

IChO 1980

المسائل النظرية والحلول · لينتس، النمسا · 6 مسائل نظرية مع حلول كاملة

eulersolve.org/icho/1980/

المسألة 1: التفكك الضوئي للكlor والمردود الكمي لتفاعل $\text{H}_2\text{-Cl}_2$ تفكك الكلور (الجزيئي) عملية ماصة للحرارة، $\Delta H = 243.6 \text{ kJ mol}^{-1}$.

يمكن أيضاً إحداث التفكك بتأثير الضوء.

1.1 عند أي طول موجي يمكن توقُّع أن يحدث الضوء تفككاً؟

1.2 هل يمكن أيضاً الحصول على هذا التأثير باستخدام ضوء طوله الموجي أقصر أو أطول من الطول الموجي الحرج المحسوب؟

1.3 ما طاقة الفوتون ذي الطول الموجي الحرج؟

عندما يسقط ضوء قادر على إحداث تفكك الكلور على مزيج من غازي الكلور والهيدروجين، يتكوّن كلوريد الهيدروجين. يُعرَّض المزيج للإشعاع باستخدام مصباح زئبقي للأشعة فوق البنفسجية ($\lambda = 253.6 \text{ nm}$). تبلغ القدرة الداخلة إلى المصباح 10 واط. يمتص المزيج الغازي (في وعاء سعته 10 لترات) نسبة 2 % من الطاقة المزودة. خلال 2.5 ثانية من التشعيع، يتكوّن 65 مليمولاً من HCl .

1.4 ما مقدار المردود الكمي (= عدد جزيئات الناتج لكل فوتون ممتص)؟

1.5 كيف يمكن تفسير القيمة التي تم الحصول عليها (تفسيراً نوعياً)؟ صف آلية التفاعل.

نص المسألة مترجم عن النص الإنجليزي الرسمي.

الإجابات

- 1.1 الطول الموجي الحرج هو $\lambda_{\text{crit}} = 491.1 \text{ nm}$ ، وهو أكبر طول موجي يسمح به شرط طاقة التفكك.
- 1.2 يمكن للأطوال الموجية الأقصر أن تحدث التفكك إذا امتصّت. أما الأطوال الموجية الأطول فلا تستطيع توفير طاقة كافية للتفكك بفوتون واحد.
- 1.3 $E_{\text{crit}} = 4.045 \times 10^{-19} \text{ J}$ لكل فوتون.
- 1.4 $\Phi \approx 6.1 \times 10^4$ جزيئاً من كلوريد الهيدروجين (Cl [H]) لكل فوتون ممتص.
- 1.5 يجري التفاعل بآلية سلسلة جذرية. يبدأ التفكك الضوئي سلاسل تُنتج خطوات استمرارها كلوريد الهيدروجين بصورة متكررة وتُجدد الجذور الحاملة للسلسلة. وينتهي اتحاد الجذور من جديد هذه السلاسل.

الحل

نستخدم الثوابت القياسية

$$h = 6.62607015 \times 10^{-34} \text{ J s}, \quad c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m s}^{-1},$$

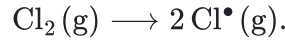
$$N_A = 6.02214076 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}.$$

الأنواع الكيميائية المستخدمة أدناه هي:

الاسم	الصيغة	SMILES
الكlor الجزيئي	Cl ₂	ClCl
الهيدروجين الجزيئي	H ₂	[H][H]
كلوريد الهيدروجين	HCl	Cl[H]
ذرة الكلور (جذر الكلور)	Cl•	[Cl]
ذرة الهيدروجين (جذر الهيدروجين)	H•	[H]

1.1 — الطول الموجي الحرج

يتمثل التفكك في



باعتبار إنتالبي التفكك المولي المعطى طاقة التفكك المطلوبة، يجب أن يوفر فوتون ممتص واحد طاقة لا تقل عن

$$E_{\text{diss}} = \frac{\Delta H}{N_A}.$$

بما أن طاقة الفوتون هي $E = hc/\lambda$ ، فإن عتبة التفكك تحقق

$$\frac{hc}{\lambda_{\text{crit}}} = \frac{\Delta H}{N_A}.$$

وعليه،

$$\lambda_{\text{crit}} = \frac{N_A hc}{\Delta H} = \frac{N_A hc}{243.6 \times 10^3 \text{ J mol}^{-1}} = 4.91078 \times 10^{-7} \text{ m}.$$

إذن،

$$\boxed{\lambda_{\text{crit}} = 491.1 \text{ nm}}.$$

1.2 — الأطوال الموجية الأقصر والأطول

تتناسب طاقة الفوتون عكسياً مع الطول الموجي:

$$E = \frac{hc}{\lambda}.$$

وبناءً على ذلك:

- عندما يكون $\lambda < \lambda_{\text{crit}}$ ، تكون طاقة الفوتون أكبر من الحد الأدنى لطاقة التفكك. ويكون التفكك ممكناً من حيث الطاقة، بشرط امتصاص الفوتون في انتقال مناسب.
- عندما يكون $\lambda > \lambda_{\text{crit}}$ ، تكون طاقة الفوتون غير كافية. ولا يمكنه تفكيك الجزيء في العملية القائمة على فوتون واحد التي نتناولها هنا.

1.3 — طاقة فوتون ذي الطول الموجي الحرج

$$E_{\text{crit}} = \frac{\Delta H}{N_A} = \frac{243.6 \times 10^3 \text{ J mol}^{-1}}{6.02214076 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}}.$$

ومن ثم،

$$\boxed{E_{\text{crit}} = 4.045 \times 10^{-19} \text{ J}}.$$

1.4 — المردود الكمي

الطاقة الممتصة أثناء التشعيع هي

$$Q_{\text{abs}} = 0.02Pt = 0.02(10 \text{ J s}^{-1})(2.5 \text{ s}) = 0.50 \text{ J}.$$

عند الطول الموجي للمصباح، تكون الطاقة لكل فوتون

$$E_{\text{UV}} = \frac{hc}{253.6 \times 10^{-9} \text{ m}} = 7.833 \times 10^{-19} \text{ J}.$$

وعليه، فإن عدد الفوتونات الممتصة هو

$$N_{\text{abs}} = \frac{Q_{\text{abs}}}{E_{\text{UV}}} = \frac{0.50}{7.833 \times 10^{-19}} = 6.383 \times 10^{17}.$$

عدد جزيئات كلوريد الهيدروجين المتكوّنة هو

$$N_{\text{HCl}} = n_{\text{HCl}}N_{\text{A}} = (65 \times 10^{-3} \text{ mol})N_{\text{A}} = 3.914 \times 10^{22}.$$

باستخدام التعريف الوارد في السؤال،

$$\Phi = \frac{N_{\text{HCl}}}{N_{\text{abs}}} = \frac{3.914 \times 10^{22}}{6.383 \times 10^{17}} = 6.132 \times 10^4.$$

إذن،

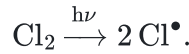
$$\boxed{\Phi \approx 6.1 \times 10^4 \text{ جزيئاً من كلوريد الهيدروجين لكل فوتون ممتص}}.$$

لا حاجة إلى حجم الوعاء، لأن الحساب يستخدم الطاقة الكلية الممتصة والكمية الكلية للنواتج.

1.5 — التفسير وآلية التفاعل

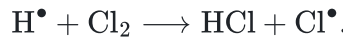
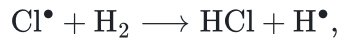
يُظهر المردود الكمي الكبير جداً أن فوتوناً ممتصاً واحداً يؤدي إلى تفاعلات عديدة مُكوّنة للنواتج عبر سلسلة جذرية.

بدء السلسلة:



يحدث الضوء انشطاراً متماثلاً لرابطة الكلور-الكلور: يذهب إلكترون واحد من إلكتروني الرابطة إلى كل ذرة كلور.

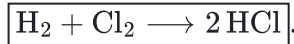
استمرار السلسلة:



أولاً، ينتزع جذر الكلور ذرة هيدروجين من الهيدروجين الجزيئي. ثم ينتزع جذر الهيدروجين الناتج ذرة كلور من الكلور الجزيئي.

في كل عملية انتزاع، يُشكّل الإلكترون غير المزدوج للجذر المهاجم وإلكترون واحد من الرابطة المكسورة الرابطة الجديدة؛ ويبقى إلكترون الرابطة الآخر على الذرة التي تتحرر على هيئة جذر. ولا تُصوّر تمثيلات SMILES هذه الانتقالات الإلكترونية.

بجمع خطوتي استمرار السلسلة نحصل على



يتجدد جذر الكلور، ولذلك يمكن أن تتكرر هذه الدورة مرات عديدة دون فوتون آخر.

إنهاء السلسلة: تُزال الجذور باتحادها من جديد، على سبيل المثال،



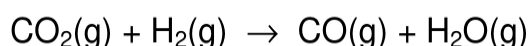
يرمز M هنا إلى شريك ثالث في التصادم يحمل الطاقة الزائدة بعيداً. وقد تُفقد الجذور أيضاً عند جدران الوعاء.

نظرًا إلى تكرار خطوات استمرار السلسلة مرات عديدة قبل إنهاؤها، يمكن أن يتكوّن نحو 6.1×10^4 جزيئاً من كلوريد الهيدروجين لكل فوتون ممتص. يبدأ الفوتون السلسلة؛ أما التفاعل الكيميائي الكلي الطارد للحرارة فيوفّر الطاقة المنطلقة أثناء استمرارها.

تمت مراجعة الحل بمقارنته بالحل الرسمي. حيثما يختلف هذا الحل عن الحل الرسمي، يحتوي الحل الرسمي على خطأ أو خطأ مطبعي.

المسألة 2: اتزان غاز الماء

يُسمّى التفاعل الغازي المتجانس



تفاعل غاز الماء.

