IChO 1974

المسائل النظرية والحلول · بوخارست، رومانيا · 5 مسائل نظرية مع حلول كاملة

eulersolve.org/icho/1974/

المسألة 1: من الهيدروجين الناتج بالتحليل الكهربائي إلى الميثيل البرتقالي

لإجراء التحليل الكهروكيميائي للماء، تتكون دائرة كهربائية من فولتمتر وأقطاب من البلاتين وبطارية تحتوي على عشر خلايا جلفانية موصولة على التوالي، جهد كل منها 1.5 V ومقاومتها الداخلية 0.4 Ω. تبلغ مقاومة الفولتمتر 0.5 Ω وجهد استقطاب البطارية 1.5 V. يمر التيار الكهربائي عبر الكهرل مدة 8 ساعات و56 دقيقة و7 ثوانٍ. استُخدم الهيدروجين الناتج بهذه الطريقة في تفاعل اصطناع مع مادة أخرى، فتكوّنت مادة غازية **A** يمكن تحويلها بالأكسدة بالأكسجين، مرورًا بأكسيد، إلى المادة **B**.

باستخدام المادة **B** يمكن تحضير المادة **C**، التي يمكن الحصول منها على المادة **D** بعد اختزالها بالهيدروجين. تتفاعل المادة **D** عند 180 °C مع محلول مركز من حمض الكبريتيك لتعطي حمض السلفانيليك. وبإجراء الديازتة ثم الاقتران مع بارا-N,N-ثنائي ميثيل الأنيلين، تتكوّن صبغة آزوية هي الميثيل البرتقالي.

المطلوب:

1. اكتب المعادلات الكيميائية لجميع التفاعلات المذكورة أعلاه.
2. احسب كتلة الناتج **D**.
3. أعطِ الاسم الكيميائي الدقيق للدليل الميثيل البرتقالي. وضّح باستخدام الصيغ البنائية التغيرات التي تحدث تبعًا لتركيز أيونات $\mathrm{H_3O^+}$ في المحلول.

الكتل الذرية النسبية: $A_\mathrm{r}(\mathrm{H}) = 1.$ $A_\mathrm{r}(\mathrm{C}) = 12;$ $A_\mathrm{r}(\mathrm{O}) = 16;$ $A_\mathrm{r}(\mathrm{N}) = 14;$

نص المسألة مترجم عن النص الإنجليزي الرسمي.

الإجابات

1. المواد هي:

الرمز	هوية المادة	SMILES
A	الأمونيا، $\mathrm{NH_3}$	`N`
B	حمض النتريك، $\mathrm{HNO_3}$	`O=[N+]([O-])O`
C	النيتروبنزين، $\mathrm{C_6H_5NO_2}$	`O=[N+]([O-])c1ccccc1`
D	الأنيلين، $\mathrm{C_6H_5NH_2}$	`Nc1ccccc1`

يخضع الأنيلين للسلفنة ليعطي حمض السلفانيليك، الذي يخضع للديازتة ثم يقترن مع N,N-ثنائي ميثيل الأنيلين ليعطي الميثيل البرتقالي. ترد جميع المعادلات الموزونة في الحل 1.

2. $\boxed{m(\mathbf{D}) \approx 31\ \mathrm{g}}$، بافتراض التحول الكمي وتوفير كمية إضافية من الهيدروجين لاختزال **C**.

3. الميثيل البرتقالي هو **4-{[4-(ثنائي ميثيل أمينو)فينيل]ديازينيل}بنزين سلفونات الصوديوم**، ويُسمّى أيضًا 4-[(4-ثنائي ميثيل أمينوفينيل)آزو]بنزين سلفونات الصوديوم. للصيغة المعتادة ذات التشكيل E تمثيل SMILES الآتي:
`CN(C)c1ccc(/N=N/c2ccc(S(=O)(=O)[O-])cc2)cc1.[Na+]`.

أنيونه الآزوي **أصفر**؛ وتؤدي زيادة تركيز الهيدرونيوم إلى تكوّن **الصيغة المبرتنة الحمراء**، التي تُعرض صيغها المساهمة في الرنين في الحل 3.

الحل

1. تحديد المواد ومعادلات التفاعلات الموزونة

بالاستدلال عكسيًا، فإن حمض السلفانيليك مشتق من الأنيلين تقع فيه مجموعة حمض السلفونيك في الموضع بارا بالنسبة إلى مجموعة الأمينو. لذلك فإن **D** هو الأنيلين. وتعطي هدرجة النيتروبنزين الأنيلين، وبذلك تُحدَّد هوية **C**. ويمكن تحضير النيتروبنزين بنترتة البنزين بحمض النتريك، وبذلك تُحدَّد هوية **B**. وأخيرًا، تُصطنع الأمونيا من الهيدروجين والنيتروجين، ويمكن أكسدتها مرورًا بأكاسيد النيتروجين إلى حمض النتريك، وبذلك تُحدَّد هوية **A**.

التحليل الكهربائي للماء. ينتج الماء (O) الهيدروجين ([H][H]) والأكسجين (O=O). وباستخدام الترميز المعتاد للبروتون في المحلول المائي، $\mathrm{H^+}$ ([+H])، تكون تفاعلات القطبين كما يأتي:

$$\begin{aligned} \text{المهبط:} \quad & 2\,\mathrm{H^+} + 2\,\mathrm{e^-} \longrightarrow \mathrm{H_2}, \\ \text{المصعد:} \quad & 2\,\mathrm{H_2O} \longrightarrow \mathrm{O_2} + 4\,\mathrm{H^+} + 4\,\mathrm{e^-}. \end{aligned}$$

إذن،

$$\boxed{2\,\mathrm{H_2O} \longrightarrow 2\,\mathrm{H_2} + \mathrm{O_2}}.$$

لا يُظهر ترميز البروتون إماهته في الماء.

اصطناع الأمونيا، A. يتفاعل الهيدروجين مع النيتروجين (N#N) باستخدام حفاز من الحديد عند درجة حرارة وضغط مرتفعين:

$$\boxed{\mathrm{N_2} + 3\,\mathrm{H_2} \rightleftharpoons 2\,\mathrm{NH_3}}.$$

تحويل A إلى حمض النتريك، B. تعطي الأكسدة الحفزية أولًا أحادي أكسيد النيتروجين ([N]=O)، الذي يتأكسد بعد ذلك إلى ثنائي أكسيد النيتروجين ([O-][N+]=O):

$$\begin{aligned} 4\,\mathrm{NH_3} + 5\,\mathrm{O_2} &\xrightarrow{\mathrm{Pt}} 4\,\mathrm{NO} + 6\,\mathrm{H_2O}, \\ 2\,\mathrm{NO} + \mathrm{O_2} &\longrightarrow 2\,\mathrm{NO_2}. \end{aligned}$$

يؤدي الامتصاص في الماء إلى تكوّن حمض النتريك وتجدد أحادي أكسيد النيتروجين:

$$3\,\mathrm{NO_2} + \mathrm{H_2O} \longrightarrow 2\,\mathrm{HNO_3} + \mathrm{NO}.$$

يُعاد أكسدة أحادي أكسيد النيتروجين المتجدد. وعليه، تكون المعادلة الإجمالية للامتصاص بوجود كمية كافية من الأكسجين:

$$4\,\mathrm{NO_2} + \mathrm{O_2} + 2\,\mathrm{H_2O} \longrightarrow 4\,\mathrm{HNO_3}.$$

ومن ثم فإن المعادلة الصافية لتحويل الأمونيا إلى حمض النتريك هي:

$$\boxed{\mathrm{NH_3} + 2\,\mathrm{O_2} \longrightarrow \mathrm{HNO_3} + \mathrm{H_2O}}.$$

تحضير النيتروبنزين، C. يُنترَت البنزين (c1ccccc1) بحمض النتريك في وجود حمض الكبريتيك المركز (OS(=O)(=O)O):

$$\boxed{\mathrm{C_6H_6} + \mathrm{HNO_3} \xrightarrow{\mathrm{H_2SO_4}} \mathrm{C_6H_5NO_2} + \mathrm{H_2O}}.$$

الاختزال إلى الأنيلين، D. تعطي الهدرجة الحفزية، على النيكل مثلًا، التفاعل الآتي:

$$\boxed{\mathrm{C_6H_5NO_2} + 3\,\mathrm{H_2} \xrightarrow{\mathrm{Ni}} \mathrm{C_6H_5NH_2} + 2\,\mathrm{H_2O}}.$$

سلفنة الأنيلين. ينتج عن التسخين مع حمض الكبريتيك المركز عند $180\,^\circ\mathrm{C}$ حمض السلفانيليك، أو حمض 4-أمينوبنزين سلفونيك: Nc1ccc(S(=O)(=O)O)cc1.

$$\boxed{\mathrm{C_6H_5NH_2} + \mathrm{H_2SO_4} \longrightarrow \mathrm{H_2N{-}C_6H_4{-}SO_3H} + \mathrm{H_2O}}.$$

تشغل مجموعتا الأمينو وحمض السلفونيك الموضعين 1 و4. ويوجد حمض السلفانيليك عادةً على هيئة الأيون المزدوج `c1ccc(S(=O)(=O)[O-])cc1[+NH3]`؛ وتستخدم المعادلة أعلاه تمثيله البنائي المتعادل.

الديازتة. يحوّل حمض النيتروز (`O=NO`) مجموعة الأمينو إلى مجموعة ديازونيوم في محلول حمضي عند نحو 0–$5\,^\circ\mathrm{C}$. والناتج هو 4-ديازونيوبنزين سلفونات، وهو ملح داخلي: `N#[N+]c1ccc(S(=O)(=O)[O-])cc1`.

معادلة تكوّنه الصافية الموزونة هي:

$$\boxed{\mathrm{H_2N{-}C_6H_4{-}SO_3H + HNO_2 \longrightarrow {^-O_3S{-}C_6H_4{-}N_2^+} + 2\,H_2O}}.$$

تبقى مجموعتا الديازونيوم والسلفونات في الوضع بارا إحداهما بالنسبة إلى الأخرى.

