جدول التقدم :

معادلة التفاعل		$\text{R}-\text{Cl}_{(aq)} + 2 \text{H}_2\text{O}_{(l)} \rightarrow \text{R}-\text{OH}_{(aq)} + \text{H}^+_{(aq)} + \text{Cl}^-_{(aq)}$				
حالة الجملة الكيميائية	التقدم	كمية المادة بـ (mol)				
الحالة الابتدائية	0	$8,6 \times 10^{-5}$	زيادة	0	0	0
الحالة الانتقالية	$x(t)$	$8,6 \times 10^{-5} - x(t)$	زيادة	$x(t)$	$x(t)$	$x(t)$
الحالة النهائية	x_{max}	$8,6 \times 10^{-5} - x_{max}$	زيادة	x_{max}	x_{max}	x_{max}

4 - تُعطى الناقلية النوعية بالعلاقة $\sigma = \lambda_{\text{Cl}^-} [\text{Cl}^-] + \lambda_{\text{H}^+} [\text{H}^+]$ ، ولدينا : $[\text{Cl}^-] = \frac{n(\text{Cl}^-)}{V}$ و $[\text{H}^+] = \frac{n(\text{H}^+)}{V}$.

ومن جدول التقدم نستنتج $n(\text{Cl}^-) = n(\text{H}^+) = x(t)$ ، ومنه : $\sigma(t) = \frac{(\lambda_{\text{Cl}^-} + \lambda_{\text{H}^+})}{V} x(t)$ (1)

5 - تكون الناقلية النوعية معدومة في اللحظة $t = 0$ ، لأن المزيج يكون خاليا من الشوارد (يتواجد نوعان كيميائيان جزيئيان هما $\text{R}-\text{Cl}$ و H_2O ، مع الإشارة إلى أننا أهملنا شوارد $\text{H}^+_{(aq)}$ و $\text{OH}^-_{(aq)}$ في الماء لأن تركيزهما حوالي 10^{-7} mol/L)

6 - في نهاية التفاعل يكون $x = x_{max}$ ، وبالتالي تكون الناقلية النوعية : $\sigma_f = \frac{(\lambda_{\text{Cl}^-} + \lambda_{\text{H}^+})}{V} x_{max}$ (2)

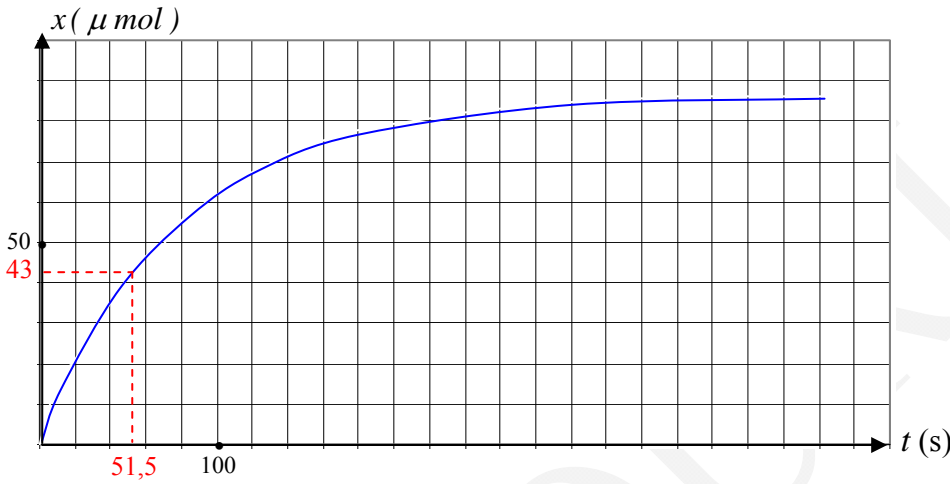
7 - التقدم الأعظمي يساوي كمية مادة 2 - كلور - 2 - ميثيل بروبان ، أي $x_{max} = 8,6 \times 10^{-5} \text{ mol}$

8 - بتقسيم العلاقتين (1) و (2) طرفا لطرف نجد $\frac{\sigma_f}{\sigma(t)} = \frac{x_{max}}{x(t)}$ ، ومنه $x(t) = x_{max} \frac{\sigma(t)}{\sigma_f}$ (3)

9 - نستعمل العلاقة (3) لحساب التقدم في كل لحظة ، مع العلم أن $\sigma_f = 298,1 \mu\text{S.cm}^{-1}$ (من الجدول) .

من أجل كل لحظة نقسم $\sigma(t)$ على σ_f ونضرب الناتج في x_{max} ، مع ترك الناقليتين النوعيتين بنفس الوحدة .

t (s)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$x(t)$ (μmol)	0	15,2	21,5	28,6	34,9	41,2	46,6	49,3	55,5	59,1
t (s)	100	110	120	140	160	190	220	240	285	315
$x(t)$ (μmol)	61,8	65,4	67,2	71,6	75,2	78,8	80,6	82,4	84,2	85,1
t (s)	365	375	380	450						
$x(t)$ (μmol)	86,0	86,0	86,0	86,0						



10 - تمثيل التقدم بدلالة الزمن :

على محور الترتيب غيرت السلم

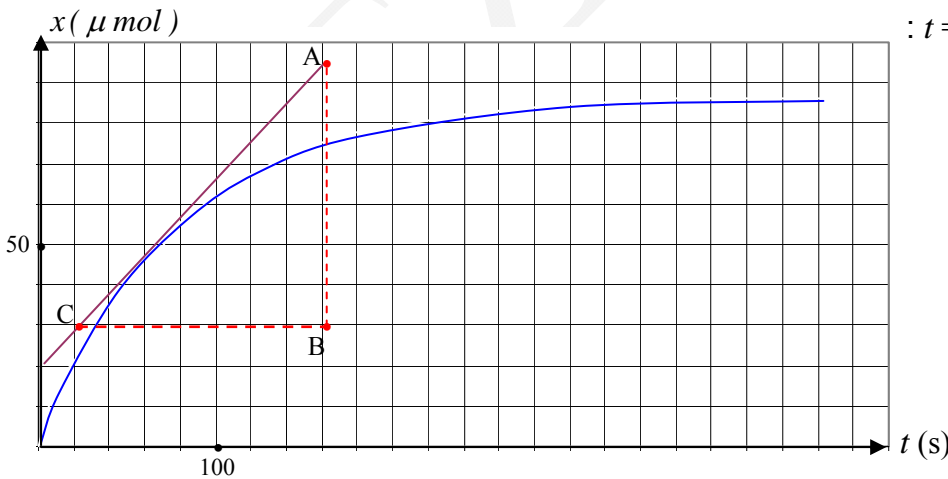
بـ : $1 \text{ cm} \rightarrow 10 \mu mol$

للتذكير : ($1 \mu mol = 10^{-6} mol$)

11 - زمن نصف التفاعل هو الزمن الموافق لنصف قيمة التقدم الأعظمي .