المطلوب:

2.1 احسب طاقة غيبس للتفاعل، ΔG_{1000}^0 ، لتفاعل غاز الماء عند K 1000 انطلاقاً من إنثالبي التفاعل:

$$\Delta H_{1000}^0 = 35040 \text{ J mol}^{-1}$$

وإنتروبيا التفاعل:

$$\Delta S_{1000}^0 = 32.11 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}.$$

2.2 ما قيمة ثابت الاتزان K_p لتفاعل غاز الماء عند K 1000؟

2.3 ما قيمتا ثابتي الاتزان K_x و K_c (حيث x : الكسر المولي، و c : التركيز بوحدة mol dm^{-3}) عند درجة الحرارة نفسها (1000 K)؟ (ملاحظة: يسلك الغاز سلوكاً مثاليًا.)

2.4 يُسخّن مزيج من الغازات يحتوي على 35% حجمياً من H_2 ، و 45% حجمياً من CO، و 20% حجمياً من بخار H_2O إلى K 1000. ما تركيب المزيج بعد استقرار اتزان غاز الماء؟

2.5 احسب قيمة إنثالبي التفاعل، ΔH_{1400}^0 ، عند K 1400 انطلاقاً من قيمة إنثالبي التفاعل، ΔH_{1000}^0 ، وقيم السعة الحرارية المولية، c_p^0 ، (الصالحة في مجال درجات الحرارة من K 1000 إلى K 1400)

$$\Delta H_{1000}^0 = 35040 \text{ J mol}^{-1}$$

$$c_p^0(\text{CO}_2) = 42.31 + 10.09 \times 10^{-3} T \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$c_p^0(\text{H}_2) = 27.40 + 3.20 \times 10^{-3} T \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$c_p^0(\text{CO}) = 28.34 + 4.14 \times 10^{-3} T \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$c_p^0(\text{H}_2\text{O}) = 30.09 + 10.67 \times 10^{-3} T \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$\left(\int_a^b (c_1 + c_2 x) dx = c_1(b - a) + 0.5c_2(b^2 - a^2) \right) \text{ (تصح العلاقة)}$$

2.6 ماذا يمكنك أن تستنتج، استناداً إلى النتائج السابقة المتعلقة بـ ΔH^0 ، بشأن انزياح اتزان غاز الماء مع ارتفاع درجة الحرارة؟

نص المسألة مترجم عن النص الإنجليزي الرسمي.

الإجابات

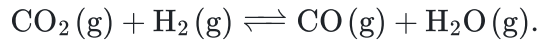
• **2.1** : $\Delta G_{1000}^0 = +2.93 \text{ kJ mol}^{-1}$

• **2.2** : $K_p = 0.703$ عند K 1000.

- 2.3: $K_x = K_c = K_p = 0.703$ ، وجميعها بلا أبعاد.
- 2.4: تركيب المزيج عند الاتزان بالحجم هو تقريباً 45.4% هيدروجين ($[H][H]$)، و34.6% أول أكسيد الكربون ($[+O] \# [-C]$)، و9.6% بخار الماء (O)، و10.4% ثاني أكسيد الكربون ($O=C=O$).
- 2.5: $\Delta H_{1400}^0 = +31.26 \text{ kJ mol}^{-1}$.
- 2.6: تؤدي زيادة درجة الحرارة إلى انزياح الاتزان نحو نواتج التفاعل المذكور، CO و H_2O ؛ ويزداد ثابت الاتزان.

الحل

التفاعل الموزون، الذي تكون فيه جميع الأنواع الكيميائية غازية، هو



تشير الكميات الخاصة بالتفاعل فيما يلي إلى مول واحد من التفاعل كما كُتب.

2.1 — طاقة غيبس للتفاعل

باستخدام

$$\Delta G_T^0 = \Delta H_T^0 - T\Delta S_T^0,$$

نحصل على

$$\begin{aligned}\Delta G_{1000}^0 &= 35040 \text{ J mol}^{-1} - (1000 \text{ K})(32.11 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}) \\ &= 2930 \text{ J mol}^{-1}.\end{aligned}$$

إذن

$$\Delta G_{1000}^0 = +2.93 \text{ kJ mol}^{-1}.$$

2.2 — ثابت الاتزان بدلالة الضغط

بالنسبة إلى الغازات المثالية، يكون ثابت الاتزان اللابُعدي

$$K_p = \frac{(p_{CO}/p^0)(p_{H_2O}/p^0)}{(p_{CO_2}/p^0)(p_{H_2}/p^0)} = \frac{p_{CO}p_{H_2O}}{p_{CO_2}p_{H_2}}.$$

تحقق طاقة غيبس القياسية للتفاعل العلاقة

$$\Delta G^0 = -RT \ln K_p.$$

باستخدام $R = 8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ،

$$\ln K_p = -\frac{2930}{8.314 \times 1000} = -0.35242,$$

ومن ثم

$$K_p = e^{-0.35242} = 0.70299 \approx 0.703.$$

2.3 — ثابتا الاتزان بدلالة الكسر المولي والتركيز

التغير في الكمية الكلية الستوكيومترية للغاز هو

$$\Delta \nu_{\text{gas}} = (1 + 1) - (1 + 1) = 0.$$

بما أن $p_i = x_i P$

$$K_p = \frac{(x_{CO}P)(x_{H_2O}P)}{(x_{CO_2}P)(x_{H_2}P)} = \frac{x_{CO}x_{H_2O}}{x_{CO_2}x_{H_2}} = K_x.$$

وبالمثل، تعطي علاقة الغاز المثالي $p_i = c_i RT$ ، عند استخدام وحدات متسقة،

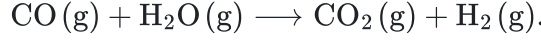
$$K_p = \frac{(c_{\text{CO}}RT)(c_{\text{H}_2\text{O}}RT)}{(c_{\text{CO}_2}RT)(c_{\text{H}_2}RT)} = \frac{c_{\text{CO}}c_{\text{H}_2\text{O}}}{c_{\text{CO}_2}c_{\text{H}_2}} = K_c.$$

تُختزل جميع وحدات الضغط والتركيز لأن $\Delta \nu_{\text{gas}} = 0$. لذلك

$$K_x = K_c = K_p = 0.703.$$

2.4 — التركيب عند الاتزان

بالنسبة إلى الغازات المثالية، تساوي الكسور الحجمية الكسور المولية. لا يوجد ثاني أكسيد الكربون في البداية، لذا يسير التفاعل في الاتجاه العكسي:



تظل الكمية الكلية للغاز ثابتة. ليكن z الكسر المولي لثاني أكسيد الكربون عند الاتزان. تعطي العلاقات الستوكيومترية حينئذٍ:

الغاز	الكسر المولي الابتدائي	الكسر المولي عند الاتزان
CO ₂	0	z
H ₂	0.35	$0.35 + z$
CO	0.45	$0.45 - z$
H ₂ O	0.20	$0.20 - z$

المجال المسموح به فيزيائياً هو $0 < z < 0.20$. بالتعويض في عبارة الاتزان للتفاعل كما كُتب في الأصل،

$$K_x = \frac{(0.45 - z)(0.20 - z)}{z(0.35 + z)} = 0.7029865.$$

يعطي النشر

$$(1 - K_x)z^2 - (0.65 + 0.35K_x)z + 0.0900 = 0,$$

أو

$$0.2970135z^2 - 0.8960453z + 0.0900 = 0.$$

الجزران هما تقريباً 0.1040285 و 2.91282. الجذر الأول وحده يقع ضمن الحدود الفيزيائية:

$$z = 0.1040285.$$

إذن يكون التركيب عند الاتزان:

الغاز	النسبة المئوية الحجمية عند الاتزان
الهيدروجين، H ₂	45.4%
أول أكسيد الكربون، CO	34.6%
بخار الماء، H ₂ O	9.6%
ثاني أكسيد الكربون، CO ₂	10.4%

مجموع هذه النسب المئوية هو 100.0%. كما أن استخدام الكسور المولية غير المقرّبة يعطي مجدداً $K_x = 0.7029865$.

2.5 — إنتالبي التفاعل عند 1400 K

يعطي قانون كيرشهوف

$$\Delta H_{1400}^0 = \Delta H_{1000}^0 + \int_{1000 \text{ K}}^{1400 \text{ K}} \Delta c_p^0(T) dT,$$

حيث

$$\Delta c_p^0 = c_p^0(\text{CO}) + c_p^0(\text{H}_2\text{O}) - c_p^0(\text{CO}_2) - c_p^0(\text{H}_2).$$

المعامل الثابت هو

$$28.34 + 30.09 - 42.31 - 27.40 = -11.28,$$

ومعامل T هو

$$(4.14 + 10.67 - 10.09 - 3.20) \times 10^{-3} = 1.52 \times 10^{-3}.$$

لذلك

$$\Delta c_p^0(T) = -11.28 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1} + (1.52 \times 10^{-3} \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-2})T.$$

بالتعويض عددياً عن درجات الحرارة بالكلفن،

$$\begin{aligned}\Delta H_{1400}^0 - \Delta H_{1000}^0 &= \left[-11.28(1400 - 1000) + \frac{1.52 \times 10^{-3}}{2}(1400^2 - 1000^2) \right] \text{ J mol}^{-1} \\ &= (-4512 + 729.6) \text{ J mol}^{-1} \\ &= -3782.4 \text{ J mol}^{-1}.\end{aligned}$$

وبالتالي،

$$\Delta H_{1400}^0 = 35040 - 3782.4 = 31257.6 \text{ J mol}^{-1},$$

ومن ثم

$$\boxed{\Delta H_{1400}^0 = +31.26 \text{ kJ mol}^{-1}}.$$

2.6 — أثر زيادة درجة الحرارة

التفاعل الأمامي ماص للحرارة عند درجتَي الحرارة كلتيهما:

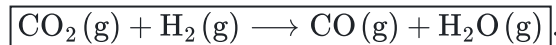
$$\Delta H_{1000}^0 = +35.040 \text{ kJ mol}^{-1}, \quad \Delta H_{1400}^0 = +31.26 \text{ kJ mol}^{-1}.$$

علاوة على ذلك، فإن $\Delta c_p^0 < 0$ على امتداد المجال 1000–1400 K، لذا ينخفض إنثالبي التفاعل باستمرار بين هاتين القيمتين الموجبتين، ويظل موجباً على امتداد ذلك المجال.

