



الكيمياء

مدرسة قطر التقنية الثانوية

كتاب الطالب
المستوى الثاني عشر

CHEMISTRY
STUDENT BOOK

GRADE
12

الفصل الدراسي الثاني
SECOND SEMESTER



© وزارة التربية والتعليم العالي في دولة قطر

يخضع هذا الكتاب لقانون حقوق الطباعة والنشر، ويُخضع
للاستثناء التشريعي المسموح به قانوناً ولأحكام التراخيص
 ذات الصلة.

لا يجوز نسخ أي جزء من هذا الكتاب من دون الحصول
على الإذن المكتوب من وزارة التربية والتعليم والتعليم
العالي في دولة قطر.

تم إعداد الكتاب بالتعاون مع شركة تكنولاب.

التأليف: فريق من الخبراء بقيادة الدكتور توم سو وبالتعاون
مع شركة باسكو العلمية.

الترجمة: مطبعة جامعة كامبريدج.



حضره صاحب السمو الشيخ تميم بن حمد آل ثاني
أمير دولة قطر

النشيد الوطني

قَسَمًا بِمَنْ رَفَعَ السَّمَاءَ قَسَمًا بِمَنْ نَشَرَ الضِّيَاءَ
قَطْرُ سَتَبْقَى حُرَّةً تَسْمُو بِرُوحِ الْأَوْفِيَاءَ
سِيرُوا عَلَى نَهْجِ الْأُكَى وَعَلَى ضِيَاءِ الْأَنْبِيَاءَ
قَطْرُ بِقَلْبِي سِيرَةُ عِزٌّ وَأَمْجَادُ الْإِبَاءَ
قَطْرُ الرِّجَالِ الْأَوَّلِينَ حُمَّاتُنَا يَوْمَ النِّدَاءَ
وَحَمَائِمُ يَوْمَ السَّلَامِ جَوَارِحُ يَوْمَ الْفِداءَ



وزارة التربية والتعليم والتعليم العالي
Ministry of Education and Higher Education
State of Qatar • دولة قطر

المراجعة والتّدقيق العلمي والتّربوي

إدارة المناهج الدراسية ومصادر التّعلم

إدارة التّقييم

خبرات تربوية وأكاديمية من المدارس

الإشراف العلمي والتّربوي

إدارة المناهج الدراسية ومصادر التّعلم

يعد كتاب الطالب مصدرًا مثيرًا لاهتمام الطالب من ضمن سلسلة كتب العلوم لدولة قطر، فهو يستهدف جميع المعرف والمهارات التي يحتاجون إليها للنجاح في تنمية المهارات الحياتية وبعض المهارات في المواد الأخرى.

وبما أننا نهدف إلى أن يكون طلابنا مميزين، نود منهم أن يتسموا بما يأتي:

- البراعة في العمل ضمن فريق.
- امتلاك الفضول العلمي عن العالم من حولهم، والقدرة على البحث عن المعلومات وتوثيق مصادرها.
- القدرة على التفكير بشكلٍ ناقدٍ وبناءً.
- الثقة بقدرتهم على اتباع طريقة الاستقصاء العلمي، عبر جمع البيانات وتحليلها، وكتابة التقارير، وإنتاج الرسوم البيانية، واستخلاص الاستنتاجات، ومناقشة مراجعات الزملاء.
- الوضوح في تواصلهم مع الآخرين لعرض نتائجهم وأفكارهم.
- التمرّس في التفكير الإبداعي.
- التمسّك باحترام المبادئ الأخلاقية والقيم الإنسانية.

يتجسد في المنهج الجديد العديد من التوجّهات مثل:

- تطوير المنهج لجميع المستويات الدراسية بطريقة متكاملة، وذلك لتشكيل مجموعة شاملة من المفاهيم العلمية التي تتوافق مع أعمار الطالب، والتي تسهم في إظهار تقدّمهم بوضوح.
- مواءمة محتوى المصادر الدراسية لتوافق مع الإطار العام للمنهج الوطني القطري بغية ضمان حصول الطالب على المعرف والمهارات العلمية وتطوير المواقف (وهو يُعرف بالكفايات) مما يجعل أداء الطالب يصل إلى الحد الأقصى.
- الانطلاق من نقطة محورية جديدة قوامها مهارات الاستقصاء العلمي، ما أسس للتنوع في الأنشطة والمشاريع في كتاب الطالب.
- توزّع المعرفة والأفكار العلمية المخصصة لكلّ عام دراسي ضمن وحدات بطريقة متسلسلة مصممة لتحقيق التنوع والتطور.

- تعدد الدّروس في كلّ وحدة، بحيث يعالج كلّ درس موضوعاً جديداً، منطلاقاً ممّا تمّ اكتسابه في الدّروس السابقة.
- إتاحة الفرصة للطلّاب، في كلّ درس، للتحقّق الذّاتي من معارفهم ولممارسة قدرتهم على حلّ المشكلات.
- احتواء كلّ وحدة على تقويم للدرس وتقويم الوحدة التي تمكّن الطّلاب والأهل والمدرّسين من تتبع التّعلم والأداء.

العلوم مجموعة من المعارف التي تشمل الحقائق والأشكال والنظريّات والأفكار. ولكنّ العالم الجيّد يفهم أنّ «طريقة العمل» في العلوم أكثر أهميّة من المعرفة التي تحتويها.

سوف يساعد هذا الكتاب الطّلاب على تقدير جميع هذه الأبعاد واعتمادها ليصبحوا علماء ناجحين ولديهم مجموعة واسعة من التّحدّيات في حياتهم المهنية المستقبلية.

مفتاح كفايات الإطار العام للمنهج التعليمي الوطني لدولة قطر

الاستقصاء والبحث



التعاون والمشاركة



التوّاصل



التفكير الإبداعي والنّاقد



حلّ المشكلات



الكفاية العدديّة



الكفاية اللغويّة



الكيمياء

ماذا ستعلم من هذا الكتاب

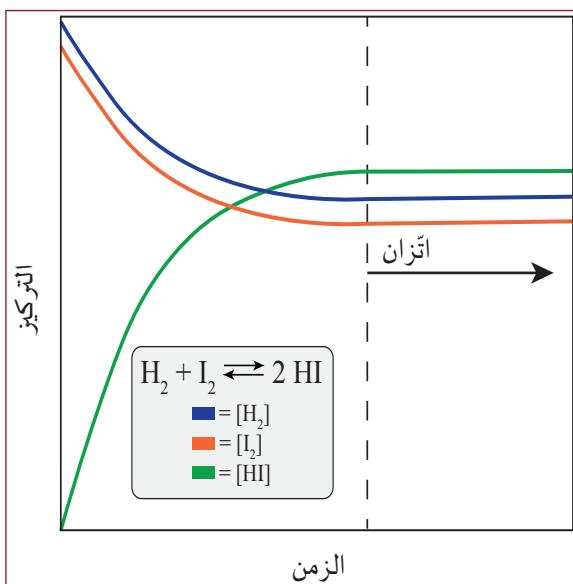
سوف نركّز خلال هذا الفصل الدراسي على التفاعلات الكيميائية لجهة سرعتها والميكانيكيّات المتعلّقة بها بالإضافة إلى الاتزان المرتّب بها.

تتعلّق الوحدة الأولى بالكيمياء الحركيّة أي المجال الذي يختصّ بدراسة سرعة التفاعلات الكيميائية، ويشرح الميكانيكيّات التي تحدث من خلالها، ويعرف معادلات حساب سرعة التفاعل. لكن لماذا من المهمّ لنا دراسة هذه التفاعلات وما المفید في معرفة سرعتها؟ إنّ التفاعلات الكيميائية جزءاً أساسياً من حياتنا اليوميّة. ففي تحدث باستمرار وقد تستغرقآلافاً من السنين أو أجزاءً من الثانية. قد تؤدي بعض التفاعلات البطيئه إلى تلف مواد معينة بصورة نهائیة مثل صدأ الحديد أو تتسبّب بعض التفاعلات الفائقه السرعة بانفجار خطير كما يحدث عند تزويد خليط من الأكسجين والأسطيّلين بشرارة مما قد يؤدي إلى حدث يهدّد سلامه البشر.



سرعة التفاعلات عندما تكون (a) بطيئة، و(b) سريعة، و(c) سريعة جداً.

سرعة التفاعل	السرعة	سرعة التفاعل	1.4
عدد المولات (A) في المعادلة الموزونة	n		
التغيير في تركيز المادة (A) بوحدة (M)	$\Delta[A]$	$\frac{1}{n} \frac{\Delta[A]}{\Delta t}$ = السرعة	
(s, min, hr, yrs) (t)	Δt		



تفاعل يكون حالة اتّزان.

بعد الانتهاء من دراسة سرعة التفاعلات بشكلٍ عام، تتطرق الوحدة الثانية إلى حالة الاتزان عندما تكون سرعة التفاعل الطردي مساوية لسرعة التفاعل العكسي في نظامٍ مغلق. حين يتعرّض نظام ما في حالة اتّزان لمؤثّر خارجي، فإنّ موضع الاتّزان يُزاح نحو الاتّجاه الذي يؤدّي إلى تقليل أثر هذا المؤثّر أو إلغائه، ليعود إلى حالة اتّزان جديدة. يتأثر الاتّزان بتغيير تركيز إحدى المواد المتفاعلة أو المواد الناتجة، وأيضاً بتغيير الحرارة، كما يتأثر بتغيير الضغط فقط في التفاعلات الغازية.

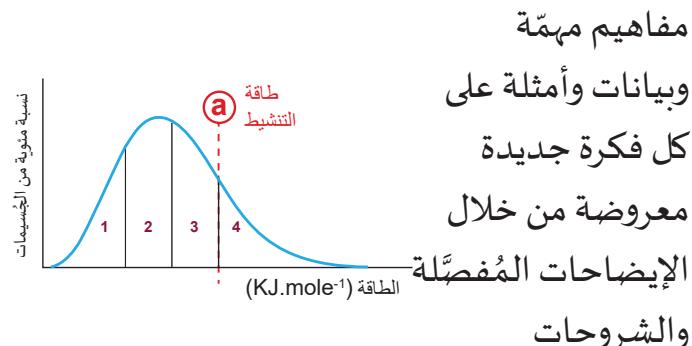
بعض أقسام هذا الكتاب

أسئلة للمناقشة

ما السultan اللتان يجب أن تمتلكهما جميع المواد الأمفوتيّة؟

أسئلة المناقشة تزود طلاب الصف بفرصة مناقشة المفاهيم والمعلومات الجديدة.

الرسوم التوضيحية



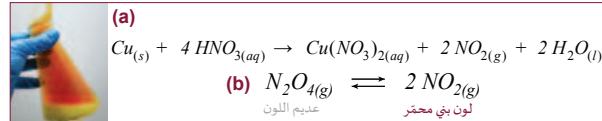
شريط الأفكار المهمة

تحديد النقاط الرئيسية وتذكّرها.

سرعة التفاعل هي التغيير في تركيز المادة الناتجة أو المتفاعلة في وحدة الزمن.

العلاقات والمعادلات

مُثلث المعادلات الكيميائية بشكل واضح مع احتوائها على رموز ملوّنة تمثّل المعلومات المهمّة.

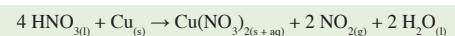


الأمثلة

تُظهر الأمثلة جميع خطوات الحلّ والتفسير للحصول على حسابات صحيحة.

مثال 1

ينتافع حمض النيتريك مع النحاس بحسب المعادلة الآتية



احسب سرعة التفاعل بين 5 min و 10 min من الرسم البياني الوارد في الشكل 6-4

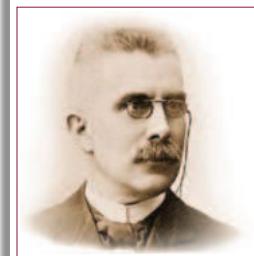
الحل

العلم والعلماء

تم تطوير معرفتنا العلمية على مدى أكثر من ثلاثة آلاف عام. تطلعنا هذه المقالات على إلهام الإنسان وتصوريه في التعامل مع العلم والتكنولوجيا. وستتعرف إلى أشخاص رائعين في هذه الصفحات.

إضاءة على عالم

هنري لويس لو شاتيليه Henry Louis Le Chatelier 1850-1936



ولد هنري لويس لو شاتيليه (الشكل 6-5) في باريس بتاريخ 8 أكتوبر 1850 لوالديه لويس ولويس لو شاتيليه. كان له أربعة إخوة وأخت واحدة. قامت والدتهم بتربيةهم، كما صفتها لو شاتيليه، في «نظام صارم للغاية». حافظ عليه في منهجه للبحث العلمي. كان والده مهندس مواد. وعلى الرغم من أن هنري قد درس الهندسة في فرنسا واهتم بحل المشكلات الصناعية، فإنه اختار تدريس الكيمياء. تزوج من جينيفيف نيكولا، وأنجب منها سبعة أولاد.

الأنشطة

التدريب العملي من خلال المختبر والمشاريع البحثية وسواها من الأنشطة التي ترسّخ معاني الأفكار الجديدة وتطور العمل المخبري.

تقويم الدرس

يتميز كل درس بعرض يحتوي على الأسئلة التي تُغطي جميع المفاهيم والمعلومات في هذا الدرس.

مراجعة الوحدة

ملخص قصير عند نهاية كل وحدة، وهو مرجع سريع للأفكار والمصطلحات الرئيسية.

تقويم الوحدة

رُوّدت كل وحدة بمجموعة من الأسئلة ذات الخيارات المتعددة كعينة تُحضر الطالب لاختبار نموذجي.

تقويم الوحدة

أسئلة الإجابات القصيرة وأسئلة الإجابات المطلولة بُنيتا على مستويات ثلاثة من الصعوبة في نهاية كل وحدة.

الوحدة 4: الكيمياء الحركية

٦٦٦

1-4 منحنى توزيع ماكسويل-بولتزمان

سؤال الاستقصاء: كيف يؤثر ارتفاع درجة الحرارة في شكل منحنى توزيع ماكسويل - بولتزمان؟

المادة المطلوبة: أوراق عمل تحتوي على منحنى توزيع ماكسويل-بولتزمان.

١. استخدم الرسم البياني المعطى أدناه، رسم **الجدول 14** ببيانات محسوبة لماكسويل-بولتزمان (x 1000).

V (cm ³)	77K	298K	800K

الوحدة 5: التأزن

2 تقويم الدرس 5

١. أيٌ من الآتي يُبيّن العلاقة الصحيحة بين تركيز المواد المُتفاعلة والمادة الناتجة الموجودة في تثبيت الأُتزان (K)؟

- a. [المادة الناتجة] \ [المادة المُتفاعلة]
- b. [المادة المُتفاعلة] \ [المادة الناتجة]
- c. [المادة الناتجة] \times [المادة المُتفاعلة]
- d. [المادة المُتفاعلة] + [المادة الناتجة]

٢. أيٌ من الآتي هو وحدة القياس الازمة للمادة الناتجة والمادة المُتفاعلة الموجودة في تثبيت الأُتزان (K)؟

الدرس 5-2: ثابت الأُتزان

الوحدة 5

مراجعة الوحدة

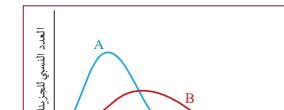
الدرس 5-1: مفهوم الأُتزان

- ٠١. لكي يتحقق التفاعل **الأُتزان** **Equilibrium**. يجب أن يكون قابلاً للانعكاس، ويُجري في نظام مغلق.
- ٠٢. تكون التفاعلات عند الأُتزان متّجّهة إلى اليسار أو إلى اليمين.
- ٠٣. يستخدم **مبدأ لو شاتيليه Le Chatelier's principle** لتوقع إزاحة موضع اتجاه الأُتزان الناتج عن المؤثرات الناتجة عن التغييرات في التركيز أو درجة الحرارة أو الضغط (تغير الحجم) في التفاعلات الغازية.

الدرس 5-2: ثابت الأُتزان

تقويم الوحدة

اختبار من متعدد



١. أيٌ من الجمل الآتية تُغيّر بشكل صحيح عن الرسم البياني المُقابل للمتعلق بالغازين A و B؟

تقويم الوحدة

٢٥. مُعادلة حالة الأُتزان التي تكوّنت عند تشكّل HCl من عناصر مُعطاة كالتالي: $H_{(g)} + I_{(g)} \rightleftharpoons 2HI_{(g)}$ تم ملء وعاء تفاعل حجمه 1 L بكمية من غاز $H_{(g)}$ مقدارها 0.50 moles وكمية من غاز $I_{(g)}$ مقدارها 0.050 moles. إذا تم قياس تركيز الأُتزان لغاز $HI_{(g)}$ وكانت تساوي 0.11 M.

٢٦. إذا أعطيت الشعاعلة الآتية: $2NO_{(g)} + Br_{(g)} \rightleftharpoons 2NOBr_{(g)}$ بغاز $NO_{(g)}$ ضغطه 0.400 atm وغاز $Br_{(g)}$ ضغطه 0.200 atm. وإذا تم قياس قيمة الضغط الجزئي لحالة الأُتزان لغاز $NOBr_{(g)}$ وكانت تساوي 0.240 atm، أحسب قيمة K_p .

٢٧. قيمة K_p لحالة الأُتزان الآتية عند درجة حرارة 500 K تساوي 1.23×10^{-5}



مختّط المادة

الوحدة 4 الكيمياء الحركية

تَختصّ الكيمياء الحركية بدراسة سُرعة التفاعلات الكيميائية، وتشرح الميكانيكيات التي تحدث من خلالها تلك التفاعلات. تزداد سُرعة التفاعل بارتفاع درجة الحرارة، وزيادة التركيز، وزيادة مساحة السطح، ووجود العامل الحفّاز، وزيادة الضغط في التفاعلات الغازية. سوف تتناول هذه الوحدة دراسة كمية للكيمياء الحركية. يُناقِش الدرس 1 سرعة التفاعلات الكيميائية ونظرية التصادم والعوامل المؤثرة على سرعة التفاعل الكيميائي.

الوحدة 5 الاتّزان

يُعدّ الاتّزان الكيميائي مفهوماً حاسماً في كل من التكنولوجيا والعالم الطبيعي. يقدم الدرس الأوّل مفهوم الاتّزان، وتمّ فيه مناقشة مبدأ لوشاـتيلـيه (Le Chatelier's Principle) الذي يُبيّن كيفية استجابة الأنظمة المُتّزنة لمؤثّرات مختلفة، كالتغيّرات في التركيز ودرجة الحرارة والحجم والضغط. ويتناول الدرس الثاني كيفية كتابة ثابت الاتّزان ($K_{(eq)}$)، وكيفية حساب قيمته.

ويضمن الدرس الثالث تدريبات حول مفهوم الاتّزان في موضوعات مختلفة، مثل الرقم الهيدروجيني pH للمحاليل الحمضية والقاعدية، وعمليات مُعايرة الحمض-القاعدة، وأدلة الحمض-القاعدة، والمحاليل المنظمة.

الوحدة 6 حساب التغيّرات في المُحتوى الحراري

المحتوى الحراري هو شكل من أشكال الطاقة التي تتأثّر بدرجة الحرارة والضغط والحجم. يصاحب التفاعلات الماصّة للطاقة الحراريّة والتفاعلات التي تُطلق الطاقة الحراريّة تدفقاً للمحتوى الحراري بشكل متّبادل بين النظام والوسط المحيط.

الوحدة 7

الإنترôبى (العشوائية) والطاقة الحرّة

يعرف الدرس 1-7 الطالب على مفهوم الإنترôبى من حيث مفهومي الحالات المجهريّة والعينيّة. تم كذلك تعريف القانون الثاني للديناميكا الحرارية.

الوحدة 8

تقنيات التحليل الحديثة

يناقش الطالب في الدرس 1-8 تقنيات تحليل مطیاف الكتلة من أجل تحديد الصيغة الكيميائية لمادة ما.

جدول المحتويات

الوحدة 4 الكيمياء الحركية

الدرس 1-4 نظرية التصادم وسرعة التفاعل الكيميائي

الوحدة 5 الاتزان

الدرس 1-5 مفهوم الاتزان وثابت الاتزان K_{eq}
الدرس 2-5 مبدأ لوشاتيليه
الدرس 3-5 الاتزان في المحاليل الحمضية والقاعدية

الوحدة 6 حساب التغيرات في المحتوى الحراري

الدرس 1-6 المحتوى الحراري

الوحدة 7 الإنترولي (العشوائية) والطاقة الحرة

الدرس 1-7 الإنترولي (s)

الوحدة 8 تقنيات التحليل الحديثة

الدرس 1-8 مطياف الكتلة



الوحدة 4

الكيمياء الحركية

Chemical Kinetics

في هذه الوحدة

C1205
C1206

الدرس 1-4: نظرية التصادم وسرعة التفاعل

مُقدّمة الوحدة

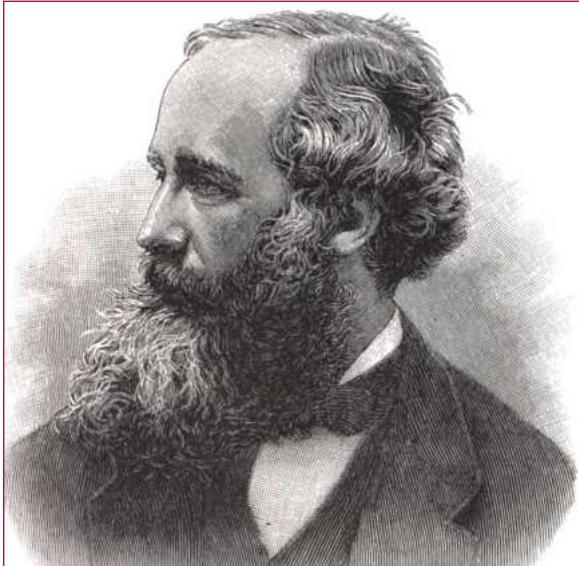
تختص الكيمياء الحركية بدراسة سرعة التفاعلات الكيميائية، وتشرح الميكانيكيات التي تحدث من خلالها تلك التفاعلات. سوف نتذكّر العوامل المؤثرة في سرعة التفاعلات، حيث تزداد سرعة التفاعل بارتفاع درجة الحرارة، وزيادة التركيز (وزيادة الضغط في التفاعلات الغازية)، وزيادة مساحة السطح، ووجود العامل الحفّاز. سوف تتناول هذه الوحدة دراسة كمية للكيمياء الحركية.

يناقش الدرس 1 سرعة التفاعلات الكيميائية ونظرية التصادم والعوامل المؤثرة على سرعة التفاعل الكيميائي

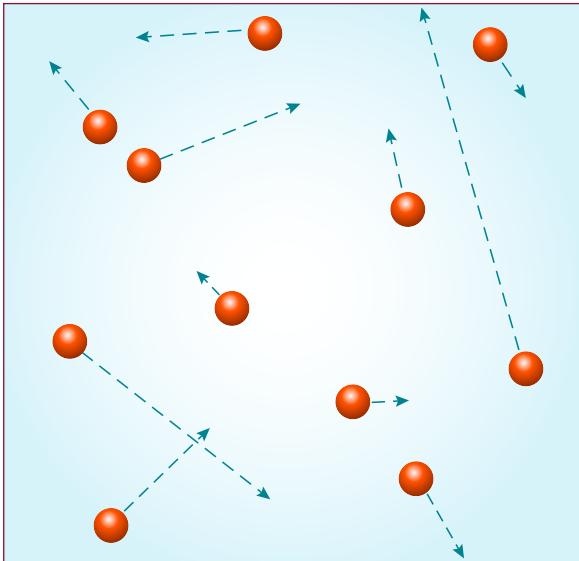
الدرس 1-4

نظريّة التصادُم وسُرعة التفاعل الكيميائي

Collisions Theory and Reaction Rate



الشكل 1-4 جيمس كليرك ماكسويل.



الشكل 2-4 تحرّك الجُسيمات في عيّنة من الغاز بسرعات مختلفة.

لم يشهد القرن التاسع عشر موافقة جميع العلماء على وجود الذرّات، فقد طرح علماء الذرّة وغيرهم نظريّات كثيرة لتفسيّر سلوك المادّة، ودراسة الملاحظات التي تمّ أخذها من التفاعلات الكيميائيّة وسُرعتها. وقد رأى واضعو النظريّات الذريّة في ذلك الوقت أنّ الجُسيمات جميعها التي تكون الغاز تتحرّك بالسُرعة نفسها. وقد نفّذ العالم جيمس كليرك ماكسويل الشكل (1-4) طرائق الاحتمالات والإحصائيّات ليوضّح أنّ سُرّعات الجُسيمات لها توزيع يمكن توقّعه، بحيث يتراوح مدى السُرّعات بين البطئيّة جدًا والسرعيّة للغاية الشكل (2-4). وقد عمّم هذه النظريّة في وقت لاحق العالم لودفيج بولتزمان.

مخرجات التعلم

C1205.1 يعرّف أن التفاعلات المختلفة تحدث بسرعات مختلفة، ويفسر سُرعة التفاعل من خلال تصادمات الجُسيمات، وطاقة الجُسيمات.

المفردات



Collision theory

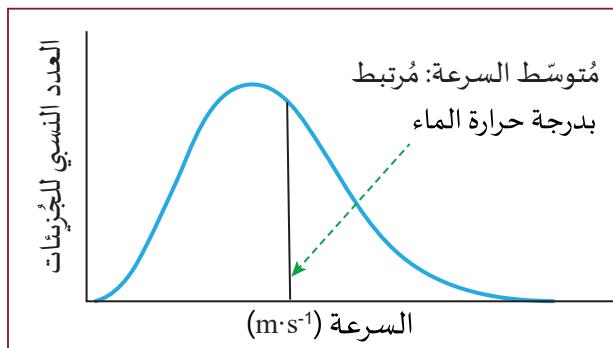
نظريّة التصادُم

Activation Energy

طاقة التنشيط

هل يمكن تجميد الماء عند الغليان؟

الإجابة هي: نعم! وأساس فهم ذلك هو أن درجة الحرارة تقيس مُعَدَّل سُرعة الجُزيئات المُتحرِّكة. فالجُزيئات في عيّنة من الماء، تتحرّك عند أي درجة حرارة تقريباً بمدّى واسع من السرعات. ويرتبط مُتوسّط السُّرعة بدرجة حرارة الماء (الشكل 4-3)، فعند الغليان يتمّ في الغالب تسخينه.



الشكل 4-3 مُتوسّط السُّرعة مُرتبط بدرجة حرارة الماء.

إن أسرع الجُزيئات حرّكة ستغادر السائل وتدخل في الحالة الغازية. أما أبطأ الجُزيئات حرّكة، والتي ظلّت خلفها، فتمتص الطاقة الحرارية، وتحل محلّ أسرع الجُزيئات حرّكة إلى أن تغلي هي أيضاً وتغادر السائل. إذا استمرّ تسخين السائل لمدّة زمنية كافية، فإنّ جُزيئاته جميعاً تغلي وتستمرّ في المغادرة، ولكن بمتّسق سُرعة ثابت للجُزيئات جميعها. ولهذا، تبقى درجة الحرارة ثابتة أثناء عملية الغليان.

ويمكن غلي الماء من دون تسخينه، وذلك بخفض الضغط الواقع عليه إلى أن يتّساوى مع ضغط بخار الماء. فإذا تمّ وضع الماء في غرفة تفريغ (الشكل 4-4) وُخُفِّض الضغط، فإنّ الماء يبدأ بالغليان.



الشكل 4-4 كأس ماء في وعاء تفريغ الهواء.

ومرة أخرى، فإن أسرع الجُزيئات حرّكة فقط هي التي تتمكن من الدخول في الحالة الغازية.

وعلى العكس من عملية غلي الماء بتسخينه، فإن جُزيئات الماء ذات الحركة الأبطأ لن تمتص الطاقة لتتحرّك بشكل أسرع وبالتالي ستنخفض درجة حرارتها.

ومع استمرار خفض الضغط، فإنّ الماء يبدأ بالغليان وتنتقل أسرع الجُزيئات إلى الحالة الغازية بينما تستمر درجة الحرارة بالانخفاض وينخفض أيضاً متوسّط سرعة الجُزيئات إلى أن يصبح في النهاية عند درجة حرارة مقدارها 0°C .

وكم من المدهش أن ترى حينها كيف يتجمد الماء بشكل فوري.

سُرعة التفاعل

من المشاهد التي نألفها جميًعاً ذلك التفاعل الذي يتَّحد فيه الأكسجين مع الحديد لتكوين الصدأ بوجود الرطوبة. فالحديد أو الفولاذ الذي يُصنَع منه أي قارب يرسو في ميناء الدوحة، يجب حمايته لمنع حدوث الصدأ. ومع ذلك، فعندما نضع برغبياً (مسماراً) مصنوعاً من الحديد في الماء، ونراقبه، فإننا لا نلاحظ أنَّ شيئاً قد تغيَّر، لأنَّ ذلك التفاعل لا يحدث سريعاً مقارنة بما يحدث في عملية إضافة ملعقة صغيرة من صودا الخبز إلى الخل، فهذا التفاعل يحدث في الحال، ويستغرق حدوثه دقائق فقط ليكتمل. وهنالك تفاعل أسرع: عند تعريض خليط مُكون من الأكسجين وغاز الأسيتيلين (الإيثاين) لشرارة يحدث تفاعل خلال أجزاء من الثانية، وقد يؤدي إلى حدوث انفجار خطير.