لدينا التقدم الأعظمي $x_{max} = 86 \mu mol$ ، ومنه $\frac{x_{max}}{2} = 43 \mu mol$. الزمن الموافق على البيان $t_{1/2} \approx 51,5$ s

- 12



السرعة الحجمية للتفاعل في اللحظة $t = 60$ s :

$$v = \frac{1}{V} \frac{dx}{dt} = \frac{1}{V} \frac{AB}{CB}$$

$$v = \frac{1}{82 \times 10^{-3}} \frac{66 \times 10^{-6}}{140}$$

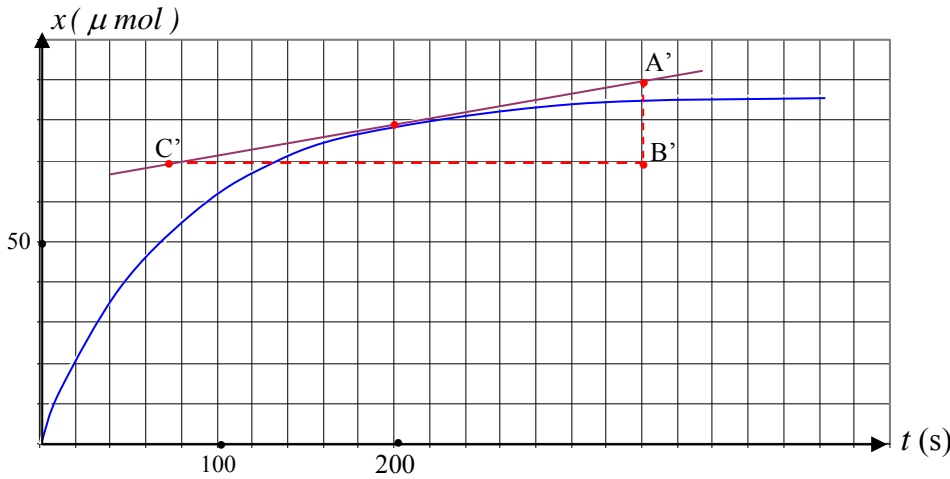
$$v = 5,7 \times 10^{-6} \text{ mol.L}^{-1} . \text{s}^{-1}$$

السرعة الحجمية للتفاعل في اللحظة $t' = 200$ s :

$$v' = \frac{1}{V} \frac{dx}{dt} = \frac{1}{V} \frac{A'B'}{C'B'}$$

$$v' = \frac{1}{82 \times 10^{-3}} \frac{20 \times 10^{-6}}{270}$$

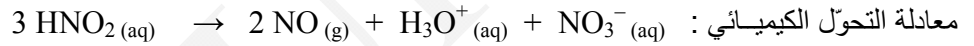
$$v' = 9,0 \times 10^{-7} \text{ mol.L}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$$



13 - السرعة الحجمية للتفاعل في اللحظة $t = 200$ s أصغر من السرعة في اللحظة $t' = 60$ s . تناقص السرعة سببه تناقص تراكيز المتفاعلات خلال الزمن .

الذي يوضح ذلك بيانها هو تناقص ميل المماس كلما زاد الزمن ، إلى أن يصبح هذا الميل معدوما عندما يصبح المماس أفقيا .

التمرين 23



1 - جدول التقدم (أسفل الصفحة)

لدينا في اللحظة t كمية مادة حمض الأزوتيد هي :

$$n(\text{HNO}_2) = 3x$$

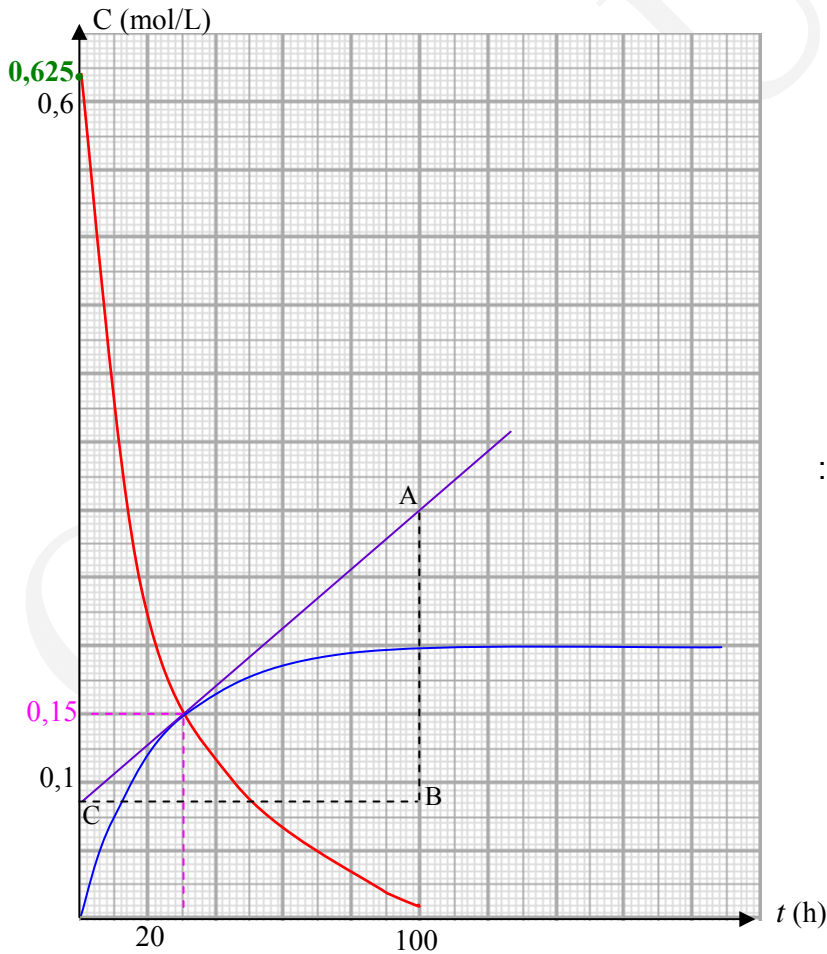
$$[\text{HNO}_2] = \frac{n_0(\text{HNO}_2)}{V} - \frac{3x}{V}$$