لذلك تعطي معادلة فانت هوف

$$\frac{d \ln K_p}{dT} = \frac{\Delta H^0(T)}{RT^2} > 0.$$

تؤدي زيادة درجة الحرارة إلى زيادة K_p وتُرجِّح التفاعل الأمامي الماص للحرارة:



ينزاح الاتزان نحو أول أكسيد الكربون وبخار الماء.

تمت مراجعة الحل بمقارنته بالحل الرسمي.

المسألة 3: كيمياء الأيونات، والحسابات الستوكيومترية، وتفاعلات الأكسدة والاختزال: تعيين هوية مركب بلوري أبيض A

(كيمياء الأيونات، والحسابات الستوكيومترية، وتفاعلات الأكسدة والاختزال)

يُظهر مركب صلب بلوري أبيض A التفاعلات الآتية:

(1) يتلون لهب موقد بنسن بلون أصفر شديد.

(2) يكون المحلول المائي للمركب A متعادلاً. وتؤدي إضافة حمض الكبريتوز (محلول SO_2) قطرةً قطرةً إلى تكوّن محلول بني داكن يزول لونه بوجود فائض من حمض الكبريتوز.

(3) إذا أُضيف محلول AgNO_3 إلى المحلول الذي أُزيل لونه في (2) وحُمض بـ HNO_3 ، يتكوّن راسب أصفر لا يذوب عند إضافة NH_3 ، ولكن يمكن إذابته بسهولة بإضافة CN^- أو $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$.

(4) إذا عولج محلول مائي للمركب **A** بـ KI و H_2SO_4 المخفف، يتكوّن محلول بني داكن يمكن إزالة لونه بإضافة حمض الكبريتوز أو محلول $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$.

(5) تُذاب كمية مقدارها 0.1000 g من **A** في الماء، ثم تُضاف 0.5 g من KI وبضعة cm^3 من H_2SO_4 المخفف. ويُعاير المحلول البني الداكن المتكوّن بمحلول $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ تركيزه 0.1000 M حتى يزول لون المحلول تمامًا. ويبلغ الحجم المستهلك 37.40 cm^3 . المطلوب:

3.1 ما العناصر التي يحتوي عليها المركب **A**؟

3.2 ما المركبات التي يُحتمل وجودها استناداً إلى التفاعلات من (1) إلى (4)؟ احسب كتلتها المولية.

3.3 صُغ التفاعلات الموافقة لما ورد في (2) إلى (4) للمركبات المحتملة، واكتب المعادلات الموافقة بالصيغة الأيونية.

3.4 حدّد، استناداً إلى (5)، أيّ مركب هو الموجود.

نص المسألة مترجم عن النص الإنجليزي الرسمي.

الإجابات

• **3.1** الصوديوم واليود والأكسجين.

• **3.2** يودات الصوديوم، NaIO_3 ، $[\text{Na}^+]$ ، $\text{I}(\text{O})=\text{O}[\text{O}^-]$ ، وكتلتها المولية $M = 197.9 \text{ g mol}^{-1}$ ؛ وميتايريودات الصوديوم، NaIO_4 ، $[\text{Na}^+]$ ، $\text{I}(\text{O})=\text{O}[\text{O}^-]$ ، وكتلتها المولية $M = 213.9 \text{ g mol}^{-1}$.

• **3.3** الناتج البني هو اليود، I_2 ، II ، الذي يُختزل لاحقاً إلى يوديد، I^- ، $[\text{I}^-]$. والراسب الأصفر هو يوديد الفضة، AgI ، $[\text{Ag}^+]$ ، $[\text{I}^-]$ ، الذي يذوب بتكوين معقدات مع السيانيد أو الثيوكبريتات. وتنتج اليودات والبيريودات في الوسط الحمض ثلاثة وأربعة مكافئات من اليود لكل وحدة صيغة، على الترتيب. وجميع المعادلات الأيونية الموزونة مبيّنة أدناه.

• **3.4** المركب **A** هو ميتايريودات الصوديوم، NaIO_4 . وتعطي النسبة الستوكيومترية للثيوكبريتات إلى المركب، وهي ثمانية إلى واحد، كتلة مولية تجريبية مقدارها 213.9 g mol^{-1} .

الحل

3.1 — العناصر الموجودة

يدل اللهب الأصفر الشديد على وجود أيون الصوديوم، Na^+ ، $[\text{Na}^+]$.

يدل راسب الفضة الأصفر، غير القابل للذوبان في الأمونيا والقابل للذوبان في السيانيد والثيوكبريتات، على **يوديد الفضة**. ومن ثم، يحتوي المحلول عديم اللون الناتج بعد الاختزال على اليوديد، ويحتوي **A** على اليود.

يختزل حمض الكبريتوز الأنيون المحتوي على اليود في **A** إلى يود بني اللون، ثم إلى يوديد. وبالمقابل، يؤكسد **A** اليوديد المضاف إلى يود. وتدل هذه الملاحظات على وجود أنيون أكسجيني لليود ذي قدرة مؤكسدة، يحتوي على الأكسجين.

إذن، العناصر هي الصوديوم واليود والأكسجين.

3.2 — المركبات المحتملة وكتلتها المولية

أملاح الصوديوم الأكسجينية الشائعة المستقرة لليود، المتوافقة مع هذه الملاحظات، هي:

المركب	الأنيون	حالة أكسدة اليود
يودات الصوديوم، NaIO_3	اليودات، IO_3^-	+5

المركب	الأيون	حالة أكسدة اليود
ميثايريودات الصوديوم، NaIO_4	IO_4^- ، الميثايريودات،	+7

لا يفسر ملح اليوديد تكوّن اليود عند إضافة عامل مختزل، ولا أكسدة اليوديد المضاف.

لم تُذكر أي كتل ذرية في نص المسألة. وباستخدام القيم القياسية

$$A_r(\text{Na}) = 22.99, \quad A_r(\text{I}) = 126.90, \quad A_r(\text{O}) = 16.00,$$

نحصل على

$$M(\text{NaIO}_3) = 22.99 + 126.90 + 3(16.00) = 197.89 \text{ g mol}^{-1},$$

$$M(\text{NaIO}_4) = 22.99 + 126.90 + 4(16.00) = 213.89 \text{ g mol}^{-1}.$$

تصف سلاسل SMILES للأملح الواردة في الإجابات الأيونات المكوّنة لها، لا شبكاتها البلورية. ولأيون اليودات شكل هرمي ثلاثي؛ أما أيون الميثايريودات فشكله رباعي السطوح. ولا ترمز سلاسل SMILES هذه الأشكال الهندسية.

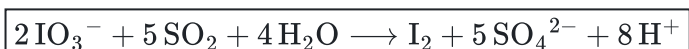
3.3 — المعادلات الأيونية الموزونة

يُكتب حمض الكبريتوز أدناه على صورة SO_2 المائي، كما هو محدّد في المسألة. وقد جُمعت أسماء الأنواع الكيميائية الإضافية وسلاسل SMILES الخاصة بها بعد المعادلات.

التفاعل (2): الاختزال بحمض الكبريتوز

عند استخدام كمية محدودة من حمض الكبريتوز، يتكوّن اليود. ويتأكسد الكبريت من +4 إلى +6.

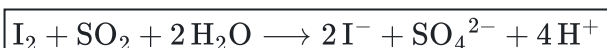
بالنسبة إلى اليودات:



بالنسبة إلى البيريودات:



يختزل فائض حمض الكبريتوز اليود إلى يوديد عديم اللون:



وعليه، فإن التفاعلين الكليين مع فائض حمض الكبريتوز هما



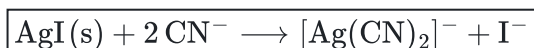
التفاعل (3): الترسيب وتكوين المعقدات

يعطي كلا المركبين المحتملين اليوديد بعد الاختزال التام، ولذلك يعطي كلاهما راسب يوديد الفضة نفسه:

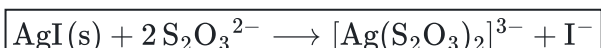


لا تُحدث الأمونيا ذوباناً ملحوظاً في ظروف الاختبار المذكورة.

يُذيب السيانيد الراسب بتكوين ثنائي سيانيدوأرجنتات(I):



وتُذيبه الثيوكبريتات بتكوين ثنائي(ثيوكبريتاتو)أرجنتات(I):



التفاعل (4): أكسدة اليوديد في محلول حمضي

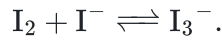
بالنسبة إلى اليودات:



بالنسبة إلى البيرويدات:

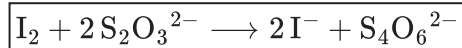


عند وجود اليوديد، يُكوّن اليود أيضًا أيون ثلاثي اليوديد البني:



تحدث إزالة اللون بحمض الكبريتوز وفق معادلة اختزال اليود الواردة سابقًا ضمن التفاعل (2).