الاقتران الآزوي وتكوّن الميثيل البرتقالي. يقترن N,N-ثنائي ميثيل الأنيلين (`CN(C)c1ccccc1`) عند ذرة الكربون الواقعة في الموضع بارا بالنسبة إلى مجموعة ثنائي ميثيل أمينو. والمعادلة الجامعة للاقتران الذي يليه التعادل بهيدروكسيد الصوديوم (`[Na+].[OH-]`) هي:

$$\boxed{\begin{aligned}&{^-O_3S{-}C_6H_4{-}N_2^+} + C_6H_5{-}N(CH_3)_2 + NaOH\\ &\quad\longrightarrow NaO_3S{-}C_6H_4{-}N{=}N{-}C_6H_4{-}N(CH_3)_2 + H_2O.\end{aligned}}$$

كلتا حلقتي البنزين في الناتج ثنائية الاستبدال في الوضع بارا. والناتج هو ملح الصوديوم المسمّى الميثيل البرتقالي، الذي حُدِّدت هويته في الإجابة 3.

2. كتلة الأنيلين

باعتبار المقاومات المذكورة موصولة على التوالي، تكون القوة الدافعة الكهربائية الكلية والمقاومة الكلية:

$$\mathcal{E} = 10(1.5\ \mathrm{V}) = 15\ \mathrm{V},$$
$$R = 10(0.4\ \Omega) + 0.5\ \Omega = 4.5\ \Omega.$$

يعاكس جهد الاستقطاب القوة الدافعة الكهربائية المطبقة. ومن ثم:

$$I = \frac{\mathcal{E} - E_{\mathrm{pol}}}{R} = \frac{15 - 1.5}{4.5} = 3.0\ \mathrm{A}.$$

زمن التحليل الكهربائي هو:

$$t = 8(3600) + 56(60) + 7 = 32167\ \mathrm{s}.$$

إذن، الشحنة المارة هي:

$$Q = It = (3.0\ \mathrm{A})(32167\ \mathrm{s}) = 96501\ \mathrm{C}.$$

باستخدام القيمة القياسية لثابت فاراداي $F \approx 96500\ \mathrm{C\,mol^{-1}}$، وبافتراض كفاءة تيار كاملة، ينتج مولان من الإلكترونات مولًا واحدًا من الهيدروجين:

$$n(\mathrm{H_2}) = \frac{Q}{2F} = \frac{96501}{2(96500)} \approx 0.500\ \mathrm{mol}.$$

يعطي اصطناع الأمونيا:

$$n(\mathrm{NH_3}) = \frac{2}{3}n(\mathrm{H_2}) \approx \frac{1}{3}\ \mathrm{mol}.$$

العلاقات الستوكيومترية اللاحقة هي:

$$n(\mathrm{NH_3}) = n(\mathrm{HNO_3}) = n(\mathrm{C_6H_5NO_2}) = n(\mathrm{C_6H_5NH_2}),$$

بافتراض التحول الكمي، وتوافر كميات كافية من الكواشف الأخرى، وتوفير هيدروجين إضافي لاختزال النيتروبنزين.

الصيغة الجزيئية للأنيلين هي $\mathrm{C_6H_7N}$، لذا:

$$M(\mathrm{C_6H_7N}) = 6(12) + 7(1) + 14 = 93\ \mathrm{g\,mol^{-1}}.$$

إذن،

$$\boxed{m(\mathbf{D}) = \left(\frac{1}{3}\ \text{mol}\right)\left(93\ \text{g mol}^{-1}\right) \approx 31\ \text{g}}.$$

3. الميثيل البرتقالي: الاسم والبنى واتزان الدليل

الاسم الكيميائي الدقيق هو **4-{[4-(ثنائي ميثيل أمينو)فينيل]ديازينيل}بنزين سلفونات الصوديوم**، وله التشكيل الآزوي المعتاد E:

`CN(C)c1ccc(/N=N/c2ccc(S(=O)(=O)[O-])cc2)cc1.[Na+]`.

أيون الصوديوم، $\mathrm{Na^+}$ (`[Na+]`)، أيون متفرج. وبحذفه، يكون أنيون الميثيل البرتقالي الأصفر:

$$\boxed{\mathrm{^-O_3S{-}C_6H_4{-}N{=}N{-}C_6H_4{-}N(CH_3)_2}}$$

وتمثيله بصيغة SMILES هو `CN(C)c1ccc(/N=N/c2ccc(S(=O)(=O)[O-])cc2)cc1`.

يبرتن الهيدرونيوم، $\mathrm{H_3O^+}$ (`[OH3+]`)، ذرة النيتروجين الآزوية المرتبطة بالحلقة المسلفنة:

$$\underbrace{\mathrm{^-O_3S{-}C_6H_4{-}N{=}N{-}C_6H_4{-}N(CH_3)_2}}_{\text{أصفر}} + \mathrm{H_3O^+}$$
$$\rightleftharpoons \underbrace{\mathrm{^-O_3S{-}C_6H_4{-}NH^+{=}N{-}C_6H_4{-}N(CH_3)_2}}_{\text{الصيغة المبرتنة الحمراء}} + \mathrm{H_2O}.$$

للأيون المزدوج للميثيل البرتقالي المبرتن هذا تمثيل SMILES الآتي للصيغة الآزوية:

`CN(C)c1ccc(/N=[NH+]/c2ccc(S(=O)(=O)[O-])cc2)cc1`.

شحنته الموجبة غير متمركزة. ومن الصيغ البديلة المهمة المساهمة في الرنين الصيغة شبه الكينونية من نمط بارا:

$$\mathrm{^-O_3S{-}C_6H_4{-}NH^+{=}N{-}C_6H_4{-}N(CH_3)_2} \longleftrightarrow \mathrm{^-O_3S{-}C_6H_4{-}NH{-}N{=}C_6H_4{=}N^+(CH_3)_2}.$$

للصيغة **شبه الكينونية من نمط بارا المساهمة في رنين الميثيل البرتقالي المبرتن** تمثيل SMILES الآتي:

`C[N+](C)=C1C=CC(=NNc2ccc(S(=O)(=O)[O-])cc2)C=C1`.

لرسم هذه الصيغة المساهمة بدقة، أبقِ الحلقة المسلفنة عطرية. وفي الحلقة الأخرى، ضع ذرة النيتروجين المشتقة من مجموعة الآزو عند ذرة الكربون 1، وذرة نيتروجين مجموعة ثنائي ميثيل أمينو عند ذرة الكربون 4. ارسم رابطتين مزدوجتين خارج الحلقة تصلان ذرتي الكربون هاتين بذرتي النيتروجين المناظرتين لهما، ورابطتين مزدوجتين داخل الحلقة بين ذرتي الكربون 2–3 و5–6. تحمل ذرة نيتروجين مجموعة ثنائي ميثيل أمينو الشحنة الموجبة؛ ويبقى البروتون على ذرة النيتروجين المرتبطة بالحلقة المسلفنة.

هذه صيغ مساهمة في رنين النوع الكيميائي المبرتن نفسه. يسجّل تمثيل SMILES كل صيغة مساهمة على حدة؛ وهو لا يُظهر بذاته عدم تمركز الإلكترونات بينها.

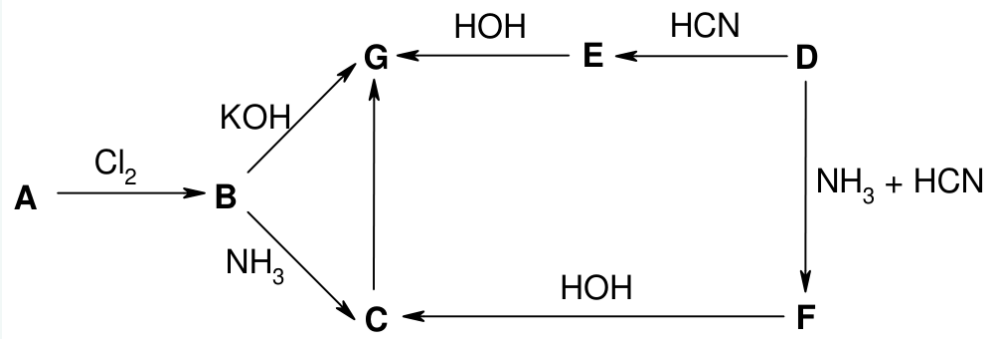
وبناءً عليه:

- تؤدي زيادة $[\mathrm{H_3O^+}]$ إلى ترجيح الصيغة المبرتنة، وتعطي محلولًا **أحمر**.
- يؤدي خفض $[\mathrm{H_3O^+}]$ إلى ترجيح الأنيون الآزوي، ويعطي محلولًا **أصفر**.
- تنتج النسب المتوسطة اللون الانتقالي **البرتقالي**.

تمت مراجعة الحل بمقارنته بالحل الرسمي.

المسألة 2: مخطط تفاعلات يؤدي إلى المادة G

يمكن تحضير المادة **G** بعدة طرائق وفقًا للمخطط الآتي:



يحتوي المركب **A** على 48.60 % كتليًا من الكربون، و8.10 % من الهيدروجين، و43.30 % من الأكسجين. ويتفاعل مع أكسيد الفضة(I) المحضّر حديثًا ليكوّن ملحًا غير ذائب. وتتكوّن كمية مقدارها 1.81 g من ملح الفضة(I) من 0.74 g من المركب **A**.

يحتوي المركب **D** على 54.54 % كتليًا من الكربون، و9.09 % من الهيدروجين، و36.37 % من الأكسجين. ويتحد مع $\mathrm{NaHSO_3}$ لينتج مركبًا يحتوي على 21.6 % من الكبريت.