$$(1) \quad [\text{HNO}_2] = C_0 - \frac{3x}{V}$$

أما كمية مادة شاردة النترات (NO_3^-) فهي :

$$n(\text{NO}_3^-) = x$$

$$(2) \quad [\text{NO}_3^-] = \frac{x}{V}$$



معادلة التفاعل		$3 \text{HNO}_2 (\text{aq}) \rightarrow \text{NO} (\text{g}) + \text{H}_3\text{O}^+ (\text{aq}) + \text{NO}_3^- (\text{aq})$			
حالة الجملة	التقدم	كمية المادة بـ (mol)			
الحالة الابتدائية	0	$n_0 (\text{HNO}_2)$	0	0	0
الحالة الانتقالية	x	$n_0 (\text{HNO}_2) - 3x$	x	x	x
الحالة النهائية	x_{max}	$n_0 (\text{HNO}_2) - 3x_{\text{max}}$	x_{max}	x_{max}	x_{max}

2 - السرعة الحجمية للتفاعل هي مفهوم له علاقة مباشرة مع الزمن ، وتتمثل في مشتق التقدم بالنسبة للزمن في وحدة الحجم .

$$\text{أي : } v = \frac{1}{V} \frac{dx}{dt}$$

• بالنسبة للمنحني $f(t)$ ، فهو يمثل اختفاء حمض الأروتيد HNO_2 خلال الزمن . نرسم لسرعة الاختفاء بـ v_d ، ونكتب :

$$v_d = -\frac{d[\text{HNO}_2]}{dt} \text{ ، وباستعمال العلاقة (1) تصبح السرعة : } v_d = -\frac{dC_0}{dt} + \frac{3}{V} \frac{dx}{dt} = \frac{3}{V} \frac{dx}{dt} \text{ (مشتق عدد ثابت يساوي 0)}$$

$$(3) \quad v_x = \frac{v_d}{3} \text{ ، ومنه } v_x \text{ هي سرعة الحجمية للتفاعل ، حيث } v_d = 3v_x \text{ وبالتالي نكتب}$$

إذن يمكن معرفة السرعة الحجمية للتفاعل من البيان $f(t)$.

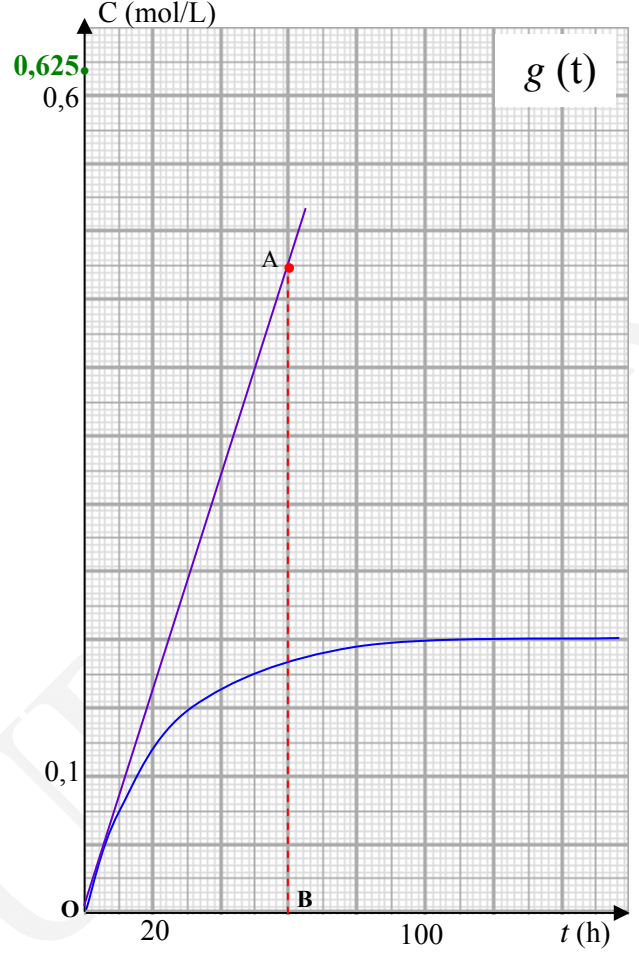
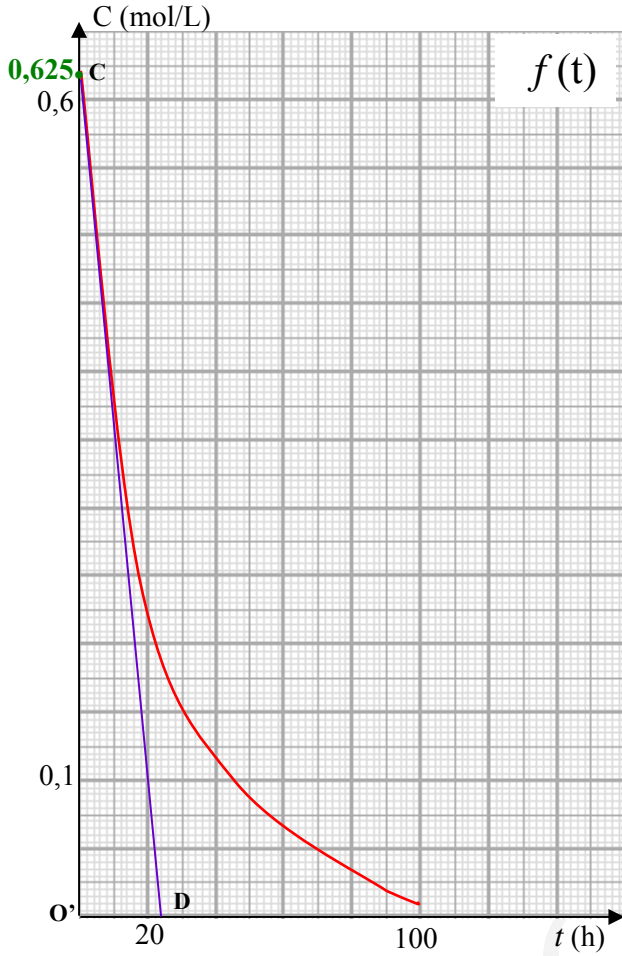
• بالنسبة للمنحني $g(t)$ ، فهو يمثل تشكل شاردة النترات خلال الزمن . نرسم لسرعة التشكل بـ v_a ، ونكتب :