الشكل 5-4 تختلف التفاعلات في سرعتها فقد تكون (a) بطيئة، و(b) سريعة، و(c) سريعة جداً. إنَّ صدأ الحديد تفاعل بطيء إلى حدٍ ما، أمَّا تفاعل الأسيتيلين مع الأكسجين بشرارة فهو تفاعل سريع للغاية. وفي الطبيعة والعمليات الصناعية المتنوعة، نجد مديًّا واسعاً من سُرعة التفاعلات التي قد يستغرق حدوثها آلاً من السنين أو أجزاء من الثواني.

سُرعة التفاعل هي التغيير في تركيز المادة الناتجة أو المُتفاعلة في وحدة الزمن.

تعريف سُرعة التفاعل: هي التغيير في تركيز إحدى المواد المُتفاعلة (أو إحدى المواد الناتجة) في وحدة الزمن المُعادلة (4 - 1). وتتنوع وحدات التركيز بتنوع استخدامه، فالاختيار الشائع لوحدة تركيز المحاليل هي المولارية (M) أو (mol/L)، والضغط الجزيئي للغازات (atm). وبسبب تنوع سُرعة التفاعلات بشكل كبير، فقد تنوَّعت وحدات الزمن الشائعة، والتي تتضمن الثواني (s)، والدقات (min)، والساعات (hr)، والسنوات (yr).

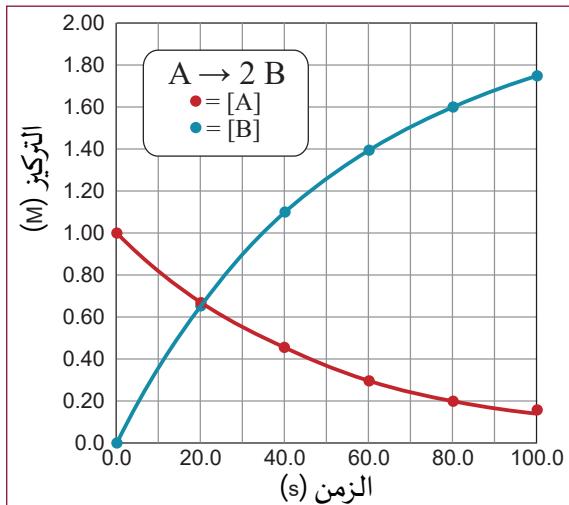
		سُرعة التفاعل	1.4
عدد مولات المادة (A)	في المعايرة الموزونة	n	
التغيير في تركيز المادة (A)	بوحدة (M)	$\Delta[A]$	$\frac{1}{n} \frac{\Delta[A]}{\Delta t} = \text{سُرعة التفاعل}$
التغيير في الزمن (t)	(s, min, hr, yr)	Δt	

لتحديد سُرعة التفاعل، نقيس التغيير في أحد العوامل الآتية:

- التغيير في الكتلة عند استهلاك المادة المُتفاعلة، أو تكون المادة الناتجة.
- سُرعة التغيير في لون محلول.
- سُرعة التغيير في الرقم الميدروجيني pH .
- سُرعة انطلاق الطاقة عن طريق التغييرات في درجة الحرارة والضغط.
- سُرعة التغيير في حجم الغاز (للتفاعلات المحتوية على غازات).

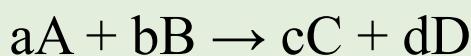
سرعة التفاعل-تابع

عند وضع المواد المُتفاعلة في وعاء التفاعل يكون التركيز الابتدائي للمواد الناتجة فيه صفرًا. مع مضي الزمن، ستتناقص تراكيز المواد المُتفاعلة، وتزداد تراكيز المواد الناتجة. يُبيّن الشكل (6-4) كيف تغيّر تراكيز المادة المُتفاعلة «A» والمادة الناتجة «B» للتفاعل الكيميائي: $A \rightarrow 2B$. تذكّر أن الصيغة الكيميائية، عندما تكون موضوعة بين قوسين مُربّعين []، فإنها ترمز إلى مolarية (تركيز) تلك المادة.



الشكل 6-4 التركيز مقابل الزمن.

تستخدم معادلات حساب سرعة التفاعل لتوقع قيمة سرعة التفاعلات أو تركيز المواد المُتفاعلة أو الناتجة بشكل كمي. وفي معادلة التفاعل الكيميائي العامة الآتية:



حيث يُمثل كل من A و B المُتفاعلات، C و D المولارات (تمثّل عدد المولات في المعادلة الموزونة).

يمكن حساب قيمة سرعة التفاعل من حيث سرعة اختفاء المواد المُتفاعلة أو سرعة ظهور المواد الناتجة على النحو الآتي:

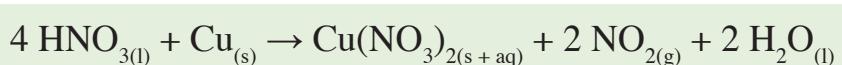
$$-\frac{1}{a} \times \frac{\Delta[A]}{\Delta t} = -\frac{1}{b} \times \frac{\Delta[B]}{\Delta t} = \frac{1}{c} \times \frac{\Delta[C]}{\Delta t} = \frac{1}{d} \times \frac{\Delta[D]}{\Delta t}$$

• تكون قيمة سرعة التفاعلات موجبة دائمًا. بما أن التغيير في تركيز المواد المُتفاعلة ذو قيمة سالبة (التركيز النهائي - التركيز الابتدائي)، يتم وضع إشارة سالبة في التعبير الرياضي لسرعة التفاعل للدلالة على نقص تركيز المواد المُتفاعلة مع مرور الزمن.

مثال 1

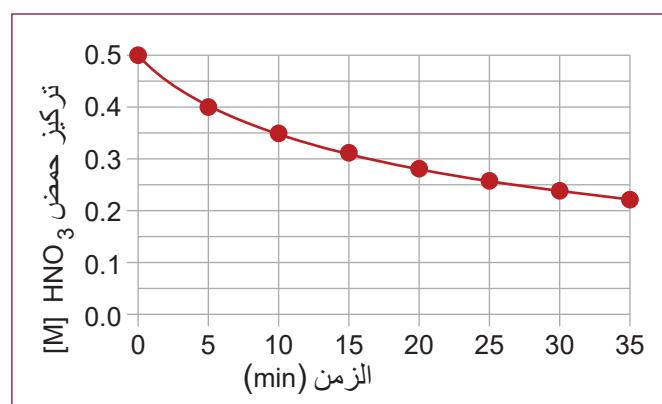


يتفاعل حمض النيتريل مع النحاس بحسب المعادلة الآتية:



احسب سرعة التفاعل بين 5 min و 10 min باستخدام الرسم البياني الوارد في الشكل (7-4).

الحل



الشكل 7-4 رسم بياني لسرعة التفاعل.

$$\begin{aligned} \text{يُمثل حمض النيتريل المادة المُتفاعلة، التي} \\ \text{يُساوي مُعاملها (4)، وبما أن تركيز المادة المُتفاعلة} \\ \text{يتناقص مع الزمن توضع إشارة سالب في معادلة} \\ \text{السرعة. عندها، ستكون سرعة التفاعل بين} \\ \text{10 min و 5 min :} \\ -\frac{1}{n} \frac{\Delta[A]}{\Delta t} = \text{سرعة التفاعل} \\ = -\left(\frac{1}{4}\right) \left(\frac{0.35 - 0.40}{5 \text{ min}}\right) \\ = 0.0025 \text{ M/min} \end{aligned}$$

نظريّة التصادم

يمكن تفسير كيفية حدوث التفاعلات الكيميائية اعتماداً على "نظريّة التصادم" (Collision theory) التي تنص على أن جسيمات المواد المتفاعلة في حالة حركة عشوائية ومستمرة، لذلك فإنّها تتصادم مع بعضها البعض. وتفترض نظريّة التصادم الآتي:

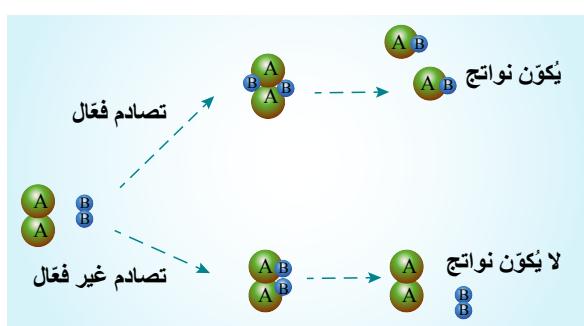
أن التفاعل الكيميائي يحدث نتيجة لتصادم جسيمات المواد المتفاعلة مع بعضها البعض.

لكي يحدث تفاعل كيميائي ما، ويعطي نواتج يجب أن تتصادم جزيئات المواد المتفاعلة تصادمات فعالة مع بعضها البعض وذلك بتوفّر شرطين هما:

1. يجب أن يكون لدى الجزيئات المتصادمة كمية كافية من الطاقة اللازمة لبدء التفاعل. وتسمى هذه الطاقة "طاقة التنشيط" (Activation energy) وهي الحد الأدنى من الطاقة التي يجب أن تمتلكها الجسيمات لكي تتفاعل عند التصادم.

2. يجب أن تتصادم الجسيمات في الاتجاه الفراغي المناسب لأنّ الجسيمات التي تصطدم وهي في اتجاه فراغي غير مناسب لا تتفاعل مع بعضها حتى لو كانت تمتلك طاقة التنشيط.

يمكن أن يكون التصادم فعالاً وينتج عنه تفاعل كيميائي عند توافر طاقة التنشيط المناسبة والإتجاه الفراغي الصحيح أو يكون تصادم غير فعال إذا لم يتوفّر أي من الشرطين أو كلاهما. الشكل (4-8).



الشكل 4-8 نظريّة التصادم.

العوامل التي تؤثر على سرعة التفاعل:

1. طبيعة المواد المتفاعلة: تحدث التفاعلات الكيميائية نتيجة تكسير الروابط الكيميائية بين الذرات في المواد المتفاعلة ثم تكوين روابط كيميائية جديدة في المواد الناتجة. وبالتالي تعتمد سرعة التفاعل الكيميائي على أنواع وأعداد الروابط التي يتم كسرها والتي يتم تكوينها.

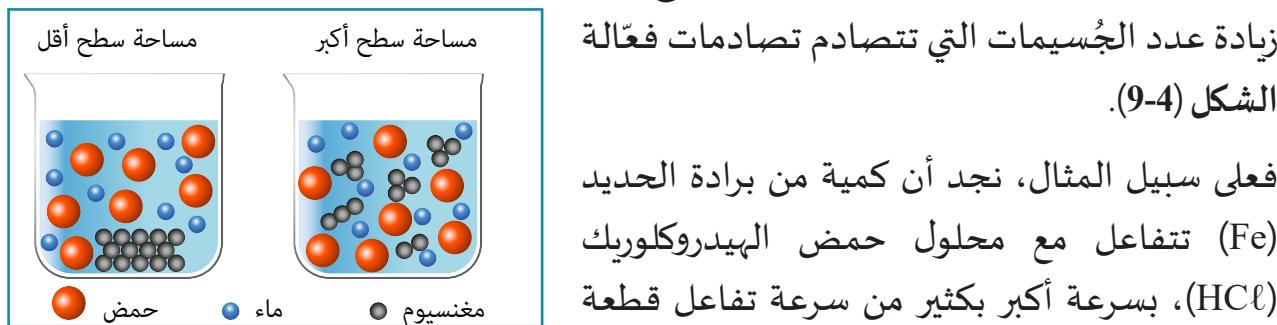
ويلاحظ بشكل عام أن تفاعل الأيونات أسرع من تفاعل الذرات، وتتفاعل الذرات أسرع من تفاعل الجزيئات، كما أن تفاعل الجزيئات قليلة الروابط أسرع من تفاعل الجزيئات كثيرة الروابط.

كما تعتمد سرعة التفاعل الكيميائي للعنصر على نشاطه أي موقعه في سلسلة النشاط الكيميائي. فعلى سبيل المثال يتفاعل المغنيسيوم مع حمض الهيدروكلوريك بسرعة أكبر من تفاعل الخارصين مع الحمض.

2. تركيز المواد المتفاعلة: تزداد سرعة التفاعل الكيميائي بزيادة تركيز المواد المتفاعلة، حيث كلما زاد تركيز المادة المتفاعلة يزداد عدد الجسيمات في وحدة الحجم وبالتالي يزداد احتمال التصادم الفعال بين الجسيمات المتفاعلة. فعلى سبيل المثال، يزيد تركيز جزيئات الأكسجين النقي 5 مرات عن تركيزها في الهواء، تحت الضغط نفسه. لذلك فإنّ المواد تتأكسد بسرعة أكبر في الأكسجين النقي منه في الهواء. كما يؤثر الضغط في التفاعلات التي تحتوي على غازات، فإن زيادة الضغط عن طريق تقليل الحجم يؤدي إلى زيادة عدد جزيئات الغاز في وحدة الحجم مما يزيد التصادم الفعال بين جزيئات الغاز فتزداد سرعة التفاعل.

العوامل التي تؤثر على سرعة التفاعل - تابع

3. **مساحة السطح المعرض للتفاعل:** تعتمد سرعة تفاعل المواد الصلبة على مساحة السطح المعرض للتفاعل. فكلما زادت مساحة السطح المعرض للتفاعل، زادت سرعة التفاعل بسبب



الشكل 9-4 أثر زيادة مساحة السطح.

زيادة عدد الجسيمات التي تتصادم تصادمات فعالة (9-4).

على سبيل المثال، نجد أن كمية من برادة الحديد (Fe) تتفاعل مع محلول حمض الهيدروكلوريك (HCl)، بسرعة أكبر بكثير من سرعة تفاعل قطعة حديد مماثلة في الكتلة والسبب أن مساحة السطح المعرض للتفاعل من برادة الحديد أكبر بكثير من مساحة السطح المعرض للتفاعل في قطعة الحديد وبالتالي يزداد عدد الجسيمات المتصادمة تصادمات فعالة في حالة البرادة مع الحمض فتزداد سرعة التفاعل.

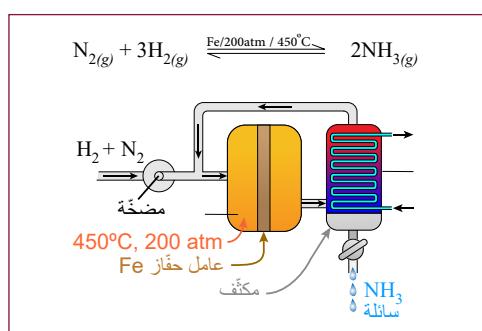
4. **تأثير درجة الحرارة:** إن ارتفاع درجة حرارة وسط التفاعل يؤدي إلى زيادة سرعة التفاعل، ويمكن تفسير ذلك من خلال زيادة طاقة حركة الجسيمات المتفاعلة عند زيادة درجة الحرارة، مما يؤدي إلى زيادة عدد الجسيمات التي تمتلك طاقة التنشيط فيزداد عدد التصادمات الفعالة وتزداد سرعة التفاعل (علمًا بأن تغير درجة الحرارة لا يؤثر على قيمة طاقة التنشيط).

5. **العامل الحفاز:** العامل الحفاز هو المادة التي تزيد من سرعة التفاعل الكيميائي ولكنها لا تتغير عند انتهاء التفاعل.

كيف تزيد العوامل الحفازة من سرعة التفاعل الكيميائي؟

إن العامل الحفاز يقلل مقدار طاقة التنشيط الالزمة لحدوث التفاعل، مما يؤدي إلى زيادة عدد الجزيئات التي تمتلك طاقة التنشيط فتزيد سرعة التفاعل. وفي بعض الأحيان، تعمل العوامل الحفازة على زيادة سرعة التفاعل مليون مرة أكثر من حدوث هذا التفاعل من دون عامل حفاز وبخاصة في التفاعلات البيولوجية.

 تميل سرعة التفاعل إلى الارتفاع بارتفاع درجة الحرارة، وزيادة الضغط (للتفاعلات الغازية)، وزيادة التركيز وإضافة العامل الحفاز المناسب وزيادة مساحة السطح المعرض للتفاعل.



الشكل 10-4 عملية هابر لإنتاج غاز الأمونيا.

يبين الشكل (10-4) كيف تستخدم هذه العوامل بالتفاعلات الصناعية، مثل طريقة إنتاج غاز الأمونيا بواسطة عملية هابر الصناعية، حيث تحتاج عملية هابر لصنع الأمونيا (NH_3) إلى ضغط عالي 400 - 200 atm، ودرجة حرارة مرتفعة لا تزيد عن 450 °C وعامل حفاز (الحديد) لزيادة سرعة التفاعل بشكل كافٍ لإنتاج الأمونيا تجاريًا.

تقويم الدرس 1-4

1. أيٌ من الظروف الآتية يعمل على زيادة سرعة التفاعل؟

- a. تصادمات قليلة، وطاقة تنشيط منخفضة
- b. تصادمات قليلة، وطاقة تنشيط مرتفعة
- c. تصادمات كثيرة، وطاقة تنشيط منخفضة
- d. تصادمات كثيرة، وطاقة تنشيط مرتفعة

2. في أيٍ من الحالات الآتية تتوقع أن تكون سرعة التفاعل بين فلز المغنيسيوم وحمض الكبريتيك H_2SO_4 أكبر ما يمكن؟

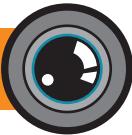
- a. قطع من فلز المغنيسيوم مع حمض الكبريتيك (1M) عند $25^\circ C$.
- b. قطع من فلز المغنيسيوم مع حمض الكبريتيك (1M) عند $50^\circ C$.
- c. مسحوق فلز المغنيسيوم مع حمض الكبريتيك (2M) عند $25^\circ C$.
- d. مسحوق فلز المغنيسيوم مع حمض الكبريتيك (2M) عند $50^\circ C$.

3. أيٍ من العوامل التالية لا يؤثر على معدل سرعة التفاعل؟

- a. تركيز المواد المتفاعلة
- b. وجود عامل حفاز
- c. درجة حرارة التفاعل
- d. كمية المواد الناتجة

4. لماذا يزداد معدل سرعة التفاعل بزيادة تركيز المواد المتفاعلة؟

- a. بسبب زيادة عدد التصادمات بين الجزيئات
- b. بسبب زيادة طاقة التنشيط
- c. بسبب زيادة متوسط الطاقة الحركية للجزيئات
- d. بسبب زيادة ثابت معدل التفاعل



لودفيج إدوارد بولتزمان 1844-1906 Ludwig Eduard Boltzmann



هو فيزيائي، وفيلسوف، ورائد في علم الميكانيكا الإحصائية. ولد في مدينة فيينا في 20 فبراير من العام 1844م. في ذلك الوقت، كانت مدينة فيينا جزءاً من الإمبراطورية النمساوية. تلقى علومه الابتدائية في المنزل قبل التحاقه بالمدرسة الثانوية، ثم التحق بجامعة فيينا في العام 1863م لدراسة علوم الفيزياء والرياضيات، وحصل على شهادة الدكتوراه في العام 1866م. في أثناء دراسته في جامعة فيينا، قدمَه مدير معهد الفيزياء، جوزيف ستيفان، إلى مجموعة عمل جيمس ماكسيويل.

قام بولتزمان بعد فترة بتعزيز نظريات ماكسويل، واستدلالاته **الشكل 4-11** لدفيف إدوارد بولتزمان. المعادلات التي تصف منحنى توزيع ماكسويل-بولتزمان، وقد دعمت نظرياته النظرية الحركية للغازات وجود الذرات. في ذلك الوقت، تبنى الكيميائيون نظرية الذرات (والتي لم يكن قد تم إثباتها بعد)، إلا أن الكثير من الفيزيائيين لم يأخذوا بها. وقد تعرضت نظريات بولتزمان للسخرية من بعض زملائه الأكثر شهرة منه. فقد نُقل عن لسان العالم إرنست ماخ قوله: «ذرات؟ هل سبق أن رأيت واحدة منها حتى الآن؟». توصل بولتزمان إلى استدلالاته الأكثـر شهرة، وهي: $S = k \cdot \log W$ ، والتي تربط الإنتروبي (S) بعد الجسيمات المجهريـة التي يمكن أن يتضمنـها أي نظام (W)، أما k فهو عبارة عن ثابت أطلق عليه اسم «ثابت بولتزمان» تكريـماً له، وقد نقشت هذه المعادلة على شاهد قبره. طوال حياته المهنية، كان لدى بولتزمان الكثير من الطلاب الذين أسمـموا بشـكل كبير في المعرفـة العلمـية.

أثناء عمله في التدريس بجامعة فيينا، كان بولتزمان قد ألهم العالمة ليز مايتز لدراسة علم الفيزياء، والتي أدّت دوراً رئيساً في اكتشاف الانشطار النووي، واكتشفت عنصر البروتاكتينيوم، فأطلق اسم مايتزيوم (Mt) على العنصر رقم 109 تكريماً لها. وكان لبولتزمان عقل لامع وعبري وعناد أسطوري، فقد عاش رافعاً شعاره المشهور: «قل الحقيقة، واكتب بكل وضوح، ودافع عنها حتى النهاية»، وقد التزم بذلك التزاماً كاملاً. توفي بولتزمان في 5 سبتمبر من العام 1906م. بعد وفاته بوقت قصير، أصبحت نظرياته مقبولة على نطاق واسع، وكان ذلك بفضل عمل ماكسويل بلانك وأوبرت آينشتاين.

الوحدة 4

مراجعة الوحدة

الدرس 4-1: نظرية التصادم وسرعة التفاعل الكيميائي

- تمتلك جسيمات الغازات ، عند درجة حرارة محددة ، مدى واسع من السرعات.
- تكون قيمة متوسط السرعة مترتبة بدرجة حرارة الغاز.
- عند درجات الحرارة المرتفعة ، يكون لدى الكثير من الجسيمات سرعة أعلى.
- تمثل المساحة التي تقع تحت المنحنى العدد الكلي للجزيئات الموجودة في عينة من الغاز.
- عندما ترتفع درجة الحرارة ، فإن السرعة المرتبطة بالعدد الأكبر للجسيمات تزداد.
- تمتلك الجسيمات ذات السرعات العالية طاقة تنشيط تزيد التصادمات الفعالة فتزداد سرعة التفاعل.

أسئلة اختيار من متعدد

1. أيٌ من الجمل الآتية تفسِّر بشكل صحيح نتيجة التناقص في متوسط سرعة جسيمات مادة مُتفاعلة لعينة محددة؟
- a. تزداد سرعة التفاعل، وترتفع درجة الحرارة.
 - b. تزداد سرعة التفاعل، وتنخفض درجة الحرارة.
 - c. تقل سرعة التفاعل، وترتفع درجة الحرارة.
 - d. تقل سرعة التفاعل، وتنخفض درجة الحرارة.
2. أيٌ من الجمل الآتية صحيح عن سرعة التفاعلات؟
- a. تكون سرعة التفاعلات دائمًا موجبة، وتكون سرعة المواد المُتفاعلة هي سرعة ظهورها فقط.
 - b. يمكن أن تكون سرعة التفاعلات سالبة، ويمكن أن تكون سرعة المواد المُتفاعلة هي سرعة ظهورها فقط.
 - c. تكون سرعة التفاعلات دائمًا موجبة، وتكون سرعة المواد المُتفاعلة هي سرعة اختفائها فقط.
 - d. قد تكون سرعة التفاعلات سالبة، وقد تكون سرعة المواد المُتفاعلة هي سرعة ظهورها أو سرعة اختفائها.
3. في أيٍ من الحالات التالية تتوقع أن يكون معدل التفاعل بين كربونات الكالسيوم CaCO_3 وحمض النيتريك HNO_3 أكبر ما يمكن؟
- a. مسحوق كربونات الكالسيوم مع 2M من حمض النيتريك عند 40°C .
 - b. مسحوق كربونات الكالسيوم مع 0.5M من حمض النيتريك عند 40°C .
 - c. مسحوق كربونات الكالسيوم مع 2M من حمض النيتريك عند 20°C .
 - d. قطع من كربونات الكالسيوم مع 0.5M من حمض النيتريك عند 40°C .

أسئلة الإجابات القصيرة

4. فسر كل مما يأتي:
- a. ليس بالضرورة حدوث تفاعل في كل مرة يحدث فيها تصادم بين الجزيئات.
 - b. تزداد سرعة التفاعل بزيادة درجة حرارة التفاعل.
 - c. تتم عملية طهي الطعام بسرعة أكبر في أواني الضغط عن الأواني العادية.
 - d. تصدأ برادة الحديد بسرعة أكبر عن قطعة واحدة من الحديد لها نفس الكتلة.
 - e. سرعة احتراق قطعة فحم (كربون) في مخبأ مملوء بغاز الأكسجين أكبر من سرعة احتراقها في الهواء الجوي.



الوحدة 5 الإتزان

Equilibrium

في هذه الوحدة

C1207

C1208

الدرس 5-1: مفهوم الإتزان وثابت الإتزان (K_{eq})

الدرس 5-2: مبدأ لوشاتيليه

الدرس 5-3: الإتزان في المحاليل الحمضية والقاعدية

مقدمة الوحدة

يُعدّ الاتزان الكيميائي مفهوماً هاماً في كل من التكنولوجيا والبيئة الحيوية. فالدم الذي يجري في جسمك يكون دائماً في حالة اتزان، حيث يحافظ على رقم هيدروجيني pH خاص به تتراوح بين 7.35 و 7.45. الأسمدة التي يستخدمها المزارعون في جميع أنحاء العالم ترتكز على الأمونيا (NH_3) الناتجة عن عملية تصنيع تعتمد على الاتزان الكيميائي.

يقدم الدرس الأول مفهوم الاتزان، ويتم فيه دراسة كيفية كتابة ثابت الاتزان (K_{eq})، وكيفية حساب قيمته.

ويتم في الدرس الثاني مناقشة مبدأ لوشاطيليه (Le Chatelier's Principle) الذي يُبيّن كيفية استجابة الأنظمة المُترنّنة لمؤثّرات مختلفة، كالتغيّرات في التركيز ودرجة الحرارة والحجم والضغط.

ويتضمن الدرس الثالث تدريبات حول مفهوم الاتزان في موضوعات مختلفة، مثل الرقم الهيدروجيني pH للمحاليل الحمضية والقاعدية، وعمليات معايرة الأحماض والقواعد، وأدلة الأحماض والقواعد، والمحاليل المنظمة.

الأنشطة والتجارب

1-5 ثابت الاتزان (K_{eq})

5-2 الاتزان الكيميائي

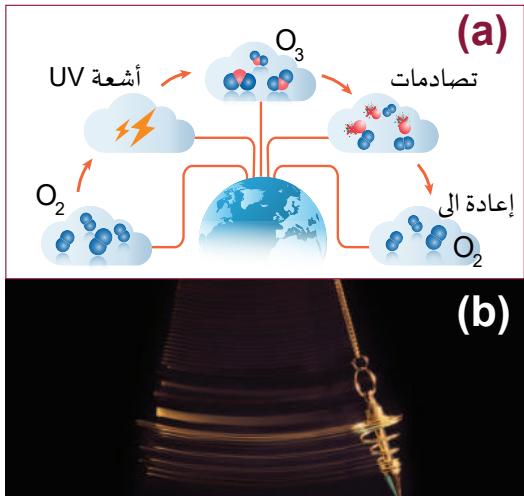
5-3 حساب الرقم الهيدروجيني للأحماض والقواعد الضعيفة

الدرس 1-5

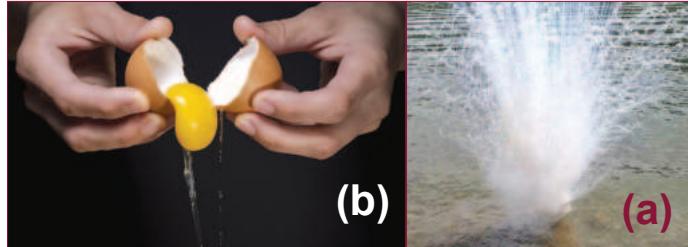
مفهوم الاتزان وثابت الإتزان K_{eq}

The Concept of Equilibrium and equilibrium constant K_{eq}

ت تكون بعض التفاعلات الكيميائية والعمليات الفيزيائية انعكاسية، ولا يكون بعضها الآخر كذلك. فتفاصل فلز البوتاسيوم مع الماء (الشكل 5 a1-5 b)، وكسر بيضة (الشكل a1-5 b)، هما مثالان على عمليتين غير انعكاسيتين. أما عملية التحويل بين غاز الأكسجين والأوزون (الشكل a2-5 b)، وعملية إزاحة ذراع البندول (الشكل 5 b2-5 b) فتعدان عمليتين انعكاسيتين.



الشكل 2-5 عمليتان انعكاسيتان: (a) التحويل بين غاز الأكسجين والأوزون، (b) إزاحة ذراع البندول.



الشكل 1-5 عمليتان غير انعكاسيتان: (a) تفاعل فلز البوتاسيوم مع الماء، (b) كسر بيضة.