مع الثيوكبريتات، يُختزل اليود إلى يوديد، بينما تتأكسد الثيوكبريتات إلى رباعي الثيونات:



وبصورة مكافئة، بالنسبة إلى ثلاثي اليوديد:



للأنواع الجزيئية والأيونية الإضافية المستخدمة أعلاه الأسماء وسلاسل SMILES الآتية:

النوع الكيميائي	الاسم	SMILES
IO_3^-	اليودات	<chem>I(=O)=O[O-]</chem>
IO_4^-	الميتايريودات	<chem>I(=O)(=O)=O[O-]</chem>
SO_2	ثاني أكسيد الكبريت	<chem>O=S=O</chem>
H_2O	الماء	<chem>O</chem>
H^+	أيون الهيدروجين، الرمز المختصر للبروتون في المحلول المائي	<chem>[+H]</chem>
SO_4^{2-}	الكبريتات	<chem>S(=O)(=O)[O-][O-]</chem>
Ag^+	أيون الفضة (I)	<chem>[+Ag]</chem>
NH_3	الأمونيا	<chem>N</chem>
CN^-	السيانيد	<chem>N#[C-]</chem>
$\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$	الثيوكبريتات	<chem>S(=O)(=O)[S-][O-]</chem>
I_3^-	ثلاثي اليوديد	<chem>I[I-]I</chem>
$\text{S}_4\text{O}_6^{2-}$	رباعي الثيونات	<chem>S(=O)(=O)SSS(=O)(=O)[O-][O-]</chem>
$[\text{Ag}(\text{CN})_2]^-$	ثنائي سيانيدوأرجنتات (I)	<chem>N#[C-]>[+Ag]<-(N#[C-])[C-]</chem>
$[\text{Ag}(\text{S}_2\text{O}_3)_2]^{3-}$	ثنائي (ثيوكبريتاتو)أرجنتات (I)	<chem>S(=O)(=O)[S-]>[Ag+]<-[S-]S(=O)(=O)[O-]</chem>

تستخدم سلاسل SMILES للمعقدات ترميز الرابطة التناسقية: يتناسق السيانيد عبر الكربون، والثيوكبريتات عبر ذرة الكبريت الطرفية. وتُظهر تمثيلاتها البسيطة ذات عدد التناسق اثنين ترتيبات شبه خطية من ذرة مانحة-فضة-ذرة مانحة. وثلاثي اليوديد خطي أيضًا؛ ولا تمثل سلاسل SMILES ترابطه غير المتمركز تمثيلًا كاملاً.

3.4 — تعيين الهوية من المعايير

كمية مادة الثيوكبريتات المستهلكة هي

$$\begin{aligned}
 n(\text{S}_2\text{O}_3^{2-}) &= cV \\
 &= (0.1000 \text{ mol L}^{-1})(37.40 \times 10^{-3} \text{ L}) \\
 &= 3.740 \times 10^{-3} \text{ mol.}
 \end{aligned}$$

بما أن مولاً واحداً من اليود يستهلك مولين من الثيوكبريتات، فإن إجمالي كمية اليود المكافئة التي جرت معايرتها هو

$$n(\text{I}_2) = \frac{3.740 \times 10^{-3}}{2} = 1.870 \times 10^{-3} \text{ mol.}$$

تعطي المعادلات في 3.3 العلاقات الآتية:

المركب المحتمل	مكافئات اليود لكل مول	الثيوكبريتات المستهلكة لكل مول
NaIO ₃	3	6
NaIO ₄	4	8

لعينة كتلتها 0.1000 g، يكون حجم محلول المعاير المتوقع استهلاكه

$$V = \frac{r m}{Mc},$$

حيث r هي النسبة المولية للثيوكبريتات إلى المركب.

إذن

$$V_{\text{NaIO}_3} = \frac{6(0.1000)}{197.89(0.1000)} = 0.03032 \text{ L} = 30.32 \text{ cm}^3,$$

بينما

$$V_{\text{NaIO}_4} = \frac{8(0.1000)}{213.89(0.1000)} = 0.03740 \text{ L} = 37.40 \text{ cm}^3.$$

تتوافق البيرويدات وحدها مع حجم محلول المعاير المقاس. وبصورة مكافئة،

$$n(A) = \frac{3.740 \times 10^{-3}}{8} = 4.675 \times 10^{-4} \text{ mol,}$$

و

$$M(A) = \frac{0.1000 \text{ g}}{4.675 \times 10^{-4} \text{ mol}} = 213.9 \text{ g mol}^{-1}.$$

يتجدد اليوديد أثناء المعايرة. وجمع تفاعل تحرير اليود وتفاعل اختزاله بالثيوكبريتات نحصل على



ومن ثم، تظل نسبة ثمانية إلى واحد صحيحة عندما يستمر تكوّن اليود أثناء المعايرة.

$$A = \text{NaIO}_4 \quad (\text{ميتايريودات الصوديوم})$$

تمت مراجعة الحل بمقارنته بالحل الرسمي.

المسألة 4: الكيمياء العضوية، الكيمياء الفراغية: حمض C₅H₈O₂ ودرجته وبرومته

(الكيمياء العضوية، الكيمياء الفراغية)

لحمض الكربونيك **A** ذي الصيغة الإجمالية C₅H₈O₂ متماكان هندسيان، سيس (**A**) وترانس (**A**). وعند الهدرجة باستخدام Pt/H₂، يُحصل من كلا المتماكين الفراغيين على الحمض الكربوكسيلي الراسيمي نفسه **B**، الذي يمكن فصله إلى المتماكين المرآتيين **B**-(+) و **B**-(−).

يتفاعل **A** و **A** بسرعة مع مول واحد من البروم في CCl₄ في الظلام عند 20 °C ليعطيا **C**.

المطلوب:

4.1 ما البنية الدستورية لكل من A وB؟

4.2 اكتب الصيغ الفراغية لكل من A وA' وصيغ إسقاط فيشر للمتماكبين المرآتيين لـ B (دون النظر إلى الإشارتين (+) أو (-)).

4.3 كم عدد المتماكبات الفراغية لـ C التي تتكون في آن واحد عند معالجة A وA' بالبروم؟

4.4 علّل بإيجاز إجابتك عن C.

4.5 اكتب صيغ إسقاط فيشر وصيغة إسقاط نيومان واحدة (هيئة توافقية) لجميع المتماكبات الفراغية لـ C. وحدّد أيّها متماكبات مرآتية بعضها لبعض وأيّها متماكبات فراغية غير مرآتية بعضها لبعض.

نص المسألة مترجم عن النص الإنجليزي الرسمي.

الإجابات

فيما يتعلق بالرمزين A'/A'' أدناه، يشير الوصف سيس/ترانس إلى مجموعتي الميثيل.

• 4.1: A هو حمض 2-ميثيل بوت-2-ينويك، $CC=C(C)C(=O)O$ و B هو حمض 2-ميثيل بوتانويك، $CCC(C)C(=O)O$.

• 4.2: A' هو حمض (E)-2-ميثيل بوت-2-ينويك، $O=C(O)/C(C)=C/C$ و A'' هو حمض (Z)-2-ميثيل بوت-2-ينويك، $O=C(O)/C(C)=C\backslash C$. والمتماكان المرآتيان لـ B هما حمض (R)-2-ميثيل بوتانويك، $O=C(O)[C@H](C)CC$ وحمض (S)-2-ميثيل بوتانويك، $O=C(O)[C@@H](C)CC$. وتُحدّد إسقاطاتهما أدناه.

• 4.3: متماكان مرآتيان من كل ألكين نقي؛ وأربعة متماكبات فراغية إجمالاً. يعطي الألكين E المتماكان $(2R, 3R)/(2S, 3S)$ ويعطي الألكين Z المتماكان $(2R, 3R)/(2S, 3S)$.

• 4.4: البرومة إضافة مضادة نوعية فراغياً. يحتوي الناتج على مركزين مولّدين للتصاوغ الفراغي وليس له شكل ميزو؛ ويعطي كل ألكين زوجاً راسيمياً.

• 4.5: النواتج الأربعة هي متماكبات فراغية لـ حمض 2,3-ثنائي برومو-2-ميثيل بوتانويك، $O=C(O)C(Br)C$. وتُردّ في الجداول أدناه تمثيلاتها بصيغة SMILES المحدّدة للكيمياء الفراغية، وإسقاطات فيشر، وهيئات نيومان التوافقية. والزوجان المرآتيان هما $(2R, 3R)/(2S, 3R)$ و $(2R, 3R)/(2S, 3S)$ ؛ وكل اقتران بين عضو من أحد الزوجين وعضو من الآخر يشكّل زوجاً من المتماكبات الفراغية غير المرآتية.

الحل

4.1 — تحديد هوية A وB

درجة عدم الإشباع في A هي

$$DBE = \frac{2(5) + 2 - 8}{2} = 2.$$

تمثّل مجموعة الكربونيل في الكربوكسيل درجة واحدة من عدم الإشباع. ويشير التصاوغ الهندسي وتفاعل إضافة البروم السريع إلى أن الدرجة الأخرى ترجع إلى رابطة ألكينية مزدوجة، في إطار كيمياء الألكينات المقصودة في هذه المسألة.

تعطي الهدرجة حمضاً مشبعاً صيغته $C_5H_{10}O_2$. وتستلزم قابليته للفصل إلى متماكين مرآتيين وجود مركز مولّد للتصاوغ الفراغي. ومع وجود خمس ذرات كربون فقط، فإن المستبدلات الأربعة المختلفة المطلوبة هي الكربوكسيل والإيثيل والميثيل والهيدروجين. لذا فإن B هو حمض 2-ميثيل بوتانويك، $CCC(C)C(=O)O$.

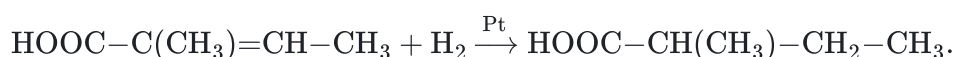


يجب أن تؤدي إعادة رابطة مزدوجة إلى هذا الهيكل الكربوني إلى ألكين يحمل مستبدلين مختلفين على كل ذرة كربون من ذرتي الرابطة المزدوجة. وهذا يضع الرابطة المزدوجة بين C2 وC3:



إذن **A** هو حمض 2-ميثيل بوت-2-ينويك، $CC=C(C)C(=O)O$.