$$v_a = \frac{d[\text{NO}_3^-]}{dt} \text{ ، وباستعمال العلاقة (2) تصبح السرعة : } v_a = \frac{1}{V} \frac{dx}{dt}$$

$$(4) \quad v_x = v_a \text{ وبالتالي نكتب}$$

إذن يمكن معرفة السرعة الحجمية للتفاعل من البيان $g(t)$.

3 - السرعة الحجمية الابتدائية للتفاعل (v_0) : نحسبها بيانيا في اللحظة $t = 0$ إما من البيان $f(t)$ أو $g(t)$



من البيان $g(t)$:

سرعة ظهور شاردة النترات هي :

$$v_a = \frac{d[NO_3^-]}{dt} = \frac{AB}{OB} = \frac{9,6 \times 0,05}{60} = 8,0 \times 10^{-3} \text{ mol.L}^{-1} . h^{-1}$$

باستعمال العلاقة (4) نجد السرعة الحجمية للتفاعل $v_0 = v_x = 8,0 \times 10^{-3} \text{ mol.L}^{-1} . h^{-1}$

من البيان $f(t)$:

سرعة اختفاء حمض الأزوتيد هي :

$$v_a = -\frac{d[HNO_2]}{dt} = -\left(-\frac{O'C}{O'D}\right) = +\frac{0,625}{25} = 2,5 \times 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1} . h^{-1}$$

باستعمال العلاقة (3) نجد السرعة الحجمية للتفاعل $v_0 = v_x = \frac{2,5 \times 10^{-2}}{3} = 8,3 \times 10^{-3} \text{ mol.L}^{-1} . h^{-1}$

السرعتان متساويتان في حدود أخطاء التمثيل البياني .

4 - نقطة تقاطع البيانيين توافق : $[HNO_2] = [NO_3^-] = 0,15 \text{ mol.L}^{-1}$

ومن معادلة التحول نستنتج : $[H_3O^+] = 0,15 \text{ mol.L}^{-1}$ و $[NO] = 2 \times 0,15 = 0,3 \text{ mol.L}^{-1}$

حجم المزيج غير معروف

السرعة الحجمية للتفاعل عند اللحظة t_1 : $v'_x = v'_a = \frac{AB}{CB} = \frac{4,3 \times 0,05}{100} = 2,1 \times 10^{-3} \text{ mol.L}^{-1} . h^{-1}$

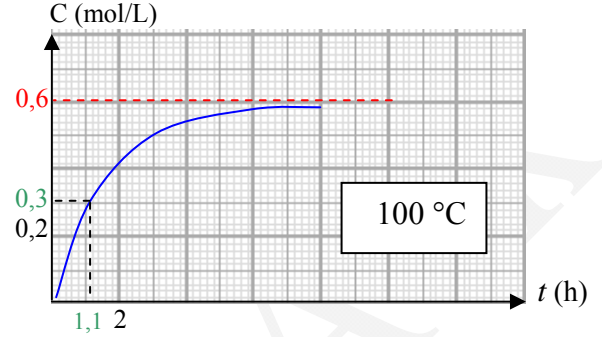
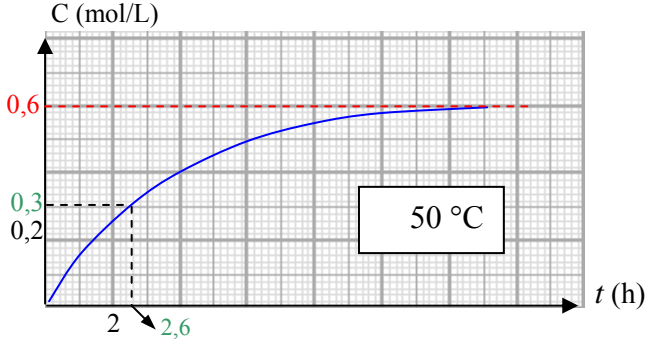
5 - السرعة تتناقص بسبب تناقص التركيز المولي لحمض الأزوتيد .

6 - نعتبر التحول قد انتهى في اللحظة $t = 100 \text{ h}$ ، وعندها تنعدم السرعة الحجمية للتفاعل .

التمرين 24

معادلة التحول : $A + B \rightarrow C + D$

- 1



لدينا في اللحظة t : $x = [C].V$ ، فمن أجل قيمتين لـ x ، x_1 و x_2 نكتب : $x_1 = [C_1].V$ ، $x_2 = [C_2].V$

فإذا كان $x_2 = \frac{x_1}{2}$ ، فإن كذلك بتقسيم العلاقتين طرفا لطرف يكون $[C_2] = \frac{[C_1]}{2}$.

إذن لكي نحسب زمن نصف التفاعل يكفي أن نقسم التركيز الأعظمي للنوع الكيميائي C على 2 ونستنتج $t_{1/2}$ من بيان التركيز .