توجد قيمة تسمى ثابت الاتزان *Equilibrium constant* تُستخدم للقيام بهذه التوقعات يمكن أن يُستخدم ثابت الاتزان أيضاً لحساب كمية كل نوع من المواد الداخلة في التفاعل والمواد الناتجة عن التفاعل عند النقطة التي يصل فيها هذا التفاعل إلى حالة الاتزان.

مخرجات التعلم

C1207.1 يناقش المقصود بالتفاعل الانعكاسي، **C1207.5** ويستخدم مصطلح موضع الاتزان الذي يمكن تطبيقه على التفاعل الانعكاسي.

C1207.6 يدرك أن قيمة ثابت الاتزان مؤشر يوضح مدى اقتراب التفاعل من الاتكمال.

المفردات



Dynamic Equilibrium

الاتزان الديناميكي

Equilibrium

الاتزان

Law of chemical equilibrium

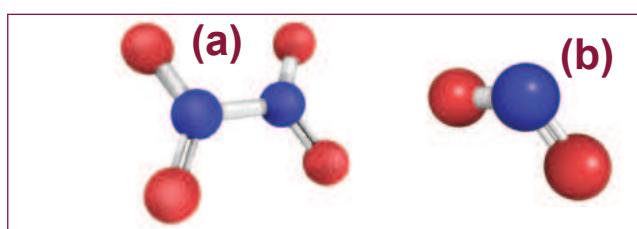
قانون الاتزان الكيميائي

Equilibrium constant

ثابت الاتزان

C1207.4 يحسب قيمة ثوابت الاتزان من حيث التراكيز أو الضغوط الجزئية من خلال البيانات المناسبة، ويحسب الكميات الموجودة في حالة الاتزان بتوفير البيانات المناسبة.

التفاعل الكيميائي القابل للانعكاس

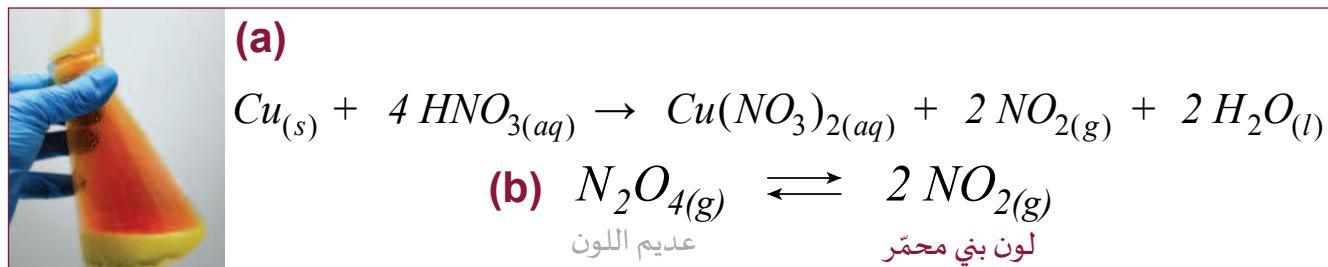


الشكل 3-5 NO_2 (b), N_2O_4 (a)



يُصنَّف رباعي أكسيد ثنائي النيتروجين، N_2O_4 (الشكل 5-5a) بأنه عديم اللون عند درجة حرارة الغرفة. وقد استخدمته الولايات المتحدة الأمريكية، والاتحاد السوفيافي السابق لأكسدة الهيدرازين، N_2H_4 وقوداً للصواريخ (الشكل 5-4). أما ثاني أكسيد النيتروجين، NO_2 ، الوارد في (الشكل 5-5b) فهو غاز ذو لون بُني محمّر عند درجة حرارة الغرفة، وينتج كُمْرَكَب وسطي عند تصنيع حمض النيتريك (HNO_3). والذي يُستخدم معظمـه في إنتاج الأسمدة. يمكن إنتاج ثاني أكسيد النيتروجين في المختبر عن طريق تفاعل النحاس مع حمض النيتريك المُركَّز (الشكل 5-5a).

الشكل 4-5 يتم دفع الصاروخ عن طريق الهيدرازين ورباعي أكسيد ثنائي النيتروجين.



الشكل 5-5 تفاعل النحاس مع حمض النيتريك (a) معادلة التفاعل بين النحاس وحمض النيتريك المُركّز، (b) التفاعل الانعكاسي بين رباعي أكسيد ثانوي النيتروجين، وثنائي أكسيد النيتروجين.

ويكون غاز ثانٍ أكسيد النيتروجين أيضاً من التفاعل الانعكاسي لتفكيك غاز رباعي أكسيد ثنائي النيتروجين الموضح في المعادلة الكيميائية في الشكل 5-5.

يكون واحد من هذين الغازين مُفضلاً عند درجات الحرارة المنخفضة. أما الغاز الآخر فيكون مُفضلاً عند درجات الحرارة المرتفعة. الغاز الذي يكون مُفضلاً عند درجة حرارة محددة يمكن تحديده تجريبياً عن طريق تنفيذ النشاط الآتي:

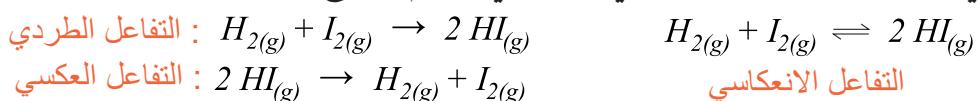
نشاط:

خذ أنبوباً زجاجياً من نوع (Pyrex™) مملوءاً بمخلوط من هذين الغازين عند درجة حرارة الغرفة، ولاحظ لون المخلوط وسجله. ضع الأنبوب في كأس زجاجية كبيرة تحتوي على ماء مُقطّر عند درجة الغليان، ثم لاحظ لون المخلوط الجديد وسجله. انقل الأنبوب إلى كأس زجاجية تحتوي على ماء بارد مُثلج، ثم لاحظ تغيير اللون وسجله.

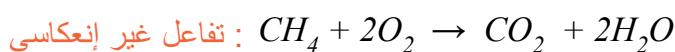
1. حدد بعد المناقشة مع طلاب الصف الغاز الذي يكون مفضلاً عند درجة الحرارة المرتفعة، والغاز الذي يكون مفضلاً عند درجات الحرارة المنخفضة.
 2. هل كان التفاعل الطردي تفاعلاً ماصاً للحرارة أم طارداً لها؟

مفهوم الاتزان

التفاعل الانعكاسي هو التفاعل الكيميائي الذي يحدث في الاتجاهين (طردي وعكسى). في التفاعل الطردي تتفاعل المتفاعلات لنتج نواج، أما في التفاعل العكسي فتتفاعل النواتج لتنتج المتفاعلات. لذا نأخذ التفاعل بين غاز الهيدروجين واليود في الحالة الغازية لإنتاج غاز يوديد الهيدروجين: هذا مثال جيد على تفاعل انعكاسي يمثل فيه التفاعلين الطردي والعكسى بسهم مزدوج كما تبين المعادلات الآتية:



أما التفاعلات غير الانعكاسية فتحدث في اتجاه واحد، أي الاتجاه الطردي فقط. ومن الأمثلة الجيدة على التفاعلات غير الانعكاسية ، تفاعلات الاحتراق، مثل تفاعل احتراق غاز الميثان في وجود الأكسجين المبين في المعادلة الآتية:



توجد حالة **الاتزان الديناميكى** *Dynamic Equilibrium* عندما تحدث عملية بطيقتين متعاكستين بنفس السرعة ونفس الوقت. فعلى سبيل المثال: في نظام مغلق يحتوى على الماء، هناك باستمرار جزيئات ماء تتحول إلى بخار ماء وجزيئات بخار ماء تتكتف إلى ماء. عند الاتزان تتساوى سرعة العمليتين، التبخر والتكتيف، ليبقى المعدل الكلى للجزيئات التي تتكتاف إلى الجزيئات التي تتبعثر ثابتاً.

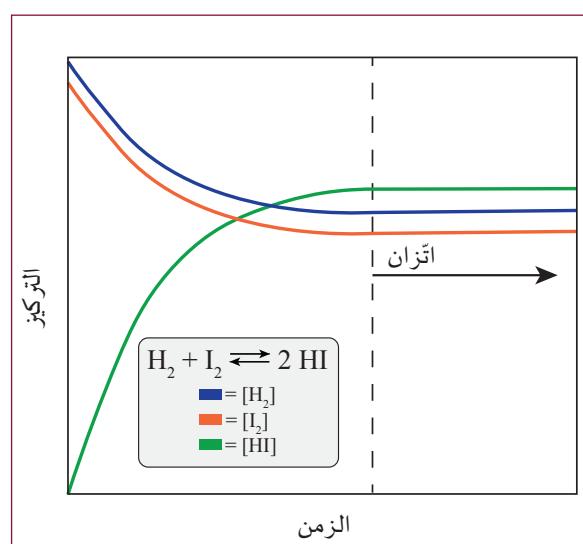
عند الاتزان، تكون سرعة التفاعل الطردي متساوية لسرعة التفاعل العكسي.



عندما تصف حالة الاتزان الديناميكى فاعلم أنه خلال الاتزان الكيميائي لا تتوقف التفاعلات، حيث تُشير إلى أن الاتزان الديناميكى هو بكل بساطة حالة **اتزان** *Equilibrium*. وتذكر أن التفاعلات الطردية والعكسية كلتيهما تحدثان في الوقت ذاته.

يصل أي تفاعل إلى حالة الاتزان كنتيجة طبيعية عندما يتم هذا التفاعل في الإتجاهين الطردي والعكسى في نفس الوقت. لذا نأخذ التفاعل بين غاز الهيدروجين واليود في الحالة الغازية، يبدأ التفاعل أولاً بين الهيدروجين واليود. عند وضع جزيئات المواد المتفاعلة (H_2 ، I_2) في وعاء التفاعل، تبدأ هذه الجزيئات بالتصادم؛ ونتيجة لذلك، يتكون غاز يوديد الهيدروجين HI ، حيث ستبدأ سرعة التفاعل الطردي بالتناقص بسبب نقصان تركيز المواد المتفاعلة ما يُقلل من عدد التصادمات بينها.

في الوقت ذاته، ستبدأ سرعة التفاعل العكسي بالازدياد، بسبب تكون المزيد من جزيئات يوديد الهيدروجين الناتجة عن التفاعل الطردي. وتستمر سرعة التفاعل الطردي بالتناقص، وتستمر سرعة التفاعل العكسي بالازدياد، وسوف يبلغ النظام حالة الاتزان عندما تكون سرعة التفاعل الطردي $H_2(g) + I_2(g) \rightarrow 2 HI$ الذي يتم عندها استهلاك المواد المتفاعلة متساوية لسرعة التفاعل الذي يؤدي إلى تكونها مرة أخرى عن طريق التفاعل العكسي $2 HI \rightarrow H_2(g) + I_2(g)$. عند الاتزان تصبح تراكيز كل من H_2 و I_2 و HI ثابتة كما يبيّن (الشكل 5-6).



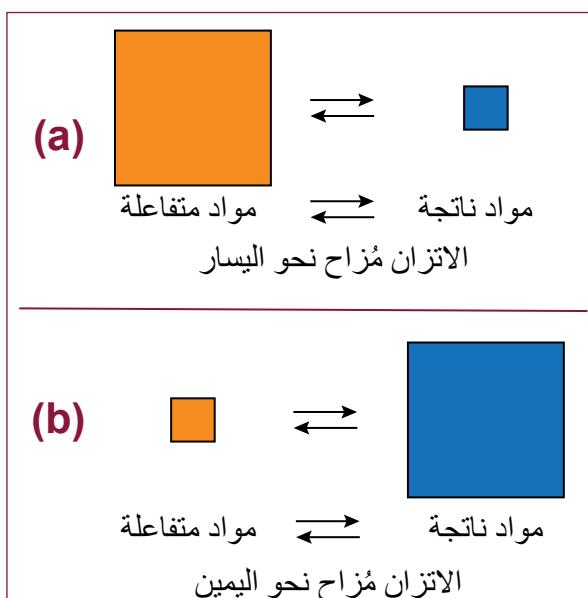
الشكل 5-6 تفاعل يكون حالة اتزان.

ما المقصود بأن يكون النظام في حالة اتزان؟

لا بدّ لأي نظام يتحقق حالة الاتزان، ويحافظ عليها، أن يكون نظاماً مغلقاً. فالنظام المغلق هو ذلك النظام الذي لا تدخل إليه طاقة أو مادة، ولا تخرج منه.

تحدث حالة الإتزان في الأنظمة المغلقة فقط.

يجري تداول مفهوم خاطئ شائع يتعلّق بالاتزان، وهو الآتي: بمجرد الوصول إلى حالة اتزان، فلن يحدث شيء وهذا غير صحيح! لأنّ التفاعلات الطردية والعكسية مستمرة في الحدوث. ومع ذلك، ولأنّها لا تزال تحدث بالسرعة نفسها، فإن كميات المواد المُتفاعلة والممواد الناتجة تبقى ثابتة، ولا تكون بالضرورة متساوية.



الشكل 5-7 الاتزان مُزاح نحو (a) اليسار، (b) اليمين.

من المهم فهم الآتي:

1- عند الاتزان ، تتساوى سرعة التفاعل الطردي وسرعة التفاعل العكسي، وليس كميات المواد المُتفاعلة والناتجة.

2- إنّ معظم حالات الاتزان لنظام ما في حالة إتزان قد تحتوي على:

- مواد مُتفاعلة أكثر من المواد الناتجة (الشكل 5-7a)، وعندها يقال إنّ موضع هذا الاتزان مُزاح نحو اليسار.
- وقد تحتوي حالة الإتزان على مواد ناتجة أكثر من المواد المُتفاعلة (الشكل 5-7b) وعندها يقال إنّ موضع هذا الاتزان مُزاح نحو اليمين.

وستتم مناقشة هذين الموضوعين بشكل كمي في هذا الدرس ووصفياً في الدرس 5-2 من خلال قاعدة لوشايليه.

مُلخص:

لكي يصل التفاعل إلى الاتزان:

- يجب أن يكون انعكاسياً.
- يجب أن تكون سرعة التفاعل الطردي مُساوية لسرعة التفاعل العكسي، وعندها ثبت تراكيز المواد المُتفاعلة وتراكيز المواد الناتجة.
- يجب أن يكون النظام مُغلقاً.

افرض أن لديك نظاماً في حالة اتزان، حيث تحرّك فيه الناس صعوداً ونزواً على درج كهربائي في أحدى المحلات التجارية الكبيرة في الدوحة قطر.

- كيف سيبدو هذا النظام عندما تتجه العملية نحو الأعلى (صعود الناس على الدرج الكهربائي)؟
- كيف سيبدو هذا النظام عندما تتجه العملية نحو الأسفل (تنحرّك الناس نزواً على الدرج الكهربائي)؟
- صف حركة الناس نزواً وصعوداً إذا لم يكن النظام في حالة اتزان.

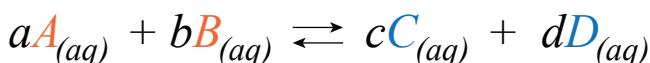
قانون الاتزان الكيميائي

يعرف **قانون الاتزان الكيميائي** **Law of chemical equilibrium** بما يسمى **قانون فعل الكتلة** الذي ينص على ما يأتي: لتفاعل ما عند الاتزان، فإن حاصل ضرب تراكيز المواد الناتجة مرفوعة لقوة تمثل معاملاتها (من المعادلة الموزونة) مقسوماً على حاصل ضرب تراكيز المواد المتفاعلة مرفوعة لقوة تمثل معاملاتها، هو مقدار ثابت عند درجة حرارة معينة.

هذه النسبة هي **ثابت الاتزان equilibrium constant** لتفاعل، الذي يرمز إليه بالحرف « K »، أو « K_{eq} ». ويُستخدم الرمز « K_c » ليؤكد أن ثابت الاتزان تم حسابه من التراكيز المولية للمواد المتفاعلة والمواد الناتجة التي تكون في حالة اتزان. فإذا تم استخدام الضغط الجزئي لحساب ثابت الاتزان عوضاً عن التراكيز المولية في حالة التفاعلات الغازية، يُستخدم الرمز « K_p ».

المعاملات = a, b, c, d
المادة المتفاعلة = A, B
المادة الناتجة = C, D

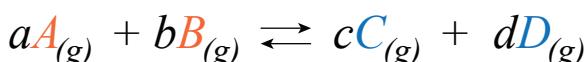
(a)



(b)

$$K_c = \frac{[C]^c \times [D]^d}{[A]^a \times [B]^b}$$

(c)



(d)

$$K_p = \frac{P_C^c \times P_D^d}{P_A^a \times P_B^b}$$

الشكل 8-5 (a) مُعادلة الاتزان العامة، و(b) تعبير ثابت الاتزان بدلالة التركيز، و(c) مُعادلة الاتزان العامة لتفاعل الغاز، و(d) تعبير ثابت الاتزان بدلالة الضغوط الجزئية.

اما الجسيمات التي تكون موجودة عند الاتزان على هيئة مواد صلبة، أو مواد سائلة ندية مثل المذيبات (الماء)، فلا تكتب في تعبير ثابت الاتزان، لأن تراكيزها ثابتة مهما اختلفت كميّتها لا تغير بدرجة ملموسة ومقدار ما يتفاوت منها مقدار ضئيل جداً.

ملاحظة هامة: إن تغيير درجة الحرارة (فقط)، سيغير من قيمة ثابت الاتزان.

وفي التفاعل الذي يكون في حالة اتزان، كما هو مُبيّن في المُعادلة العامة الواردة في (الشكل 5-a8)، يتم حساب ثابت الاتزان (K_c) من التراكيز المولية كما هو مُبيّن في (الشكل 5-b8). لاحظ أن تراكيز المواد الناتجة تكون في البسط، أمّا تراكيز المواد المتفاعلة فتكون في المقام. وعندما تكون المواد في التفاعل المتزن في الحالة الغازية، كما هو مُبيّن في (الشكل 5-c8)، يمكن التعبير عن ثابت الاتزان إما بدلالة التراكيز المولية، أو بدلالة الضغوط الجزئية (الشكل 5-d8).

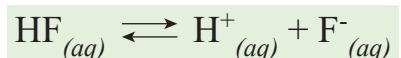
عندما يتم تمثيل الحالتين، المحاليل المائية والغازية في الاتزان، يُستخدم محلول مناسب لتحديد التركيز المولي للغاز، وحساب ثابت الاتزان K_c .

أما الجسيمات التي تكون موجودة عند الاتزان على هيئة مواد صلبة، أو مواد سائلة ندية مثل المذيبات (الماء)، فلا تكتب في تعبير ثابت الاتزان، لأن تراكيزها ثابتة مهما اختلفت كميّتها لا تغير بدرجة ملموسة ومقدار ما يتفاوت منها مقدار ضئيل جداً.

مثال 1



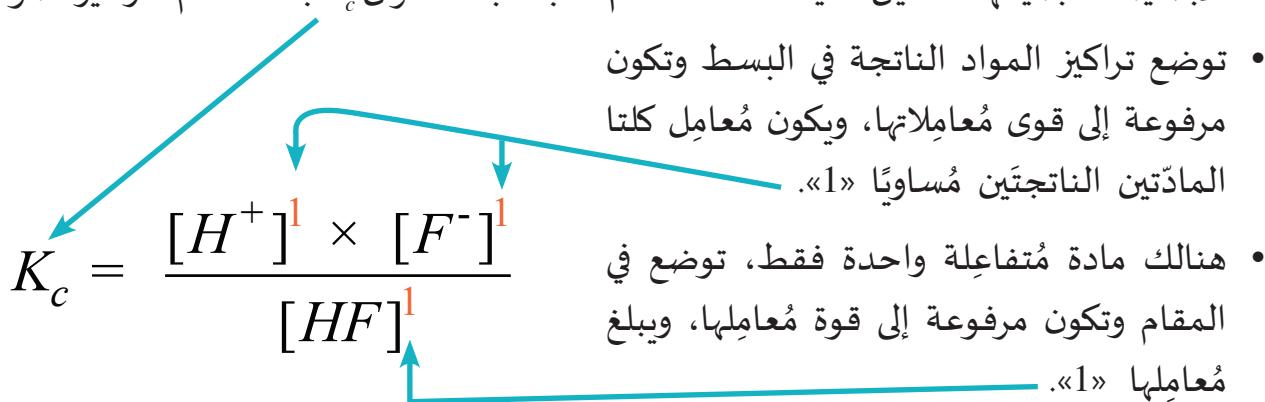
إذاً أُعطيت الاتزان الأيوني الآتي للمحلول المائي فلوريد الهيدروجين (حمض الهيدروفلوريك):



اكتب تعبير ثابت الاتزان له.

الحل

- الجسيمات جميعها محليل مائية، لذلك، ستم كتابة ثابت الاتزان K_c باستخدام التراكيز المولية.



مثال 2



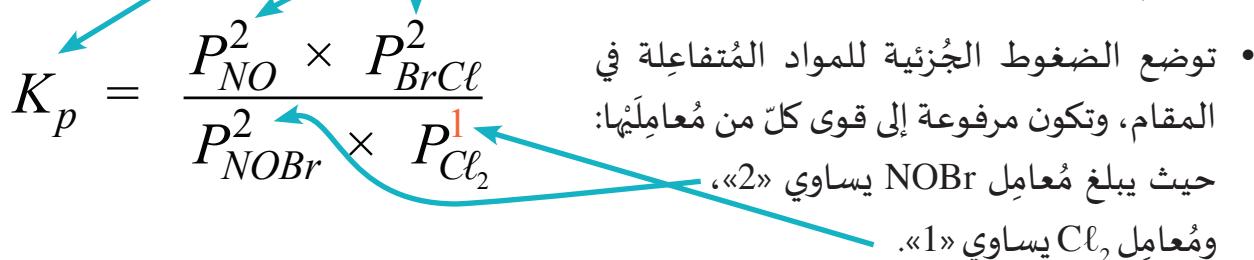
اكتب تعبير ثابت الاتزان بدالة الضغوط الجزئية لتفاعل الآتي:



الحل

- سوف يستخدم الرمز K_p لثابت الاتزان، بالنظر إلى استخدام الضغوط الجزئية.

وضع الضغوط الجزئية للمادتين الناتجتين في البسط، وتكون مرفوعة إلى قوى معامليه، ومعامل كلتا المادتين الناتجتين «2»:



حساب ثابت الاتزان (K_p و K_c)

يمكن حساب ثوابت الاتزان عندما تكون قيم أي من التراكيز المولية أو الضغوط الجزئية عند حالة الاتزان معلومة. وثوابت الاتزان ليس لها وحدات قياس خاصة، لأنها تُحسب بشكل فعلي من التراكيز المولية، أو من الضغوط الجزئية، لكل من المتفاعلات والنواتج، مع الأخذ في الحسبان أن المواد الصلبة والسوائل النقية (مثل المذيبات كالماء) لا تظهر في تعبير ثابت الاتزان. وبالتالي، لا تدخل ضمن وحدات ثابت الاتزان. تكون قيم التراكيز المولية في العادة بوحدة L/mol ، والضغوط الجزئية بوحدة atm .

عند حساب قيمة ثابت الاتزان K_c و K_p ، يجب أن تكون قيم التراكيز المولية بوحدة mol/L ، والضغوط الجزئية بوحدة atm .

استخدام جدول قيم التغيير الابتدائي للاتزان (ICE) لحساب التراكيز عند الاتزان.

	$A_{(g)}$	+	$B_{(g)}$	\rightleftharpoons	$2C_{(g)}$	+	$D_{(g)}$
التركيز الابتدائي I_{Initial}	a M		b M		0 M		0 M
التغيير في التركيز C_{Change}	-x		-x		+2x		+x
التركيز عند الاتزان E_{Equilibrium}	a-x		b-x		2x		x

إذا لم تكن التراكيز، أو الضغوط الجزئية عند الاتزان، معلومتين، يمكن حسابهما من القيم المعلومة، حيث تُستخدم الحسابات الكيميائية وتركيز المواد المُتفاعلة والناتجة عن التفاعل لإجراء هذه الحسابات.

ويُعد جدول التغيير الابتدائي للاتزان (ICE) (الشكل 9-5) مثال على جدول التغيير الابتدائي للاتزان المستخدم لحل مسائل الاتزان.

اعلم أن جدول (ICE) يستخدم حرف (x) للدلالة على التغيير الذي حصل في المادة خلال التفاعل (متغير). إذا افترضنا أن تراكيز المواد المتفاعلة تتناقص خلال التفاعل، كما في التفاعل الافتراضي المبين بالشكل 9-5 فإن تركيز كل من المادتين A و B تتناقص بمقدار التغيير (-x) وبالتالي، فإن استخدام المعادلة الكيميائية الموزونة يزيد تركيز المادة C بقيمة (+2x) والمادة D بقيمة (+x). عليه فإن قيمة تركيز كل مادة في التفاعل عند الاتزان تُحدّد باستخدام التراكيز الابتدائي لكل مادة والتغيير الذي حدث فيها على النحو الآتي: التغيير في التركيز + التركيز الابتدائي = التركيز عند الاتزان

مثال 3

احسب ثابت الاتزان للتفاعل الممثل بالمعادلة الآتية: $N_{2(g)} + 3 H_{2(g)} \rightleftharpoons 2 NH_{3(g)}$ ، عندما تبلغ قيمة الضغط عند الاتزان لغاز N_2 0.112 atm، ولغاز H_2 0.444 atm، ولغاز NH_3 1.332 atm.

$$K_p = \frac{P_{NH_3}^2}{P_{N_2} \times P_{H_2}^3}$$

الحل

اكتب تعبير ثابت الاتزان K من المعادلة.

$$K_p = \frac{(0.112)^2}{(0.444) \times (1.332)^3}$$

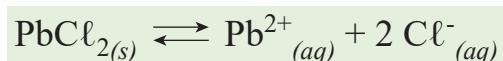
$$K_p = 0.0120 \text{ atm}^{-2}$$

حول وحدات قياس قيمة الضغوط الجزئية إلى وحدة atm (إذا لزم الأمر)، وعوّض القيم في تعبير ثابت الاتزان من دون استخدام وحدات القياس.

مثال 4



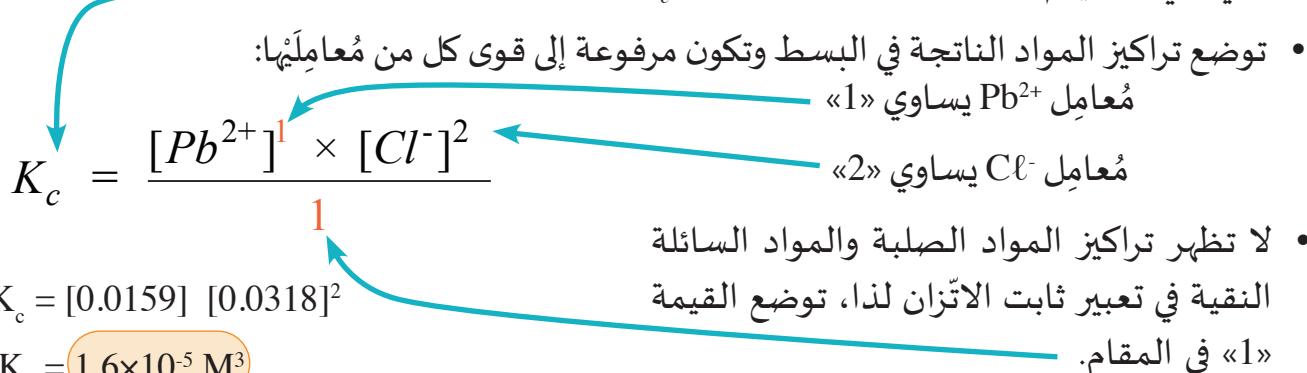
يُعدّ ملح كلوريد الرصاص (II) $PbCl_2$ ذا قابلية ضعيفة للذوبان. ما قيمة ثابت الاتزان من معادلة إتزان محلول المُشبّع للملح $PbCl_2$ الآتية:



علمًا بأنه تم وضع 0.2252g من الماء في وعاء حجمه (1) ووجد عند الاتزان أن تركيز محلول Pb^{2+} يساوي 0.0159 M وتركيز محلول Cl^- يساوي 0.0318 M

الحل

- لا توجد جسيمات غازية في هذا النظام المُتزن، لذا، سوف تُستخدم التراكيز المولية في التعبير الرياضي، وسيتم إعطاء ثابت الاتزان الرمز K_c .



مثال 5



في نظام مُغلق، يتفاعل فلز القصدير مع الأحماض لتحقيق حالة الاتزان الآتية:

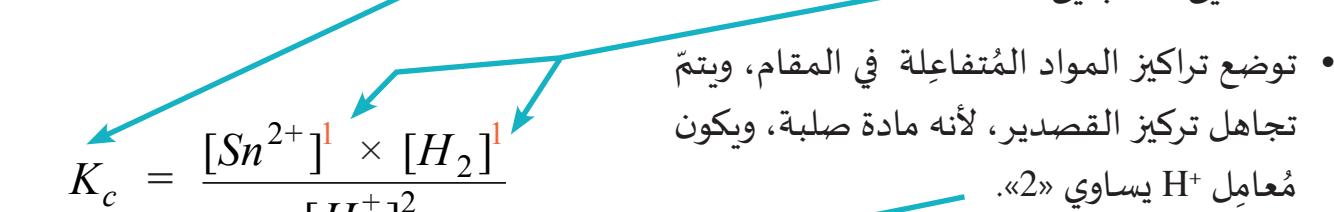


احسب قيمة ثابت الاتزان K_c إذا تم قياس التركيز عند الاتزان، فكان تركيز أيونات H^+ يساوي 0.22 M وتركيز محلول Sn^{2+} يساوي 0.14 M، و H_2 يساوي 0.14 M

الحل

- عندما تظهر كلتا الحالتين، المحاليل المائية والغازية في حالة الاتزان، تتم في العادة كتابة ثابت الاتزان من حيث التراكيز المولية. لذلك، يُستخدم الرمز K_c لهذا الثابت.