تمثل الهدرجة بالهيدروجين الجزيئي، $[H][H]$ ، على البلاتين بالمعادلة الموزونة



تصبح **C3** مجموعة ميثيلين، فيزول التمايز الهندسي الأصلي. وتصبح **C2** مركزاً مولداً للتصاوغ الفراغي؛ وتعطي الهدرجة في وسط غير كيرالي كميتين متساويتين من المتماكين المرأتين لـ **B** انطلاقاً من أيٍّ من الألكينين.

4.2 — البنى الهندسية لـ **A** وإسقاطات فيشر لـ **B**

رقم كربون الكربوكسيل بالرمز **C1**. ولتحديد رسومات الألكين، ضع **C2** على اليسار و**C3** على اليمين، واربطهما برابطة مزدوجة أفقية. وضع المستبدلات فوقها وتحتها كما يأتي:

الشكل	الاسم وصيغة SMILES المحددة للكيمياء الفراغية	فوق C2 ؛ فوق C3	تحت C2 ؛ تحت C3
A' ، مجموعتا الميثيل في وضع سيس	حمض (E)-2-ميثيل بوت-2-ينويك، $O=C(O)/C(C)=C/C$	H ; COOH	CH ₃ ; CH ₃
A'' ، مجموعتا الميثيل في وضع ترانس	حمض (Z)-2-ميثيل بوت-2-ينويك، $O=C(O)/C(C)=C\C$	CH ₃ ; COOH	H ; CH ₃

لتعيين E/Z ، يكون المستبدل الأعلى أولوية هو COOH عند **C2** وCH₃ عند **C3**. ومن ثم، يقابل وضع سيس لمجموعتي الميثيل التشكيل E ، في حين يقابل وضع ترانس لمجموعتي الميثيل التشكيل Z .

في إسقاطي فيشر لـ **B**، ضع COOH في الأعلى وCH₂CH₃ في الأسفل. تتجه الروابط الأفقية نحو الناظر، وتتجه الروابط الرأسية بعيداً عنه.

المتماكب المرآتي	المستبدل الأيسر	المستبدل الأيمن	صيغة SMILES المحددة للكيمياء الفراغية
حمض (R)-2-ميثيل بوتانويك	H	CH ₃	$O=C(O)[C@H](C)CC$
حمض (S)-2-ميثيل بوتانويك	CH ₃	H	$O=C(O)[C@@H](C)CC$

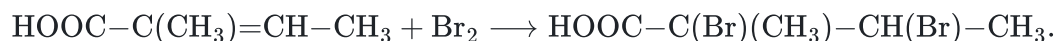
ترتيب الأولوية هو



هذان الإسقاطان صورتان مرأتيتان. ولا يحدد التشكيلان R/S أيهما ذو دوران ضوئي موجب وأيها ذو دوران ضوئي سالب.

4.3 — عدد نواتج البرومة

يُضاف البروم، BrBr، عبر الرابطة المزدوجة في رباعي كلوريد الكربون، $C_1Cl(C_1)(C_1)C_1$ ، في الظلام عند 20 °C:



وهكذا يستهلك مول واحد من **A** مولاً واحداً من البروم. والنتيجة **C** هو حمض 2,3-ثنائي برومو-2-ميثيل بوتانويك،
 $C_5H_8Br_2O_2$ ، وصيغته $O=C(O)C(Br)(C)C(Br)C$.

كلٌّ من **C2** و**C3** مركز مولد للتصاوغ الفراغي. ولا يمتلك الناتج تناظراً داخلياً يمكن أن ينتج عنه شكل ميزو، لذا فإن العدد الكلي لمتماكباته الفراغية هو

$$2^2 = \boxed{4}.$$

تعطي الإضافة المضادة النوعية فراغياً:

الألكين الابتدائي	النواتج
A_E ، وهو هنا A'	$(2R, 3S)$ و $(2S, 3R)$ ، بكميتين متساويتين
A_Z ، وهو هنا A''	$(2R, 3R)$ و $(2S, 3S)$ ، بكميتين متساويتين

إذن يعطي كل متماكب هندسي يُبروم على حدة متماكبين فراغيين، بينما تعطي برومة مزيج يحتوي على كليهما المتماكبات الأربعة جميعها. وتعتمد الكميات النسبية للزوجين الراسيمين على المزيج الابتدائي.

4.4 — أسباب النتيجة الفراغية

في الظروف المذكورة، تكون البرومة الإلكترونية إضافة مضادة: إذ تتكون رابطة الكربون-البروم الجديدتان على وجهين متقابلين من الرابطة المزدوجة الأصلية.

لكل من الألكينين المستويين، يكون مسارا الإضافة المرتبطان بعلاقة مرآتية متساويين في الاحتمال في وسط التفاعل غير الكيرالي. ولذلك يعطيان كميتين متساويتين من متماكبين مرآتيين.

يؤدي تغيير الألكين الابتدائي من E إلى Z إلى تغيير التشكيل النسبي الناتج عن الإضافة المضادة، فيعطي الزوج المرآتي الآخر. ولا يكون أي ناتج من نوع ميزو لأن المركزين المولدين للتصاوغ الفراغي يحملان مجموعتين مختلفتين من المستبدلات: تحمل $C2$ مجموعة كربوكسيل ومجموعة ميثيل، بينما تحمل $C3$ هيدروجيناً ومجموعة ميثيل.

4.5 — إسقاطات فيشر وإسقاطات نيومان والعلاقات

في كل إسقاط فيشر لـ C ، ارسم السلسلة الرئيسية الرأسية بهذا الترتيب:

في الأسفل CH_3 ، $C3$ ، $C2$ ، وفي الأعلى $COOH$.

يحدّد الجدول كل مستبدل أفقي. وكالمعتاد، تتجه الروابط الأفقية نحو الناظر وتتجه الروابط الرأسية بعيداً عنه.

المتماكب الفراغي لحمض 2,3-ثنائي برومو-2-ميثيل بوتانويك	$C2$: اليسار / اليمين	$C3$: اليسار / اليمين	صيغة SMILES المحددة للكيمياء الفراغية
(2R, 3S)	CH_3 / Br	H / Br	<chem>O=C(O)[C@](Br)(C)[C@@H](Br)C</chem>
(2S, 3R)	Br / CH_3	Br / H	<chem>O=C(O)[C@@](Br)(C)[C@H](Br)C</chem>
(2R, 3R)	CH_3 / Br	Br / H	<chem>O=C(O)[C@](Br)(C)[C@H](Br)C</chem>
(2S, 3S)	Br / CH_3	H / Br	<chem>O=C(O)[C@@](Br)(C)[C@@H](Br)C</chem>

تستخدم ترتيبات الأولوية الآتية لتعيين التشكيلات:

$C2$: $Br > CH(Br)CH_3 > COOH > CH_3$,

$C3$: $Br > C(Br)(CH_3)COOH > CH_3 > H$.

عند $C2$ ، تتقدم ذرة الكربون المجاورة الحاملة للبروم على كربون الكربوكسيل في الأولوية لأن قائمة الذرات المرتبطة بها تبدأ بالبروم، الذي يتقدم على الأكسجين في الأولوية.

في إسقاطات نيومان، انظر من $C2$ نحو $C3$ ، بحيث تُمثّل $C2$ بالنقطة الأمامية و $C3$ بالدائرة الخلفية. استخدم مواضع الساعة كما يراها الناظر:

- تشغل الروابط الأمامية مواضع الساعة 12 و 4 و 8.
- تشغل الروابط الخلفية مواضع الساعة 2 و 6 و 10.

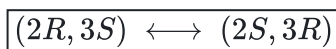
يحدّد الجدول الآتي هيئة توافقية متناوبة واحدة لكل متماكب فراغي:

التشكيل	$C2$ الأمامية: مواضع الساعة 12 / 4 / 8	$C3$ الخلفية: مواضع الساعة 2 / 6 / 10
(2R, 3S)	$Br / CH_3 / COOH$	$H / CH_3 / Br$
(2S, 3R)	$CH_3 / Br / COOH$	$Br / CH_3 / H$

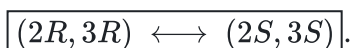
التشكيل	C2 الأمامية: مواضع الساعة 8 / 4 / 12	C3 الخلفية: مواضع الساعة 10 / 6 / 2
(2R, 3R)	Br / CH ₃ / COOH	Br / CH ₃ / H
(2S, 3S)	CH ₃ / Br / COOH	H / CH ₃ / Br

تحدّد مواضع الساعة هذه هيئات توافقية لا ترمّزها صيغ SMILES المحدّدة للكيمياء الفراغية. ويغيّر الدوران حول الرابطة الأحادية C2–C3 الهيئة التوافقية دون تغيير التشكيل؛ أما «الإضافة المضادة» فتصف وجهي الإضافة في التفاعل.

الزوجان المرآتيان هما



9



كل عضو من الزوج الأول متماكب فراغي غير مرآتي لكل عضو من الزوج الثاني.

تمت مراجعة الحل بمقارنته بالحل الرسمي.

المسألة 5: الكيمياء غير العضوية: التحلل المائي القلوي لثنائي السيلان المُمثِّل جزئياً

(الكيمياء غير العضوية)

يتصاعد 27.8 cm³ من الهيدروجين من 20 mg من ثنائي السيلان المُمثِّل جزئياً، Si₂H_{6-x}(CH₃)_x، أثناء التحلل المائي القلوي عند 294 K و 97400 Pa.

5.1 لماذا تتفاعل الرابطة Si-Si في ثنائي السيلان أثناء التحلل المائي؟

5.2 لماذا تتفاعل الروابط Si-H في ثنائي السيلان أثناء التحلل المائي؟

5.3 احسب درجة الاستبدال x لثنائي السيلان المُمثِّل.

5.4 اكتب معادلة التفاعل الكاملة للتحلل المائي.

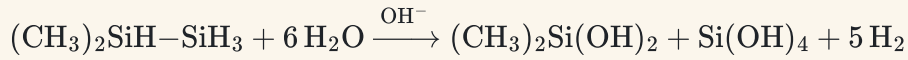
5.5 كم عدد التماكبات الممكنة للمركب الذي حُدّد بالحساب؟ أعطِ الصيغة البنائية لكل تماكب.