2 - كلما كان زمن نصف التفاعل أقل تكون سرعة التفاعل عند $t = 0$ أكبر ، أي أن كلما كانت درجة حرارة المزيج أكبر كلما كان التحول أسرع . (درجة الحرارة عامل حركي)

التمرين 25

1 - أ) سبب تحول اللون البنفسجي لعديم اللون هو تفاعل شاردة البرمنغنات وتحولها لشاردة المنغنيز Mn^{2+} عديمة اللون . أما سبب زوال اللون ، فيجب أن نبيّن أن شاردة البرمنغنات هي المتفاعل المحدّ .

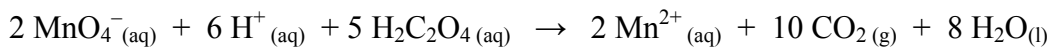
كمية مادة البرمنغنات :

$$n(MnO_4^-) = [MnO_4^-] V_1 = 0,2 \times 0,2 \times 10^{-3} = 4,0 \times 10^{-5} \text{ mol}$$

كمية مادة حمض الأوكساليك :

$$n(H_2C_2O_4) = [H_2C_2O_4] V_2 = 0,2 \times 0,005 = 1,0 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

معادلة التحول الكيميائي هي :



المتفاعلان	$2 \text{MnO}_4^- (\text{aq}) + 5 \text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 (\text{aq})$	
$t = 0$	$4,0 \times 10^{-5}$	10^{-3}
t	$4 \times 10^{-5} - 2x$	$10^{-3} - 5x$

$$4 \times 10^{-5} - 2x = 0 \Rightarrow x = 2 \times 10^{-5} \text{ mol}$$

$$10^{-3} - 5x = 0 \Rightarrow x = 2 \times 10^{-4} \text{ mol}$$

إذن المتفاعل المحد هو برمنغنات البوتاسيوم (أصغر قيمة للتقدم)

ونسنتج من هذا أن الكمية المضافة (0,2 mL) تختفي كلها عند إضافتها

$$(1) \quad v = \frac{1}{V} \frac{\Delta x}{\Delta t} \text{ هي : السرعة الحجمية الوسطية (المتوسطة) المقصودة}$$

لدينا $n(\text{MnO}_4^-) - 2x = 0$ ، هذه العلاقة صحيحة بين أية لحظتين زونيتين ، ومنه : $x = \frac{1}{2} n(\text{MnO}_4^-)$ ، وبالتالي

$$v = \frac{1}{2V} \frac{\Delta(\text{MnO}_4^-)}{\Delta t} \text{ بالتعويض في العلاقة (1) نجد : } \Delta x = \frac{1}{2} \Delta n(\text{MnO}_4^-)$$

$$v = \frac{1}{2 \times 0,2} \left| \frac{0 - 4 \times 10^{-5}}{45} \right| = 2,2 \times 10^{-6} \text{ mol.L}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ (أهملنا الحجم 0,2 mL أمام 200 mL)}$$

2 - بعد زوال اللون البنفسجي وجدنا $x = 2 \times 10^{-5} \text{ mol}$ وهي نفسها التقدم الأعظمي ، حينئذ تكون كمية مادة حمض الأكساليك

الباقية في المزيج : $n(\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4) - 5x = 10^{-3} - 5 \times 2 \times 10^{-5} = 9,0 \times 10^{-4} \text{ mol}$ ، أما التركيز المولي للحمض هو :

$$[\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4] = \frac{9 \times 10^{-4}}{0,2} = 4,5 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$$

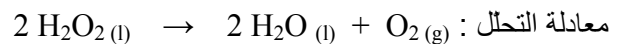
$$v' = \frac{1}{2V} \frac{\Delta(\text{MnO}_4^-)}{\Delta t} = \frac{1}{2 \times 0,2} \left| \frac{0 - 4 \times 10^{-5}}{28} \right| = 3,57 \times 10^{-6} \text{ mol.L}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ (أ - 3)}$$

(ب) نلاحظ أن $v' > v$ ، وهذا لا يكون ممكنا في تفاعل عادي لأن تناقص التركيز يؤدي إلى تناقص السرعة ، لكن في هذا التحول

حدث ما يلي : في التجربة الثانية (الإضافة الثانية) كانت هناك كمية من شوارد المنغنيز Mn^{2+} الناتجة عن الإضافة الأولى ، وهذه الشوارد كانت سببا في تحفيز التفاعل (التحفيز الذاتي في هذه الحالة) . وهذا ما جعل السرعة في التجربة الثانية أكبر من السرعة في التجربة الأولى .

4 - في هذه الحالة (أي التجربة الثانية) يتدخل عاملان حركيان هما التحفيز ودرجة الحرارة ، لهذا تكون السرعة أكبر ولا يدوم التحول إلا ثانية واحدة .

التمرين 26



1 - دون الوسيط يكون التفاعل بطيئا ، وخاصة في درجة حرارة منخفضة .

2 - في هذا التحول لدينا وساطة متجانسة ، أي أن الوسيط والمتفاعلات من نفس الحالة الفيزيائية (سوائل) .

للعلم فقط أن في حالة الوساطة المتجانسة يظهر الناتج في جميع أنحاء البيشر ، أما في الوساطة غير المتجانسة يظهر الناتج بجوار الوسيط .

يمكن تحفيز هذا التفاعل بواسطة سلك من البلاتين (وساطة غير متجانسة) بحيث نلاحظ انطلاق غاز الأكسجين بجوار السلك فقط .



المرحلة 4



المرحلة 3

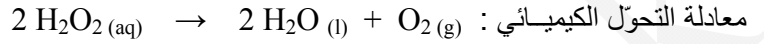
3 - الشيء الذي يوضّح أن الوسيط قد شارك في التفاعل هو صورة المرحلة (3) - اللون البني والفوران

الفوران : انطلاق ثنائي الأوكسجين

اللون البني: ناتج عن المركبات المعقدة التي يمر بها الوسيط وهو يسرع في التفاعل ، حيث أنه يغيّر آلية (ميكانيزم) التفاعل .