- توضع تراكيز المواد الناتجة في البسط وتكون مرفوعة إلى قوى مُعاملِيهَا. حيث يبلغ كل من مُعاملِي المادتين الناتجتين «1».



تفسير قيمة ثابت الاتزان (K_{eq})

ورد في بداية هذه الوحدة أن معظم الأنظمة التي تكون في حالة اتزان يمكن أن يحدث لها إزاحة في موضع الاتزان، سواء نحو اليمين لتكوين مواد ناتجة أكثر من المواد المُتفاعلة، أو نحو اليسار ليكون لديها مواد مُتفاعلة أكثر من المواد الناتجة. وتشير قيمة ثابت الاتزان إلى إمكانية حدوث إزاحة في موضع الاتزان نحو اليمين أو نحو اليسار، وستخبرنا قيمة ثابت الاتزان أيضًا إلى المدى الذي تصل إليه الإزاحة في موضع الاتزان، سواء أكان ذلك نحو اليسار، وستخبرنا قيمة ثابت الاتزان طرديًا مع نسبة تراكيز المواد الناتجة إلى تراكيز المواد المُتفاعلة (الشكل 5-10a). عندما تكون قيمة ثابت الاتزان أقل من واحد، فإن ذلك يشير إلى أن هناك مواد مُتفاعلة موجودة عند حالة الاتزان أكثر من المواد الناتجة (الشكل 5-10b). لكن، عندما تكون قيمة ثابت الاتزان أكبر من واحد، فسوف يُشير هذا إلى أن هناك مواد ناتجة موجودة عند حالة الاتزان أكثر من المواد المُتفاعلة (الشكل 5-10c).

$$K_{eq} \approx \frac{[نواتج]}{[متفاعلات]} \quad (a)$$

(b) إذا كان $K_{eq} > 1$ عندها [متفاعلات] < [نواتج]

(c) إذا كان $K_{eq} < 1$ عندها [نواتج] < [متفاعلات]

الشكل 5-10 (a) تناوب قيمة K_{eq} مع تراكيز المواد الناتجة، والمُتفاعلة. (b) تفسير قيمة K_{eq} الصغيرة. (c) تفسير قيمة K_{eq} الكبيرة

تشير قيم ثوابت الاتزان الصغيرة جدًا إلى أن التفاعل الطردي لن يحدث تقريبًا، وسوف تنتج كمية قليلة جدًا من المواد الناتجة، أمّا قيم ثوابت الاتزان الكبيرة فتشير إلى أن كمية كبيرة من المواد الناتجة سوف تنتج، وستبقى كمية قليلة جدًا من المواد المُتفاعلة، ما يدل على أن التفاعل قارب على الإكمال.

تشير قيم ثوابت الاتزان الكبيرة للغاية إلى أن التفاعل قارب على الإكمال.

مثال 6

أعطيت قيم ثوابت الاتزان الآتية: أي منها يُشير إلى التفاعل الذي: (a) سيحدث له إزاحة بشكل كبير نحو اليسار، (b) سيحدث له إزاحة بشكل كبير نحو اليمين، (c) سيكون قارب على الإكمال؟

$$K_{eq} = 1 \times 10^{-10} \text{ M}, K_{eq} = 2 \times 10^2 \text{ M}, K_{eq} = 5 \times 10^{34} \text{ M}$$

الحل

• (a) تُشير قيم ثوابت الاتزان الصغيرة إلى أن حالات الاتزان التي تكون فيها المواد المُتفاعلة أكثر من المواد الناتجة ستحدث لها إزاحة بشكل كبير في موضع الاتزان نحو اليسار.

$$K_{eq} = 1 \times 10^{-10}$$

• (b) تُشير قيم ثوابت الاتزان الكبيرة إلى أن حالات الاتزان التي تكون فيها المواد الناتجة أكثر من المواد المُتفاعلة ستحدث لها إزاحة بشكل كبير في موضع الاتزان نحو اليمين.

$$K_{eq} = 2 \times 10^2$$

• (c) تُشير قيم ثوابت الاتزان الكبيرة جدًا إلى أن التفاعل قارب على الإكمال وبالتالي توجد المواد الناتجة فقط تقريبًا عند الاتزان.

$$K_{eq} = 5 \times 10^{34}$$



ثابت الاتزان (K_{eq})

1-5

سؤال الاستقصاء

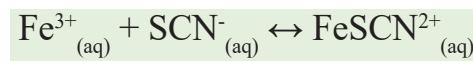
كيف يمكن قياس التراكيز عند الاتزان؟

المواد المطلوبة

محلول نيترات الحديد (III) ($Fe(NO_3)_3$) تركيزه $2.0 \times 10^{-3} M$ ، ومحلول ثيوسيانات البوتاسيوم (KSCN) تركيزه $2.0 \times 10^{-3} M$ ، وحمض النيتريك تركيزه 2M، خمسة دوارق سعة كل منها 50 mL، ثلاثة مخابير مدرجة سعة كل منها 10 mL، عصا تحريك، مقياس ألوان الضوء المرئي وحوض صغير.

مقدمة:

إحدى طرائق قياس التراكيز عند الاتزان لنوع مادة ما هي قياس امتصاص الضوء المرئي باستخدام مقياس ألوان الضوء المرئي، وهذه الطريقة ناجحة في الأنواع التي تُظهر لوناً في محلول: عندما يزداد التراكيز، يزداد امتصاص طول موجي محدد للضوء المرئي. لتوضيح هذه العلاقة بشكل عملي، سوف تستخدم الاتزان لتكوين أيون معقد ثيوسيانات الحديد (III) ذي اللون الأحمر الدموي الغامق بحسب المعادلة الآتية:



الخطوات (أعمل في مجموعة ثنائية):

حضر 5 محليل في خمسة دوارق سعة كل منها 50 mL لأيون معقد (FeSCN²⁺) بحسب الجدول الآتي:

HNO ₃ (mL)	KSCN (mL)	Fe(NO ₃) ₃ (mL)	المحلول
4.0	1.0	5.0	1
3.0	2.0	5.0	2
2.0	3.0	5.0	3
1.0	4.0	5.0	4
0.0	5.0	5.0	5

في كل واحد من هذه محليلات، يكون ثيوسيانات البوتاسيوم (KSCN) هو المادة المحددة للتفاعل. لهذا، سوف يزداد تركيز أيون معقد ثيوسيانات الحديد (III) (FeSCN²⁺) عندما يزداد حجم ثيوسيانات البوتاسيوم (KSCN) المضاف.

قسّ، وسجل الامتصاص عند طول موجي مقداره 470 nm لكل محلول من محليلات الخمسة باستخدام مقياس ألوان الضوء المرئي. وسوف تحتاج إلى نقل ما مقداره 3 mL من كل محلول إلى الحوض الصغير لإجراء كل عملية قياس.

الأسئلة:

(a) هل يزداد الامتصاص عندما تزداد تركيز أيون معقد ثيوسيانات الحديد (III) (FeSCN²⁺)؟

(b) كيف يمكن استخدام هذه الطريقة لتحديد تركيز غير معلوم لأيونات معقد ثيوسيانات الحديد (FeSCN²⁺) (III)؟

1. أيٌ من الآتي يشير إلى وجود تفاعلٍ في حالة اتزان؟ 

- .a. كتل المواد المُتفاعلة والممواد الناتجة متساوية.
- .b. سرعتا التفاعلين الطردي والعكسي متساويتان.
- .c. تراكيز المواد المُتفاعلة والممواد الناتجة متساوية.
- .d. حجوم المواد المُتفاعلة وحجوم المواد الناتجة متساوية.

2. أيٌ من الآتي يُبيّن العلاقة الصحيحة بين تراكيز المواد المُتفاعلة والممواد الناتجة الموجودة في تعبير ثابت الاتزان (K_c)؟ 

- .a. [المواد الناتجة] \ [المواد المُتفاعلة]
- .b. [المواد المُتفاعلة] \ [المواد الناتجة]
- .c. [المواد الناتجة] \times [المواد المُتفاعلة]
- .d. [المواد المُتفاعلة] + [المواد الناتجة]

3. ما وحدة القياس المستخدمة للمواد الناتجة والمادة المُتفاعلة الموجودة في تعبيري ثابت الاتزان K_c ، و K_p ، على التوالي؟ 

- torr, moles .a
- torr, mol/L .b
- atm, moles .c
- atm, mol/L .d

4. أيٌ من الآتي يتم استبعاده عند كتابة تعبير ثابت اتزان؟ 

- .a. المواد الصلبة والغازات
- .b. المواد الصلبة والممواد السائلة النقية
- .c. المحاليل المائية والغازات
- .d. المواد السائلة والمحاليل المائية

5. وضِّح، من حيث تعبير ثابت الاتزان، السبب الذي يجعل تفاعلات الاتزان التي تكون على مدى قريب من الاكتمال تمتلك قيم ثوابت اتزان كبيرة جدًا. 

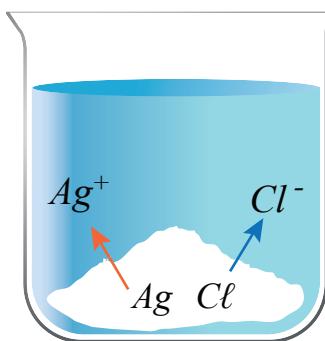
الدرس 2-5

مبدأ لوشاـتيلـيه

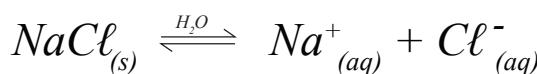
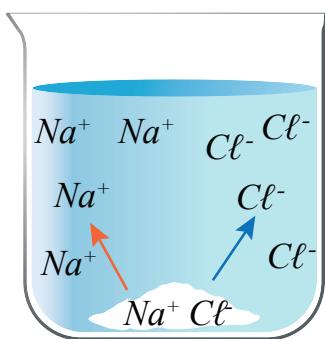
Le Chatelier's Principle

سيتم في الدرس 2-5 تحليل الأنظمة المُتَرَنَّة تحليلًا وصفيًّا، من خلال تطبيق مبدأ لوشاـتيلـيه. حيث درس لوشاـتيلـيه التغيرات التي تؤثر في موضع الاتزان وتوصـل إلى أنه يمكن التحكم في التفاعل الكيميائي من خلال التحكم بالتركيز أو الضغـط أو درجة الحرارة. بحيث يتم تحـديد إحدى هذه المؤثرات المُمـيـزة عندما تـحدث إـزـاحـة لمـوـضـع الـاتـزان بـشـكـل كـبـير نحو الـيسـار، أو نحو الـيمـين.

(a)



(b)



على سبيل المثال، المـحلـول المـشـبـع لـمـلحـ كـلـورـيدـ الفـضـةـ، $AgCl$ ـ، ذـيـ القـابـلـيـةـ الـضـعـيفـةـ لـلـذـوبـانـ (ـالـشـكـلـ ـa11-5ـ).ـ سـوـفـ تـحـدـثـ لـهـ إـزـاحـةـ كـبـيرـةـ نـحـوـ الـيـسـارـ.ـ أـمـاـ المـحلـولـ المـشـبـعـ لـمـلحـ ذـيـ قـابـلـيـةـ قـوـيـةـ لـلـذـوبـانـ،ـ مـثـلـ كـلـورـيدـ الصـودـيـوـمـ،ـ وـالـمـعـرـفـ بـمـلحـ الـطـعـامـ،ـ $NaCl$ ـ،ـ (ـالـشـكـلـ ـb11-5ـ)ـ فـسـتـحـدـثـ لـهـ إـزـاحـةـ كـبـيرـةـ نـحـوـ الـيـمـينـ.

مـخـرـجـاتـ التـعـلـمـ

Le Chatelier's Principle (C1207.2) يطبق مبدأ لوشاـتيلـيه، ويـسـتـنـجـ (ـوـصـفـيـاـ)ـ تـأـيـيرـ درـجـةـ الـحرـارـةـ أوـ التـرـكـيزـ أوـ الضـغـطـ عـلـىـ نـظـامـ فيـ حـالـةـ الـاتـزانـ.

الـشـكـلـ 11-5ـ مـحلـولـ مـشـبـعـ فـيـ حـالـةـ اـتـزانـ يـحـدـثـ لـهـ إـزـاحـةـ بـشـكـلـ كـبـيرـ (ـaـ)ـ نـحـوـ الـيـسـارـ،ـ (ـbـ)ـ نـحـوـ الـيـمـينـ.

المفردات



Le Chatelier's Principle

مبدأ لوشاـتيلـيه

مبدأ لوشاتيليه

يُعد النّظام الذي يكون في حالة اتّزان نظاماً متّزناً عند ظروف مُحدّدة فقط. ولكن عندما لا يكون النّظام مُغلقاً بسبب امتصاص طاقة أو فقدانها، أو بسبب إضافة مادة متفاعلة أو إزالتها، سيتغيّر التّوازن، ولن يبقى هذا النّظام في حالة اتّزان بعد ذلك. يُستخدم **مبدأ لوشاتيليه Le Chatelier's Principle** للتّوقع كيّفية استجابة نّظام يكون في حالة اتّزان للتّغيّر، بسبب المؤثّر الخارجي الذي يتّعرض له. وينصّ مبدأ لوشاتيليه على الآتي:

عندما يتعرّض نّظام ما في حالة اتّزان لمؤثّر خارجي، فإنّ موضع الاتّزان يُزاح نحو الاتّجاه الذي يؤدّي إلى تقليل أثر هذا المؤثّر أو إلغائه، ليعود إلى حالة اتّزان جديدة.

من المؤثّرات أو العوامل المؤثّرة في تفاعل في حالة إتّزان:

- ازدياد أو نقصان في تركيز إحدى المّواد المتفاعلة أو المّواد النّاتجة.
- ارتفاع أو انخفاض في درجة الحرارة.
- تغيّر في الضّغط (النّاتج عن تغيّر في حجم وعاء التّفاعل) للتفاعلات الغازية فقط.

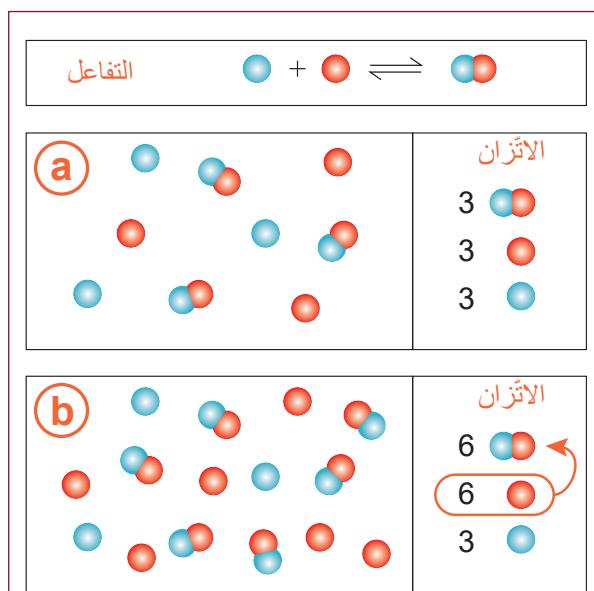
ويشير التغيّر في الاتّجاه إلى إحدى الاستجابات المحتملتين الآتتتين:

- يحدث التّفاعل الطردي بشكل أسرع من التّفاعل العكسي.
- يحدث التّفاعل العكسي بشكل أسرع من التّفاعل الطردي.

ويمكّن أن يُزاح موضع الاتّزان لتفاعل متّزن في حالة:

- ازدياد في سرعة أحد التّفاعلين أو نقصانها.
- ازدياد في سرعة التّفاعلين، لكن أحدهما يزداد بشكل أكبر من الآخر.
- نقصان في سرعة التّفاعلين، لكن أحدهما ينقص بشكل أكبر من الآخر.

التغيّر في التركيز ونظرية التصادم



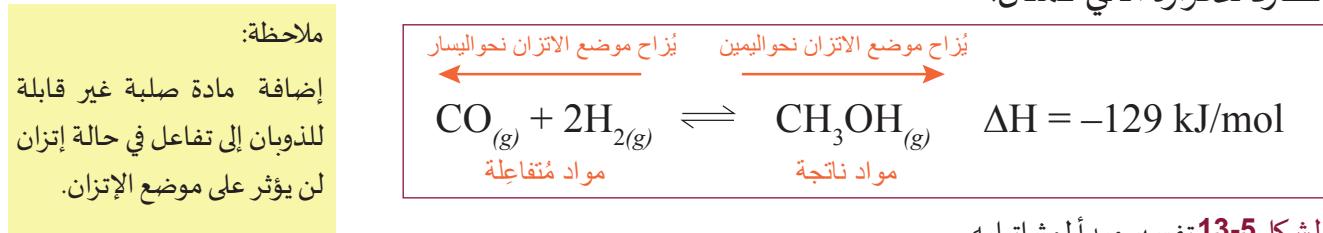
الشكل 12-5 ازدياد تركيز المادة المتفاعلة يعمل على إزاحة موضع الاتّزان (تزايد سرعة التّفاعل الطردي)، بحيث يتجه نحو تكوين المزيد من المّواد النّاتجة.

افترض أن التّفاعل المبيّن في (الشكل 12.5 a) في حالة اتّزان: عندما يزداد تركيز أحد جزيئات المّواد المتفاعلة (أي إضافة جزيئات مادة متفاعلة)، تزداد إمكانية تصادمها مع جزيئات المادة المتفاعلة الأخرى، فيزّاح موضع الاتّزان نحو اليمين، أي باتّجاه تكوين المزيد من المّواد النّاتجة (الشكل 12.5 b).

في ضوء مبدأ لوشاتيليه، تؤدي زيادة أي من تركيز المّواد المتفاعلة أو نقصانها إلى إزاحة في موضع الاتّزان، حيث يحاول التّفاعل التّقليل من أثر تغيّر التركيز للوصول إلى حالة اتّزان جديدة. ويمكّن توقّع حدوث هذه الإزاحة في موضع الاتّزان من خلال نظرية التصادم.

تطبيق مبدأ لوشاتيليه

عندما نطبق مبدأ لوشاتيليه، في الغالب نرغب أن نعرف إمكانية حدوث إزاحة لموضع اتّزان تفاعل ما متّجهًا نحو اليسار لتكوين مزيد من المواد المتفاعلة، أو إزاحة هذا التفاعل واتّجاهه نحو اليمين لتكوين مزيد من المواد الناتجة. تُعدّ هذه المعرفة مهمة إلى حدّ بعيد بخاصة في عملية التصنيع الكيميائية، والتي تحتاج من خلالها إلى ظروف تؤدي إلى تكوين أكبر كمية ممكنة من المادة الناتجة. افترض أن لديك التفاعل الطارد للحرارة الآتي كمثال:



الشكل 5-13 تفسير مبدأ لوشاتيليه.

يزاح موضع الاتّزان نحو اليمين : عند زيادة تركيز إحدى المواد المتفاعلة (CO أو H_2)، أو نقص تركيز المواد الناتجة (CH_3OH).

يزاح موضع الاتّزان نحو اليسار: عند زيادة تركيز إحدى المواد الناتجة (CH_3OH)، أو نقص تركيز إحدى المواد المتفاعلة (CO أو H_2).

ويتمّ حلّ الأسئلة على مبدأ لوشاتيليه في ثلاث خطوات، هي:

1. **حدّد المؤثّر الذي سبّب إزاحة موضع الاتّزان.** ما الذي تغيّر؟

2. **حدّد ما الذي يقلّل أثراً لهذا المؤثّر.** كيف يمكن للتفاعل أن يغيّر موضع الإزاحة ويُكوّن حالة اتّزان جديدة؟

3. **حدّد اتجاه إزاحة موضع الاتّزان.** ما تأثير الخطوة 2، في إزاحة موضع الاتّزان نحو اليسار، أو نحو اليمين؟

مثال 7



أضيف غاز الميثanol (CH_3OH) إلى نظام التفاعل المغلق، للتفاعل في حالة اتّزان الآتي:



ما تأثير ذلك في حالة اتّزان هذا النظام؟

الحلّ

حدّد المؤثّر الذي سبّب إزاحة موضع الاتّزان: لقد ازداد تركيز غاز الميثanol (CH_3OH) على الجهة اليمينيّة لمعادلة اتّزان.

حدّد ما يقلّل أثراً لهذا المؤثّر: إن تقليل تركيز غاز الميثanol (CH_3OH) يغيّر موضع الاتّزان ويُكوّن حالة اتّزان جديدة.

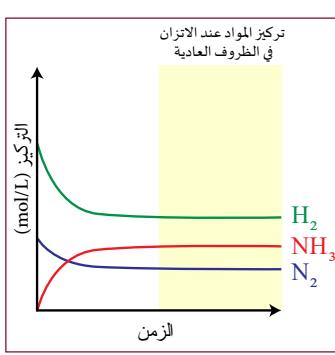
حدّد اتجاه إزاحة موضع الاتّزان: يُزاح موضع الاتّزان نحو اليسار لإنتاج المزيد من المواد المتفاعلة، فيستهلك بذلك بعضاً من غاز الميثanol (CH_3OH)، ليعود التفاعل إلى اتّزان من جديد من خلال إنتاج المزيد من المواد المتفاعلة (CO و H_2).

أثر تغيير التركيز في حالة الاتزان الكيميائي

وضح المثال السابق كيف أن ازدياد تركيز المادة الناتجة يدفع التفاعل العكسي إلى الحدوث، ويعمل على إزاحة موضع الاتزان نحو اليسار باتجاه إنتاج المزيد من المواد المتفاعلة. بالمقابل، يبين الجدول 1-5 أنّ خفض تركيز المادة الناتجة له تأثير معاكس، حيث يؤدي هذا إلى زيادة سرعة التفاعل الطردي، وبالتالي إزاحة الاتزان نحو اليمين لإنتاج المزيد من المواد الناتجة.

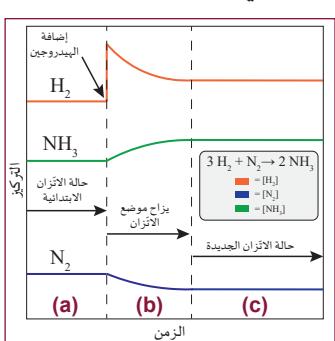
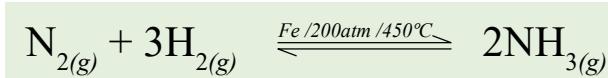
جدول 1-5 أثر تغيير التركيز في موضع الاتزان.

مؤثرات التغيير في التركيز		
التأثير في K	الإزاحة في موضع الاتزان	المؤثر
لا تغير	يزاح باتجاه اليمين	زيادة تركيز المادة المتفاعلة
لا تغير	يزاح باتجاه اليسار	زيادة تركيز المادة الناتجة
لا تغير	يزاح باتجاه اليسار	نقصان تركيز المادة المتفاعلة
لا تغير	يزاح باتجاه اليمين	نقصان تركيز المادة الناتجة

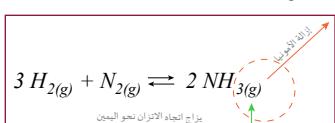


الشكل 14-5 حالة اتزان لإنتاج الأمونيا في الظروف العادي.

تُعد عملية هابر اكتشافاً علمياً مهماً في العلوم الزراعية التي يتم فيها إنتاج غاز الأمونيا (NH_3) المستخدم في صناعة الأسمدة الزراعية، والذي يُنتج من عُنصُرِيه الغازيين الهيدروجين والنيدروجين بحسب التفاعل المتنّ الآتي كما يبيّن الشكل 14-5 تغيير تركيز المواد للوصول إلى الاتزان:



الشكل 15-5 (a) حالة الاتزان الابتدائية، (b) المؤثر الذي تعرّض له النظام، (c) حالة الاتزان الجديدة.



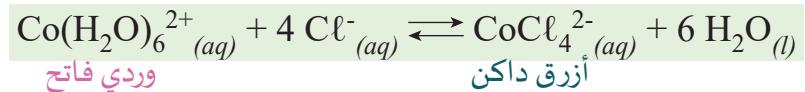
الشكل 16-5 يزاج اتجاه الاتزان إلى اليمين في عملية هابر عن طريق إزالة الأمونيا.

لنحلّ ما يحدث عند إضافة غاز الهيدروجين إلى هذا النظام الذي يكون في حالة اتزان، حيث يبيّن (الشكل 15-5 a) عملية هابر في إحدى حالات الاتزان، ويبيّن (الشكل 15-5 b) كيف يستجيب النظام لعملية إضافة غاز الهيدروجين. لاحظ أن بعض الهيدروجين الذي تمّ إضافته يتم استهلاكه، ويتم استهلاك بعض النيدروجين الذي كان موجوداً أيضاً. وسينتج عن ذلك المزيد من الأمونيا. وهذا يتفق مع إزاحة موضع الاتزان نحو اليمين، حيث يبيّن (الشكل 15-5 c) النظام وهو في حالة اتزان جديدة.

ولمّا كان التفاعل العكسي يقلّل من كمية الأمونيا الناتجة، يُستخدم مبدأ لوشاتيليه في عمليات الإنتاج الصناعية للعمل على إزاحة اتجاه حالة الاتزان نحو اليمين بشكل مستمر، وذلك عن طريق الإضافة المستمرة لكل من H_2 و N_2 . ويتم تحقيق ذلك أيضاً عن طريق تكثيف NH_3 وإخراجها من النظام. وعندما تتم إزالة الأمونيا، تحدث تصادمات أقل بين جزيئات الأمونيا. عندها يصبح التفاعل العكسي أبطأ من التفاعل الطردي، ويزاج اتجاه موضع الاتزان نحو اليمين، لأن التفاعل الطردي يحدث أسرع من التفاعل العكسي (الشكل 16-5).



تحدث حالة الاتزان الآتية عندما يذوب كلوريد الكوبالت (II) المائي ($\text{CoCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) في محلول حمض الهيدروكلوريك، بحسب المعادلة الكيميائية الآتية:



حيث تكون أيونات $\text{Co}(\text{H}_2\text{O})_6^{2+}_{(aq)}$ ذات لون وردي فاتح، وتكون أيونات $\text{CoCl}_4^{2-}_{(aq)}$ ذات لون أزرق داكن.

(1) توقع اتجاه إزاحة موضع الاتزان عند إذابة كلوريد الصوديوم (NaCl) في محلول عند الاتزان.

(2) وضِّح: هل يتغيّر لون محلول إلى اللون الوردي الفاتح أم إلى اللون الأزرق الداكن؟

الحل

(a) حدد المؤثّر الذي سبب إزاحة موضع الاتزان.

(b) حدد ما الذي يُقلّل أثر هذا المؤثّر.

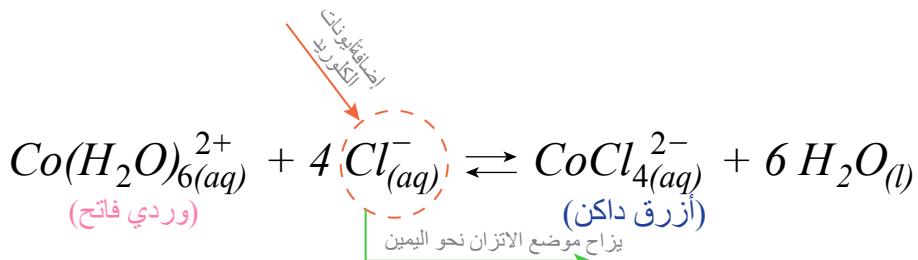
(c) حدد اتجاه إزاحة موضع الاتزان.

(1) ينبع عن إذابة NaCl في محلول أيونات صوديوم، وأيونات كلوريد: $\text{NaCl} \rightarrow \text{Na}^+ + \text{Cl}^-$. فأيونات الصوديوم لا تشارك في التفاعل، لذلك، فإنّها لا تؤدي إلى أيّة إزاحة في موضع الاتزان. أما أيونات الكلوريد فهي أحد المُتفاعلات في هذا النظام. لذلك، تمثّل زيادة تركيز أيونات الكلوريد المؤثّر الذي يُسبّب إزاحة موضع الاتزان.

(a) المؤثّر: زيادة تركيز أيونات الكلوريد $[\text{Cl}^-]$.

وبتطبيق مبدأ لوشاتيليه: لتعديل هذا المؤثّر يُزاح موضع الاتزان باتّجاه استهلاك المادة المُضافة، ويُزاح بالتالي النظام نحو اليمين، أي تزداد سرعة التفاعل الطردي لاستهلاك بعض أيونات الكلوريد المُضافة.

(b) خفض المؤثّر: استهلاك أيونات الكلوريد $[\text{Cl}^-]$ للتقليل من تركيزها.