المطلوب:

1. اكتب الصيغ الجزيئية وكذلك الصيغ البنائية للمادتين **A** و**D**.
2. اكتب الصيغ البنائية للمواد **B** و**C** و**E** و**F** و**G**.
3. صنّف التفاعلات المشار إليها بالأسهم في المخطط، وناقش بمزيد من التفصيل التفاعلين **B** → **G** و**E** → **D**.
4. اكتب الصيغ البنائية للمتماكبات الممكنة للمادة **G**، وحدّد نوع التماكب.

الكتل الذرية النسبية:

$$A_r(\mathrm{C}) = 12; \quad A_r(\mathrm{H}) = 1; \quad A_r(\mathrm{O}) = 16; \quad A_r(\mathrm{Ag}) = 108; \quad A_r(\mathrm{Na}) = 23; \quad A_r(\mathrm{S}) = 32.$$

نص المسألة مترجم عن النص الإنجليزي الرسمي.

الإجابات

1. A وD:

المادة	الاسم	الصيغة الجزيئية	الصيغة البنائية المكثفة	SMILES
A	حمض البروبانويك (حمض البروبيونيك)	$\mathrm{C_3H_6O_2}$	$\mathrm{CH_3CH_2COOH}$	`CCC(=O)O`
D	الإيثانال (الأسيتالدهيد)	$\mathrm{C_2H_4O}$	$\mathrm{CH_3CHO}$	`CC=O`

2. المركبات المتبقية:

المادة	الاسم	الصيغة البنائية المكثفة	SMILES
B	حمض 2-كلوروبروبانويك	$\mathrm{CH_3CHClCOOH}$	`CC(Cl)C(=O)O`
C	حمض 2-أمينوبروبانويك (الألانين)	$\mathrm{CH_3CH(NH_2)COOH}$	`CC(N)C(=O)O`
E	2-هيدروكسي بروبان نيتريل (سيانوهيدرين الأسيتالدهيد)	$\mathrm{CH_3CH(OH)CN}$	`CC(O)C#N`
F	2-أمينو بروبان نيتريل	$\mathrm{CH_3CH(NH_2)CN}$	`CC(N)C#N`
G	حمض 2-هيدروكسي بروبانويك (حمض اللاكتيك)	$\mathrm{CH_3CH(OH)COOH}$	`CC(O)C(=O)O`

لا تحدّد صيغ SMILES هذه الكيمياء الفراغية. وفي ظروف تفاعل غير كيرالية، تُحصل النواتج الكيرالية على هيئة مخاليط راسيمية.

3. تصنيف التفاعلات:

السهم	التصنيف
A → B	استبدال: كلورة عند ذرة الكربون المجاورة لمجموعة الكربوكسيل
B → G	استبدال نيوكليوفيلي: إحلال الهيدروكسيل محل الكلور
B → C	استبدال نيوكليوفيلي بالأمونيا؛ تحلّل بالأمونيا
C → G	نزع الأمين بالنتروزَة، مع إحلال الهيدروكسيل محل مجموعة الأمينو
D → E	إضافة نيوكليوفيلية إلى مجموعة كربونيل؛ تكوين سيانوهيدرين
E → G	تحلّل مائي لنتريل إلى حمض كربوكسيلي
D → F	تكاثف تتبعه إضافة السيانيد؛ مرحلة تكوين الأمينونتريل في اصطناع شتريكر
F → C	تحلّل مائي لنتريل إلى حمض كربوكسيلي

الكاشف الناقص في **C → G** هو حمض النيتروز، $\mathrm{HNO_2}$، ON=O. ويعطي هيدروكسيد البوتاسيوم المائي في البداية ملح اللاكتات في **B → G**؛ ويعطي التحميض **G** الحر.

4. للمادة G متماكبان ضوئيان، وهما متماكبان مرآتيان:

المتماكب	صيغة SMILES المحدّدة للكيمياء الفراغية
حمض (S)-2-هيدروكسي بروبانويك	C[C@H](O)C(=O)O
حمض (R)-2-هيدروكسي بروبانويك	C[C@@H](O)C(=O)O

ضمن عائلة الأحماض الهيدروكسية الكربوكسيلية، يُعدّ **حمض 3-هيدروكسي بروبانويك**، $\mathrm{HOCH_2CH_2COOH}$، OCCC(=O)O، أيضًا **متماكبًا بنائيًا موضعيًا** للمادة G.

الحل

1. تحديد هوية A وD

بالنسبة إلى **A**، تحتوي عينة مقدارها $100\ \mathrm{g}$ على

$$n(\mathrm{C}) = \frac{48.60}{12} = 4.050\ \mathrm{mol},$$

$$n(\mathrm{H}) = \frac{8.10}{1} = 8.10\ \mathrm{mol}, \qquad n(\mathrm{O}) = \frac{43.30}{16} = 2.70625\ \mathrm{mol}.$$

وعليه،

$$n(\mathrm{C}) : n(\mathrm{H}) : n(\mathrm{O}) = 1.4965 : 2.9931 : 1 \approx 3 : 6 : 2.$$

إذن الصيغة الأولية هي $\mathrm{C_3H_6O_2}$، وكتلة الصيغة الأولية هي

$$3(12) + 6(1) + 2(16) = 74\ \mathrm{g\,mol^{-1}}.$$

يدل تكوّن ملح فضة باستخدام أكسيد الفضة(I) على أن المركب حمض كربوكسيلي. وأي مضاعف صحيح لهذه الصيغة الأولية، $\mathrm{C_{3k}H_{6k}O_{2k}}$، له درجة عدم إشباع واحدة فقط:

$$\mathrm{DBE} = 1 + 3k - \frac{6k}{2} = 1.$$

وبالتالي، لا يمكن أن يحتوي إلا على مجموعة كربوكسيل واحدة. وعند تكوّن ملحه الفضي، تحل الفضة محل ذرة هيدروجين حمضية واحدة في كل جزيء، فتزداد الكتلة المولية بمقدار

$$108 - 1 = 107\ \mathrm{g\,mol^{-1}}.$$

ومن ثم،

$$n(\mathbf{A}) = \frac{(1.81 - 0.74)\ \text{g}}{107\ \text{g mol}^{-1}} = 0.0100\ \text{mol},$$

و

$$M(\mathbf{A}) = \frac{0.74\ \text{g}}{0.0100\ \text{mol}} = 74\ \text{g mol}^{-1}.$$

تساوي الصيغة الجزيئية الصيغة الأولية. والحمض الكربوكسيلي الذي يحتوي على ثلاث ذرات كربون هو **حمض البروبانويك**، `CCC(=O)O`.

تفاعل تكوين الملح هو

$$2\,\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH} + \text{Ag}_2\text{O} \longrightarrow 2\,\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOAg}\,(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}.$$

يُمثّل أكسيد الفضة(I) هنا أيونيًا بالصيغة `[Ag+].[Ag+].[O-2]`، وبروبانوات الفضة بالصيغة `[Ag+].[O-]C(=O)CCC`، والماء بالصيغة `O`. وتحدّد صيغ SMILES الأيونية هذه التركيب، لا التناسق في الحالة الصلبة.

الكتلة المولية لملح الفضة هي

$$M(\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_2\text{Ag}) = 36 + 5 + 32 + 108 = 181\ \text{g mol}^{-1},$$

ومن ثم تكون كتلة الملح المتوقعة

$$0.0100\ \text{mol} \times 181\ \text{g mol}^{-1} = 1.81\ \text{g},$$

وهي تطابق تمامًا المردود المذكور.

بالنسبة إلى **D**، تكون كميات المادة المقابلة في $100\ \text{g}$ هي

$$\frac{54.54}{12} : \frac{9.09}{1} : \frac{36.37}{16} = 4.545 : 9.09 : 2.273125 \approx 2 : 4 : 1.$$

إذن صيغته الأولية هي $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$، وكتلة صيغته الأولية $44\ \text{g mol}^{-1}$.

تدل إضافة هيدروجين كبريتيت الصوديوم، NaHSO_3، `[Na+].[O-]S(=O)O`، على وجود مركب كربونيلي. وأي مضاعف صحيح للصيغة $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$ له أيضًا درجة عدم إشباع واحدة فقط، لذا توجد مجموعة كربونيل واحدة وتُضاف وحدة واحدة من الهيدروجين كبريتيت إلى كل جزيء.

بما أن

$$M(\text{NaHSO}_3) = 23 + 1 + 32 + 3(16) = 104\ \text{g mol}^{-1},$$

فإن الكسر الكتلي للكبريت في ناتج الإضافة يعطي

$$\frac{32}{M(\mathbf{D}) + 104} = 0.216.$$

ولذلك،

$$M(\mathbf{D}) = \frac{32}{0.216} - 104 = 44.1\ \text{g mol}^{-1} \approx 44\ \text{g mol}^{-1}.$$

إذن الصيغة الجزيئية للمادة D هي $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$. ولا بد أن يكون المركب الكربونيلي المحتوي على ذرتي كربون هو الألدهيد **الإيثانال**، `CC=O`.

تفاعل الإضافة الخاص به هو

$$\text{CH}_3\text{CHO} + \text{NaHSO}_3 \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{CH(OH)SO}_3\text{Na}.$$

الناتج هو **1-هيدروكسي إيثان-1-سلفونات الصوديوم**، `CC(O)S(=O)(=O)[O-].[Na+]`. وتبلغ كتلته المولية $148\ \text{g mol}^{-1}$، مما يعطي

$$w(\text{S}) = \frac{32}{148} \times 100\% = 21.6\%.$$

2. تحديد هوية B وC وE وF وG

يوفّر الانطلاق من D أكثر السبل مباشرة لتحديد هوية G.