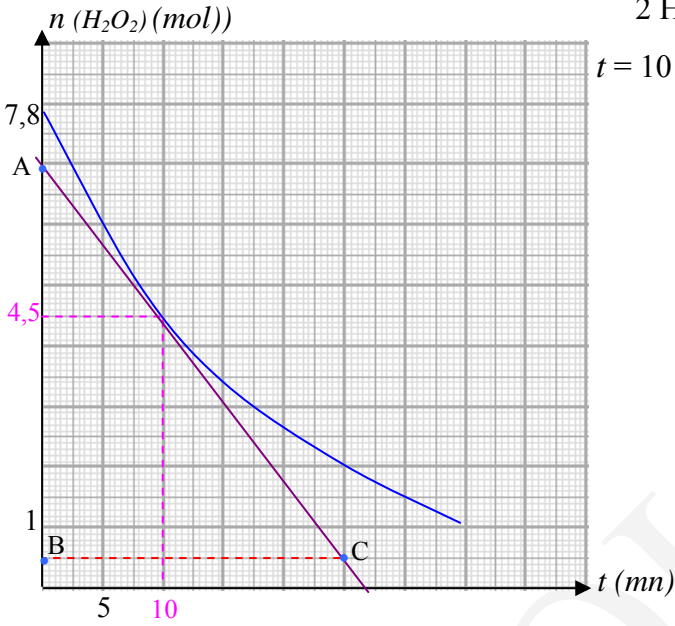
4 - المعلومة المتعلقة بالوسيط التي تبرزها الصورة نرصدها في صورة المرحلة 4 ، بحيث أن هذا اللون الأصفر الصدئي هو لون شوارد الحديد الثلاثية . يدلّ هذا على أن الوسيط أنهى مهمته وعاد إلى لونه الطبيعي (الأصلي) .

التمرين 27



1 - أ) من البيان نستنتج كمية مادة الماء الأوكسجيني الموافقة لـ $t = 10 \text{ mn}$

$$n(\text{H}_2\text{O}_2) = 4,5 \text{ mol}$$



معادلة التفاعل	$2 \text{H}_2\text{O}_2(\text{l}) \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}(\text{l}) + \text{O}_2(\text{g})$		
$t = 0$	$n_0(\text{H}_2\text{O}_2)$	0	0
t	$n_0(\text{H}_2\text{O}_2) - 2x$	$2x$	x

ب) في اللحظة t تكون كمية مادة الماء الأوكسجيني:

$$n_0(\text{H}_2\text{O}_2) - 2x = 4,5$$

، ومنه كمية مادة ثنائي الأوكسجين هي : $x = 1,65 \text{ mol}$

$$n(\text{H}_2\text{O}) = 2 \times 1,65 = 3,3 \text{ mol} , n(\text{O}_2) = 1,65 \text{ mol}$$

ومنه التركيب المولي للمزيج : $\{ n(\text{H}_2\text{O}) = 3,3 \text{ mol} , n(\text{O}_2) = 1,65 \text{ mol} , n(\text{H}_2\text{O}_2) = 4,5 \text{ mol} \}$

ج) سرعة اختفاء الماء الأوكسجيني :

$$v = -\frac{d n(\text{H}_2\text{O}_2)}{dt} = -\left(-\frac{AB}{BC}\right) = \frac{6,3}{25} = 2,5 \times 10^{-1} \text{ mol.mn}^{-1}$$

2 - أ) نقطة تقاطع بيان سرعة اختفاء الماء الأوكسجيني مع محور الترتيب هي السرعة في غياب الوسيط .

$$v = 3,3 \times 10^{-2} \text{ mol.mn}^{-1}$$

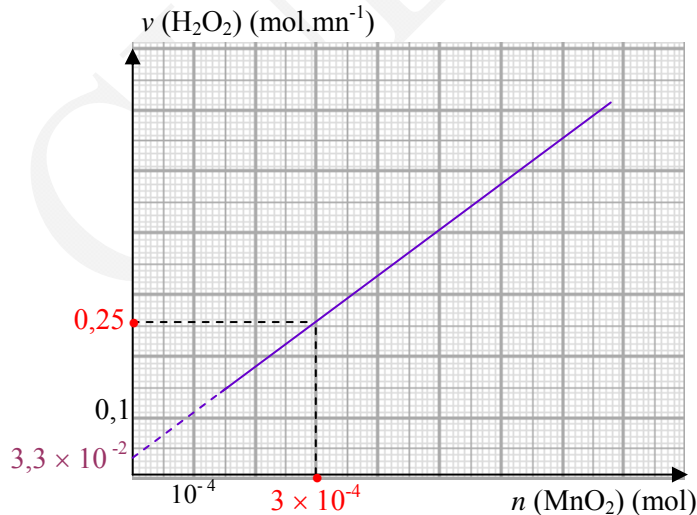
ب) لإيجاد كمية مادة الوسيط المستعملة في السؤال 1 - ،

نستعمل بيان السرعة ونأخذ القيمة الموافقة لـ $v = 0,25 \text{ mol.mn}^{-1}$

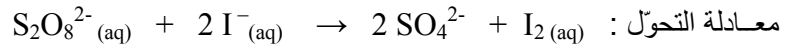
$$n(\text{MnO}_2) = 3 \times 10^{-4} \text{ mol}$$

ج) كلما استعملنا كمية أكبر من الوسيط نحصل على سرعة أكبر

في اللحظة $t = 0$.