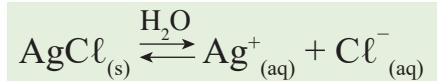
(c) سوف يُزاح موضع الاتزان في اتجاه التفاعل المستهلك لأيونات الكلوريد، أي نحو اليمين.

(2) في أثناء إزاحة اتجاه التفاعل نحو اليمين، سيتم استهلاك أيونات $\text{Co}(\text{H}_2\text{O})_6^{2+}_{(aq)}$ أيضًا، وينتج عن ذلك أيونات $\text{CoCl}_4^{2-}_{(aq)}$ ذات اللون الأزرق الداكن. لهذا، سيلاحظ أن لون محلول سيتغيّر إلى اللون الأزرق الداكن.

ملحوظة: يُطلق على عملية إضافة ملح قابل للذوبان إلى محلول يحتوي على أيونات مماثلة في حالة إتّزان، وملحوظة الإزاحة في موضع الاتزان، تسمية تأثير الأيون المشترك *common ion effect*



ملح كلوريد الفضة شحيق الذوبان في الماء حيث يتآين بنسبة قليلة في الماء ليصل إلى حالة الاتزان بحسب المعادلة الكيميائية الآتية:



إذا أُضفت كمية قليلة من محلول كلوريد البوتاسيوم KCl

(1) توقع إزاحة في موضع الاتزان.

(2) توقع: هل تزداد كتلة كلوريد الفضة $\text{AgCl}_{(s)}$ أم تقل، أم تبقى ثابتة دون تغيير عند الاتزان؟

الحل

(a) حدد المؤثر الذي سبب إزاحة موضع الاتزان.

(b) حدد ما يُقلل أثر هذا المؤثر.

(c) حدد اتجاه إزاحة موضع الاتزان.

(1) ينتج عن إذابة KCl في محلول أيونات بوتاسيوم، وأيونات كلوريد: $\text{KCl} \rightarrow \text{K}^{+} + \text{Cl}^{-}$. فأيونات البوتاسيوم لا تدخل في التفاعل. لذلك فهي لا تؤدي إلى أيّة إزاحة في موضع الاتزان. أما أيونات الكلوريد فتتفاعل مع أيونات الفضة وترسّب خارج محلول في هيئة راسب أبيض اللون هو كلوريد الفضة $\text{AgCl}_{(s)}$:



لذا، تتم إزالة أيونات الفضة من تفاعل الاتزان.

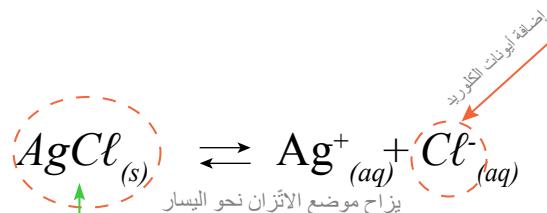
(a) المؤثر: يزداد تركيز أيونات الكلوريد $[\text{Cl}^{-}]$ في النظام المتزن:

بتطبيق مبدأ لوشاطيّيه: لتعديل هذا المؤثر يُزاح النظام المتزن بالإتجاه العكسي لتقليل تركيز أيونات الكلوريد وتكوين مزيد من الراسب أبيض كلوريد الفضة AgCl .

(b) خفض المؤثر: إنتاج المزيد من كلوريد الفضة AgCl .

ينتج كلوريد الفضة في التفاعل العكسي، لذلك يُرجح التفاعل العكسي على التفاعل الطردي.

(c) سوف يُزاح النظام في اتجاه التفاعل الذي ينتج المزيد من كلوريد الفضة، أي نحو اليسار.



(2) أثناء إزاحة موضع الاتزان نحو اليسار يُرجح التفاعل العكسي. تزداد كتلة كلوريد الفضة AgCl أي يزداد الراسب أبيض.

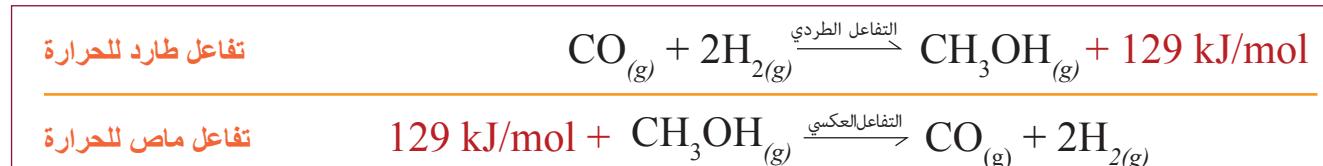
هل يحدث نفس التأثير إذا تمت إضافة مزيد من كلوريد الفضة الصلب بدلاً من إضافة كلوريد البوتاسيوم؟

فسر إجابتك.



أثر تغيير درجة الحرارة في حالة الاتزان الكيميائي

يؤدي التغيير في درجة الحرارة إلى إزاحة في موضع الاتزان لأي تفاعلات تتضمن تغييرًا في الطاقة، وهذا يتضمن التفاعلات الطاردة للحرارة (التي تنطلق منها حرارة)، والماصنة للحرارة أيضًا (التي تمتضض حرارة). ويبين **الشكل 17-5** تفاعلاً انعكاسياً يصاحبه تغيير في الطاقة سواء على جهة الموارد الناتجة، أو على جهة الموارد المتفاعلة. لاحظ هذه النقطة المهمة: عندما يكون التفاعل الأمامي طارداً للحرارة، يجب أن يكون التفاعل العكسي ماصاً لها.



الشكل 17-5 تغيير الطاقة في التفاعل الطردي والتفاعل العكسي.

إضافة طاقة حرارية إلى التفاعل الطارد للحرارة الموجود في **الشكل 17-5** يؤدي إلى ارتفاع درجة حرارة النظام المترن، وهذا المؤثر مشابه تماماً لعملية إضافة مادة ناتجة. لذلك، ستحدث إزاحة في موضع الاتزان بطريقة ما لإعادة النظام إلى الاتزان من جديد؛ هنا يُزاح الاتزان نحو اليسار لإنتاج المزيد من الموارد المتفاعلة (التفاعل العكسي الماص للحرارة). ويُلخص الجدول 5-2 تأثير التغيير في درجة الحرارة على نظام مترن.

جدول 5-2 تأثير التغيير في درجة الحرارة على نظام مترن.

المؤثر	نوع التفاعل	الإزاحة في موضع الاتزان	التأثير في k
ارتفاع درجة الحرارة	طارد للحرارة ($\Delta H < 0$)	يُزاح باتجاه اليسار	يقل
انخفاض درجة الحرارة		يُزاح باتجاه اليمين	يزداد
ارتفاع درجة الحرارة	ماص للحرارة ($\Delta H > 0$)	يُزاح باتجاه اليمين	يزداد
انخفاض درجة الحرارة		يُزاح باتجاه اليسار	يقل

تبعاً لمبدأ لوشاتيليه: إن زيادة درجة الحرارة تؤدي إلى إزاحة موضع الاتزان نحو الاتجاه الذي يتم فيه امتصاص الحرارة، وخفض درجة الحرارة يؤدي إلى إزاحة موضع الاتزان نحو اتجاه يطلق خالله الحرارة. ولفهم ما يُسبب إزاحة النظام المترن، خذ بعين الاعتبار النقطتين الآتيتين:

- إن ارتفاع درجة حرارة النظام يعني أن الجسيمات جميعها تتحرك بسرعة أكبر. لهذا، تتصادم الجسيمات بشكل متكرر وأسرع، مما يؤدي إلى زيادة سرعة التفاعلين الطردي والعكسي.
- تحدث إزاحة في موضع الاتزان لأن سرعة أحد التفاعلين تزداد بشكل أكبر من سرعة التفاعل المعاكس له. يحدث التغيير في موضع الاتزان بسبب الاختلاف في طاقة تنشيط التفاعل الطردي والتفاعل العكسي. حيث تكون طاقة تنشيط التفاعل الماص للحرارة أعلى من طاقة تنشيط التفاعل الطارد للحرارة، ويوضح الجدول 5-2:
- أن زيادة درجة الحرارة تؤدي إلى إزاحة الاتزان ناحية الجهة التي يتم فيها امتصاص الحرارة والعكس فإن خفض درجة الحرارة يؤدي إلى إزاحة الاتزان ناحية الجهة التي يتم فيها انطلاق حرارة.
- كما أن زيادة درجة الحرارة تزيد قيمة ثابت الاتزان للتفاعل الماص للحرارة وتقلل من قيمة ثابت الاتزان للتفاعل الطارد للحرارة (K).
- وبالعكس عند خفض درجة الحرارة تقل قيمة ثابت الاتزان للتفاعل الماص للحرارة وتزداد قيمة ثابت الاتزان للتفاعل الطارد للحرارة (K).

مثال 10



يخضع غاز رباعي أكسيد ثنائي النيتروجين (N_2O_4) إلى تفاعل تفكك ماص للحرارة ليتحقق حالة اتزان مع غاز ثاني أكسيد النيتروجين (NO_2), كما في المعادلة الكيميائية الآتية:



إذا انخفضت درجة الحرارة:

- (1) توقع اتجاه الإزاحة في موضع الاتزان.
- (2) كيف سيتغير تركيز غاز ثاني أكسيد النيتروجين (NO_2)؟
- (3) كيف تتغير قيمة ثابت الاتزان K للتفاعل؟

الحل

(a) المؤثر الذي سبب إزاحة موضع الاتزان.

(b) حدد ما يقلل أثر هذا المؤثر.

(c) حدد اتجاه إزاحة موضع الاتزان.

(1) كما ذكر في المثال، فقد انخفضت درجة الحرارة.

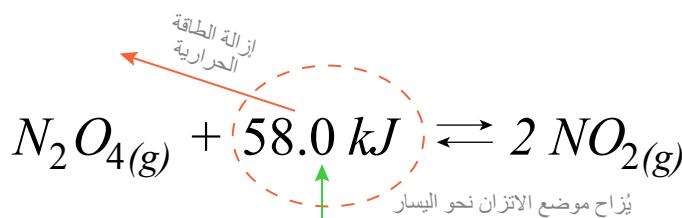
(a) المؤثر: تم إزالة الطاقة الحرارية (انخفاض درجة الحرارة).

وبتطبيق مبدأ لوشاتيليه: سيتغير اتجاه التفاعل لتقليل المؤثر. إذا انخفضت درجة الحرارة في النظام، فإن موضع الاتزان يزاح لإنتاج المزيد من الطاقة الحرارية، وبالتالي يرجح التفاعل البارد للحرارة (يزاح نحو اليسار).

(b) خفض المؤثر: ترجيح التفاعل البارد للحرارة لإنتاج الطاقة الحرارية (ارتفاع درجة الحرارة).

التفاعل العكسي هو التفاعل البارد للحرارة.

(c) يزاح النظام إلى اليسار (يرجح التفاعل العكسي البارد للحرارة).

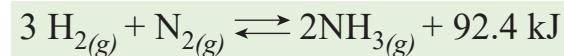


(2) يستهلك التفاعل العكسي غاز ثاني أكسيد النيتروجين (NO_2) لهذا، يقل تركيز هذا الغاز.

(3) التفاعل ماص للحرارة، خفض درجة الحرارة يؤدي لزيادة تركيز المتفاعلات ونقص تركيز النواتج لذا ، تقل قيمة ثابت الاتزان K .



يُعد إنتاج غاز الأمونيا من عملية هابر تفاعلاً طارداً للحرارة، كما يُشير وجود طاقة حرارية في طرف النواتج للمعادلة الكيميائية الآتية:



حدّد: هل يجب رفع درجة الحرارة، أم خفضها لزيادة إنتاج غاز الأمونيا (NH_3)؟

الحل

يتم حل هذا المثال بطريقة عكسيّة:

(a) حدّد اتجاه إزاحة موضع الاتزان لإنتاج المزيد من غاز الأمونيا

(b) حدّد كيفية خفض هذا المؤثّر

(c) حدّد المؤثّر

تنتج الأمونيا في التفاعل الطردي.

(a) يجب أن يكون اتجاه إزاحة موضع الاتزان نحو اليمين.

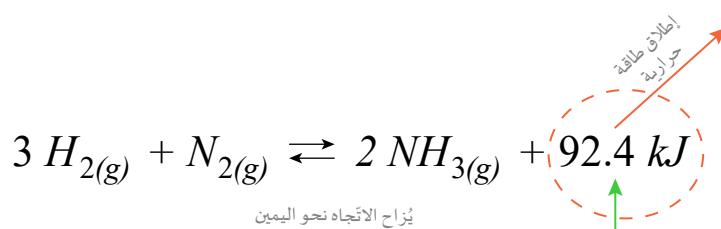
يكون التفاعل الطردي طارداً للحرارة، لأنّه يُطلق طاقة حرارية، ويعود إلى رفع درجة حرارة النظام.

(b) خفض المؤثّر: سيتغيّر اتجاه التفاعل لرفع درجة الحرارة.

وبتطبيق مبدأ لوشاطيه: خفض درجة الحرارة يؤدي لإزاحة موضع الاتزان نحو النواتج.

(c) المؤثّر: يجب خفض درجة الحرارة.

في عملية هابر، سيتم تناول هذا المثال عن طريق تحديد درجة الحرارة المثلى التي تُوازن سرعة التفاعل أثناء إزاحة موضع الاتزان نحو اليمين. وكتطبيق صناعي لعملية هابر، فسوف تتراوح درجة الحرارة فيها بين 400°C و 500°C .



أثر تغيير الضغط في حالة الاتزان الكيميائي

يتغير ضغط غاز ما نتيجة التغيير في درجة الحرارة أو الحجم أو التركيز وكما ناقشنا سابقاً الإزاحة في موضع الاتزان الناتجة عن التغييرات في درجة الحرارة والتركيز بشكل منفصل، فإننا سنسلط الضوء هنا على التغيير في الضغط الناتج عن التغيير في حجم وعاء التفاعل. وهناك شرطان لحدوث إزاحة في موضع الاتزان نتيجة التغيير في الضغط، وهما:

1. أن يحتوي التفاعل الانعكاسي مادة واحدة على الأقل في الحالة الغازية.
2. أن يكون عدد المولات الكلي للجسيمات الغازية الموجودة على الطرف الأيسر للمعادلة الموزونة (n_R) مختلفاً عن عدد المولات الكلي للجسيمات الغازية الموجودة على الطرف الأيمن للمعادلة الموزونة (n_P). يلخص الجدول 5-3 إزاحة موضع الاتزان نتيجة التغييرات في الضغط.
 - عندما يقل الضغط (بسبب ازدياد الحجم) على نظام متزن، يُزاح التفاعل نحو الاتجاه ذي عدد المولات الغازية الأكثري. وبهذا يزداد الضغط إلى أن يتحقق التفاعل حالة اتزان جديدة.
 - عندما يزداد الضغط (بسبب نقصان الحجم) على نظام متزن، يُزاح التفاعل نحو الاتجاه ذو عدد المولات الغازية الأقل، وبهذا يقل الضغط إلى أن يتحقق التفاعل حالة اتزان جديدة.
 - في التفاعلات التي لديها عدد مولات كلي متساوٍ من الجسيمات الغازية الموجودة على طرفي المعادلة الموزونة ($n_R = n_P$)، فإن هذا النظام المتزن لا يتأثر بالتغيير في الضغط.

ملحوظة: لا تتأثر كميات المواد الصلبة أو السائلة النقية أو تراكيز المحاليل المائية بتغيير حجم وعاء التفاعل.

جدول 5-3 إزاحة في موضع الاتزان نتيجة التغييرات في الضغط.

مؤثرات التغيير في الضغط

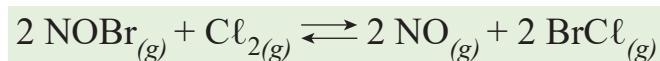
المؤثر	* نوع التفاعل	الازاحة في موضع الاتزان	التأثير في k
زيادة الضغط	$n_{R(g)} < n_{P(g)}$	يُزاح باتجاه اليسار	➡ لا تغيير
نقصان الضغط		يُزاح باتجاه اليمين	➡ لا تغيير
زيادة الضغط	$n_{R(g)} > n_{P(g)}$	يُزاح باتجاه اليمين	➡ لا تغيير
نقصان الضغط		يُزاح باتجاه اليسار	➡ لا تغيير
زيادة الضغط	$n_{R(g)} = n_{P(g)}$	لا تغيير	➡ لا تغيير
نقصان الضغط		لا تغيير	➡ لا تغيير

$n_{R(g)} = *n_{P(g)}$ = عدد المولات الكلي للمواد المتفاعلة الغازية، $n_{P(g)}$ = عدد المولات الكلي للمواد الناتجة الغازية

التغييرات في الضغط الناتجة عن إضافة أو إزالة جسيمات غازية داخلة في حالة الاتزان سوف تؤدي إلى تغييرات لا يمكن أن تتوقعها التطبيقات البسيطة لمبدأ لوشاتيليه. ثم إن إضافة أو إزالة الغاز الذي لن ينبع عنه تغيير كيميائي (مثل الغاز النبيل) في وعاء التفاعل لن تؤدي إلى إزاحة في موضع الاتزان.



إذا تم خفض الضغط ، مع ثبات درجة الحرارة، في حالة الاتزان الآتية:



(1) توقع التغيير في حالة الاتزان التي حدثت.

(2) توقع: هل تزداد كمية غاز الكلور (Cl_2) الموجودة في وعاء التفاعل، أم تقل، أم تبقى ثابتة كما هي.

الحل

(a) حدد المؤثر.

(b) حدد ما يقلل أثر هذا المؤثر.

(c) حدد اتجاه الإزاحة في موضع الاتزان.

1. كما ذكر في المثال، انخفاض الضغط داخل النظام المتزن بازدياد حجم وعاء التفاعل.

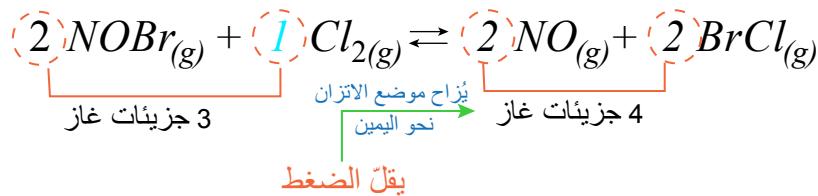
(a) المؤثر: انخفاض الضغط.

بتطبيق مبدأ لوشاطيلا: يُزاح موضع الاتزان للتخفيف من المؤثر، أي بالاتجاه الذي يحتوي على عدد مولات غازية أكثر (الاتجاه الطردي).

(b) خفض المؤثر: من خلال زيادة الضغط في النظام.

يمكن زيادة الضغط من خلال إزاحة موضع التفاعل الذي يُنتج عدداً كلياً لجزيئات غاز أكثر، حيث تنتج أربعة جزيئات غاز في التفاعل الطردي، وتنتج ثلاثة جزيئات غاز فقط في التفاعل العكسي.

(c) يجب أن يُزاح موضع الاتزان نحو اليمين.



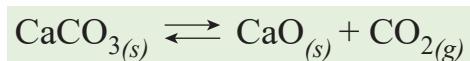
يُزاح موضع الاتزان نحو اليمين لإنتاج 4 مولات من المواد الغازية في طرف النواتج من المعادلة الموزونة. وبالتالي، يزداد الضغط ويقل تأثير المؤثر. أعلم أن الاتزان لا يمكن أن يُعاد كما كان قبل إضافة المؤثر على النظام المتزن. في معظم الحالات، يُطبق مبدأ لوشاطيلا على الأنظمة المتزنة لخفض المؤثرات التي تسبب اضطراباً في هذه الأنظمة، ولكنه لا يزيلها كلياً.

2. سيتم استهلاك غاز الكلور (Cl_2) في التفاعل الطردي. ولأن التفاعل الطردي هو المرجح لزيادة ضغط النظام، فإن كمية هذا الغاز تقل.

مثال 13



تفكك كربونات الكالسيوم، وتحقق حالة اتزان في نظام مغلق بحسب المعادلة الكيميائية الآتية:



(1) توقع الإزاحة في موضع الاتزان الذي سوف يحدث عندما يزداد الضغط.

(2) وضح كيف تؤثر إضافة كربونات الكالسيوم (CaCO_3) إلى وعاء التفاعل في حالة الاتزان.

الحل

(a) حدد المؤثر.

(b) حدد ما يقلل أثر هذا المؤثر.

(c) حدد اتجاه الإزاحة في موضع الاتزان.

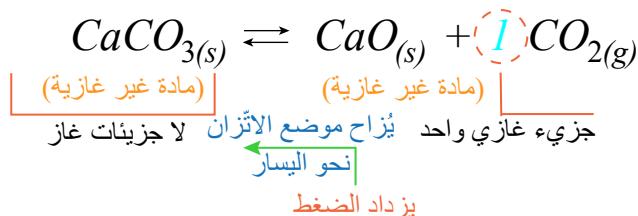
1. كما ذكر في المثال، يزداد الضغط بنقصان حجم وعاء التفاعل.

(a) المؤثر: زيادة الضغط في النظام.

بتطبيق مبدأ لوشاتيليه: يزاح اتجاه التفاعل لخفض المؤثر: عندما يزداد الضغط في نظام مُثْرٌ، يرجح التفاعل الذي يُخفض الضغط.

(b) خفض المؤثر: تقليل الضغط.

لتقليل الضغط يزاح موضع الاتزان ليرجح التفاعل الذي يُنتج عدد جزيئات غازية أقل. ومن خلال المعادلة الكيميائية، ينتج جزيء غازي واحد في التفاعل الطردي، ولا تنتج أية جزيئات غازية في التفاعل العكسي. لذلك، يرجح التفاعل العكسي لتخفيف الضغط في هذا النظام.



(c) يجب أن يزاح موضع الاتزان نحو اليسار.

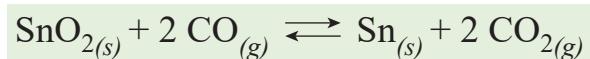
2. لن تؤدي إضافة كربونات الكالسيوم إلى وعاء التفاعل إلى أية إزاحة في موضع الاتزان، لأن كربونات الكالسيوم مادة صلبة. إن إضافة المواد الصلبة أو السوائل الندية أو المحاليل المائية لن تؤدي إلى تغيير في الضغط في داخل وعاء التفاعل.

وضح المعلومات الإضافية التي يمكن أن تحتاج إليها في المثال أعلاه لتوقع الإزاحة في موضع الاتزان التي تنتج عن تغيير في درجة الحرارة.





إذا أُعطيت النظم المتنزّل الآتي:



- (1) توقّع الإزاحة في موضع الاتّزان الذي سوف يحدث إذا تغيّر حجم وعاء التفاعل من L 1.00 إلى L 1.50.
- (2) وضّح كيف تغيّر سرعة التفاعلات النسبية لكلا التفاعلين، الطردي والعكسي، استجابة للمؤثّر الذي حدث في النظام المتنزّل.

الحل

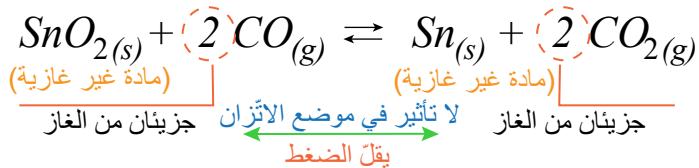
- (a) حدّد المؤثّر.
 - (b) حدّد ما يُقلّل أثر هذا المؤثّر.
 - (c) حدّد اّتجاه الإزاحة في موضع الاتّزان.
- 1.** يزداد الحجم من L 1.00 إلى L 1.50، وهنالك علاقة عكسيّة بين الحجم في نظام غازي مُغلق والضغط. كلّما ازداد حجم الوعاء انخفض الضغط.
- (a) المؤثّر: انخفاض الضغط.**

بتطبيق مبدأ لوشاطيلا: يُزاح اّتجاه التفاعل لخفض المؤثّر، مما يؤدّي إلى الإزاحة في موضع الاتّزان ليُرجّح التفاعل الذي يزيد الضغط.

(b) خفض المؤثّر: ازدياد الضغط.

يزداد الضغط بإزاحة موضع الاتّزان ليُرجّح التفاعل الذي يُنتج عدد جُزيئات غازية أكثر. بحسب المعادلة الكيميائية، ينتج جُزيئان من الغاز في التفاعل الطردي، وجُزيئان من الغاز في التفاعل العكسي. لذلك، لن يكون هنالك أيّ إزاحة في كلا الاتّجاهين يمكن أن يزيد عدد جُزيئات الغاز الناتجة.

(c) لا يوجد إزاحة في موضع الاتّزان.



- 2.** سوف يُسهم ازدياد حجم وعاء التفاعل في زيادة المسافة بين الجسيمات المُتفاعلية بشكل متساوٍ نسبياً في كلا التفاعلين، الطردي والعكسي. نتيجة لذلك، تقلّ التصادمات التي تحدث بين الجسيمات المُتفاعلية في كلا التفاعلين، الطردي والعكسي. بشكل متساوٍ نسبياً أيضاً. لهذا، يحدث كلا التفاعلين، الطردي والعكسي، بشكل أبطأ مما كان عليه النظام قبل حدوث المؤثّر، إضافة إلى أن التفاعلين سوف يحدثان بسرعة متساوية.

أثر إضافة العامل الحفّاز على موضع الاتّزان

لا تؤثّر إضافة العامل الحفّاز على موضع الاتّزان، وذلك لأنّ إضافة العامل الحفّاز تؤدي إلى زيادة سرعة التفاعل في الاتّجاه الطردي (الأمامي) والاتّجاه العكسي بنفس المقدار، وذلك لأنّ العامل الحفّاز يقلّل طاقة التنشيط لهذين التفاعلين بنفس المقدار.

ملاحظة عامة:

لأن تفاعل في حالة اتزان لا تؤدي عملية إضافة أو إزالة بعض (وليس كل) الجسيمات التي تكون في الحالة الصلبة أو السائلة النقية الموجودة في حالة اتزان، إلى إزاحة في موضع الاتزان مادام هناك بعض من المادة الصلبة أو السائلة، لأن قيم كثافتها تكون ثابتة عند درجة حرارة وضغط مُحدّدين.

ملخص أنواع المؤثرات والاستجابات

يبين الجدول 4-5 استجابة أحد الأنظمة الموجودة في حالة اتزان كيميائي لعدة أنواع من المؤثرات المألوفة لدينا. لاحظ أن الاستجابة تعتمد على كل من: نوع النظام، ونوع المؤثر.

يبين العمود الموجود في أقصى يسار الجدول مدى تأثير المؤثرات في ثابت اتزان التفاعل (K)، لاحظ أن ثابت الاتزان يتأثر فقط بالتغيير بدرجة حرارة النظام.

جدول 4-5 ملخص أنواع المؤثرات والتأثيرات في الاتزان.

مؤثرات التغيير في التركيز		
التأثير في K	الإزاحة في موضع الاتزان	المؤثر
لا تغير	يزاح باتجاه اليمين	زيادة تركيز المادة المتفاعلة
لا تغير	يزاح باتجاه اليسار	زيادة تركيز المادة الناتجة
لا تغير	يزاح باتجاه اليسار	نقصان تركيز المادة المتفاعلة
لا تغير	يزاح باتجاه اليمين	نقصان تركيز المادة الناتجة

مؤثرات التغيير في درجة الحرارة			
التأثير في K	الإزاحة في موضع الاتزان	نوع التفاعل	المؤثر
يقل	يزاح باتجاه اليسار	طارد للحرارة ($\Delta H < 0$)	ارتفاع درجة الحرارة
يزداد	يزاح باتجاه اليمين		انخفاض درجة الحرارة
يزداد	يزاح باتجاه اليمين	ماص للحرارة ($\Delta H > 0$)	ارتفاع درجة الحرارة
يقل	يزاح باتجاه اليسار		انخفاض درجة الحرارة

مؤثرات التغيير في الضغط			
التأثير في K	الإزاحة في موضع الاتزان	* نوع التفاعل	المؤثر
لا تغير	يزاح باتجاه اليسار	$n_{R(g)} < n_{P(g)}$	زيادة الضغط
لا تغير	يزاح باتجاه اليمين		نقصان الضغط
لا تغير	يزاح باتجاه اليمين	$n_{R(g)} > n_{P(g)}$	زيادة الضغط
لا تغير	يزاح باتجاه اليسار		نقصان الضغط
لا تغير	لا تغير	$n_{R(g)} = n_{P(g)}$	زيادة الضغط
لا تغير	لا تغير		نقصان الضغط

* $n_{R(g)}$ = عدد المولات الكلي للمواد المتفاعلة الغازية، $n_{P(g)}$ = عدد المولات الكلي للمواد الناتجة الغازية



الاتزان الكيميائي

2-5

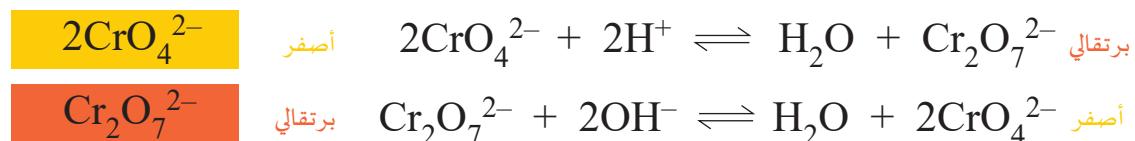
هل يمكن ملاحظة حالات الاتزان وتحليلها؟	سؤال الاستقصاء
حاليل: 0.2 M NaOH تركيزه $1.0\text{ M H}_2\text{SO}_4$ ، $0.1\text{ M K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ تركيزه 15 mL ، حامل أنابيب اختبار، عصا تحريك طويلة، نظارات واقية.	المواد المطلوبة

المقدمة:

لاحظ العرض العملي لتجربة الاتزان المسممة "الزجاجة الزرقاء"، ثم سجل ملاحظاتك، واقترح فرضية لملاحظتك.