تؤدي إضافة **سيانيد الهيدروجين**، `C#N`، إلى الإيثانال إلى وضع مجموعتي الهيدروكسيل والسيانو على ذرة الكربون التي كانت كربون مجموعة الكربونيل. ولذلك يكون الناتج E هو **2-هيدروكسي بروبان نيتريل**:

$$\mathbf{E}: \quad \mathrm{CH_3CH(OH)CN}.$$

يحوّل التحلّل المائي كربون النتريل إلى كربون الكربوكسيل دون تغيير الهيكل الكربوني. وعليه، تكون G هي **حمض 2-هيدروكسي بروبانويك**:

$$\mathbf{G}: \quad \mathrm{CH_3CH(OH)COOH}.$$

لإنتاج هذه المادة G بإحلال الهيدروكسيل محل الكلور، يجب أن تحمل B الكلور على ذرة الكربون 2:

$$\mathbf{B}: \quad \mathrm{CH_3CHClCOOH}.$$

يؤدي إحلال مجموعة أمينو محل ذلك الكلور باستخدام **الأمونيا**، `N`، إلى إعطاء C، وهو **الألانين**:

$$\mathbf{C}: \quad \mathrm{CH_3CH(NH_2)COOH}.$$

وأخيرًا، يتفاعل الإيثانال مع الأمونيا وسيانيد الهيدروجين ليكوّن الأمينونتريل المقابل F:

$$\mathbf{F}: \quad \mathrm{CH_3CH(NH_2)CN}.$$

يعطي التحلّل المائي لمجموعة النتريل فيه الألانين، مما يؤكد بصورة مستقلة هوية كل من F وC.

3. المعادلات الموزونة وآليات التفاعل

تستخدم المعادلات أدناه الأشكال الجزيئية العضوية المتعادلة، ما لم يُذكر ملح صراحةً. ويتطلّب التحلّل المائي للنتريل ظروفًا مائية حمضية أو قلوية مناسبة، مع التسخين عادةً؛ وتعتمد حالات البروتنة أثناء التفاعل على الأس الهيدروجيني pH.

A → B: الكلورة في الموضع α

$$\mathrm{CH_3CH_2COOH + Cl_2 \longrightarrow CH_3CHClCOOH + HCl}.$$

هذا استبدال لذرة هيدروجين في الموضع α بالكلور، في الظروف المعتادة لهلجنة حمض كربوكسيلي في الموضع α. وصيغة SMILES للكلور هي `ClCl`؛ وصيغة SMILES لكلوريد الهيدروجين هي `Cl`.

B → G: استبدال نيوكليوفيلي بالتحلّل المائي

باستخدام **هيدروكسيد البوتاسيوم** المائي، `[K+].[OH-]`، يعطي التعادل وإزاحة الكلور

$$\mathrm{CH_3CHClCOOH + 2\,KOH \longrightarrow CH_3CH(OH)COOK + KCl + H_2O}.$$

الناتج العضوي في المحلول القلوي هو **لاكتات البوتاسيوم**، `[K+].[O-]C(=O)C(O)C`. وصيغة كلوريد البوتاسيوم هي `[K+].[Cl-]`.

ثم يعطي التحميض حمض اللاكتيك الحر:

$$\mathrm{CH_3CH(OH)COOK + HCl \longrightarrow CH_3CH(OH)COOH + KCl}.$$

يعادل مكافئ واحد من الهيدروكسيد مجموعة الكربوكسيل؛ ويُحدث مكافئ آخر الاستبدال. ويمكن تمثيل الاستبدال أيونيًا كما يأتي

$$\mathrm{CH_3CHClCOO^- + OH^- \longrightarrow CH_3CH(OH)COO^- + Cl^-}.$$

الأيونات المشاركة هي:

- **2-كلوروبروبانوات:** `CC(Cl)C(=O)[O-]`
- **الهيدروكسيد:** `[OH-]`
- **اللاكتات:** `CC(O)C(=O)[O-]`
- **الكلوريد:** `[Cl-]`

وفق وصف مباشر بآلية S_N2، يهاجم زوج إلكتروني حر على أكسجين الهيدروكسيد ذرة الكربون α من الجهة المقابلة للكلور. وينتقل الزوج الإلكتروني الرابط بين الكربون والكلور إلى الكلور بالتزامن مع تكوّن رابطة الكربون–الأكسجين. وتؤدي هذه الإزاحة المباشرة إلى انقلاب التشكيل الفراغي عند المركز الفراغي المنفرد. ولأن B تتكوّن على هيئة خليط راسيمي في ظروف غير كيرالية، فإن هذا المسار يعطي G راسيمية.

B → C: التحلّل بالأمونيا

$$\mathrm{CH_3CHClCOOH + 2\,NH_3 \longrightarrow CH_3CH(NH_2)COOH + NH_4Cl.}$$

هذا استبدال نيوكليوفيلي. يوفّر جزيء أمونيا واحد مجموعة الأمينو، بينما يستقبل جزيء آخر البروتون المتحرّر. وصيغة SMILES لـ**كلوريد الأمونيوم** هي `[NH4+].[Cl-]`.

C → G: نزع الأمين بالنتروزَة

$$\mathrm{CH_3CH(NH_2)COOH + HNO_2 \longrightarrow CH_3CH(OH)COOH + N_2 + H_2O.}$$

يُحِلّ **حمض النيتروز**، `ON=O`، الهيدروكسيل محل مجموعة الأمينو مع تصاعد **النيتروجين**، `N#N`. وهذا يحدّد الكاشف المحذوف من السهم الرأسي في المخطط.

D → E: تكوين السيانوهيدرين

$$\mathrm{CH_3CHO + HCN \rightleftharpoons CH_3CH(OH)CN.}$$

هذه إضافة نيوكليوفيلية إلى مجموعة الكربونيل. وتسير الآلية في خطوتين.

أولًا، يهاجم **أيون السيانيد**، `[C-]#N`، كربون الكربونيل الإلكتروفيلي عبر ذرة الكربون فيه. وينتقل زوج إلكترونات π في مجموعة الكربونيل إلى الأكسجين:

$$\mathrm{CH_3CHO + CN^- \rightleftharpoons CH_3CH(O^-)CN.}$$

الوسيط هو **ألكوكسيد السيانوهيدرين**، `CC([O-])C#N`.

ثانيًا، يأخذ الألكوكسيد بروتونًا من سيانيد الهيدروجين:

$$\mathrm{CH_3CH(O^-)CN + HCN \rightleftharpoons CH_3CH(OH)CN + CN^-.}$$

يتجدّد السيانيد. والتغيّران الصافيان هما تكوّن رابطة كربون–كربون وتحوّل مجموعة الكربونيل إلى مجموعة كحولية.

يكون كربون الكربونيل في البداية ذا هندسة مثلثية مستوية. ويتساوى احتمال الهجوم على وجهيه في وسط غير كيرالي، فتنتج كميات متساوية من المتماكبين المرآتيين للمادة E. ولذلك يعطي التحلّل المائي اللاحق للنتريل G راسيمية.

E → G: التحلّل المائي للنتريل

$$\mathrm{CH_3CH(OH)CN + 2\,H_2O \longrightarrow CH_3CH(OH)COOH + NH_3.}$$

تتحلّل مجموعة النتريل مائيًا، مرورًا بوسيط أميدي، إلى مجموعة كربوكسيل.

D → F: تكوين الأمينونتريل

$$\mathrm{CH_3CHO + NH_3 + HCN \longrightarrow CH_3CH(NH_2)CN + H_2O.}$$

هذه هي مرحلة تكوين الأمينونتريل في اصطناع شتريكر. وتشمل تكاثف الإيثانال مع الأمونيا، تليه إضافة السيانيد. ووسيط التكاثف هو **الإيثانيمين**، `CC=N`:

$$\mathrm{CH_3CHO + NH_3 \rightleftharpoons CH_3CH{=}NH + H_2O,}$$

ويليه، في المحصلة،

$$\mathrm{CH_3CH{=}NH + HCN \longrightarrow CH_3CH(NH_2)CN.}$$

F → C: التحلّل المائي للنتريل

$$\mathrm{CH_3CH(NH_2)CN + 2\,H_2O \longrightarrow CH_3CH(NH_2)COOH + NH_3.}$$

تتحوّل مجموعة النتريل إلى مجموعة كربوكسيل مع بقاء مجموعة الأمينو، فينتج الألانين.

4. تماكب G

ترتبط ذرة الكربون المركزية في حمض اللاكتيك بأربع مجموعات مختلفة:

$$-\mathrm{OH}, \quad -\mathrm{COOH}, \quad -\mathrm{CH_3}, \quad -\mathrm{H}.$$

لذلك فهي مركز مولّد للتماكب الفراغي. ويوجد متماكبان فراغيان بالضبط لهذا الترابط بين الذرات: **حمض اللاكتيك-(S)**، `C[C@H](O)C(=O)O`، و**حمض اللاكتيك-(R)**، `C[C@@H](O)C(=O)O`. وهما صورتان مرآتيتان غير قابلتين للتطابق: **متماكبان ضوئيان، أو متماكبان مرآتيان**.

يمكن تحديد مسقطي فيشر لهما بدقة كما يأتي. ضع مجموعة الكربوكسيل في الأعلى ومجموعة الميثيل في الأسفل:

المتماكب	المجموعة الأفقية اليسرى	المجموعة الأفقية اليمنى
حمض اللاكتيك-(S)	OH	H
حمض اللاكتيك-(R)	H	OH

في هذين المسقطين، تتجه الروابط الأفقية نحو الناظر، بينما تتجه الروابط الرأسية بعيدًا عنه. وترتيب الأولوية هو الهيدروكسيل $>$ الكربوكسيل $>$ الميثيل $>$ الهيدروجين.

للمتماكبين المرآتيين دورانان ضوئيان متساويان في المقدار ومتعاكسان في الاتجاه في ظروف قياس متماثلة. وخليطهما المتساوي المولات غير نشط ضوئيًا.