التمرين 28



1 - السرعة الحجمية للتفاعل هي مفهوم له علاقة مباشرة مع الزمن ، وتتمثل في مشتق التقدّم بالنسبة للزمن في وحدة الحجم .

$$v = \frac{1}{V} \frac{dx}{dt}$$

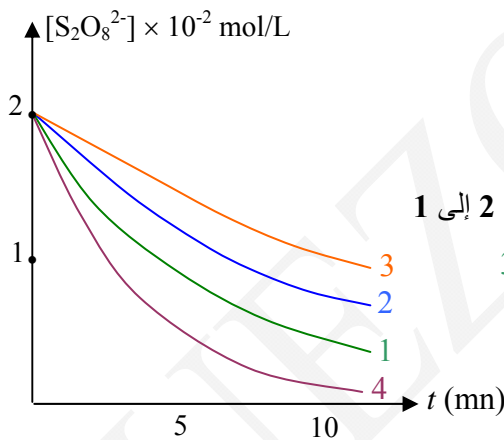
معادلة التفاعل	$\text{S}_2\text{O}_8^{2-}(\text{aq}) + 2\text{I}^-(\text{aq}) \rightarrow 2\text{SO}_4^{2-} + \text{I}_2(\text{aq})$	
$t = 0$	$n_0(\text{S}_2\text{O}_8^{2-})$	
t	$n_0(\text{S}_2\text{O}_8^{2-}) - x$	

لدينا كمية مادة $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ في اللحظة t هي : $n_0(\text{S}_2\text{O}_8^{2-}) - x$ ، ومنه : $[\text{S}_2\text{O}_8^{2-}] = \frac{n_0(\text{S}_2\text{O}_8^{2-}) - x}{V}$

باشتقاق طرفي هذه المعادلة بالنسبة للزمن : $\frac{d[\text{S}_2\text{O}_8^{2-}]}{dt} = \frac{1}{V} \left(\frac{dn_0(\text{S}_2\text{O}_8^{2-})}{dt} - \frac{dx}{dt} \right) = -\frac{1}{V} \frac{dx}{dt}$ (مشتق عدد ثابت = 0)

وبالتالي سرعة التفاعل بدلالة تركيز شاردة البروكسوثنائي كبريتات هي : $v = -\frac{d[\text{S}_2\text{O}_8^{2-}]}{dt}$

2 - ملاحظة خاصة بالمعطيات : في التجارب الأربعة استعملنا الوسيط فقط في التجربة الرابعة ، إجلاء للغموض في نص التمرين الذي يوحي أن كل التجارب أسُتعمل فيها الوسيط ، مع الإشارة إلى أن شوارد الحديد الثنائية كافية لتحفيز هذا التفاعل .



المقصود في السؤال تعيين التركيز المولي عند اللحظة $t = 0$ لشوارد $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ ، وهذا التركيز هو الموجود على البيان $[\text{S}_2\text{O}_8^{2-}] = 2 \times 10^{-2} \text{ mol/L}$.

3-

سرعة اختفاء شوارد $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ تتزايد عند $t = 0$ بالقيمة المطلقة من التجربة 3 إلى 2 إلى 1

لأن درجة الحرارة في هذه التجارب تتزايد من 15°C إلى 23°C إلى 32°C

التجربة 4 أجريت في نفس درجة حرارة التجربة 1 ، لكن بوجود وسيط ، إذن في

هذه التجربة تكون أكبر سرعة لإختفاء شوارد $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$.

4 - العوامل الحركية التي تبرزها هذه التجارب هي :

التجربة 1 : درجة الحرارة

التجربة 2 : درجة الحرارة

التجربة 3 : درجة الحرارة

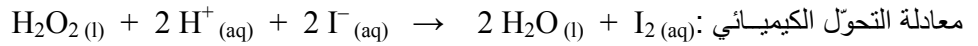
التجربة 4 : درجة الحرارة + الوسيط (شوارد Fe^{2+}) .

5 - نلاحظ على البيان أن كمية المادة المختفية من شوارد $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ تكون معتبرة في مدة قصيرة إذا ما قورنت بالمدة اللازمة لإجراء

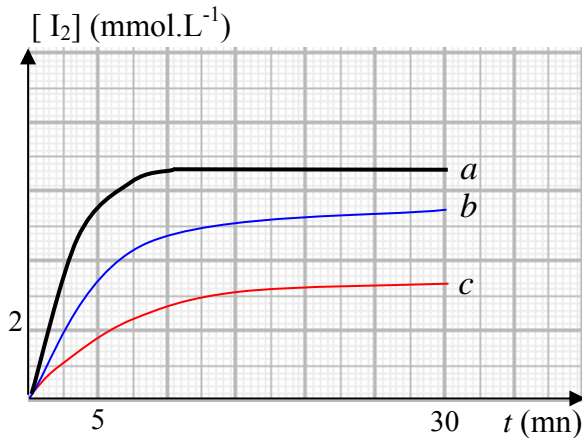
المعايرة ، لهذا يجب إيقاف التفاعل للتمكن من المعايرة ، وذلك بوضع العيّنة المعايرة في ماء الثلج .

(لهذا يجب أن نعرّف السرعة والبطء في التفاعلات بنسبها إلى المدة المستغرقة في تقنية المتابعة)

التمرين 29



(1 - أ)



	H ₂ SO ₄ محلول 1 mol.L ⁻¹	KI محلول 0,1 mol.L ⁻¹ الحجم V ₂	H ₂ O ₂ 0,1 mol.L ⁻¹ الحجم V ₁	H ₂ O
الخليط a 30 mL	10 mL	18 mL	2 mL	0
الخليط b 40 mL	10 mL	10 mL	10 mL	10 mL
الخليط c 30 mL	10 mL	10 mL	1 mL	9 mL

المقصود بالتركيز المولي الابتدائي هو التركيز المولي في المزيج في اللحظة $t = 0$. من أجل حسابه ، نحسب أولاً عدد المولات في كل محلول ثم نقسم على حجم المزيج (الخليط).

الخليط (a) :

التركيز المولي $[\text{H}_2\text{O}_2]_0$ لدينا : $n(\text{H}_2\text{O}_2) = [\text{H}_2\text{O}_2] \times V_1 = 0,1 \times 2 \times 10^{-3} = 2 \times 10^{-4} \text{ mol}$ ، أما التركيز المولي

$$[\text{H}_2\text{O}_2]_0 = \frac{n(\text{H}_2\text{O}_2)}{\Sigma V} = \frac{2 \times 10^{-4}}{30 \times 10^{-3}} = 6,7 \times 10^{-3} \text{ mol.L}^{-1}$$

التركيز المولي $[\text{I}^-]_0 = [\text{KI}]_0$ لدينا : $n(\text{I}^-) = [\text{I}^-] \times V_2 = 0,1 \times 18 \times 10^{-3} = 1,8 \times 10^{-3} \text{ mol}$ ، أما التركيز المولي

$$[\text{I}^-]_0 = \frac{n(\text{I}^-)}{\Sigma V} = \frac{1,8 \times 10^{-3}}{30 \times 10^{-3}} = 6,0 \times 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$$