نشاط عملي (اعمل في مجموعات ثنائية):

يتفاوت ثانوي كرومات البوتاسيوم ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) لتكوين أيونات $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ البرتقالية اللون في المحلول المائي، أما كرومات البوتاسيوم (K_2CrO_4) فيتفاوت لتكوين أيونات CrO_4^{2-} الصفراء، حيث يكون هذان المركبان نظاماً متزناً يتغير لونه بحسب المعادلتين الآتتين:



1. ضع 20 نقطة من محلول $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7_{(aq)}$ في أنبوب اختبار سعة 15 mL .
2. أضف 20 نقطة من محلول $\text{NaOH}_{(aq)}$ ، وحرك، ثم سجل ملاحظاتك.
3. أضف 20 نقطة من محلول $\text{H}_2\text{SO}_4_{(aq)}$ ، وحرك، ثم سجل ملاحظاتك.
4. كرر الخطوتين 2، و3 إلى أن يمتلئ أنبوب الاختبار.

الأسئلة

(a) استخدم مبدأ لوشاتيليه لتفسير التغيير في اللون الذي يحدث عند إضافة محلول NaOH إلى محلول $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ؟

(b) استخدم مبدأ لوشاتيليه لتفسير التغيير في اللون الذي يحدث عند إضافة محلول H_2SO_4 إلى محلول K_2CrO_4 ؟

اتزان ثاني أكسيد الكبريت



أكمل الجدول أدناه إذا أعطيت معادلة الاتزان الآتية:



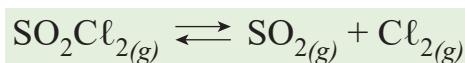
O_2 التغيير في كمية	SO_2 التغيير في كمية	SO_3 التغيير في كمية	المؤثر
			ازدياد O_2
			نقصان O_2
			ارتفاع درجة الحرارة
			انخفاض درجة الحرارة
			ازدياد الضغط
			نقصان الضغط

2-5 تقويم الدرس



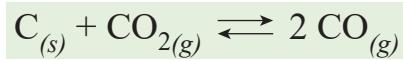
1. ماذا يحدث عندما يُزاح موضع الاتزان لتفاعل متزن نحو اليسار نتيجة وجود مؤثر خارجي ما؟
- يحدث التفاعل الطردي بشكل أسرع من التفاعل العكسي.
 - يزداد تركيز المواد المتفاعلة.
 - يزداد تركيز المواد الناتجة.
 - لا يتأثر تركيز المواد المتفاعلة.

2. أي من الآتي لا يُزاح فيه موضع الاتزان نحو اليسار في التفاعل المُبيَّن بالمعادلة الآتية؟

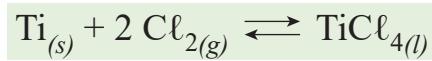


- إضافة $\text{He}_{(g)}$
- إضافة كمية من غاز الكلور
- إزالة كمية من $\text{SO}_2\text{Cl}_{2(g)}$
- خفض الحجم

3. ماذا يحدث لتركيز $\text{CO}_{(g)}$ عندما يزداد الضغط على النظام المتزن الآتي:

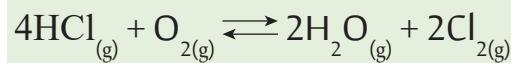


4. يمكن أن يتكون رباعي كلوريد التيتانيوم عن طريق تفاعل فلز التيتانيوم مع غاز الكلور، وهذا التفاعل انعكاسي، ويشكل حالة الاتزان الآتية:



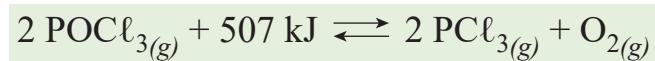
- ما الاتجاه الذي يجب أن يُزاح فيه موضع الاتزان لزيادة كمية TiCl_4 الناتجة؟ هل يجب إضافة كمية من غاز الكلور Cl_2 إلى النظام أم إزالتها منه لحدوث هذه الإزاحة؟

5. ماذا يحدث لموضع الاتزان لتفاعل المتزن الآتي عند زيادة حجم وعاء التفاعل؟

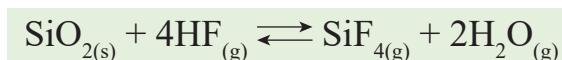


وضّح ذلك باستخدام مبدأ لوشاطييه.

6. وضّح باستخدام مبدأ لوشاطييه ما يحدث لكمية O_2 عندما تنخفض درجة حرارة النظام المتزن الآتي:



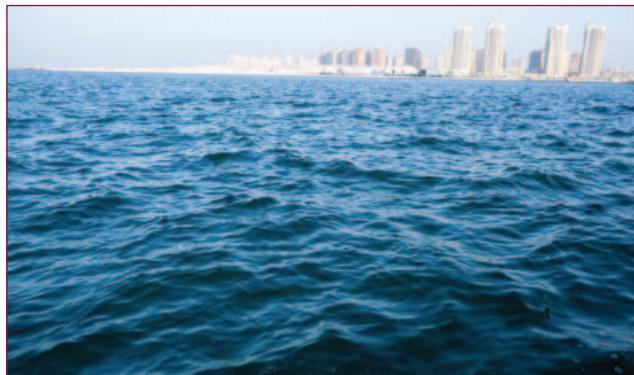
7. وضّح باستخدام مبدأ لوشاطييه ما يحدث لموضع الاتزان لتفاعل المتزن الآتي عند نقص حجم وعاء التفاعل؟



الدرس 3-5

الاتزان في المحاليل الحمضية والقواعدية

Equilibrium in acidic and basic solutions



الشكل 18-5 الخليج العربي قبالة لوسيل في قطر، بتاريخ 10 يونيو 2020.



الشكل 19-5 تغيير اللون في أدلة الأحماض والقواعد.

المفردات



Conjugate pairs	أزواج مترافقة
Amphoteric (amphiprotic) substances	مواد أمفوتيبرية (مترددة)
Acid-base titration	معايرة الأحماض والقواعد
Acid-base indicators	أدلة الأحماض والقواعد
Equivalence point	نقطة التكافؤ (التعادل)
End point	نقطة النهاية
Buffer solutions	محاليل مُنظمة
Henderson-Hasselbalch equation	مُعادلة هندرسون-هاسيلبالش
Burette	سحاحة

تساعد تفاعلات اتزان الأحماض والقواعد في أنظمة التحكم بالتنظيم البيولوجي لدرجة الحموضة pH في الدم، والتحكم بتركيز ثاني أكسيد الكربون المُخزن في المحيطات والبحار والخلجان والبحيرات (الشكل 18-5). تفسّر هذه التفاعلات أيضاً كيف تحدث تغييرات اللون في أدلة الأحماض والقواعد (الشكل 19-5) المستخدمة في تحليل تراكيز محلول، وتفسّر سبب حدوثها.

مخرجات التعلم

C1208.1 يصف نظرية برونيستيد- لوري للأحماض والقواعد. ويدرك المقصود بكل من المصطلحات الآتية: K_a , K_w , pK_a , pK_w ، ويستخدم هذه المفاهيم في إجراء حسابات مثل حساب الرقم الهيدروجيني pH لمحاليل حمضية وقواعدية ضعيفة.

C1208.2 يدرك أن الأدلة هي أحماض ضعيفة، ويفسّر كيفية اختيار الأدلة المناسبة أثناء معايرات الأحماض والقواعد، مع الأخذ في عين الاعتبار ثابت تفكّك الدليل.

C1208.3 يصف كيفية تنظيم المحاليل المنظمة للرقم الهيدروجيني (pH) (بما في ذلك دور HCO_3^- في تنظيم درجة حموضة الدم) وحساب الرقم الهيدروجيني (pH) للمحاليل المنظمة بتوفير البيانات المناسبة.

تأرجح الألوان - عرض ظاهرة الاتزان

نشاط عرض

يتكون خلال هذا النشاط غاز كلوريد الهيدروجين (HCl). لذلك، يجب أن يقوم المعلم بالعرض التوضيحي الآتي في خزانة الأبخرة. يجب توخي الحذر لأن محلول قابل للاشتعال.



الشكل 20-5 الصبغات الشائعة هي مُستخلصات نباتية مُذابة في الإيثانول.

1. أسكب 250 mL من محلول كلوريد النحاس (0.1 M CuCl_2) في كأس سعة 1000 mL. يُعرف هذا النوع من المحاليل بإسم "الصبغة" (الشكل 20-5).

2. ضع مغناطيس تحريك في الكأس. ضع الكأس على لوحة التحريك المغناطيسي (الشكل 21-5) الموضوعة في خزانة الأبخرة. شغل لوحة التحريك المغناطيسي.

3. أضف الماء المقطر ببطء إلى أن تلاحظ تغيير اللون.

4. أضف ببطء حمض الهيدروكلوريك المركز (HCl) إلى أن يتغير اللون مرة أخرى ويعود إلى اللون الأصلي.

5. أضف الماء المقطر ببطء حتى يتغير اللون مرة أخرى.

6. كرر الخطوتين 4 و 5 مرتين آخريتين. التحليل

لأن الماء المقطر نقي، فإن تغيير اللون الذي حدث عند إضافة الماء المقطر سببه الماء فقط. وفي المقابل، يُضيف حمض الهيدروكلوريك كلاً من أيونات الهيدروجين (H^+) وأيونات الكلوريد (Cl^-) إلى محلول.



الشكل 21-5 كأس محلول كلوريد النحاس (II) على لوحة التحريك المغناطيسي.

اعمل مع زميل لك على ابتكار طريقة لاختبار تغيير اللون عند إضافة حمض الهيدروكلوريك: أ هو ناتج عن أيونات الهيدروجين، أم عن أيونات الكلوريد أو عن كلِّيما؟

مراجعة نظريات الأحماض والقواعد

نظريَّة أَرْهِينِيُوس

تذَكَّر تعريف أَرْهِينِيُوس لِلأَحْمَاصِ وَالْقَوَاعِدِ:

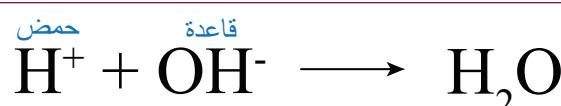
- الأَحْمَاصُ مَوَادٌ تُنْتَجُ مَحَالِيلَهَا الْمَائِيَّةً أَيُونَاتَ الْهِيْدِرُوجِينَ (H^+), كَوْنُهَا أَيُونَاتَ الْمَوْجَبَةِ الْوَحِيدَةِ فِي الْمَحْلُولِ.
- الْقَوَاعِدُ هِي مَوَادٌ تُنْتَجُ مَحَالِيلَهَا الْمَائِيَّةً أَيُونَاتَ الْهِيْدِرُوكَسِيدَ (OH^-), كَوْنُهَا أَيُونَاتَ الْمَسَالِبَةِ الْوَحِيدَةِ فِي الْمَحْلُولِ.

نظريَّة بِرُونْسْتِيد - لُورِي

- تذَكَّر تعريف بِرُونْسْتِيد - لُورِي لِلأَحْمَاصِ وَالْقَوَاعِدِ:
- الأَحْمَاصُ مَوَادٌ مَانِحةٌ لِلْبِرُوتُونِ.
- الْقَوَاعِدُ مَوَادٌ مُسْتَقِبِلَةٌ لِلْبِرُوتُونِ.

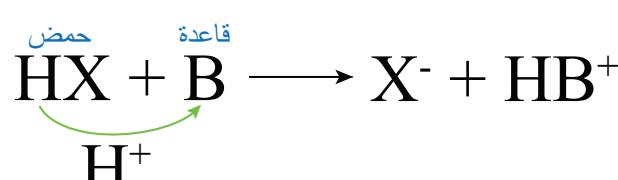
الاختلافات الرئيسيَّة بين نظريات الأَحْمَاصِ وَالْقَوَاعِدِ

- في نظريَّة أَرْهِينِيُوس ، لا يمكن أن تَوَجُدَ الْأَحْمَاصُ وَالْقَوَاعِدُ إِلَّا فِي الْمَحَالِيلِ الْمَائِيَّةِ . لكن لا يَوْجُدُ مِثْلُ هَذَا التَّقْيِيدُ فِي نظريَّة بِرُونْسْتِيد - لُورِي .
- في نظريَّة أَرْهِينِيُوس ، يَمْكُنُ أَنْ يَوْجُدَ الْحَمْضُ مِنْ دُونِ قَاعِدَةٍ . لكن، في نظريَّة بِرُونْسْتِيد - لُورِي ، يَجِبُ أَنْ تَوَجُدَ الْأَحْمَاصُ دَائِمًا (تَتَفَاعَلُ) مَعَ الْقَوَاعِدِ.
- تستند نظريَّة أَرْهِينِيُوس إلى مفهوم التَّعَادُلِ الْمُبِينِ فِي الْمُعَادَلَةِ الْأَيُونِيَّةِ النَّهَائِيَّةِ الْوَارِدَةِ فِي الشَّكْل 22-5.



الشكل 22-5 المُعَادَلَةِ الْأَيُونِيَّةِ النَّهَائِيَّةِ لِلْتَّعَادُلِ.

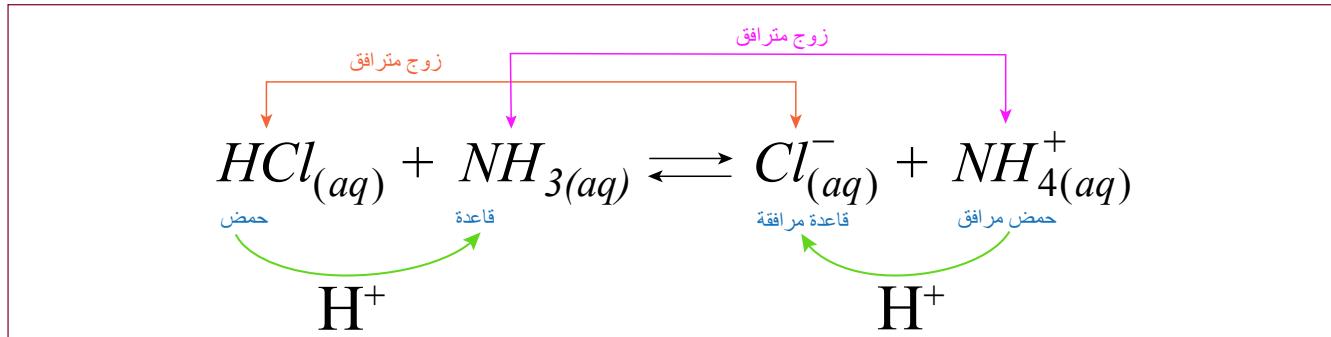
تستند نظريَّة بِرُونْسْتِيد - لُورِي إلى مفهوم تَبَادُلِ الْبِرُوتُونِ (H^+) ، كَمَا هُو مُوضَّحُ فِي الشَّكْل 23-5.



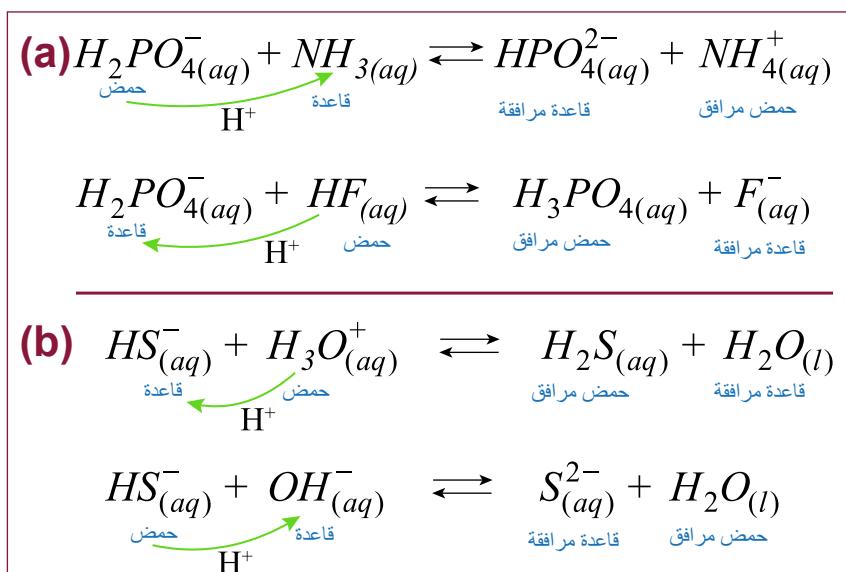
الشكل 23-5 تَبَادُلِ الْبِرُوتُونِ بِحَسْبِ نظريَّة بِرُونْسْتِيد - لُورِي .

الأزواج المترافقه والمواد الأمفوتيه

ينتج عن نظرية برونستييد- لوري مفهوم **الأزواج المترافقه** **Conjugate pairs**. الأزواج المترافقه هي جسيمات تختلف بوجود أيون الهيدروجين أو عدمه. وهي الجسيمات وما تصبح عليه بعد منح بروتون أو استقباله. يكون أحد الجسيمات في الزوج حمض برونستييد- لوري، ويكون الآخر قاعدة برونستييد- لوري في التفاعل العكسي (الشكل 24-5).



الشكل 24-5 أزواج مترافقه حسب نظرية برونستييد- لوري.



الشكل 25-5 السلوك الأمفوتيه (a) أيونات فوسفات ثنائية الهيدروجين ($H_2PO_4^-$),
(b) أيونات كبريتيد الهيدروجين (HS^-).

قد تكون بعض الجسيمات في نظرية برونستييد- لوري حمضًا أو قاعدة، بحسب المادة المُتفاعلة معها. ويقال إن هذه الجسيمات هي **مواد أمفوتيه (مُترددة)** **.Amphoteric (amphiprotic)**

يوضح الشكل 25-5 أمثلة على تفاعلات لمواد أمفوتيه كما في أيونات الفوسفات ثنائية الهيدروجين ($H_2PO_4^-$) وأيونات كبريتيد الهيدروجين (HS^-).

1. ما السمتان اللتان يجب أن تمتلكهما جميع المواد الأمفوتيه؟

2. ليس ضروريًا أن تكون جميع المواد الأمفوتيه ذات شحنة سالبة. ابحث في أمثلة على مواد أمفوتيه مُتعادلة. نقاش نتائجك مع زملائك.

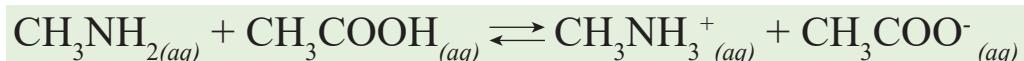
اشرح سبب عدم احتمال أن يكون الجسيم المشحون بشحنة موجبة أمفوتيهًا.



مثال 15

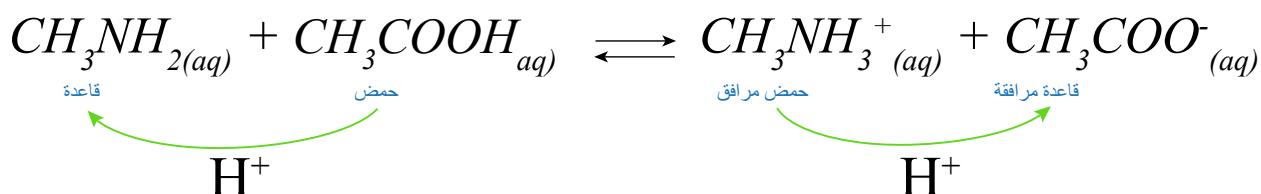


حدّد أحماض وقواعد برونستييد - لوري في التفاعل الانعكاسي الآتي:



الحل

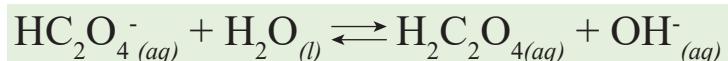
- أحماض برونستييد - لوري هي مواد مانحة للبروتون. في التفاعل الطردي، يمنح CH_3COOH بروتوناً CH_3COO^- . وفي التفاعل العكسي، يمنح CH_3NH_3^+ بروتوناً CH_3NH_2 .
- قواعد برونستييد - لوري مواد مُستقبلة للبروتونات. في التفاعل الطردي، يستقبل CH_3NH_2 بروتوناً CH_3NH_3^+ . وفي التفاعل العكسي، يستقبل CH_3COO^- بروتوناً من CH_3COOH .



مثال 16

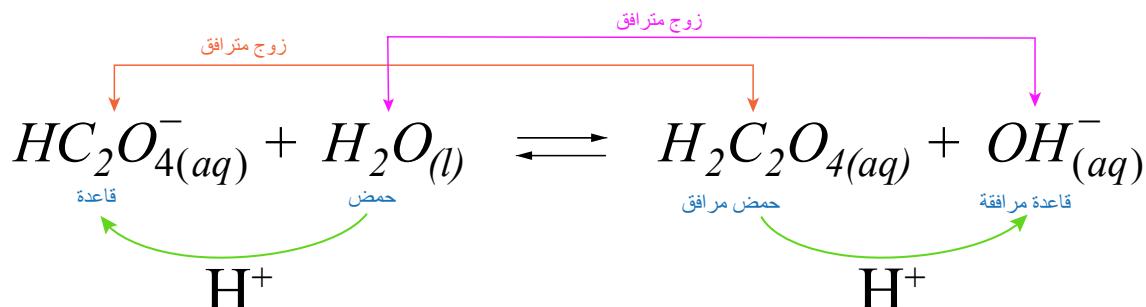


حدّد الأزواج المترافقية في التفاعل الانعكاسي الآتي:

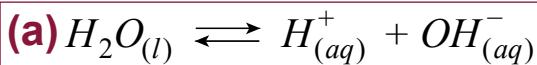


الحل

- يمنح جُزء الماء H_2O بروتوناً H_2O_4^- في التفاعل الطردي ويكون حمضاً، وتصبح القاعدة المترافقية له OH^- .
- يستقبل HC_2O_4^- بروتوناً في التفاعل الطردي لذلك يعتبر قاعدة و ينتج عنه $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ الذي يعد الحمض المترافق له.



التأين الطبيعي (الذاتي) للماء



$$(b) K_w = [H^+] \times [OH^-] = 1.0 \times 10^{-14} \text{ M}^2$$

الشكل 26-5 (a) المعادلة الأيونية التي تصف التأين الطبيعي للماء، و (b) التعبير الذي يصف ثابت تأين الماء النقى عند 25°C.

كما في (الشكل 5-26b)، حيث قيمة K_w عند 25°C تساوى $1.0 \times 10^{-14} \text{ M}^2$.

هذا يعني أن عينة من الماء النقى لا تتكون فقط من جزيئات الماء، بل تحتوى أيضًا على تركيز ضعيف من

$$K_w = [H^+] \times [OH^-] = 1.0 \times 10^{-14} \text{ M}^2$$

$$[H^+] = [OH^-]$$

$$x^2 = 1.0 \times 10^{-14}$$

$$x = 1.0 \times 10^{-7}$$

$$\text{وبالتالي: } [H^+] = [OH^-] = 1.0 \times 10^{-7} \text{ M}$$

الشكل 27-5 في الماء النقى يبلغ تركيز أيونات الهيدروجين وأيونات الهيدروكسيد $1.0 \times 10^{-7} \text{ M}$ عند 25°C.

لذلك إذا أضيف حمض إلى الماء النقى، يزداد تركيز أيونات الهيدروجين. وبالتالي، وفقاً لمبدأ لوشاطيليه سيُزاح اتجاه موضع الاتزان إلى اليسار لاستهلاك بعض أيونات الهيدروجين المضافة، وينخفض وبالتالي تركيز أيونات الهيدروكسيد. ويمكن القول أيضاً وللسبب نفسه إن تركيز أيونات الهيدروجين $[H^+]$ سيُنخفض إذا أضيفت قاعدة إلى الماء النقى.

مثال 17



احسب تركيز أيونات الهيدروجين في محلول مائي يبلغ تركيز أيونات الهيدروكسيد فيه $4.5 \times 10^{-4} \text{ M}$ عند 25°C.

الحل

$$K_w = [H^+] \times [OH^-] = 1.0 \times 10^{-14} \text{ M}^2$$

$$[H^+] = \frac{1.0 \times 10^{-14}}{[OH^-]} = \frac{1.0 \times 10^{-14}}{(4.5 \times 10^{-4})}$$

$$[H^+] = 2.2 \times 10^{-11} \text{ M}$$

استخدم التعبير K_w وقيمة K_w للماء عند 25°C تساوى 1.0×10^{-14} ، لكي تحسب تركيز أيونات الهيدروجين $[H^+]$.

استبدل تركيز أيونات الهيدروكسيد لحساب تركيز أيونات $[H^+]$.

حساب الرقم الهيدروجيني pH

يصف الرقم الهيدروجيني pH كمياً الخاصة الحمضية أو القاعدية للمحلول. ويتم حسابه من خلال سالب لوغاريتم وقاعدته عشرة لتركيز أيون الهيدروجين (المعادلة 1-5). لأنّ pH هو دالة اللوغاريتم السالب، فإنه، بازدياد تركيز أيونات الهيدروجين، تتناقص قيمة الرقم الهيدروجيني. اعلم أننا نستطيع في بعض التطبيقات استخدام الرقم الهيدروكسيلي pOH.

في الماء النقى قيمة تركيز أيونات الهيدروجين عند ${}^{\circ}\text{C}$ تساوى $1.0 \times 10^{-7}\text{M}$ ، لذلك فإن الرقم الهيدروجيني للماء النقى يساوى 7 بحسب المعادلة الآتية:

$$\text{pH} = -\log_{10}[\text{H}^+] = -\log_{10}(1.0 \times 10^{-7}) = 7$$

الرقم الهيدروجيني	pH	pH and pOH	1-5
الرقم الهيدروكسيلي	pOH	$\text{pH} = -\log_{10}[\text{H}^+]$	
(mol/L) تركيز أيونات الهيدروجين H^+	$[\text{H}^+]$	$\text{pOH} = -\log [\text{OH}^-]$	
(mol/L) تركيز أيونات الهيدروكسيد OH^-	$[\text{OH}^-]$	$\text{pH} + \text{pOH} = 14$	

تذكّر أنّ الأحماض والقواعد القوية تتأيّن وتتفّكّر في الماء بنسبة 100%. لذلك، يمكن حساب قيم $[\text{H}^+]$ و $[\text{OH}^-]$ من تركيزات الحمض أو القاعدة القوية في المحاليل. وبالتالي، يمكن حساب الرقم الهيدروجيني للحمض القوي والمحاليل القاعدية القوية من خلال تركيزها.

مثال 18



احسب الرقم الهيدروجيني لمحلول حمض الهيدروكلوريك تركيزه 0.010 M.

الحل

- حمض الهيدروكلوريك حمض قوي. اكتب معادلة التأيّن الموزونة.
- النسبة المولية بين HCl و H^+ هي 1:1. لذلك، فإن $[\text{HCl}] = [\text{H}^+]$.
- استخدم $[\text{H}^+]$ لحساب الرقم الهيدروجيني.

مثال 19



احسب الرقم الهيدروجيني لمحلول HBr تركيزه $7.5 \times 10^{-5}\text{M}$.

الحل

- HBr حمض قوي. اكتب معادلة التأيّن الموزونة.
- النسبة المولية بين HBr و H^+ هي 1:1. لذلك. فإن $[\text{HBr}] = [\text{H}^+]$.
- استخدم $[\text{H}^+]$ لحساب الرقم الهيدروجيني.

مثال 20



احسب الرقم الهيدروجيني لمحلول NaOH تركيزه 0.0060 M .

الحل

- NaOH قاعدة قوية. اكتب معادلة التفكك الموزونة.
 - النسبة المولية بين NaOH و OH^- هي $1:1$. $[\text{NaOH}] = [\text{OH}^-]$ وبالتالي، فإن $[\text{OH}^-] = 0.0060 \text{ M}$.
 - استخدم التعبير K_w لحساب $[\text{H}^+]$ من قيمة $[\text{OH}^-]$.
 - استخدم $[\text{H}^+]$ لحساب الرقم الهيدروجيني.
- $$\text{NaOH}_{(aq)} \rightarrow \text{Na}_{(aq)}^+ + \text{OH}_{(aq)}^-$$
- $$0.0060 \text{ M} \rightarrow 0.0060 \text{ M}$$
- $$[\text{H}^+] = \frac{1.0 \times 10^{-14}}{[\text{OH}^-]} = \frac{1.0 \times 10^{-14}}{(0.0060)}$$
- $$[\text{H}^+] = 1.67 \times 10^{-12} \text{ M}$$
- $$pH = -\log_{10} (1.67 \times 10^{-12})$$
- $$pH = 11.78$$

مثال 21



من خلال التحليل الكمي وجد أن تركيز أيونات الهيدروكسيد في محلول يساوي $5.7 \times 10^{-9} \text{ M}$.

(1) احسب الرقم الهيدروجيني للمحلول. (2) هل محلول حمضي أم قاعدي، أم مُتعادل؟ فسر إجابتك.