نص المسألة مترجم عن النص الإنجليزي الرسمي.

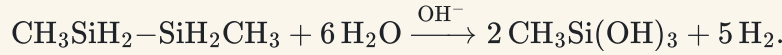
الإجابات

- 5.1 • يتيح الهجوم النوكليوفيلي على السيليكون انشطار الرابطة Si-Si، مدفوعاً بتكوّن روابط Si-O قوية. ويؤدي استبدال مجموعتي هيدروكسيل بطرفي هذه الرابطة إلى إنتاج مكافئ واحد من الهيدروجين.
- 5.2 • تكون الروابط Si-H مستقطبة نحو الهيدروجين. ويتسم الهيدروجين فيها بطابع هيدريدي، ويتحد مع هيدروجين ذي طابع بروتوني من الماء، منتجاً مكافئاً واحداً من الهيدروجين لكل رابطة Si-H.
- 5.3 • $x = 2$. المركب هو ثنائي ميثيل ثنائي السيلان، Si₂H₄(CH₃)₂، وصيغته الجزيئية C₂H₁₀Si₂.

- 5.4: عند كتابة المعادلات باستخدام نواتج السيلانول الأولية غير المتكافئة، تكون معادلتا المتماكين الممكنين كما يأتي:



و



وَتُنَاقَشُ صيغتهما الأيونيتان في الوسط القلوي أدناه.

- 5.5: يوجد متماكينان بنائيان ضمن عائلة ثنائي السيلان المُثْمِل المحددة:
- 1,1-ثنائي ميثيل ثنائي السيلان: $(\text{CH}_3)_2\text{SiH}-\text{SiH}_3$ ، $\text{C}[\text{SiH}](\text{C})[\text{SiH}_3]$.
- 1,2-ثنائي ميثيل ثنائي السيلان: $\text{CH}_3\text{SiH}_2-\text{SiH}_2\text{CH}_3$ ، $\text{C}[\text{SiH}_2][\text{SiH}_2]\text{C}$.

الحل

5.1 — التحلل المائي للرابطة سيليكون-سيليكون

المركب الأم هو ثنائي السيلان، Si_2H_6 ، $[\text{SiH}_3][\text{SiH}_3]$. والأنواع الكيميائية الصغيرة المشاركة هي الماء، H_2O ، و O^- وأيون الهيدروكسيد، OH^- ، $[\text{OH}]^-$ ؛ وثنائي الهيدروجين، H_2 ، $[\text{H}][\text{H}]$.

يمكن أن يتعرض السيليكون لهجوم نوكلوفيلي من أيون الهيدروكسيد من خلال زيادة عدد تناسقه. وهذا يسهل انشطار الرابطة $\text{Si}-\text{Si}$ الضعيفة نسبياً. ويجعل تكون روابط $\text{Si}-\text{O}$ القوية التحول الكلي موافقاً؛ ولا يلزم أن تكون الرابطة $\text{Si}-\text{Si}$ الابتدائية قطبية.

لحساب كمية الهيدروجين، يحل الانشطار محل الرابطة $\text{Si}-\text{Si}$ مجموعة هيدروكسيل واحدة على كل ذرة سيليكون. ويوفر جزيئان من الماء مجموعتي الهيدروكسيل هاتين، تاركين ذرتي هيدروجين تكوّنان جزيئاً واحداً من ثنائي الهيدروجين.

ومن ثم،

$$\boxed{\text{H}_2 \text{ تسهم بجزيء واحد من } \text{Si}-\text{Si} \text{ رابطة واحدة من}}.$$

ويتفق هذا أيضاً مع حساب حالات الأكسدة: تتغير حالة أكسدة كل ذرة سيليكون من III إلى IV، فتوفران إلكترونين في المجموع لاختزال الهيدروجين الآتي من الماء.

5.2 — التحلل المائي لروابط السيليكون-الهيدروجين

السيليكون أقل كهرسلبية من الهيدروجين، لذا تحمل ذرة السيليكون في الرابطة $\text{Si}-\text{H}$ شحنة موجبة جزئية، وتحمل ذرة الهيدروجين شحنة سالبة جزئية وتتسم بطابع هيدريدي.

أثناء التحلل المائي، تحل مجموعة هيدروكسيل محل الهيدروجين المرتبط بالسيليكون. ويتحد هذا الهيدروجين مع هيدروجين ذي طابع بروتوني من الماء لتكوين ثنائي الهيدروجين. وبناءً على ذلك، فإن إحلال مجموعة $\text{Si}-\text{OH}$ محل كل رابطة $\text{Si}-\text{H}$ يستهلك جزيئاً واحداً من الماء ويحرر جزيئاً واحداً من الهيدروجين.

تبقى مجموعات الميثيل مرتبطة من خلال روابط $\text{Si}-\text{C}$. لذلك، فإن الجزيء الذي يحتوي على $x - 6$ ذرة هيدروجين مرتبطة بالسيليكون ورابطة $\text{Si}-\text{Si}$ واحدة يعطي

$$\boxed{n(\text{H}_2) = (7 - x) n(\text{ثنائي السيلان المُثْمِل})}.$$

5.3 — حساب x

باعتبار الهيدروجين غازاً مثالياً، حيث

$$V = 27.8 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$\text{و } R = 8.314 \text{ Pa m}^3 \text{ mol}^{-1} \text{ K}^{-1},$$

$$n(\text{H}_2) = \frac{PV}{RT} = \frac{(97400 \text{ Pa})(27.8 \times 10^{-6} \text{ m}^3)}{(8.314 \text{ Pa m}^3 \text{ mol}^{-1} \text{ K}^{-1})(294 \text{ K})} = 1.108 \times 10^{-3} \text{ mol}.$$

باستخدام الكتل المولية الذرية القياسية 28.085، و12.011، و1.008 g mol⁻¹ للسيليكون والكربون والهيدروجين، على الترتيب،

$$M(x) = 2(28.085) + (6 - x)(1.008) + x(12.011 + 3(1.008)) = (62.218 + 14.027x) \text{ g mol}^{-1}.$$

كتلة العينة هي 0.020 g، لذا

$$1.108 \times 10^{-3} \text{ mol} = (7 - x) \frac{0.020 \text{ g}}{(62.218 + 14.027x) \text{ g mol}^{-1}}.$$

يعطي الحل باستخدام القيم الوسيطة غير المقربة $x \approx 2.00$. وبما أن x يمثل عدد مستبدلات الميثيل، فإن

$$x = 2.$$

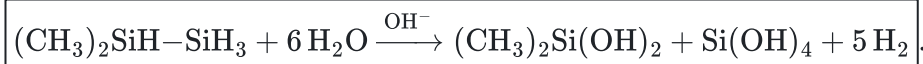
للتحقق، تبلغ الكتلة المولية 90.27 g mol⁻¹، مما يعطي نحو $2.22 \times 10^{-4} \text{ mol}$ من المركب. وتعطي روابطه الأربع من نوع Si-H وروابطه الواحدة من نوع Si-Si خمسة مكافئات من الهيدروجين، بما يتفق مع الحجم المقاس.

5.4 — معادلات التحلل المائي الكامل

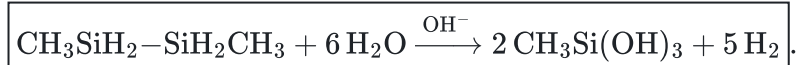
تكتسب كل ذرة سيليكون مجموعة هيدروكسيل مقابل كل رابطة Si-H ومقابل طرفها من الرابطة Si-Si. والنواتج الأولية هي:

الاسم	النتائج	SMILES
ثنائي ميثيل سيلان ديول	(CH ₃) ₂ Si(OH) ₂	C[Si](C)(O)O
حمض الأورثوسيليسيك	Si(OH) ₄	O[Si](O)(O)O
ميثيل سيلان تريول	CH ₃ Si(OH) ₃	C[Si](O)(O)O

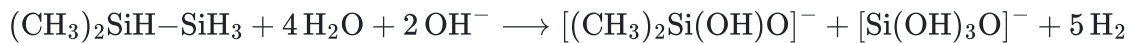
في حالة 1,1-ثنائي ميثيل ثنائي السيلان، تكتسب ذرة السيليكون الحاملة لمجموعتي ميثيل مجموعتي هيدروكسيل؛ وتكتسب ذرة السيليكون الأخرى أربع مجموعات:



في حالة 1,2-ثنائي ميثيل ثنائي السيلان، تكتسب كل ذرة سيليكون ثلاث مجموعات هيدروكسيل:



تعبّر هذه المعادلات عن الانشطار الكامل للروابط القابلة للتحلل المائي. وفي المحلول القلوي، تخضع النواتج الحاملة لمجموعات الهيدروكسيل لاتزان حمضي-قاعدي. فعلى سبيل المثال، عند نزع بروتون من مجموعة هيدروكسيل واحدة على كل ذرة سيليكون، تكون المعادلتان الأيونيتان الصافيتان الموزنتان المقابلتان كما يأتي:



و



الأيونات في هذين التمثيلين هي:

الأيون	الاسم	SMILES
$[(\text{CH}_3)_2\text{Si(OH)O}]^-$	هيدروكسي(ثنائي ميثيل)سيلانولات	C[Si](C)(O)[O-]
$[\text{Si(OH)}_3\text{O}]^-$	أورثوسيليكات ثلاثي الهيدروجين	O[Si](O)(O)[O-]

الأيون	الاسم	SMILES
$[\text{CH}_3\text{Si}(\text{OH})_2\text{O}]^-$	ثنائي هيدروكسي (ميثيل) سيلانولات	<chem>C[Si](O)(O)[O-]</chem>

يعتمد حدوث مزيد من نزع البروتونات أو التكاثف على ظروف المحلول، ولا يغيّر مردود الهيدروجين البالغ خمسة مكافئات.