إذا كانت المتماكبات البنائية مقصودة أيضًا، فإن الحمض الهيدروكسي الكربوكسيلي المشبع الآخر ذي الصيغة $\mathrm{C_3H_6O_3}$ هو:

الاسم	البنية	SMILES	العلاقة بالمادة G
حمض 3-هيدروكسي بروبانويك	$\mathrm{HOCH_2CH_2COOH}$	`OCCC(=O)O`	متماكب موضعي؛ غير كيرالي

إن السماح بترتيبات مختلفة للمجموعات الوظيفية يعطي متماكبات بنائية إضافية. ومن أمثلتها **حمض ميثوكسي إيثانويك**، $\mathrm{CH_3OCH_2COOH}$، `COCC(=O)O`، و**2-هيدروكسي إيثانوات الميثيل (غليكولات الميثيل)**، $\mathrm{HOCH_2COOCH_3}$، `COC(=O)CO`. وهذه أمثلة توضح **تماكب المجموعات الوظيفية**.

تمت مراجعة الحل بمقارنته بالحل الرسمي.

المسألة 3: تفاعلات الأحماض والقواعد للمحاليل A-H ذات التركيز 0.2 M

تتوفر المحاليل الآتية بتركيز 0.2 مولاري:

A: HCl	**B:** $\mathrm{HSO_4^-}$	**C:** $\mathrm{CH_3COOH}$	**D:** NaOH
E: $\mathrm{CO_3^{2-}}$	**F:** $\mathrm{CH_3COONa}$	**G:** $\mathrm{HPO_4^{2-}}$	**H:** $\mathrm{H_2SO_4}$

المطلوب:

1. حدد تركيز أيونات $\mathrm{H_3O^+}$ في المحلول **C**.
2. حدد قيمة pH في المحلول **A**.
3. اكتب معادلة التفاعل الكيميائي الذي يحدث عند السماح للمادتين **B** و**E** بالتفاعل، وحدد أزواج الحمض والقاعدة المترافقة.
4. قارن الخواص الحمضية والقاعدية للمواد **A** و**B** و**C**، وحدد أيها يُظهر أكبر قدر من الخواص القاعدية. علل اختيارك.
5. اكتب معادلة كيميائية للتفاعل بين المادتين **B** و**G**، وفسر انزياح الاتزان.
6. اكتب معادلة كيميائية للتفاعل بين المادتين **C** و**E**، وفسر انزياح الاتزان.
7. احسب حجم المحلول **D** اللازم لمعادلة $20.0\ \mathrm{cm^3}$ من المحلول **H**.
8. ما حجم كلوريد الهيدروجين الموجود في لتر واحد من المحلول **A** لو كان في الحالة الغازية عند ضغط 202.65 kPa ودرجة حرارة 37 °C؟

ثوابت التأين:

$CH_3COOH + H_2O \rightleftharpoons CH_3COO^- + H_3O^+$	$K_a = 1.8 \times 10^{-5}$
$H_2CO_3 + H_2O \rightleftharpoons HCO_3^- + H_3O^+$	$K_a = 4.4 \times 10^{-7}$
$HCO_3^- + H_2O \rightleftharpoons CO_3^{2-} + H_3O^+$	$K_a = 4.7 \times 10^{-11}$
$HSO_4^{2-} + H_2O \rightleftharpoons SO_4^{2-} + H_3O^+$	$K_a = 1.7 \times 10^{-2}$
$HPO_4^{2-} + H_2O \rightleftharpoons PO_4^{3-} + H_3O^+$	$K_a = 4.4 \times 10^{-13}$

الكتل الذرية النسبية:

$$A_r(\mathrm{Na}) = 23; \quad A_r(\mathrm{S}) = 32; \quad A_r(\mathrm{O}) = 16.$$

نص المسألة مترجم عن النص الإنجليزي الرسمي.

الإجابات

1. $\boxed{[H_3O^+] = 1.9 \times 10^{-3}\ \mathrm{mol\,dm^{-3}}}$.
2. $\boxed{\mathrm{pH} = 0.70}$.
3. $HSO_4^- + CO_3^{2-} \rightleftharpoons SO_4^{2-} + HCO_3^-$. الأزواج المترافقة: HSO_4^-/SO_4^{2-} و HCO_3^-/CO_3^{2-}.
4. قوة الحمض: $\boxed{A > B > C}$. **للمحلول C أعلى قيمة pH، وهو الأقل حمضية؛ أما B فهو أمفيبروتي.** يميز هذان الوصفان بين تفسيرين محتملين لعبارة «أكبر قدر من الخواص القاعدية».
5. $HSO_4^- + HPO_4^{2-} \rightleftharpoons SO_4^{2-} + H_2PO_4^-$، مع رجحان تكوّن النواتج. الثابت اللازم لحساب ثابت اتزان هذا التفاعل غير معطى.
6. $CH_3COOH + CO_3^{2-} \rightleftharpoons CH_3COO^- + HCO_3^-$، حيث $\boxed{K = 3.8 \times 10^5}$، مع رجحان كبير لتكوّن النواتج. وعند توفر كمية كافية من الحمض، يؤدي استمرار التفاعل إلى انطلاق CO_2.
7. $\boxed{V_D = 40.0\ \mathrm{cm^3}}$.
8. $\boxed{V \approx 2.54\ \mathrm{dm^3}}$، بافتراض أن الغاز مثالي.

الحل

تُجمع أدناه أسماء الأنواع الكيميائية وصيغ SMILES المستخدمة في الإجابات والحسابات. تمثل صيغ SMILES ترابط الذرات والشحنات الشكلية؛ ولا تُظهر الإماهة في المحلول المائي، أو عدم تمركز الإلكترونات بفعل الرنين، أو اتجاه انتقال البروتون. وتفصل النقاط بين المكونات الأيونية للأملاح.

النوع الكيميائي	الاسم	SMILES
HCl	كلوريد الهيدروجين	`Cl`
HSO_4^-	أيون هيدروجين الكبريتات	`O=S(=O)(O)[O-]`
CH_3COOH	حمض الأسيتيك	`CC(=O)O`
$NaOH$	هيدروكسيد الصوديوم	`[-OH].[+Na]`
CO_3^{2-}	أيون الكربونات	`O=C([O-])[O-]`

النوع الكيميائي	الاسم	SMILES
CH_3COONa	أسيتات الصوديوم	`CC(=O)[O-].[Na+]`
HPO_4^{2-}	أيون هيدروجين الفوسفات	`O=P(O)([O-])[O-]`
H_2SO_4	حمض الكبريتيك	`O=S(=O)(O)O`
H_2O	الماء	`O`
H_3O^+	أيون الهيدرونيوم	`[+OH3]`
Cl^-	أيون الكلوريد	`[-Cl]`
CH_3COO^-	أيون الأسيتات	`CC(=O)[O-]`
SO_4^{2-}	أيون الكبريتات	`O=S(=O)([O-])[O-]`
HCO_3^-	أيون هيدروجين الكربونات	`O=C(O)[O-]`
H_2CO_3	حمض الكربونيك	`O=C(O)O`
CO_2	ثاني أكسيد الكربون	`O=C=O`
$H_2PO_4^-$	أيون ثنائي هيدروجين الفوسفات	`O=P(O)(O)[O-]`
PO_4^{3-}	أيون الفوسفات	`O=P([O-])([O-])[O-]`
Na_2SO_4	كبريتات الصوديوم	`S(=O)(=O)[O-][-O].[+Na].[+Na]`

تستخدم الحسابات التقريب المعتاد القائم على التراكيز في الاتزانات المائية.

1. تركيز الهيدرونيوم في C

يتفكك حمض الأسيتيك وفق المعادلة

$$\mathrm{CH_3COOH + H_2O \rightleftharpoons CH_3COO^- + H_3O^+}.$$

لنفرض أن $c_0 = 0.2\ \mathrm{mol\,dm^{-3}}$ وأن $x = [\mathrm{H_3O^+}]$. بإهمال المساهمة الضئيلة جدًا للماء،

$$[\mathrm{CH_3COO^-}] = x, \qquad [\mathrm{CH_3COOH}] = c_0 - x.$$

إذن

$$K_a = \frac{x^2}{c_0 - x} = 1.8 \times 10^{-5}.$$

يعطي حل المعادلة التربيعية

$$x = \frac{-K_a + \sqrt{K_a^2 + 4K_a c_0}}{2} = 1.8884 \times 10^{-3}\ \mathrm{mol\,dm^{-3}}.$$

وعليه،

$$\boxed{[\mathrm{H_3O^+}] \approx 1.9 \times 10^{-3}\ \mathrm{mol\,dm^{-3}}}.$$

يعطي التقريب $x \approx \sqrt{K_a c_0}$ النتيجة نفسها بعد التقريب العددي. ولا يتفكك سوى 0.94% من الحمض، لذا فإن هذا التقريب مبرر.

2. قيمة pH للمحلول A

كلوريد الهيدروجين حمض قوي، ويتأين بصورة كاملة عمليًا:

$$\mathrm{HCl + H_2O \longrightarrow H_3O^+ + Cl^-}.$$

وبناءً على ذلك،

$$[\mathrm{H_3O^+}] = 0.2\ \mathrm{mol\,dm^{-3}},$$

و

$$\boxed{\mathrm{pH} = -\log_{10}(0.2) = 0.699 \approx 0.70}.$$

3. التفاعل بين B وE؛ الأزواج المترافقة

يمنح أيون هيدروجين الكبريتات بروتونًا لأيون الكربونات:

$$\boxed{\mathrm{HSO_4}^- + \mathrm{CO_3}^{2-} \rightleftharpoons \mathrm{SO_4}^{2-} + \mathrm{HCO_3}^-}.$$

أزواج الحمض والقاعدة المترافقة، مع كتابة الحمض أولًا، هي

$$\underbrace{\mathrm{HSO_4}^-/\mathrm{SO_4}^{2-}}_{\text{مانح البروتون وقاعدته المترافقة}} \quad , \quad \underbrace{\mathrm{HCO_3}^-/\mathrm{CO_3}^{2-}}_{\text{الحمض المترافق ومستقبل البروتون}} \quad .$$

ثابت الاتزان لانتقال البروتون هذا هو

$$K = \frac{K_a(\mathrm{HSO_4}^-)}{K_a(\mathrm{HCO_3}^-)} = \frac{1.7 \times 10^{-2}}{4.7 \times 10^{-11}} = 3.6 \times 10^{8}.$$

ومن ثم يرجح التفاعل تكوّن النواتج بدرجة كبيرة.