الحل

1. استخدم تعبير K_w لحساب $[\text{H}^+]$ من $[\text{OH}^-]$.
 2. لأن الرقم الهيدروجيني هو أقل من 7، فإن هذا يدل على وجود محلول حمضي.
 - قيمة $[\text{H}^+]$ تساوي $(1.67 \times 10^{-6} \text{ M})$ وهي أكبر من قيمة $[\text{OH}^-]$ ($5.7 \times 10^{-9} \text{ M}$). وهذا يشير أيضا إلى أن محلول حمضي.
- $$[\text{H}^+] = \frac{1.0 \times 10^{-14}}{[\text{OH}^-]} = \frac{1.0 \times 10^{-14}}{(5.7 \times 10^{-9})}$$
- $$[\text{H}^+] = 1.74 \times 10^{-6} \text{ M}$$
- $$pH = -\log_{10} (1.74 \times 10^{-6})$$
- $$pH = 5.76$$

قيمة K_w للماء عند 0°C هي $5.13 \times 10^{-13} \text{ M}^2$ وعند 100°C هي $1.14 \times 10^{-15} \text{ M}^2$.

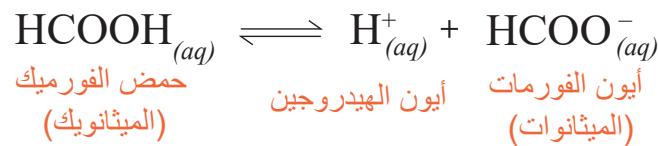


- (1) احسب الرقم الهيدروجيني للماء عند 0°C و 100°C .
- (2) ماذا تستنتج عن قيمة الرقم الهيدروجيني للماء عندما تتغير درجة حرارته عن 25°C ؟

الأهماض والقواعد الضعيفة

تتأين كل من الأحماض القوية، مثل HCl ، وتنفك القواعد القوية، مثل NaOH ، بشكل كامل في الماء. على سبيل المثال، يمتلك محلول حمض HCl تركيزه 1M تركيزاً لأيونات $[\text{H}^+]$ مقداره 1M . أما الأحماض والقواعد الضعيفة فلا تنفك بشكل كامل، وعوضاً عن ذلك، تكون اتزاناً في محلول ويصبح لديها ثابت اتزان يُعرف بثابت اتزان الحمض الضعيف ورمزه K_a .

أفضل مثال على الحمض الضعيف هو حمض الميثانويك (الفورميك) HCOOH ، وهو يوجد بشكل طبيعي في لسعة معظم أنواع النمل (الشكل 28-5). وحمض الفورميك هذا سائل عديم اللون، وله رائحة نفاذة قوية عند درجة حرارة الغرفة، ويُستخدم في الكثير من العمليات الكيميائية الصناعية. معادلة تأين حمض الفورميك هي:



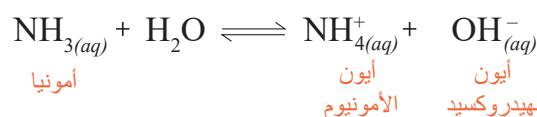
قيمة ثابت الاتزان لحمض الفورميك $k_a = 10^{-4} M$ تساوي 1.8×10^{-4} عند درجة حرارة 25°C ، ويتأين محلول حمض الفورميك، وتركيزه 1M بما نسبته 1.3% تقريباً. لهذا، فإن تركيز أيونات الهيدروجين تكون متساوية لتركيز أيونات الفورمات في محلول، تساوي:

$$[\text{H}^+] = [\text{HCOO}^-] = 0.013 \text{ M}$$

• تأين الأحماض الضعيفة، وتفكّك القواعد الضعيفة بشكل جزئي في محلول.

كما الأحماض الضعيفة، فإن القواعد الضعيفة تتفكّك بشكل جزئي في محلول وتكون متّبّعةً ولديها ثابت اتّزان يعرف بثابت اتّزان القواعد الضعيفة ورمزه K_{at} .

أفضل مثال على القاعدة الضعيفة هو الأمونيا (NH_3). المعادلة الآتية تبين التفكُّك الجزئي لمحلول الأمونيا:



قيمة ثابت التّزان للأمونيا $K = 1.8 \times 10^{-5} \text{ M}^{-2}$ عند درجة حرارة 25°C ، ويتفّكّر محلول الأمونيا تركيزه 1 M ، بما نسبته 0.42% تقريباً، لهذا فإنَّ:

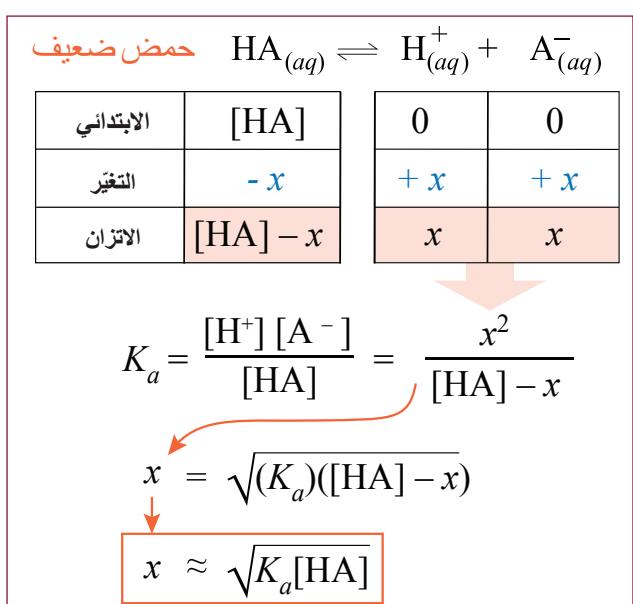
$$[\text{NH}_4^+] = [\text{OH}^-] = 0.0042 \text{ M}$$

يُعدّ الأمونيا جزءاً مهماً من دورة النيتروجين في الطبيعة، ومادة مغذية رئيسة للنباتات، وهو يوجد بشكل شائع في محاليل التنظيف (الشكل 5-29). والأمونيا عديمة اللون، ولها رائحة نفاذة وقوية يمكنها تدمير الأنسجة الموجودة في داخل الأنف والرئتين إذا تم استنشاقها بكمية عالية.



الشكل 29-5 تحتوي المنتجات المستخدمة في تنظيف الزجاج غالباً على الأمونium.

حساب قيمة الرقم الهيدروجيني pH للأحماض الضعيفة



الشكل 5-30 اَتْزَانُ حَمْضٍ ضَعِيفٍ فِي مَحْلُولٍ مَائِيٍّ.

تتأين الأحماس الضعيفة بشكل جزئي فقط في الماء، وتكون قيمة ثابت اتّزامها في الغالب أقل بكثير من (1):

$$K_a \ll 1$$

عند حل مسائل اتزان تحتوي على أحماض ضعيفة، فالحقيقة التي تؤكد أن قيمة K_a تكون صغيرة، تتيح لنا إجراء عملية تبسيط للحسابات. افترض أن لديك حمضًا ضعيفًا، HA، يتآثر إلى (H^+) ، و (A^-) (الشكل 30-5)، حيث يبين جدول التغيير الابتدائي للاتزان تركيز الأيونات عند الاتزان (x)، فعندما يكون: $1 << K_a$

$$x \ll [\text{HA}]$$

وس يكون لدينا التقرب الآتي:

$$[\text{H}^+] = [\text{A}^-] \approx \sqrt{K_a[\text{HA}]}$$

مثال 22

احسب الرقم الهيدروجيني لمحلول حمض الأسيتيك (CH_3COOH) بتركيز 0.15 M إذا علمت أن K_a له قيمة $1.8 \times 10^{-5} \text{ M}$.

الحل

لذلك، يمكن استخدام معادلة التقريب . معادلة تأكيد هذا الحمض في الماء هي:

$$\text{CH}_3\text{COOH} \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{CH}_3\text{COO}^-$$



استخدم معادلة التقريب لحساب تركيز أيونات الهيدروجين $[H^+]$:

$$[\text{H}^+] \approx \sqrt{K_a[\text{HA}]} = \sqrt{(1.8 \times 10^{-5})(0.15)} = 0.0016 \text{ M}$$

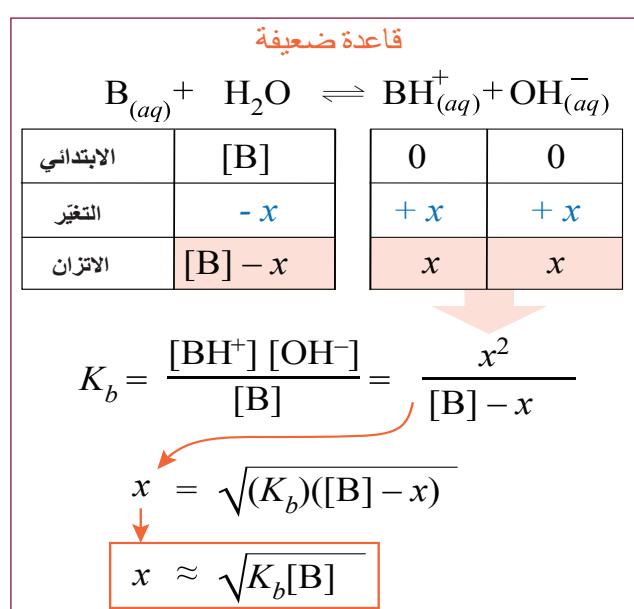
استخدم $[H^+]$ من أجل حساب الرقم الهيدروجيني.

$$\text{pH} = -\log_{10}[\text{H}^+] = -\log_{10}(0.0016) = 2.80$$

في المثال 25 ، افترض أن كمية حمض الأسيتيك المتأينة (x) كانت ضئيلة بالمقارنة مع التركيز الابتدائي. لولم يتم مثل هذا الافتراض، لكان تركيز حمض $\text{CH}_3\text{COOH}_{(aq)}$ عند الاتزان مساوياً لـ «0.15» ، ول كانت الصيغة التريبيعية مطلوبة لحل قيمة «x». حل هذا المثال باستخدام جدول ICE في الشكل 5-30 والصيغة التريبيعية، وتحقق من صحة الافتراض.



حساب قيمة الرقم الهيدروجيني pH للقواعد الضعيفة



الشكل 31-5 اتزان قاعدة ضعيفة في محلول مائي.

تشبه القواعد الضعيفة الأحماض الضعيفة في تفكّكها بشكل جزئي في محلول. ويمكننا أيضًا استخدام التقريب نفسه لإيجاد قيمة pH من ثابت الاتزان K_b من (الشكل 31-5) تركيز أيونات (OH⁻) عند الاتزان (x)، فعندما يكون: $x \ll [B]$ يكون: $K_b \ll 1$

وسيكون لدينا التقريب الآتي:

$$[OH^-] = [BH^+] \approx \sqrt{K_b[B]}$$

ولتحديد قيمة الرقم الهيدروجيني pH، نستخدم ثابت تأين الماء على النحو الآتي:

$$K_w = [OH^-] \times [H^+] = 1 \times 10^{-14} \text{ M}^2$$

عندما يكون:

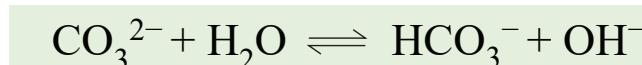
$$[H^+] = \frac{1 \times 10^{-14} \text{ M}}{[OH^-]}$$

ملاحظة: لتسهيل الحسابات يمكن هنا استخدام المعادلة: $pH + pOH = 14$

مثال 23



تُعد الكربونات أيونًا مهمًا في كيمياء كل من المحيطات والكائنات الحية. احسب قيمة الرقم الهيدروجيني pH لمحلول مائي لأيونات الكربونات (CO₃²⁻) تركيزه 0.5 M، إذا علمت أن قيمة K_b للكربونات تساوي 2.1×10^{-4} .



الحل

احسب تركيز [OH⁻] باستخدام تقريب القاعدة الضعيفة كما يأتي:

$$[OH^-] \approx \sqrt{K_b[B]} = \sqrt{(2.1 \times 10^{-4})(0.5)} = 1.03 \times 10^{-2} \text{ M}$$

احسب تركيز [H⁺] باستخدام معادلة تأين الماء كما يأتي:

$$[H^+] = \frac{1 \times 10^{-14} \text{ M}}{[OH^-]} = \frac{1 \times 10^{-14}}{1.03 \times 10^{-2} \text{ M}} = 9.71 \times 10^{-13} \text{ M}$$

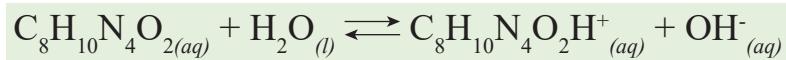
احسب قيمة pH من تركيز [H⁺] كما يأتي:

$$pH = -\log_{10}[H^+] = -\log_{10}(9.71 \times 10^{-13}) = 12.0$$

مثال 24



الكافيين، $C_8H_{10}N_4O_2$ ، قاعدة ضعيفة يكون ثابت اتّزانها $K_b = 4.0 \times 10^{-11}$. احسب الرقم الميدروجيني لمحلول تركيزه $2.07 \times 10^{-3} M$ من الكافيين. معادلة الاتزان هي:



الحل

احسب تركيز $[OH^-]$ باستخدام تقرير القاعدة الضعيفة كما يأتي:

$$[OH^-] \approx \sqrt{K_b[B]} = \sqrt{(4 \times 10^{-11})(2.07 \times 10^{-3})} = 2.88 \times 10^{-7} M$$

احسب تركيز $[H^+]$ باستخدام معادلة تأين الماء كما يأتي:

$$[H^+] = \frac{1 \times 10^{-14} M}{[OH^-]} = \frac{1 \times 10^{-14} M}{2.88 \times 10^{-7} M} = 3.48 \times 10^{-8} M$$

احسب قيمة pH من تركيز $[H^+]$ كما يأتي:

$$pH = -\log_{10}[H^+] = -\log_{10}(3.48 \times 10^{-8}) = 7.46$$

مثال 25



قيمة الرقم الميدروجيني لمحلول أسيتات الصوديوم (CH_3COONa) هي 9.2. تتفَكَّك أسيتات الصوديوم بالكامل في المحلول لتنتج أيونات الأسيتات وأيونات الصوديوم. حدد التركيز الابتدائي لأسيتات الصوديوم علماً أن معادلة اتزان تفاعل أيونات الأسيتات في الماء هي :



$$K_b = 5.56 \times 10^{-10}$$

الحل

احسب تركيز $[H^+]$ من قيمة pH :

$$pH = -\log_{10}[H^+] \rightarrow [H^+] = 10^{(-pH)} = 10^{(-9.2)} = 6.31 \times 10^{-10} M$$

احسب تركيز $[OH^-]$ باستخدام معادلة تأين الماء كما يأتي:

$$[OH^-] = \frac{1 \times 10^{-14} M}{[H^+]} = \frac{1 \times 10^{-14} M}{6.31 \times 10^{-10} M} = 1.58 \times 10^{-5} M$$

احسب التركيز الابتدائي لأيونات الأسيتات $[CH_3COO^-]$ باستخدام معادلة التقرير للقاعدة الضعيفة. هذا التركيز هو التركيز الابتدائي لأسيتات الصوديوم بحسب النسب المولية لمعادلة تفكك أسيتات الصوديوم في الماء. $[CH_3COONa] = [CH_3COO^-]$

$$[OH^-] \approx \sqrt{K_b[B]} \rightarrow [B] = \frac{[OH^-]^2}{K_b} = \frac{(1.58 \times 10^{-5})^2}{(5.56 \times 10^{-10})} = 0.449 M$$

pK_b و pK_a

إذا كانت قيمة الرقم الهيدروجيني pH تساوي سالب لوغاریتم تركيز $[H^+]$ ، فإنّ من المفيد الحصول على كميات لوغاریتمية متشابهة لوصف ثابت كلّ من الحمض الضعيف، والقاعدة الضعيفة. وكما هو مُعرّف في المعادلة 2-5، فإن قيمة pK_a تساوي اللوغاریتم السالب لقيمة ثابت الاتزان K_a ، وقيمة pK_b تساوي اللوغاریتم السالب لقيمة ثابت الاتزان K_b .

		pK_b و pK_a	2-5
ثابت الاتزان للحمض	K_a	$pK_a = -\log_{10} K_a$	$K_a = 10^{(-pK_a)}$
ثابت الاتزان لقاعدة	K_b	$pK_b = -\log_{10} K_b$	$K_b = 10^{(-pK_b)}$

وبسبب سلوك اللوغاریتم، سنلاحظ ما يأتي:

- عندما تزداد قيمة pK_a ، فذلك يعني أن قيمة K_a تقلّ، وهذا يدلّ على حمض أضعف.
- عندما تزداد قيمة pK_b ، فذلك يعني أن قيمة K_b تقلّ، وهذا يدلّ على قاعدة أضعف.

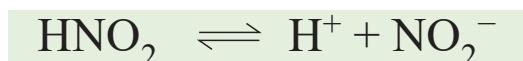
إن قيم K_w ، K_a ، K_b ، pK_a ، pK_b جميعها مرتبطة بثابت تأين الماء، والذي يساوي $1.0 \times 10^{-14} M^2$ عند درجة حرارة 25°C. هذه العلاقة تأخذ شكلين مهمين، هما:

$$1. K_w = K_b \times K_a$$

$$2. pK_a + pK_b = 14$$

مثال 26

إذا علمت أنّ قيمة $pK_a = 3.40$ لتأئن حمض النيتروز (HNO_2)، احسب قيمة الرقم الهيدروجيني pH لمحلول من هذا الحمض تركيزه 1.0 M.



ملاحظة: يتأئن حمض النيتروز بسرعة كبيرة نسبياً، كما أنه حمض ضعيف ويعدّ مادة متفاعلة مهمة للغاية في كيمياء الأوزون الموجود في طبقة الغلاف الجوي العلوية، ويختلف عن حمض النيتريل (HNO_3) الذي يُعدّ حمضاً قوياً.

الحل

احسب قيمة ثابت الاتزان K_a من قيمة pK_a كما يأتي:

$$pK_a = -\log_{10} K_a \rightarrow K_a = 10^{(-pK_a)} = 10^{(-3.40)} = 3.98 \times 10^{-4} M$$

احسب تركيز $[H^+]$ باستخدام تقرّيب الحمض الضعيف كما يأتي:

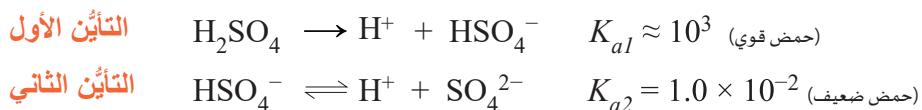
$$[H^+] \approx \sqrt{K_a [HA]} = \sqrt{(3.98 \times 10^{-4})(1.0)} = 0.020 M$$

احسب قيمة pH من تركيز $[H^+]$ كما يأتي:

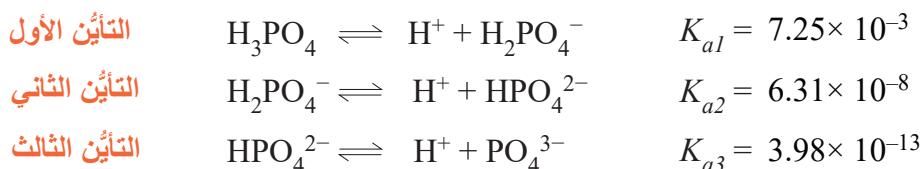
$$pH = -\log_{10} [H^+] = -\log_{10} (0.020) = 1.70$$

الأحماض عديدة البروتونات

يمكن أن يتكون الحمض عديد البروتونات عدة مرات ليسهم في أكثر من أيون واحد من أيونات H^+ لكل جزيء واحد من هذا الحمض، لكل عملية تأين قيمة ثابت انتزان K_a مختلفة عن الأخرى. أفضل مثال على ذلك هو حمض الكبريتيك (H_2SO_4) والذي يُعد ثنائي البروتون، وهذا يعني أنه يحتوي على أيونين من أيونات H^+ لكل جزيء منه. وكما هو في معظم الأحماض عديدة البروتونات، فإن قيمة K_a تكون مختلفة في كل عملية تأين، بحيث يكون لعملية التأين الأولى قيمة K_a الأكبر، في الوقت الذي تكون فيه تفاعلات التأين اللاحقة أضعف ولها قيمة K_a أقل.



ومن أفضل الأمثلة على حمض ضعيف عديد البروتونات هو حمض الفوسفوريك (H_3PO_4). حمض الفوسفوريك هذا ثلاثي البروتونات، وهذا يعني أن له ثلاثة عمليات تأين، وهي على النحو الآتي:



مثال 27



حدّد قيمة الرقم الهيدروجيني pH لمحلول حمض الكبريتيك (H_2SO_4) تركيزه M 0.02. علماً أن ثابت التأين الأول والثاني على التوالي لحمض الكبريتيك هما: $K_{a1} = 10^3$ و $K_{a2} = 1.0 \times 10^{-2}$.

الحل

لحل المسائل التي تحتوي على حمض عديد البروتونات، نفترض حدوث كل تأين بشكل منفصل، ثم نجمع تركيز (H^+) الكلي من كل عملية تأين لإيجاد قيمة الرقم الهيدروجيني pH.

يُعد H_2SO_4 حمضاً ثنائياً البروتونات، يكون فيه التأين الأول كبيراً، فينتج عن التأين الأول ما يأتي:

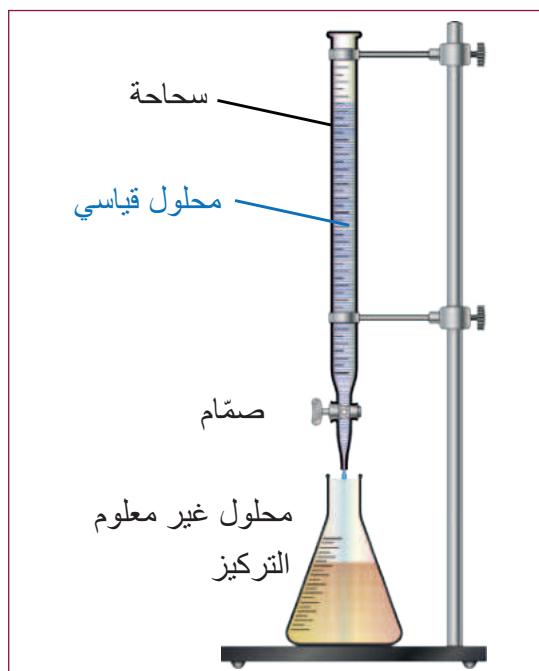
$$[H^+] = [HSO_4^-] = 0.02 \text{ M.}$$

أما التأين الثاني فيكون ضعيفاً، فنستخدم تقريب الحمض الضعيف لإيجاد تركيز $[H^+]$ كما يأتي:

$$[H^+] \approx \sqrt{K_{a2}[HA]} = \sqrt{(1.0 \times 10^{-2})(0.02)} = 0.014 \text{ M}$$

$$pH = -\log_{10}[H^+] = -\log_{10}(0.02 + 0.014) = 1.46$$

معاييرة الحمض والقاعدة



الشكل 32-5 أدوات المعايرة الموجودة في المختبر.

تُعد عملية **معاييرة الحمض والقاعدة** إجراء مختبرياً يُستخدم لتحديد تركيز غير معلوم لمحلول حمضي أو قاعدي باستخدام محلول قاعدي أو حمضي معلوم التركيز (محلول قياسي).

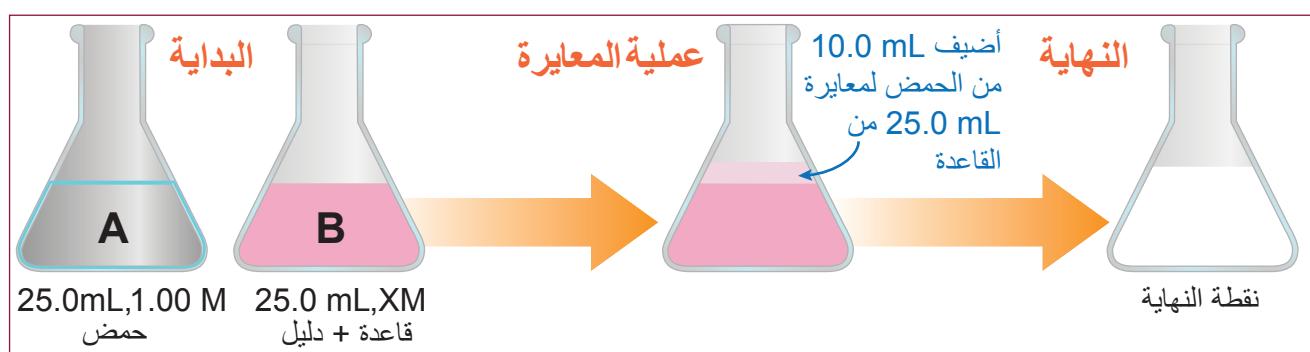
ولإيجاد تركيز غير معلوم لقاعدة، نحدد حجم الحمض ذي التركيز المعلوم، والذي سوف نستخدمه لمعادلة كمية معلومة من القاعدة.

ولإيجاد تركيز غير معلوم لحمض، نحدد حجم القاعدة ذات التركيز المعلوم، والذي سوف نستخدمها لمعادلة كمية معلومة من الحمض.

أما محلول القياسي، فهو محلول ذو التركيز المعلوم، حيث تُستخدم **السحاحة Burette** لقياس حجم هذا محلول القياسي بدقة (الشكل 32-5).

ـ عملية معايرة الحمض والقاعدة عبارة عن عملية مخبرية تُستخدم لتحديد تركيز محلول حمضي أو محلول قاعدي.

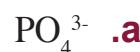
افترض أنك تستخدم حمضاً معلوم التركيز (A) لمعاييرة قاعدة غير معلومة التركيز (B) (الشكل 33-5)، حيث يُضاف الحمض إلى القاعدة إلى أن يتم الوصول إلى **نقطة التكافؤ Equivalence point**. عند هذه النقطة يكون عدد مولات (H^+) مساوياً تماماً لعدد مولات (OH^-). في الغالب، يُستخدم الدليل الذي يتغير لونه عند الوصول إلى **نقطة نهاية التفاعل End point**.



الشكل 33-5 نموذج لعملية معايرة الأحماض والقواعد.

عند الوصول إلى **نهاية المعايرة**، تكون قد حددنا حجم الحمض المضاف وتركيزه، وهذا يخبرنا بعدد مولات (H^+) التي أضيفت. ولأنَّ كل 1 mole من (H^+) يعمل على معادلة 1 mole من (OH^-)، فإنَّ عدد مولات (H^+) يخبرنا بعدد مولات (OH^-) الموجودة في محلول القاعدة غير المعلومة. ومن هذه المعلومات والحجم، يمكننا حساب التركيز غير المعلوم للقاعدة بدقة.

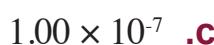
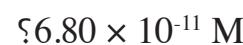
1. أيٌّ من الآتي هو الحمض المُرافق لـ HPO_4^{2-} ؟



2. أيٌّ من تراكيز أيون الهيدروجين (H^+) الآتية يُشير إلى محلول ذي الرقم الهيدروجيني الأصغر؟



3. كم يبلغ تركيز أيون الهيدروجين (H^+) محلول له تركيز أيون الهيدروكسيد (OH^-) يساوي



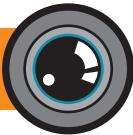
4. أيٌّ من الآتي يمثل قيمة الرقم الهيدروجيني لمحلول من حمض أحادي البروتون تركيزه



5. كم يبلغ الرقم الهيدروجيني لمحلول له pOH يساوي 4.05؟

6. احسب الرقم الهيدروجيني لمحلول قاعدة ضعيفة أحادية الهيدروكسيد تركيزها 0.084 M وثابت تفكّكها $K_b = 2.1 \times 10^{-7}$





هنري لويس لو شاتيليه 1850-1936 Henry Louis Le Chatelier



الشكل 34-5 هنري لويس لو شاتيليه.

ولد هنري لويس لو شاتيليه (الشكل 34-5) في باريس بتاريخ 8 أكتوبر 1850 لوالديه لويس ولويس لو شاتيليه. كان له أربعة إخوة وأخت واحدة. قامت والدتهم بتربيتهم، كما يصفها لو شاتيليه، في «نظام صارم للغاية»، حافظ عليه في منهجه للبحث العلمي. كان والده مهندس مواد. وعلى الرغم من أن هنري قد درس الهندسة في فرنسا واهتم بحل المشكلات الصناعية، فإنه اختار تدريس الكيمياء. تزوج من جينيفيف نيكولا، وأنجب منها سبعة أولاد.

رغم شهرته التي حصدتها جراء عمله في الاتزان ومبدأ لو شاتيليه، فإنه جرب أيضًا إنتاج الأمونيا، وأجرى بحثاً مكثفًا في علم المعادن. قضى وقتاً طويلاً مهندساً مستشاراً لشركة فرنسية تُعرف الآن باسم Lafarge Cement لافاج سمنت. وقد جمع بين معرفته في علم المعادن والبحث في الأسمنت لتطوير مزدوجات حرارية أكثر فعالية أو دقة (الشكلان 35-5a و 35-5b) يمكنها قياس درجات الحرارة المرتفعة. قاد عمله على المزدوجات الحرارية لتحقيق تقدُّم كبير في مجال قياس الحرارة، حيث تقاد درجة الحرارة عن مسافة باستخدام الإشعاع الحراري (الشكل 35-5c). وجدير بالذكر أن جميع تصاميم المزدوجات الحرارية الحديثة ومقاييس الحرارة عن بعد (بيرومترات) ترجع جزئياً إلى عمله في هذا المجال.