5.5 — حصر التماكبات

نوزّع مجموعتي الميثيل بين ذرتي السيليكون المتكافئتين. والتوزيعان المتميزان هما

$(1, 1)$ و $(2, 0)$.

التوزيع $(0, 2)$ مطابق للتوزيع $(2, 0)$ بعد تبادل ذرتي السيليكون.

المتماكب	الصيغة البنائية	SMILES
1,1-ثنائي ميثيل ثنائي السيلان	$(\text{CH}_3)_2\text{SiH}-\text{SiH}_3$	<chem>C[SiH](C)[SiH3]</chem>
1,2-ثنائي ميثيل ثنائي السيلان	$\text{CH}_3\text{SiH}_2-\text{SiH}_2\text{CH}_3$	<chem>C[SiH2][SiH2]C</chem>

لا تحتوي أيٌّ من البنيتين على مركز سيليكون مؤلّد للتماكب الفراغي: فكل ذرة سيليكون تحمل مستبدلين متماثلين على الأقل. ويعطي الدوران حول الرابطة الأحادية Si—Si تشكّلات فراغية، ولا يعطي تماكبات بنائية إضافية.

إذن، العدد المطلوب هو [2].

تمت مراجعة الحل بمقارنته بالحل الرسمي.

المسألة 6: الكيمياء العضوية، التخليق: نواتج البنزالدهيد وحمض المالمونيك

(الكيمياء العضوية، التخليق)

تفاعل البنزالدهيد وحمض المالمونيك في البيريدين عند 80°C ، فأنتجا (من بين نواتج أخرى) CO_2 والمركب **A** بمردود يقارب 80 % من القيمة النظرية. وأدت الهدرجة الحفزية لـ 1.48 g من **A** على Pt عند درجة حرارة الغرفة والضغط العادي إلى إنتاج **B** مع استهلاك 0.25 لتر من الهيدروجين. وعند تفاعل **B** مع حمض متعدد الفوسفوريك (في شروط فريدل-كرافتس)، يمكن عزل المركب **C** مصحوباً بناتجين جانبيين حمضيين متماكين. ويمكن أن يتكون الناتجان الجانبيان **Da** و **Db** بكمية أكبر عند ارتفاع تركيز **B** في وسط التفاعل، ويمكن الحد من تكوينهما بالتخفيف.

يعطي التحليل العنصري للمركب **C** نسبة 81.8 % من الكربون و 6.1 % من الهيدروجين. أما القيم المقابلة للمركبين **Da** و **Db**، المتطابقة ضمن حدود الخطأ التجريبي، فهي 76.6 % و 6.4 %، على الترتيب. وتتطلب كمية مقدارها 2.82 g من **Da**، وكذلك من **Db**، نحو 100 cm^3 من محلول هيدروكسيد البوتاسيوم بتركيز 0.1 N لمعادلتها. ويمكن تنقية **C** بالتقطير (درجة الغليان $243 - 245^\circ\text{C}$)، وعندئذ تكون درجة انصهاره 40°C وكثافته 1.09 g/cm^3 . ويمكن الحصول على الكتلة الجزيئية النسبية بواسطة مطيافية الكتلة، وقيمتها 132.

باستخدام هذه المعلومات، حل المسائل الآتية:

6.1 الصيغة البنائية للمركب **A**.

6.2 الصيغة البنائية للمركب **B**.

6.3 الصيغة البنائية للمركب **C**.

6.4 الصيغتان البنائيتان للمركبين **Da** و **Db**.

6.5 أعط مساراً بديلاً لتخليق **A** باستخدام أبسط مواد ابتدائية ممكنة، مع تكوين رابطة C—C واحدة على الأقل.

6.6 أعط مساراً بديلاً لتخليق **B** باستخدام أبسط مواد ابتدائية ممكنة، مع تكوين رابطة C—C واحدة على الأقل.

6.7 أعط الصيغ البنائية لنواتج التفاعلات الآتية:

- a) **C** + hydroxylamine (with acid catalysis) →
- b) **C** + phenylmagnesium bromide (C_6H_5MgBr) and subsequent treatment under acidic conditions →
- c) **C** + benzaldehyde + $C_2H_5O^- Na^+$ →

نص المسألة مترجم عن النص الإنجليزي الرسمي.

الإجابات

- **6.1 — A**: حمض السيناميك، ويكون عادةً المتماكب *E* هو الغالب: $O=C(O)/C=C/c1ccccc1$.
- **6.2 — B**: حمض 3-فينيل بروبانويك (حمض الهيدروسيناميك): $O=C(O)CCc1ccccc1$.
- **6.3 — C**: إندان-1-ون: $O=C1CCc2ccccc21$.
- **6.4 — Da و Db**: بتعيين الرمزتين تعييناً اعتباطياً:
- **Da**: حمض 3-[2-(3-فينيل بروبانويل)فينيل]بروبانويك، وهو متماكب أورثو: $O=C(O)CCc1ccccc1C(=O)CCc1ccccc1$.
- **Db**: حمض 3-[4-(3-فينيل بروبانويل)فينيل]بروبانويك، وهو متماكب بارا: $O=C(O)CCc1ccc(C(=O)CCc2ccccc2)cc1$.
- **6.5**: تخليق **A** بتفاعل بيركن من البنزالدهيد وأنيهيدريد الأسيتيك، باستخدام أسيتات الصوديوم والتسخين، ثم التحلل المائي.
- **6.6**: تخليق **B** بطريقة إستر المألونيك: إجراء بنزلة لمألونات ثنائي الإيثيل، ثم التحلل المائي ونزع الكربوكسيل.
- **6.7 (a)**: أكسيم إندان-1-ون: $ON=C1CCc2ccccc21$: تركيبه من المتماكين *E/Z* غير محدد.
- **6.7 (b)**: 3-فينيل-1H-إندين: $c1ccc(C2=CCc3ccccc32)cc1$ ، ويتكون بنزع الماء المحفز حمضياً من الكحول الثالثي الناتج أولاً.
- **6.7 (c)**: 2-بنزيليدين إندان-1-ون، ويكون عادةً المتماكب *E* هو الغالب: $O=C1/C(=C/c2ccccc2)Cc2ccccc21$.

الحل

6.1 — تعيين هوية A

يخضع البنزالدهيد $O=Cc1ccccc1$ وحمض المألونيك $O=C(O)CC(=O)O$ لتكاثف كنوفيناغل-دروبر في البيريدين $c1ccncc1$.

يعطي التكاثف أولاً حمض البنزيليدين مألونيك $O=C(O)C(=Cc1ccccc1)C(=O)O$:



ثم يعطي نزع الكربوكسيل حمض السيناميك:



الناتجان الجانبان هما الماء O وثاني أكسيد الكربون $O=C=O$. ومن ثم يكون التفاعل الكلي الموزون



إذن **A** هو حمض السيناميك، $C_9H_8O_2$ ، وكتلته المولية

$$M_A = 9(12) + 8(1) + 2(16) = 148 \text{ g mol}^{-1}.$$

الناتج الرئيسي المعتاد هو المتماكب *E* الأكثر استقراراً.

6.2 — تعيين هوية B

كمية **A** التي خضعت للهدرجة هي

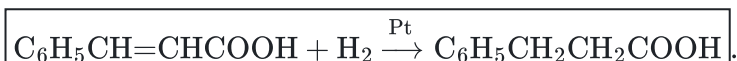
$$n_A = \frac{1.48 \text{ g}}{148 \text{ g mol}^{-1}} = 0.0100 \text{ mol}.$$

إذا تفاعل مول واحد من الهيدروجين الجزيئي، $[H] [H]$ ، لكل مول من **A**، فإن الحجم المرصود يقابل

$$V_m = \frac{0.25 \text{ L}}{0.0100 \text{ mol}} = 25 \text{ L mol}^{-1},$$

وهو ما يتفق، في حدود دقة معطيات المسألة، مع غاز عند درجة حرارة الغرفة والضغط العادي. وبذلك يُستهلك نحو مكافئ واحد من الهيدروجين.

تختزل الهدرجة الرابطة المزدوجة في السلسلة الجانبية:



لذلك فإن **B** هو حمض 3-فينيل بروبانويك، $C_9H_{10}O_2$ ، وتبلغ كتلته المولية $M_B = 150 \text{ g mol}^{-1}$.

6.3 — تعيين هوية C

النسبة المئوية للأكسجين هي

$$100 - 81.8 - 6.1 = 12.1\%.$$

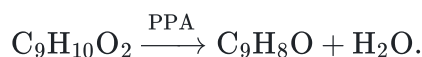
باستخدام $M_C = 132 \text{ g mol}^{-1}$ والكتل الذرية الصحيحة المعتادة، نحصل على أعداد الذرات في كل جزيء:

$$N_C = \frac{0.818(132)}{12} = 9.00, \quad N_H = \frac{0.061(132)}{1} = 8.05, \quad N_O = \frac{0.121(132)}{16} = 1.00.$$

ومن ثم فإن الصيغة الجزيئية هي



وتختلف هذه عن صيغة **B**، $C_9H_{10}O_2$ ، بمقدار جزيء ماء واحد:



ينشط حمض متعدد الفوسفوريك مجموعة الكربوكسيل لإجراء أسيلة فريدل-كرافتس داخل الجزيء. وترتبط ذرة كربون في موضع أورثو من الحلقة العطرية بذرة كربون الكربوكسيل، فتُغلق حلقة خماسية الأعضاء.

وبالتالي، فإن **C** هو إندان-1-ون. تحتوي حلقة الخماسية على ذرة كربون الكربونيل ومجموعتي ميثيلين، وتشارك مع حلقة البنزين في ضلع. وتعطي صيغته أيضًا ست درجات من عدم الإشباع:

$$DBE = \frac{2(9) + 2 - 8}{2} = 6,$$

تُعزى إلى حلقة البنزين والحلقة الإضافية ورابطة الكربونيل.