إذا توفر مكافئان على الأقل من هيدروجين الكبريتات لكل أيون كربونات، أمكن انتقال بروتون ثانٍ:

$$\mathrm{HSO_4}^- + \mathrm{HCO_3}^- \rightleftharpoons \mathrm{SO_4}^{2-} + \mathrm{H_2CO_3},$$

ويلي ذلك

$$\mathrm{H_2CO_3} \rightleftharpoons \mathrm{CO_2} + \mathrm{H_2O}.$$

الزوج المترافق الإضافي هو $\mathrm{H_2CO_3}/\mathrm{HCO_3}^-$. ومع تصاعد ثاني أكسيد الكربون، يكون التفاعل الكلي

$$2\,\mathrm{HSO_4}^- + \mathrm{CO_3}^{2-} \longrightarrow 2\,\mathrm{SO_4}^{2-} + \mathrm{CO_2}\uparrow + \mathrm{H_2O}.$$

4. الخواص الحمضية والقاعدية للمواد A وB وC

تتناقص قوتها الحمضية وفق الترتيب

$$\boxed{\mathrm{HCl} > \mathrm{HSO_4}^- > \mathrm{CH_3COOH}}.$$

كلوريد الهيدروجين حمض قوي. ولهيدروجين الكبريتات ثابت $K_a = 1.7 \times 10^{-2}$، بينما لحمض الأسيتيك ثابت أصغر بكثير، وهو $K_a = 1.8 \times 10^{-5}$.

عند تساوي التراكيز التحليلية، تكون التراكيز التقريبية للهيدرونيوم وقيم pH كما يأتي:

المحلول	$[\mathrm{H_3O^+}]$، $\mathrm{mol\,dm^{-3}}$	pH
A	0.200	0.70
B	0.0504	1.30
C	0.00189	2.72

بالنسبة إلى B، تُستنتج القيمة من $x^2/(0.2 - x) = 1.7 \times 10^{-2}$.

إذن، **إذا كان المقصود بعبارة «الأكثر قاعدية» هو أعلى قيمة pH بين المحاليل الثلاثة، فالإجابة هي C**. ومع ذلك، فإن المحاليل الثلاثة جميعها حمضية.

وهناك تمييز آخر مستقل: **B أمفيبروتي** وفق التصنيف المعتاد للأحماض والقواعد في الأوساط المائية. إذ يمكنه منح بروتون،

$$\mathrm{HSO_4}^- + \mathrm{H_2O} \rightleftharpoons \mathrm{SO_4}^{2-} + \mathrm{H_3O^+},$$

أو استقبال بروتون في وسط حمضي بما يكفي،

$$\mathrm{HSO_4}^- + \mathrm{H_3O^+} \rightleftharpoons \mathrm{H_2SO_4} + \mathrm{H_2O}.$$

وعليه، تكون الإجابة B إذا كان المطلوب تحديد النوع الكيميائي الذي يُظهر سلوكًا حمضيًا وقاعديًا معًا. ولا تكفي الصفة الأمفيبروتية وحدها لترتيب القاعدية الذاتية من حيث القدرة على استقبال البروتون.

5. التفاعل بين B وG

يعمل هيدروجين الكبريتات بوصفه مانحًا للبروتون، وهيدروجين الفوسفات بوصفه مستقبلًا للبروتون:

$$\boxed{\mathrm{HSO_4^-} + \mathrm{HPO_4^{2-}} \rightleftharpoons \mathrm{SO_4^{2-}} + \mathrm{H_2PO_4^-}}.$$

يرجح الاتزان تكوّن النواتج لأن ثنائي هيدروجين الفوسفات حمض أضعف من هيدروجين الكبريتات: إذ ينتج عن انتقال البروتون زوج الحمض والقاعدة الأضعف.

يكون ثابت الاتزان

$$K = \frac{[\mathrm{SO_4^{2-}}][\mathrm{H_2PO_4^-}]}{[\mathrm{HSO_4^-}][\mathrm{HPO_4^{2-}}]} = \frac{K_a(\mathrm{HSO_4^-})}{K_a(\mathrm{H_2PO_4^-})}.$$

غير أن $K_a(\mathrm{H_2PO_4^-})$ غير معطى. فالقيمة المدرجة 4.4×10^{-13} تصف التفاعل

$$\mathrm{HPO_4^{2-}} + \mathrm{H_2O} \rightleftharpoons \mathrm{PO_4^{3-}} + \mathrm{H_3O^+},$$

ولا يمكن استخدامها في المقام للتفاعل المطلوب. لذا يستند الاتجاه المذكور أعلاه إلى العلاقة النوعية بين قوتي الحمضين؛ ولا يمكن حساب قيمة عددية لثابت الاتزان من الجدول المعطى وحده.

6. التفاعل بين C وE

ينقل حمض الأسيتيك بروتونًا إلى أيون الكربونات:

$$\boxed{\mathrm{CH_3COOH} + \mathrm{CO_3^{2-}} \rightleftharpoons \mathrm{CH_3COO^-} + \mathrm{HCO_3^-}}.$$

ثابت اتزانه هو

$$K = \frac{K_a(\mathrm{CH_3COOH})}{K_a(\mathrm{HCO_3^-})} = \frac{1.8 \times 10^{-5}}{4.7 \times 10^{-11}} = \boxed{3.8 \times 10^{5}}.$$

وعليه، ينزاح الاتزان بدرجة كبيرة نحو اليمين. فحمض الأسيتيك أقوى بكثير من هيدروجين الكربونات بوصفه مانحًا للبروتون.

مع إضافة المزيد من حمض الأسيتيك، يستقبل هيدروجين الكربونات أيضًا بروتونًا:

$$\mathrm{CH_3COOH} + \mathrm{HCO_3^-} \rightleftharpoons \mathrm{CH_3COO^-} + \mathrm{H_2CO_3}.$$

لهذه الخطوة،

$$K = \frac{1.8 \times 10^{-5}}{4.4 \times 10^{-7}} \approx 41,$$

لذا فهي أيضًا ترجح تكوّن النواتج. ويدفع تكوّن ثاني أكسيد الكربون وتصاعده التفاعل إلى مزيد من التقدم:

$$\mathrm{H_2CO_3} \rightleftharpoons \mathrm{CO_2} + \mathrm{H_2O}.$$

عند توفر مكافئين من الحمض لكل أيون كربونات، يكون التفاعل الكلي

$$\boxed{2\,\mathrm{CH_3COOH} + \mathrm{CO_3^{2-}} \longrightarrow 2\,\mathrm{CH_3COO^-} + \mathrm{CO_2}\uparrow + \mathrm{H_2O}}.$$

7. حجم D اللازم لمعادلة H

تتطلب المعادلة التامة مولين من هيدروكسيد الصوديوم لكل مول من حمض الكبريتيك:

$$\mathrm{H_2SO_4} + 2\,\mathrm{NaOH} \longrightarrow \mathrm{Na_2SO_4} + 2\,\mathrm{H_2O}.$$

كمية مادة حمض الكبريتيك هي

$$n(\mathrm{H_2SO_4}) = 0.2\ \mathrm{mol\,dm^{-3}} \times 20.0 \times 10^{-3}\ \mathrm{dm^3} = 4.00 \times 10^{-3}\ \mathrm{mol}.$$

وعليه،

$$n(\mathrm{NaOH}) = 8.00 \times 10^{-3}\ \mathrm{mol},$$

و

$$V_D = \frac{8.00 \times 10^{-3}\ \text{mol}}{0.2\ \text{mol dm}^{-3}} = 0.0400\ \text{dm}^3.$$

إذن،

$$\boxed{V_D = 40.0\ \text{cm}^3}.$$

يُختزل التركيز المولاري المشترك، لذا فإن حجم القاعدة المطلوب يساوي ضعف حجم الحمض تمامًا في الظروف المذكورة.

8. حجم كلوريد الهيدروجين الغازي

يحتوي لتر واحد من المحلول A على ما يعادل

$$n(\text{HCl}) = 0.2\ \text{mol dm}^{-3} \times 1\ \text{dm}^3 = 0.2\ \text{mol}.$$

باستخدام معادلة الغاز المثالي،

$$V = \frac{nRT}{p},$$

حيث

$$T = 37 + 273.15 = 310.15\ \text{K}, \qquad R = 8.314\ \text{kPa dm}^3\ \text{mol}^{-1}\ \text{K}^{-1},$$

نحصل على

$$V = \frac{(0.2)(8.314)(310.15)}{202.65}\ \text{dm}^3 = 2.5449\ \text{dm}^3.$$

ومن ثم،

$$\boxed{V \approx 2.54\ \text{dm}^3},$$

أي نحو $2.5\ \text{L}$.

تمت مراجعة الحل بمقارنته بالحل الرسمي.

المسألة 4: مزيج من مركبين عضويين يحتويان على الأكسجين

يحتوي مزيج على مركبين عضويين، **A** و**B**. يحتوي كلاهما على الأكسجين في جزيئاته، ويمكن مزجهما معًا بنسب اعتباطية. تؤدي أكسدة هذا المزيج مع التبريد إلى الحصول على مادة وحيدة **C** تتحد مع NaHSO_3. وتساوي نسبة الكتلة المولية للمادة المتكوّنة في التفاعل مع NaHSO_3 إلى الكتلة المولية للمادة **C** مقدار 2.7931.

يُحرَق مزيج المادتين **A** و**B** بوجود كمية متكافئة ستوكيومتريًا من الهواء (20 % من O_2 و80 % من N_2 حجمًا) في مقياس للغازات، فينتج مزيج غازي حجمه الكلي $5.432\ \text{dm}^3$ عند درجة الحرارة والضغط القياسيين (STP). وبعد تمرير المزيج الغازي على هيئة فقاعات عبر محلول Ba(OH)_2، ينخفض حجمه بنسبة 15.46 %.