الخليط (b) :

التركيز المولي $[\text{H}_2\text{O}_2]_0$ لدينا : $n(\text{H}_2\text{O}_2) = [\text{H}_2\text{O}_2] \times V_1 = 0,1 \times 10 \times 10^{-3} = 1,0 \times 10^{-3} \text{ mol}$ ، أما التركيز المولي

$$[\text{H}_2\text{O}_2]_0 = \frac{n(\text{H}_2\text{O}_2)}{\Sigma V} = \frac{10^{-3}}{40 \times 10^{-3}} = 2,5 \times 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$$

التركيز المولي $[\text{I}^-]_0$ لدينا : $n(\text{I}^-) = [\text{I}^-] \times V_2 = 0,1 \times 10 \times 10^{-3} = 1,0 \times 10^{-3} \text{ mol}$ ، أما التركيز المولي الابتدائي

$$[\text{I}^-]_0 = \frac{n(\text{I}^-)}{\Sigma V} = \frac{10^{-3}}{40 \times 10^{-3}} = 2,5 \times 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$$

الخليط (c) :

التركيز المولي $[\text{H}_2\text{O}_2]_0$ لدينا : $n(\text{H}_2\text{O}_2) = [\text{H}_2\text{O}_2] \times V_1 = 0,1 \times 1 \times 10^{-3} = 1,0 \times 10^{-4} \text{ mol}$ ، أما التركيز المولي

$$[\text{H}_2\text{O}_2]_0 = \frac{n(\text{H}_2\text{O}_2)}{\Sigma V} = \frac{10^{-4}}{30 \times 10^{-3}} = 3,3 \times 10^{-3} \text{ mol.L}^{-1}$$

التركيز المولي $[\text{I}^-]_0$ لدينا : $n(\text{I}^-) = [\text{I}^-] \times V_2 = 0,1 \times 10 \times 10^{-3} = 1,0 \times 10^{-3} \text{ mol}$ ، أما التركيز المولي الابتدائي

$$[\text{I}^-]_0 = \frac{n(\text{I}^-)}{\Sigma V} = \frac{10^{-3}}{30 \times 10^{-3}} = 3,3 \times 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$$

ب) المتفاعل المحد في كل خليط :

	$H_2O_2(l)$	$+ 2 H^+(aq)$	$+ 2 I^-(aq)$	\rightarrow	$2 H_2O(l)$	$+ I_2(aq)$
$t = 0$	$n(H_2O_2)$	$n(H^+)$	$n(I^-)$			0
t	$n(H_2O_2) - x$	$n(H^+) - 2x$	$n(I^-) - 2x$			x

كمية مادة كل متفاعل في كل خليط :

$$n(H^+) = 2 n(H_2SO_4) = 2 \times 1 \times 10 \times 10^{-3} = 2 \times 10^{-2} \text{ mol}$$

$n(I^-)$ (mol)	$n(H^+)$ (mol)	$n(H_2O_2)$ (mol)	الخليط
18×10^{-4}	2×10^{-2}	2×10^{-4}	<i>a</i>
10^{-3}	2×10^{-2}	10^{-3}	<i>b</i>
10^{-3}	2×10^{-2}	10^{-4}	<i>c</i>

لكي نعيّن المتفاعل المحد في كل خليط ، نعدم كمية مادة كل متفاعل في اللحظة t ، وتكون أصغر قيمة لـ x موافقة للمتفاعل المحد .

الخليط *a* :

$$H_2O_2 \text{ هو المحد} \Leftrightarrow \begin{cases} 2 \times 10^{-4} - x = 0 \Rightarrow x = 2,0 \times 10^{-4} \text{ mol} \\ 18 \times 10^{-4} - 2x = 0 \Rightarrow x = 9,0 \times 10^{-4} \text{ mol} \\ 2 \times 10^{-2} - 2x = 0 \Rightarrow x = 1,0 \times 10^{-2} \text{ mol} \end{cases}$$

الخليط *b* :

$$I^- \text{ هو المحد} \Leftrightarrow \begin{cases} 10^{-3} - x = 0 \Rightarrow x = 10^{-3} \text{ mol} \\ 10^{-3} - 2x = 0 \Rightarrow x = 5,0 \times 10^{-4} \text{ mol} \\ 2 \times 10^{-2} - 2x = 0 \Rightarrow x = 10^{-2} \text{ mol} \end{cases}$$

الخليط *c* :

$$H_2O_2 \text{ هو المحد} \Leftrightarrow \begin{cases} 10^{-4} - x = 0 \Rightarrow x = 10^{-4} \text{ mol} \\ 10^{-3} - 2x = 0 \Rightarrow x = 5,0 \times 10^{-4} \text{ mol} \\ 2 \times 10^{-2} - 2x = 0 \Rightarrow x = 10^{-2} \text{ mol} \end{cases}$$

2 - التركيز المولي النهائي لثنائي اليود في كل خليط : نعلم أن $n(I_2) = x$. إذن من أجل كل خليط نقسم قيمة x على حجم المزيج .

$$\text{الخليط } a : [I_2]_f = \frac{2 \times 10^{-4}}{30 \times 10^{-3}} = 6,7 \times 10^{-3} \text{ mol.L}^{-1} \text{ ، أو من البيان}$$

$$\text{الخليط } b : [I_2]_f = \frac{5 \times 10^{-4}}{40 \times 10^{-3}} = 12,5 \times 10^{-3} \text{ mol.L}^{-1} \text{ ، البيان لا يوافق}$$

$$\text{الخليط } c : [I_2]_f = \frac{10^{-4}}{30 \times 10^{-3}} = 3,3 \times 10^{-3} \text{ mol.L}^{-1} \text{ ، أو من البيان}$$

3 - نفس القيم نجدتها عند اللحظة $t = 30 \text{ mn}$ ، لأن سرعة تشكل ثنائي اليود تكون معدومة عند هذه اللحظة (المماس أفقي) .