6.4 — تعيين هوية Da و Db

هيدروكسيد البوتاسيوم $[K] \cdot [OH]$ قاعدة أحادية. والكمية المستخدمة في المعايرة هي

$$n_{eq} = (0.100 \text{ L})(0.1 \text{ eq L}^{-1}) \simeq 0.010 \text{ eq}.$$

إذن لكل ناتج جانبي كتلة مكافئة مقدارها

$$E = \frac{2.82 \text{ g}}{0.010 \text{ eq}} \simeq 282 \text{ g eq}^{-1}.$$

يشير الاعتماد على التركيز إلى تفاعل بين الجزيئات يشترك فيه جزيئان من **B**. فإذا أجرت مجموعة الكربوكسيل المنشطة في أحد الجزيئين أسيلةً للحلقة العطرية للجزيء الآخر، فإن الناتج يحتفظ بمجموعة كربوكسيل واحدة:



الصيغة الجزيئية والكتلة المولية المتوقعتان هما

$$2 \text{C}_9\text{H}_{10}\text{O}_2 - \text{H}_2\text{O} = \text{C}_{18}\text{H}_{18}\text{O}_3,$$

$$M_D = 2(150) - 18 = 282 \text{ g mol}^{-1}.$$

ولأن هذا الناتج يحتوي على مجموعة كربوكسيل واحدة، فإن كتلته المكافئة تساوي أيضاً 282 g eq^{-1} ، بما يتفق مع المعايير. وتركيبه العنصري المحسوب هو

$$w_C = \frac{18(12)}{282} \times 100 = 76.6\%,$$

$$w_H = \frac{18(1)}{282} \times 100 = 6.38\% \approx 6.4\%.$$

وتتفق كلتا القيمتين مع القيم المقاسة.

يرتبط المستبدل الموجود أصلاً، $-\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$ ، بالحلقة العطرية عبر ذرة كربون ألكيلية، ويوجّه الاستبدال الإلكتروفيلي أساساً إلى موضعي أورثو وبارا. أما المجموعة الداخلة فهي $-\text{COCH}_2\text{CH}_2\text{C}_6\text{H}_5$. وينتج عن ذلك البنيتان المدرجتان بالرمزين **Da** و **Db**. يحدّ التخفيف من تكون هذين الناتجين لأن الأسيلة بين الجزيئات تتطلب جزيئاً ثانياً من **B**، بينما يتضمن تكوين **C** إغلاق حلقة داخل جزيء واحد. ويمكن تبادل الرمز **Da** و **Db**.

6.5 — تخليق بديل للمركب A

من البدائل المناسبة تفاعل بيركن.

سخّن البنزالدهيد مع أنهيدريد الأسيتيك $\text{CC}(=\text{O})\text{OC}(\text{C})=\text{O}$ في وجود أسيتات الصوديوم $[\text{Na}^+][\text{O}^-]\text{C}(=\text{O})$ ، ثم أجر معالجة مائية لمزيج التفاعل. والمعادلة الكلية الموزونة هي



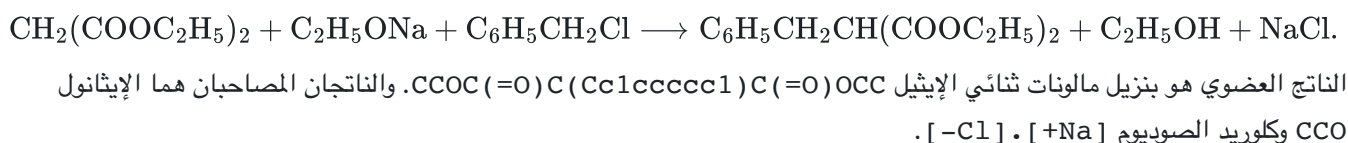
الناتج العضوي الآخر هو حمض الأسيتيك $\text{CC}(=\text{O})\text{O}$.

تصل رابطة C-C الجديدة بين ذرة كربون الألاهديد الأصلية وذرة كربون ميثيلية مصدرها أنهيدريد الأسيتيك. ويعطي التكاثف ثم التحلل المائي اللاحق المركب **A**، الذي يكون عادةً حمض السيناميك ذي الهيئة *E* هو الغالب فيه.

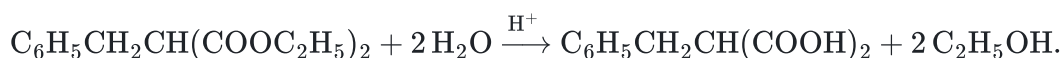
6.6 — تخليق بديل للمركب B

من البدائل المعروفة التخليق بإستر المالونيك، باستخدام مالونات ثنائي الإيثيل $\text{CCOC}(=\text{O})\text{CC}(=\text{O})\text{OCC}$ وكلوريد البنزيل ClC_6H_5 .

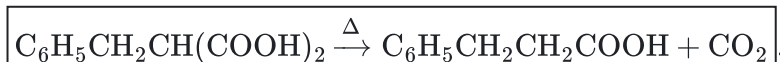
أولاً، ينتزع إيثوكسيد الصوديوم $[\text{Na}^+][\text{O}^-]\text{CC}$ بروتوناً من مالونات ثنائي الإيثيل. ويهاجم أنيون المالونات الناتج، $\text{CCOC}(=\text{O})\text{C}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OCC})=\text{O}$ ، كلوريد البنزيل في تفاعل S_N2 . والمعادلة الموزونة الجامعة للخطوتين هي



يعطي التحلل المائي لكلا مجموعتي الإستر حمض البنزيل مالونيك $\text{O}=\text{C}(\text{O})\text{C}(\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_2)\text{C}(=\text{O})\text{O}$.



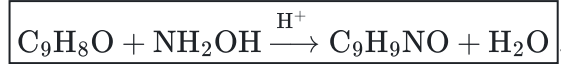
ثم يؤدي التسخين إلى نزع الكربوكسيل:



الناتج هو **B**. وتتكون رابطة C-C الجديدة المطلوبة بين ذرة كربون البنزيل وذرة الكربون المركزية في المالونات.

6.7(a) — التفاعل مع الهيدروكسيل أمين

يتكاثف الهيدروكسيل أمين NO مع مجموعة الكربونيل الكيتونية بوجود حفاز حمضي، منتجاً أكسيم إندان-1-ون:



تتحول مجموعة C=O الأصلية إلى C=N-OH.

يُمثلّ اتصال الذرات بالصيغة ON=C1CCC2CCCCC21. ولأن المسارين الحلقيين المرتبطين بذرة كربون الإيمين مختلفان، فمن الممكن وجود متماكبات هندسية:

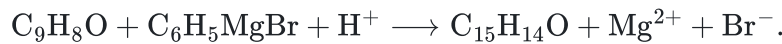
- أكسيم (E)-إندان-1-ون: O/N=C1\CCC2CCCCC21.
- أكسيم (Z)-إندان-1-ون: O/N=C1/CCC2CCCCC21.

لا تحدد المسألة نسبهما.

6.7(b) — إضافة غرينيارد والمعالجة الحمضية اللاحقة

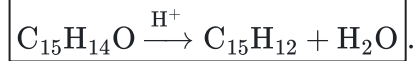
يضيف بروميد فينيل المغنيسيوم Br[Mg]c1cccc1 مجموعة فينيل إلى ذرة كربون الكربونيل. وتمثل صيغة SMILES هذه الاتصال الشكلي للذرات؛ فهي لا تظهر تناسق المذيب ولا التجمّع.

تعطي البروتنة أولاً 1-فينيل إندان-1-ول، OC1(c2cccc2)CCc2cccc21، الذي يتكون على هيئة مزيج راسيمي. والمعادلة الموزونة للإضافة والمعالجة الحمضية هي



أيونات المعالجة هنا هي أيون الهيدروجين [H+]، وأيون المغنيسيوم (II) [Mg+2]، وأيون البروميد [Br-].

ثم يخضع الكحول البنزيلي الثالثي لعملية نزع ماء محفّزة حمضياً:

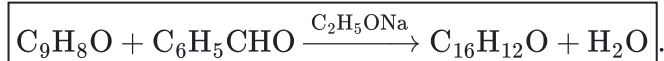


تتيح بروتنة مجموعة الهيدروكسيل فقدان الماء. ويؤدي انتزاع بروتون من مجموعة الميثيلين المجاورة إلى تكوين رابطة مزدوجة بين ذرة الكربون تلك وذرة كربون الكربونيل السابقة.

لذلك فإن الناتج النهائي هو 3-فينيل-1H-إندين، c1ccc(C2=CCc3cccc32)cc1. وفق الترقيم الأصلي للإندانون، تبقى مجموعة الفينيل عند C1 وتقع الرابطة المزدوجة الجديدة بين C1 وC2؛ وتعطي إعادة ترقيم الإندين الاسم المذكور أعلاه.

6.7(c) — التفاعل مع البنزالدهيد وإيثوكسيد الصوديوم

ينتزع الإيثوكسيد هيدروجيناً من نوع α من C2 في إندان-1-ون. ويهاجم الأينولات الناتج البنزالدهيد، ويفقد ناتج إضافة الألدول الماء ليشكّل إينوناً مترافقاً. وهذا تكاثف كلايزن-شميدت:



الناتج هو 2-بنزيليدين إندان-1-ون. وتبقى مجموعة الكربونيل الكيتونية الأصلية، وتحمل C2 مجموعة CHC6H5 ذات رابطة مزدوجة خارج الحلقة.

الناتج E المرجّح عادةً هو Cc2cccc21(=C/c2cccc2)O=C1/C: وتتقع مجموعة الفينيل وجانب الحلقة الحامل للكربونيل على جهتين متقابلتين من الرابطة المزدوجة الواقعة خارج الحلقة.

تمت مراجعة الحل بمقارنته بالحل الرسمي. حيثما يختلف هذا الحل عن الحل الرسمي، يحتوي الحل الرسمي على خطأ أو خطأ مطبعي.