المطلوب:

4.1 اكتب الصيغ البنائية للمادتين **A** و**B**.

4.2 احسب النسبة المولية للمادتين **A** و**B** في المزيج.

$$A_\text{r}(\text{C}) = 12; \qquad A_\text{r}(\text{O}) = 16; \qquad A_\text{r}(\text{S}) = 32; \qquad A_\text{r}(\text{Na}) = 23.$$

نص المسألة مترجم عن النص الإنجليزي الرسمي.

الإجابات

- **4.1** المركبان المقصودان هما **A: بروبان-2-ول**، $\mathrm{CH_3CH(OH)CH_3}$، وتمثيله بصيغة SMILES هو `CC(O)C`، و**B: بروبان-2-ون (الأسيتون)**، $\mathrm{CH_3COCH_3}$، وتمثيله بصيغة SMILES هو `CC(=O)C`. ويمكن تبادل الرمزين.
- **4.2** باستخدام هذين الرمزين،

$$\boxed{n(A) : n(B) \approx 1 : 4.}$$

يعطي الاستخدام المباشر للنسبة المئوية المطبوعة $3.94 : 1$؛ أما النسبة البسيطة $4 : 1$ فتعيد إنتاج النسبة المئوية المذكورة بعد التقريب.

الحل

4.1 — تعيين المركبين

يضيف الألدهيد أو الكيتون عادةً وحدة صيغية واحدة من هيدروجين كبريتيت الصوديوم، $\mathrm{NaHSO_3}$، وتمثيله بصيغة SMILES هو `[Na+].[O-]S(=O)O`، لكل مجموعة كربونيل، دون حذف جزيء آخر.

بأخذ $A_\mathrm{r}(\mathrm{H}) = 1$،

$$M(\mathrm{NaHSO_3}) = 23 + 1 + 32 + 3(16) = 104\ \mathrm{g\,mol^{-1}}.$$

بالنسبة إلى مركب **C** يحتوي على مجموعة كربونيل واحدة،

$$\frac{M(C) + 104}{M(C)} = 2.7931,$$

ومن ثم

$$M(C) = \frac{104}{1.7931} = 58.0001\ldots\ \mathrm{g\,mol^{-1}} \approx 58.0\ \mathrm{g\,mol^{-1}}.$$

الألدهيدات والكيتونات المعتادة المرشحة التي لها هذه الكتلة المولية صيغتها $\mathrm{C_3H_6O}$:

- البروبانال، $\mathrm{CH_3CH_2CHO}$، وتمثيله بصيغة SMILES هو `CCC=O`.
- بروبان-2-ون (الأسيتون)، $\mathrm{CH_3COCH_3}$، وتمثيله بصيغة SMILES هو `CC(=O)C`.

في ظروف الأكسدة التقليدية المقصودة هنا، يخضع الألدهيد لمزيد من الأكسدة. فالبروبانال يعطي حمض البروبانويك، وتمثيله بصيغة SMILES هو `CCC(=O)O`:

$$\mathrm{CH_3CH_2CHO} + [\mathrm{O}] \longrightarrow \mathrm{CH_3CH_2COOH}.$$

أما الأسيتون فيبقى دون تغير في ظروف الأكسدة المعتدلة. لذا يتكون المزيج المقصود من الأسيتون والكحول الثانوي الذي يتأكسد إلى الأسيتون، وهو بروبان-2-ول.

بتخصيص الرمز **A** لبروبان-2-ول والرمز **B** للأسيتون،

$$\mathrm{CH_3CH(OH)CH_3} + [\mathrm{O}] \longrightarrow \mathrm{CH_3COCH_3} + \mathrm{H_2O}.$$

يرمز $[\mathrm{O}]$ هنا إلى مكافئ ذرة أكسجين يوفّره العامل المؤكسد غير المحدد؛ وتمثيل الماء بصيغة SMILES هو `O`. ويبقى الأسيتون الأصلي، لذا يكون الناتج العضوي الوحيد هو **C = B**، أي الأسيتون. وهذان السائلان قابلان للامتزاج أحدهما بالآخر بجميع النسب.

يشكّل الأسيتون مركب إضافة البيسلفيت:

$$\mathrm{CH_3COCH_3} + \mathrm{NaHSO_3} \rightleftharpoons \mathrm{(CH_3)_2C(OH)SO_3Na}.$$

الناتج هو **2-هيدروكسي بروبان-2-سلفونات الصوديوم**، وتمثيله بصيغة SMILES هو `CC(C)(O)S(=O)(=O)[O-].[Na+]`. وصيغته $\mathrm{C_3H_7NaO_4S}$، و

$$M = 3(12) + 7 + 23 + 4(16) + 32 = 162\ \mathrm{g\,mol^{-1}}.$$

وهذا يؤكد النسبة المذكورة:

$$\frac{162}{58} = 2.793103\ldots \approx 2.7931.$$

4.2 — النسبة المولية

معادلات الاحتراق الموزونة هي

$$\mathrm{2\,CH_3CH(OH)CH_3 + 9\,O_2 \longrightarrow 6\,CO_2 + 8\,H_2O},$$
$$\mathrm{CH_3COCH_3 + 4\,O_2 \longrightarrow 3\,CO_2 + 3\,H_2O}.$$

الغازات المعنية هي الأكسجين، وتمثيله بصيغة SMILES هو `O=O`؛ والنيتروجين، وتمثيله بصيغة SMILES هو `N#N`؛ وثاني أكسيد الكربون، وتمثيله بصيغة SMILES هو `O=C=O`. باعتبار أحجام الغازات المذكورة عند درجة الحرارة والضغط القياسيين أحجامًا لغازات جافة، يُستبعد ماء الاحتراق. ولأن كمية الهواء متكافئة ستوكيومتريًا، فلا يتبقى أي أكسجين: والغازان المقاسان هما ثاني أكسيد الكربون والنيتروجين.

يزيل هيدروكسيد الباريوم ثاني أكسيد الكربون:

$$\mathrm{CO_2 + Ba(OH)_2 \longrightarrow BaCO_3\downarrow + H_2O}.$$

تمثيل الوحدة الصيغية لهيدروكسيد الباريوم بصيغة SMILES هو `[Ba+2].[-OH].[-OH]`؛ وتمثيل الوحدة الصيغية لكربونات الباريوم بصيغة SMILES هو `[Ba+2].[O-][O-]C(=O)`.

وبالتالي،

$$V(\mathrm{CO_2}) = 0.1546(5.432) = 0.8397872\ \mathrm{dm^3} \approx 0.8398\ \mathrm{dm^3},$$
$$V(\mathrm{N_2}) = 5.432 - 0.8397872 \approx 4.592\ \mathrm{dm^3}.$$

لتكن $x = n(A)$ و$y = n(B)$، وكلتاهما بالمول. تعطي معادلات الاحتراق

$$n(\mathrm{CO_2}) = 3x + 3y, \qquad n(\mathrm{O_2}) = \frac{9}{2}x + 4y.$$

يحتوي الهواء على أربعة مولات من النيتروجين لكل مول من الأكسجين، لذا

$$n(\mathrm{N_2}) = 4\left(\frac{9}{2}x + 4y\right) = 18x + 16y.$$

تساوي الكسور الحجمية للغازات كسورها المولية عند درجة الحرارة والضغط نفسيهما. لذلك،

$$0.1546 = \frac{3x + 3y}{(3x + 3y) + (18x + 16y)} = \frac{3(x + y)}{21x + 19y}.$$

بإعادة الترتيب،

$$3.2466x + 2.9374y = 3x + 3y,$$
$$0.2466x = 0.0626y,$$

ومن ثم

$$\frac{y}{x} = \frac{0.2466}{0.0626} = 3.9393\ldots.$$

وهكذا تعطي الأعداد المطبوعة $n(A) : n(B) = 1 : 3.94$. وللتحقق من النسبة البسيطة المقصودة $1 : 4$،

$$\frac{V(\mathrm{CO_2})}{V_{\text{الكلي}}} = \frac{3(1 + 4)}{21 + 19(4)} = \frac{15}{97},$$

وهو ما يقابل

$$15.4639\ldots\,\% = 15.46\%\quad \text{بعد التقريب}.$$

وعند الحجم الكلي المذكور، يعطي ذلك

$$V(\mathrm{CO_2}) = \frac{15}{97}(5.432) = 0.840\ \mathrm{dm^3},$$

بما يتفق مع بيانات الامتصاص. لذلك،

$$\boxed{n(\text{الأسيتون}) : n(\text{بروبان-2-ول}) \approx 1 : 4.}$$

تمت مراجعة الحل بمقارنته بالحل الرسمي.

المسألة 5: مزيج من فلزين: هيدريدات وهيدروكسيدات وراسب

تفاعل مزيج من فلزين يقعان في مجموعتين مختلفتين في جدول مندلييف الدوري مع 56 cm³ من الهيدروجين عند التسخين (قيس الحجم في الظروف القياسية لدرجة الحرارة والضغط)، فتكوّن مركّبان أيونيان. سُمح لهذين المركّبين بالتفاعل مع 270 mg من الماء، ولكن لم يتفاعل سوى ثلث الماء. تكوّن محلول قاعدي بلغت النسبة الكتلية للهيدروكسيدات فيه 30 %، وترسّب في الوقت نفسه راسب مثّلت كتلته 59.05 % من الكتلة الكلية للنواتج المتكوّنة من التفاعل. بعد الترشيح، سُخّن الراسب فنقصت كتلته بمقدار 27 mg.

عند إضافة كمية متكافئة ستوكيومتريًا من كربونات الأمونيوم إلى المحلول القاعدي، تكوّن راسب شحيح الذوبان، وتحررت الأمونيا في الوقت نفسه، وانخفضت نسبة الهيدروكسيدات في المحلول إلى 16.81 %.

المطلوب:

5.1 حدّد الفلزين في المزيج الابتدائي وكتلتيهما.

نص المسألة مترجم عن النص الإنجليزي الرسمي.

الإجابات

- **5.1** التركيب المقصود هو **الصوديوم**، Na: **نحو** 23 mg، و**الكالسيوم**، Ca: **نحو** 80 mg.

الحل

5.1

نستخدم الحجم المولي المتعارف عليه في الظروف القياسية لدرجة الحرارة والضغط، وهو $22\,400\ \mathrm{cm^3\ mol^{-1}}$، وكتلًا مولية مقربة.

يشير تكوّن هيدريدات أيونية إلى وجود فلز قلوي A وفلز قلوي ترابي B، يُكوّنان AH و$\mathrm{BH_2}$. وينتج عن تحللهما المائي الهيدروكسيدان الموافقان والهيدروجين.

كمية الهيدروجين المستهلكة في تكوين الهيدريدات هي

$$n(\mathrm{H_2}) = \frac{56}{22\,400} = 2.50 \times 10^{-3}\ \mathrm{mol}.$$

إذن تحتوي الهيدريدات على $5.00\ \mathrm{mmol}$ من الهيدروجين الهيدريدي. ويستهلك كل مول من الهيدروجين الهيدريدي مولًا واحدًا من الماء أثناء التحلل المائي، وهو ما يتفق مع

$$m(\mathrm{H_2O})_{\text{reacted}} = \frac{270}{3} = 90\ \mathrm{mg}, \qquad n(\mathrm{H_2O})_{\text{reacted}} = \frac{90}{18} = 5.00\ \mathrm{mmol}.$$

وعليه، فإن كتلة الماء الذي لم يتفاعل هي

$$270 - 90 = 180\ \mathrm{mg}.$$

تحتوي الهيدروكسيدات المتكوّنة على مجموع قدره $5.00\ \mathrm{mmol}$ من مجموعات الهيدروكسيد.

تحديد هوية الهيدروكسيد المترسّب.

لتكن S كتلة الهيدروكسيدات الذائبة. يحتوي المحلول الأولي على هيدروكسيدات بنسبة كتلية قدرها 30%:

$$\frac{S}{S+180} = 0.30, \qquad S = 77.14\,\text{mg} \simeq 77\,\text{mg}.$$

نفسّر النسبة المذكورة، 59.05%، على أنها الكسر الكتلي للراسب من **مجموع نواتج الهيدروكسيدات**. إذا كانت كتلته P، فإن

$$\frac{P}{P+S} = 0.5905, \qquad P = \frac{0.5905}{0.4095}(77.14) = 111.24\,\text{mg}.$$

يفقد هيدروكسيد الفلز القلوي الترابي مولًا واحدًا من الماء لكل مول منه عند تسخينه ليتحوّل إلى أكسيده. وبناءً على ذلك،

$$n\big(\text{B(OH)}_2\big)_{\text{precipitated}} = \frac{27\,\text{mg}}{18\,\text{mg mmol}^{-1}} = 1.50\,\text{mmol}.$$

كتلته المولية المستنتجة هي

$$M\big(\text{B(OH)}_2\big) = \frac{111.24\,\text{mg}}{1.50\,\text{mmol}} = 74.16\,\text{g mol}^{-1},$$

ومن ثم

$$M(B) \simeq 74.16 - 2(17) = 40.16\,\text{g mol}^{-1}.$$

وهذا يحدّد الفلز بأنه **الكالسيوم**. والتفاعل الحراري هو

$$\text{Ca(OH)}_2\,(\text{s}) \xrightarrow{\Delta} \text{CaO}\,(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}\,(\text{g}).$$

يحتوي الراسب على $2(1.50) = 3.00\,\text{mmol}$ من مجموعات الهيدروكسيد، فيتبقى منها $2.00\,\text{mmol}$ في المحلول.

تحديد هوية الفلز القلوي الذائب وتعيين الكميات.

نعبّر عن الكميتين الذائبتين بـ $x\,\text{mmol}$ من Ca(OH)_2 و$y\,\text{mmol}$ من AOH. عندئذٍ

$$y + 2x = 2.00.$$

تُفسَّر إضافة الكربونات على أنها بكمية متكافئة ستوكيومتريًا مع الكالسيوم الذائب:

$$\text{Ca(OH)}_2\,(\text{aq}) + (\text{NH}_4)_2\text{CO}_3\,(\text{aq}) \longrightarrow \text{CaCO}_3\,(\text{s}) + 2\,\text{NH}_3\,(\text{g}) + 2\,\text{H}_2\text{O}\,(\text{l}).$$

بالنسبة إلى $x\,\text{mmol}$ من هيدروكسيد الكالسيوم، يزيل هذا التفاعل نحو $74x\,\text{mg}$ من الهيدروكسيد الذائب وينتج $36x\,\text{mg}$ من الماء. والهيدروكسيد المتبقي هو AOH.

باستخدام $S \simeq 77\,\text{mg}$، يعطينا الكسر الكتلي النهائي

$$\frac{77 - 74x}{180 + 36x + 77 - 74x} \simeq 0.1681.$$

لذلك،

$$x \simeq 0.500, \qquad y = 2.00 - 2x \simeq 1.00.$$

كتلة هيدروكسيد الفلز القلوي المتبقي هي

$$m(\text{AOH}) \simeq 77 - 74(0.500) = 40.0\,\text{mg}.$$

ومن ثم

$$M(\text{AOH}) \simeq \frac{40.0\,\text{mg}}{1.00\,\text{mmol}} = 40.0\,\text{g mol}^{-1},$$

و

$$M(A) \simeq 40.0 - 17.0 = 23.0\,\text{g mol}^{-1}.$$

إذن A هو **الصوديوم**.

وبناءً على ذلك، فإن كميتي الفلزين الأصليتين هما

$$n(\mathrm{Na}) \simeq 1.00\,\mathrm{mmol}, \qquad n(\mathrm{Ca}) \simeq 1.50 + 0.500 = 2.00\,\mathrm{mmol}.$$

وكتلتاهما هما

$$\boxed{m(\mathrm{Na}) \simeq 23\,\mathrm{mg}}, \qquad \boxed{m(\mathrm{Ca}) \simeq 80\,\mathrm{mg}}.$$

معادلات التفاعل والتحققات العددية.

تكوين الهيدريدات:

$$2\,\mathrm{Na\,(s)} + \mathrm{H_2\,(g)} \xrightarrow{\Delta} 2\,\mathrm{NaH\,(s)}$$
$$\mathrm{Ca\,(s)} + \mathrm{H_2\,(g)} \xrightarrow{\Delta} \mathrm{CaH_2\,(s)}.$$

التحلل المائي:

$$\mathrm{NaH\,(s)} + \mathrm{H_2O\,(l)} \longrightarrow \mathrm{NaOH\,(aq)} + \mathrm{H_2\,(g)}$$
$$\mathrm{CaH_2\,(s)} + 2\,\mathrm{H_2O\,(l)} \longrightarrow \mathrm{Ca(OH)_2} + 2\,\mathrm{H_2\,(g)}.$$

تستهلك الكميات المقترحة

$$n(\mathrm{H_2}) = \frac{1.00}{2} + 2.00 = 2.50\,\mathrm{mmol},$$

وهو ما يقابل $56\,\mathrm{cm^3}$، وكذلك

$$n(\mathrm{H_2O}) = 1.00 + 2(2.00) = 5.00\,\mathrm{mmol} = 90\,\mathrm{mg}.$$

يحتوي الراشح الأول على نحو $40\,\mathrm{mg}$ من هيدروكسيد الصوديوم، و$37\,\mathrm{mg}$ من هيدروكسيد الكالسيوم، و$180\,\mathrm{mg}$ من الماء:

$$w_{\mathrm{hydroxides}} = \frac{40 + 37}{40 + 37 + 180} \times 100\% = 29.96\% \simeq 30\%.$$

تبلغ كتلة راسب هيدروكسيد الكالسيوم البالغة كميته $1.50\,\mathrm{mmol}$ نحو $111\,\mathrm{mg}$، ويفقد $27\,\mathrm{mg}$ من الماء عند التسخين.

يزيل الترسيب بالكربونات هيدروكسيد الكالسيوم الذائب ويولّد $18\,\mathrm{mg}$ من الماء. لذلك يحتوي المحلول النهائي على $40\,\mathrm{mg}$ من هيدروكسيد الصوديوم و$198\,\mathrm{mg}$ من الماء:

$$w_{\mathrm{hydroxides,final}} = \frac{40}{40 + 198} \times 100\% = 16.8067\% \simeq 16.81\%.$$

للمواد الجزيئية والأيونية المستخدمة أعلاه تمثيلات SMILES التالية. وبالنسبة إلى المركّبات الأيونية، تحدّد هذه التمثيلات الأيونات المكوّنة لها، لا الشبكة البلورية أو الإماهة في المحلول المائي.

المادة	الصيغة	SMILES
الهيدروجين	$\mathrm{H_2}$	`[H][H]`
الماء	$\mathrm{H_2O}$	`O`
هيدريد الصوديوم	NaH	`[-H].[+Na]`
هيدريد الكالسيوم	$\mathrm{CaH_2}$	`[-H].[-H].[Ca+2]`
هيدروكسيد الصوديوم	NaOH	`[-OH].[+Na]`
هيدروكسيد الكالسيوم	$\mathrm{Ca(OH)_2}$	`[-OH].[-OH].[Ca+2]`
أكسيد الكالسيوم	CaO	`[O-2].[Ca+2]`
كربونات الأمونيوم	$\mathrm{(NH_4)_2CO_3}$	`C(=O)([O-])[-O].[+NH4].[+NH4]`
كربونات الكالسيوم	$\mathrm{CaCO_3}$	`C(=O)([O-])[-O].[Ca+2]`

المادة	الصيغة	SMILES
الأمونيا	NH_3	N

تمت مراجعة الحل بمقارنته بالحل الرسمي.