الشكل 35-5 (a) مزدوج حراري (b) مزدوج حراري مثبت في وعاء تفاعل (c) بيرومتر يُستخدم لقياس درجة حرارة الجسم.

قال لو شاتيليه لاحقاً إن خطأه الفادح أنه لم يواصل الاستمرار في بحثه في إنتاج الأمونيا الذي أتقنه هابر لاحقاً.

الوحدة 5

مراجعة الوحدة

الدرس 5-1: مفهوم الاتزان وثابت الإتزان (K_{eq})

- لكي يتحقق التفاعل **الاتزان Equilibrium**, يجب أن يكون قابلاً للانعكاس، ويجرى في نظام مغلق.
- تكون التفاعلات عند الاتزان متوجهة إلى اليسار أو إلى اليمين.
- يصف **قانون الاتزان الكيميائي Law of chemical equilibrium** كيفية حساب ثابت الاتزان (K). وتنستخدم ثوابت الاتزان أيضاً في حساب تراكيز المواد المتفاعلة والناجدة عند الاتزان.

الدرس 5-2: مبدأ لو شاتيليه

- يستخدم مبدأ لو شاتيليه **Le Chatelier's principle** لتوقع إزاحة موضع اتجاه الاتزان الناتج عن المؤثرات الناجمة عن التغييرات في التركيز أو درجة الحرارة أو الضغط (تغير الحجم) في التفاعلات الغازية.

الدرس 5-3: الإتزان في المحاليل الحمضية والقواعدية

- من خلال نظرية برونستيد-لوري Brønsted-Lowry, تُعد **الأزواج المترافق Conjugate pairs** جزيئات يختلف بعضها عن بعض بوجود أيون الهيدروجين (H^+).
- المواد الأمفوتيرية Amphoteric substances** هي جزيئات قد تكون حمض أو قاعدة برونستيد-لوري.
- معايير الأحماض والقواعد Acid-base titration** هي إجراء مخبري يستخدم لتحديد تركيز المحاليل الحمضية أو القاعدية.
- تُستخدم **السحاحة Burette** في معايرة الأحماض والقواعد لقياس حجم السوائل بدقة.
- تُستخدم أدلة الأحماض والقواعد **Acid-base indicators** للإشارة إلى **نقطة نهاية Endpoint** المعايرة التي تزامن مع **نقطة تكافؤ Equivalent point** التفاعل.
- الرقم الهيدروجيني للمحلول هو قياس حموضته النسبية.
- قييم K_a و K_b هي ثوابت الاتزان للأحماض والقواعد على التوالي.
- K_w هو ثابت التأين الطبيعي للماء.
- يمكن توقع الرقم الهيدروجيني النسبي للمحلول متعادل من قوة الحمض والقاعدة اللذين يتفاعلان معًا.
- تتغير أدلة الأحماض والقواعد الواحدة عند مدى مختلف من الرقم الهيدروجيني.
- يجب أن يكون pK_{In} لدليل الأحماض والقواعد يساوي تقريباً الرقم الهيدروجيني للمحلول المتعادل في معايرة الأحماض والقواعد.
- يُعبر عن ثابت تفكك الدليل بالمعادلة الآتية:

$$K_{In} = \frac{[H_3O^+] \times [In^-]}{[HIn]}$$

الوحدة 5

مراجعة الوحدة

ملخص العلاقات الرياضية التي تتضمن الرقم الهيدروجيني pH

$pH = -\log_{10} [H^+]$	الرقم الهيدروجيني pH
$pOH = -\log_{10} [OH^-]$	الرقم الهيدروكسيلي pOH
$pH + pOH = 14$	العلاقة بين pH و pOH عند درجة حرارة 25°C
$K_w = [H^+] \times [OH^-] = 1 \times 10^{-14}$	التأين الطبيعي للماء عند درجة حرارة 25°C
$[H^+] \approx \sqrt{K_a [HA]}$ إذا كان $K_a \ll I$ $HA_{(aq)} \rightleftharpoons H_{(aq)}^+ + A_{(aq)}^-$ والمعادلة	حساب تركيز أيون الهيدروجين للحمض الضعيف (تقريبي)
$[OH^-] \approx \sqrt{K_b [B]}$ إذا كان $K_b \ll I$ $B_{(aq)}^- + H_2O \rightleftharpoons BH_{(aq)}^+ + OH_{(aq)}^-$ والمعادلة	حساب تركيز أيون الهيدروكسيد للقاعدة الضعيفة (تقريبي)
$pK_a = -\log_{10} K_a$ $K_a = 10^{(-pK_a)}$	pK_a
$pK_b = -\log_{10} K_b$ $K_b = 10^{(-pK_b)}$	pK_b
$K_a \times K_b = 1 \times 10^{-14}$ $pK_a + pK_b = 14$	العلاقات بين K_a , K_b , pK_a , pK_b عند درجة حرارة 25°C للحمض وقاعدته المرافق أو للقاعدة وحمضها المرافق.

اختيار من متعدد

1. ما الشرط اللازم لوصول تفاعل إلى حالة اتّزان؟ 
- a. التفاعل قابل للانعكاس والنظام مغلق.
 - b. التفاعل غير قابل للانعكاس والنظام مغلق.
 - c. التفاعل قابل للانعكاس والنظام غير مغلق.
 - d. التفاعل غير قابل للانعكاس والنظام غير مغلق.
2. أيٌّ مما يأتي يصف نظاماً في حالة اتّزان؟ 
- a. تتساوى كمّيات المواد المُتفاعلة والناتجة.
 - b. تتساوى سرعة التفاعلات الطردية والعكسية.
 - c. تتّصف سرعة التفاعلات الطردية والعكسية بأنها بطيئة.
 - d. تتوقف التفاعلات الطردية والعكسية عن الحدوث عند الوصول إلى حالة اتّزان.
3. أيٌّ من الجمل الآتية تُعبّر بشكل صحيح عن نظام متزن يقترب من الاكتمال تقرّباً؟ 
- a. يحدث التفاعل الطردي فقط.
 - b. يُزاح اتجاه الاتّزان لدرجة كبيرة إلى اليسار.
 - c. يُزاح اتجاه الاتّزان لدرجة كبيرة إلى اليمين.
 - d. التفاعل الطردي أسرع من التفاعل العكسي.
4. ماذا يحدث إذا ارتفعت درجة الحرارة لنظام في حالة اتّزان؟ 
- a. يصبح التفاعل أكثر برودة.
 - b. يصبح التفاعل الماصل للحرارة أسرع، ويصبح التفاعل الطارد للحرارة أبطأ.
 - c. يصبح التفاعل الماصل للحرارة أبطأ ويصبح التفاعل الطارد للحرارة أسرع.
 - d. تزداد سرعة كل من التفاعل الطردي والتفاعل العكسي، ولكن التفاعل الماصل للحرارة سيكون أسرع من التفاعل الطارد للحرارة.
5. ماذا يحدث لكمّيات المادة المُتفاعلة B والمادة الناتجة D إذا أُزيل بعض من الناتج C من هذا النظام؟ 
- $$A + B \rightleftharpoons C + D$$
- a. ستزداد كمّيات كلّ من B و D.
 - b. ستنخفض كمّيات كلّ من B و D.
 - c. ستنخفض كمّيات B وتزداد كمّيات D.
 - d. ستزداد كمّيات B وتنخفض كمّيات D.



6. أيٌ ما يأتي يُعرف بشكل صحيح ثابت الاتزان (K_{eq})؟ 
- .a. مجموع تراكيز المواد المتفاعلة في البسط ومجموع تراكيز النواتج في المقام.
 - .b. مجموع تراكيز النواتج في البسط، ومجموع تراكيز المواد المتفاعلة في المقام.
 - .c. حاصل ضرب تراكيز المواد المتفاعلة في البسط، وحاصل ضرب تراكيز النواتج في المقام.
 - .d. حاصل ضرب تراكيز النواتج في البسط، وحاصل ضرب تراكيز المواد المتفاعلة في المقام.
7. ما الذي يصح في دور معاملات الاتزان لمعادلة كيميائية في تعبير ثابت الاتزان K_c ? 
- .a. لا تُستخدم المُعَامِلات في التعبير.
 - .b. تُرفع التراكيز إلى قوة مُعَامِلاتها.
 - .c. تُقسم المُعَامِلات على تراكيز الأنواع الخاصة بكل منها.
 - .d. تُضرب المُعَامِلات في تراكيز الأنواع الخاصة بكل منها.
8. أي مما يأتي ينطبق على تعبير ثابت الاتزان لنظام تكون جميع مكوناته هي مواد غازية؟ 
- .a. يمكن استخدام التراكيز المولية فقط، ويجب استخدام الوحدة mol/L.
 - .b. يمكن استعمال الضغط الجُزئي بوحدات الضغط الجوي أو التركيز بوحدة mol/L.
 - .c. يمكن استخدام الضغوط الجُزئية فقط، ويجب استخدام وحدات الضغط الجوي.
 - .d. يمكن استخدام الضغوط الجُزئية فقط، ولكن يمكن أن تكون الوحدة بأي من وحدات الضغط.
9. إلام يُشير ثابت الاتزان ذو القيمة الصغيرة؟ 
- .a. [المُتَفَاعِلات] < [النواتج]
 - .b. [المُتَفَاعِلات] > [النواتج]
 - .c. [المُتَفَاعِلات] = [النواتج]
 - .d. التفاعل الطردي قريب من الاكتمال.
10. أيٌ مما يأتي هو القاعدة المرافقـة لـ $(\text{HC}_2\text{O}_4^-)$? 
- | | |
|-------------------------------------|--------------------------------|
| $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$.c | $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$.a |
| $\text{HC}_2\text{O}_4^{2-}$.d | HC_2O_4 .b |
11. أيٌ من مجموعات الجسيمات الآتية توجد جميعها في الماء النقي؟ 
- | | |
|--|---|
| H^+ و H_2O .c | H_2O و OH^- .a |
| OH^- و H^+ و H_2O .d | OH^- و H^+ .b |



12. أيُّ مما يأتي ينطبق على K_w الماء؟

- .a $K_w = [H^+] \times [OH^-]$ وتتغير قيمته مع تغيير درجة الحرارة.
- .b $K_w = [H^+] \div [OH^-]$ وتتغير قيمته مع تغيير درجة الحرارة.
- .c $K_w = [H^+] \div [OH^-]$ وقيمتها ثابتة مهما اختلفت درجة الحرارة.
- .d $K_w = [H^+] \times [OH^-]$ وقيمتها ثابتة مهما اختلفت درجة الحرارة.



13. أيُّ مما يأتي يمثل قيمة pH محلول حمض HBr تركيزه $M \times 10^{-5}$ ؟

- .a 4.2
- .b 4.5
- .c 5.8
- .d 9.8



14. ما نوع محلول الذي يتكون عند تعاُدُل حمض ضعيف مع قاعدة قوية؟

- .a قاعدي
- .b حمضي
- .c مُتعادل
- .d نوع محلول يعتمد على قيمة K_a و K_b .

أسئلة الإجابات القصيرة

الدرس 5-1: مفهوم الاتزان و ثابت الاتزان K_{eq}



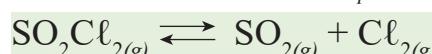
15. اكتب تعبير K_p للتفاعل الممثل بالمعادلة الآتية :



16. صُفِّر، من حيث كميات المواد المتفاعلة والنتاجة، ما تعنيه إزاحة موضع الاتزان نحو اليمين.



17. احسب قيمة ثابت الاتزان K_p لحالة الاتزان الآتية عند درجة حرارة $K = 500$:



إذا كان وعاء التفاعل يحتوي في البداية على $SO_2Cl_{2(g)}$ فقط عند ضغط جُزئي يساوي 0.444 atm ، وأصبح الضغط الجُزئي عند الاتزان لكلتا المادتين الناتجتين 0.00233 atm .

تقويم الوحدة

18. اذكر إن كانت كل قيمة من قيم ثوابت الاتزان الآتية، تشير إلى تفاعل يحدث له ازاحة إلى اليسار، أو نحو اليمين، أو لا يحدث له أي ازاحة.

2.8 $\times 10^{-9}$.a

1.0 $\times 10^{34}$.b

7.7 $\times 10^1$.c

6.1 $\times 10^{-11}$.d

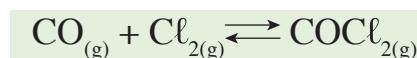
8.3 $\times 10^{15}$.e

0.233 .f



الدرس 5-2: مبدأ لوشاتيليه

19. بالنظر إلى المعادلة:



إلى أي اتجاه يُزاح موضع الاتزان في النظام إذا تم سحب غاز الكلور (Cl₂) منه؟ وماذا سيحدث لتركيز غاز أول أكسيد الكربون في هذه الحالة؟

20. في نظام متزن مبين بالمعادلة الكيميائية الآتية: $\text{PCl}_{5(g)} + 87.9 \text{ kJ} \rightleftharpoons \text{PCl}_{3(g)} + \text{Cl}_{2(g)}$ ما هو اتجاه إزاحة موضع الاتزان إذا:

a. انخفضت درجة الحرارة.

b. أُضيفت كمية من غاز Cl₂ إلى النظام.

c. سُحبت كمية من PCl₃ من النظام.

d. ازداد حجم النظام.



21. إذا أُضيف فلز никель (Ni) إلى الاتزان الآتي: $\text{Ni}(\text{CO})_{4(aq)} \rightleftharpoons \text{Ni}_{(s)} + 4 \text{ CO}_{(g)}$ ، فما اتجاه إزاحة موضع الاتزان؟ وماذا سيحدث لتركيز غاز أول أكسيد الكربون (CO)؟



22. في النظام المتزن المبين في المعادلة الآتية: $\text{N}_{2(g)} + \text{O}_{2(g)} \rightleftharpoons 2 \text{ NO}_{(g)}$ ، ما اتجاه إزاحة موضع الاتزان إذا ازداد حجم الوعاء؟ ما الذي سيحدث لتركيز غاز النيتروجين N₂؟



الدرس 5-3: الاتزان في المحاليل الحمضية و القاعدية

23. عَرَفْ حمض برونيستيد - لوري وقاعدته. 

24. ما هما الحمض والقاعدة المُرافِقان للماء؟ 

25. مستخدماً المعادلة الآتية: $\text{HCHO}_{2(aq)} + \text{PO}_{4}^{3-}_{(aq)} \rightleftharpoons \text{CHO}_{2-}^{(aq)} + \text{HPO}_{4}^{2-}_{(aq)}$, حدد أحماض برونيستيد-لوري وقواعدة في التفاعل الطردي والتفاعل العكسي، ثم حدد مجموعتين من الأزواج المترافقية.

26. يُعدّ أيون الكبريتات الهيدروجينية HSO_4^- أيوناً أمفوتيرياً. 

a. اكتب صيغة الحمض المُرافِق الخاص به.

b. اكتب صيغة قاعدته المُرافِقة.

27. إذا أعطيت التفاعل الانعكاسي الآتي: $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{S} \rightleftharpoons \text{NH}_4^+ + \text{HS}^-$ 

a. حدد أحماض برونيستيد-لوري وقواعدة في التفاعل الطردي والتفاعل العكسي.

b. حدد مجموعتين من الأزواج المترافقية.

28. احسب الرقم الهيدروجيني pH لمحلول 0.00061 M من حمض الهيدروكلوريك (HCl) القوي.

29. كم يبلغ تركيز أيون الهيدروكسيد (OH^-) لمحلول إذا كان تركيز أيون الهيدروجين فيه $2.7 \times 10^{-1} \text{ M}$ ؟ 

30. كم يبلغ الرقم الهيدروجيني لمحلول فينول ($\text{HC}_6\text{H}_5\text{O}$) تركيزه 0.037 M، إذا علمت أن قيمة

ثابت اتّزان الحمض K_a للفينول يساوي 1.3×10^{-10} . 

31. ما الرقم الهيدروجيني لمحلول هيدروكسيل أمين (القاعدة الضعيفة) (HONH_2) تركيزه 0.07 M ؟ ثابت اتّزان القاعدة: $K_b = 1.1 \times 10^{-8}$. 



الوحدة 6

حساب التغييرات في المحتوى الحراري باستخدام قانون هس

Calculation of Enthalpy changes using Hess's Law

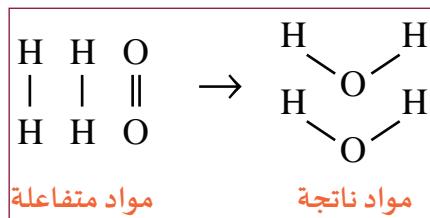
في هذه الوحدة

C1209

الدرس 6-1: المحتوى الحراري

مقدمة الوحدة

يتضمن كل تفاعل كيميائي عملية يتم فيها تبادل للطاقة. في الوقت الذي تطلق فيه بعض التفاعلات، كالاحتراق، طاقة محددة، فإن بعض التفاعلات الأخرى، كالتمثيل الضوئي، تحتاج إلى تزويدها بالطاقة. تعرض هذه الوحدة بعض التفاصيل عن كمية الطاقة اللازمة لحدوث التفاعلات، وإلى أين ستذهب هذه الطاقة.



الشكل 1-6 عملية تكون الماء H_2O ، من الأكسجين O_2 ، والهيدروجين H_2 .

تُسهم عملية تكون الرابطة الكيميائية في التقليل من الطاقة الكلية للنظام المكون من ذرات. ذلك أن «الطاقة الكيميائية» تمثل فرقاً في الطاقة الكلية الموجودة في الرابط الكيميائي جماعها، بين ترتيبين مختلفين للذرات في النظام نفسه. وعلى سبيل المثال، تفاعل الأكسجين مع الهيدروجين لإنتاج الماء (الشكل 1-6).

إن قيمة الطاقة التي امتصت عند كسر 3 روابط موجودة في المواد المُتفاعلة تساوي 1367 kJ . أما قيمة الطاقة التي انطلقت عند تكوين 4 روابط $H-O$ موجودة في المواد الناتجة، فتساوي 1852 kJ . الفرق بين القيمتين يساوي 485 kJ ، ويُمثل هذا الفرق الطاقة المنطلقة خلال هذا التفاعل.

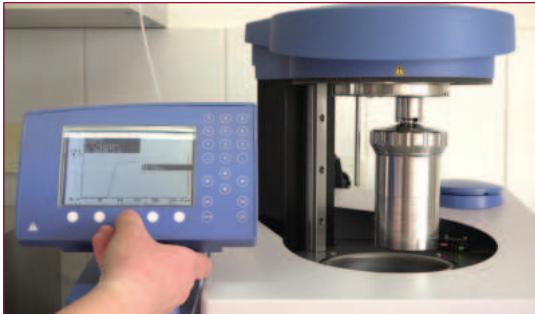
الأنشطة والتجارب

1-6 التغيير في المحتوى الحراري

الدرس 1-6

المُحتوى الحراري

Enthalpy



الشكل 2-6 المُسَعِّر الحراري التفجيري.

تُرَوَّدَ معظم مُعلَّبات الأطعمة بِمُلْصَقَاتٍ تُبَيَّنُ عدَدَ السعرات الحرارية (calories) في تلك الأطعمة. والسعرة الحرارية الواحدة (1 calorie) هي الطاقة اللازمَة لرفع درجة حرارة 1 g من الماء بمقدار 1°C . يبلغ مقدار الحاجة اليومية من الطاقة للشخص البالغ من 2000 إلى 3000 سعرة حرارية أو كيلو كالوري. علَمًا بِأَنَّ السعرة الحرارية الواحدة للأغذية تُعادِل 1,000 سعرة حرارية كما عُرِفَت في الكيمياء.

يتم قياس الطاقة التي يُنْتَجُها الغذاء بِجهاز يُسَمَّى «المُسَعِّر الحراري التفجيري» (bomb calorimeter)، وهو يحرق الغذاء ويقيس الحرارة المُنْتَلَقة منه، إِلَّا أَنَّه لَم يَعُد يُسْتَخدَم لِهَذَا الغَرْضِ فِي يَوْمَنَا هَذَا، بل أَصْبَح يُسْتَخدَم لِقِيَامِ الطَّاقَةِ فِي أَنَوَاعِ الْوَقْدِ الْمُخْتَلِفَةِ.

فِي الْوَقْتِ الْحَالِيِّ، يَتَم حَسَابِ مُحتَوِي الطَّاقَةِ فِي الطَّعَامِ مِنْ خَلَالِ السعرات الحرارية لِلْمَوَادِ الْمَكَوَّنَةِ لَهَا. وَعَلَى سَبِيلِ الْمَثَالِ، فَإِنَّ كَمِيَّةَ الْبَرَوتِينِ وَالْكَرْبُوهِيدَرَاتِ وَالْدَهُونِ يَتَم جَمْعُهَا، وَبِمَعْلُومِيَّةِ الْقِيمِ الْدَقِيقَةِ لِمَتْوَسِطِ الْمُحتَوِيِّ الْحَرَارِيِّ لِكُلِّ جَرَامٍ مِنْهَا، يَمْكُن حَسَابِ عدَدِ السعرات الحرارية المُدَرَّجَةِ عَلَى الْعَبَوَاتِ الْفَذَائِيَّةِ مِنْ عدَدِ الْجَرَامَاتِ الْكَلِيِّ لِلْدَهُونِ وَالْكَرْبُوهِيدَرَاتِ وَالْبَرَوتِينِ لِكُلِّ وَجْبَةِ غَذَائِيَّةٍ.

المفردات



Calorimetry (قياس كمية الطاقة الحرارية)	
Calorimeter	المُسَعِّر الحراري
Specific heat capacity	الحرارة النوعية
Enthalpy	المُحتوى الحراري
	المعادلة الكيميائية الحرارية
Thermochemical equation	
Standard state	الحالة القياسية
	حرارة الاحتراق القياسية
Standard enthalpy change of combustion	
	حرارة التكوين القياسية
Standard enthalpy change of formation	
	حرارة التعادل القياسية
Standard enthalpy change of neutralization	
	حرارة الذوبان القياسية
Standard enthalpy change of solution	

مخرجات التَّعْلُم

C1209.1 يُشَرِّحُ وَيُسْتَخدِمُ مفهوم التَّغْيِيرِ فِي الْمُحتَوِيِّ الْحَرَارِيِّ الْقِيَاسِيِّ (ΔH)، مَعَ التَّرْكِيزِ بِشَكْلِ خَاصٍ عَلَىِّ عَمَلِيَّةِ الْاحْتِرَاقِ، وَالتَّكَوِينِ، وَالذُّوبَانِ، وَالْتَّعَادُلِ. وَيَحْسَبُ التَّغْيِيرَاتِ فِي الْمُحتَوِيِّ الْحَرَارِيِّ مِنْ نَتَائِجِ التَّجَارِبِ.

سباق العالم على الطعام



الشكل 3-6 تفاحة وكعكة محلّاة.



الشكل 4-6 كلورات البوتاسيوم المؤكسدة، وقطعة صغيرة من الحلوى الهمامية.

ماذا يحدث إذا تمكّنت سيارة من العمل باستخدام الكعك محلّى؟ إذا استخدم الناس ذات يوم الحيوانات كوسائل نقل، فلن تكون هذه الفكرة مستحيلة من منظور الطاقة، لأنّ قدرة حصان واحد تساوي 746 watt، أو 746 joule/s، أمّا قطعة كعك محلّاة واحدة فتحتوي على 350,000 سعرة حرارية، أي 1,460,000 joules. وإذا توافرت وسائل لتحويل الطاقة بشكل مثالي، فإنه بإمكاننا الحصول على قدرة حصان واحدة (1 HP) لمدة 32 دقيقة من قطعة كعك محلّاة واحدة.



الشكل 5-6 كعكة محلّاة وكمية بترول لهما محتوى الطاقة نفسه.

هل تختار تفاحة أم كعكة محلّاة إذا كنت تبحث عن محتوى الطاقة فقط؟ (الشكل 3-3)
وأيّهما ستختار، إذا كنت تحاول إنقاص وزنك؟
ولماذا؟

يُعدّ الجزء الأصعب في إنقاص الوزن أن حجم الطعام ليس مؤشّراً على كمية الطاقة فيه، فعلى الرغم من أن التفاحة وكعكة محلّاة تبدوان بالحجم نفسه تقريباً، إلا أنّ الطاقة الموجودة في الكعكة محلّاة تُعادل أكثر من سبعة أضعاف الطاقة الموجودة في التفاحة.

يُبيّن الشكل 4-6 عرضاً عملياً لمحتوى الطاقة في الغذاء. وقد تم إسقاط قطعة صغيرة من الحلوى الهمامية في أنبوب اختبار يحتوي على كلورات البوتاسيوم التي تُعرف بأنّها عامل مؤكسد قوي يتفاعل بسرعة ليطلق الطاقة الموجودة في قطعة الحلوى، وينتج شعلة متوجّة بيضاء ساخنة. هذا التفاعل خطير للغاية، إلا أنه عرض عملي شيق لتحويل الطاقة الكيميائية إلى طاقة حرارية وضوء.

الجدول 1-6 مقارنة الطاقة الموجودة في الأغذية والوقود.

المادة	الطاقة (J/g)
الغاز الطبيعي	54,000
البترول	48,000
الدهون	38,000
الكريوهيدرات	17,000
البروتينات	17,000

المُسْعِرَة (قياس كمية الطاقة الحرارية) والطاقة الحرارية



الشكل 6-6 مُسْعِر حراري بسيط.

يرافق حدوث تفاعل كيميائي تبادل للطاقة الحرارية بين المواد الكيميائية في التفاعل الكيميائي والوسط المحيط. يطلق على دراسة تبادل الطاقة الحرارية خلال التفاعل الكيميائي اسم **المُسْعِرَة** (قياس كمية الطاقة الحرارية). **Calorimetry**

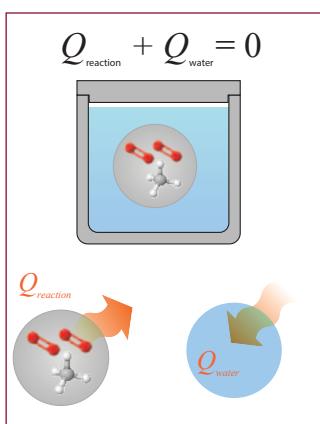
يُبيّن الشكل 6-6 مُسْعِرًا حراريًا بسيطًا. **والمسعر الحراري Calorimeter** الأساسية وعاء معزول يحدث فيه تفاعل كيميائي، بداخله مقياس درجة حرارة (thermometer) لقياس التغير في درجة الحرارة، ومحرك للتأكد من أن الحرارة موزعة بالتساوي.

يمكن حساب التغير في الطاقة الحرارية الذي يحدث في المسعر باستخدام المعادلة 6-1، حيث تمثل Q كمية الحرارة التي تمتصل بها المادة أو تطلقها أثناء حدوث التفاعل.

كمية الحرارة المنتقلة (J)	Q	كمية الحرارة المنتقلة	6-1
الكتلة (kg)	m		
الحرارة النوعية (J/kg°C)	c	$Q = mc\Delta T$	
التغير في درجة الحرارة (°C)	ΔT		

تعتمد كمية الطاقة الحرارية المنتقلة أثناء حدوث التفاعل على الخصائص الآتية:

- كتلة المادة، m .
- التغير في درجة حرارة النظام، ΔT .
- الحرارة النوعية للمادة الكيميائية، c . **والحرارة النوعية Specific heat capacity** لأية مادة هي كمية الطاقة اللازمة لتغيير درجة حرارة 1 kg من المادة بمقدار 1°C. ومن المهم أن تذكّر أن لكل مادة حرارة نوعية مختلفة.



الشكل 6-7 تبادل الحرارة في المسعر الحراري.

وعند إجراء تفاعل في مُسْعِر حراري نجد أنه يحتوي مكونين اثنين، يُعدُّ التفاعل بما يحوي من مواد متفاعلة أحد هذين المكونين (النظام) أما المكون الآخر فيتضمن الماء (المكون الرئيس لامتصاص الطاقة) ووعاء التفاعل وأي شيء آخر (الوسط المحيط). لذلك، فإنَّ أية طاقة منتقلة من التفاعل (Q_{reaction}) يجب أن تُكتسب من الماء ووعاء التفاعل (Q_{water})؛ وبالتالي فإنَّ الطاقة الكلية للنظام المعزول يجب أن تساوي صفرًا كما يبيّن الشكل 6-7.

ويمكن التعبير عن ذلك بشكل رياضي على النحو الآتي:

$$Q_{\text{reaction}} + Q_{\text{water}} = 0$$

$$Q_{\text{reaction}} = -Q_{\text{water}}$$

لذلك، فإنَّ كمية الطاقة المكتسبة في أي نظام معزول تساوي كمية الطاقة المنطلقة.

حساب التغير في درجة الحرارة والطاقة الحرارية

بشكل عام، عندما يحدث تفاعل كيميائي ترافقه عملية تبادل للطاقة. وفي المختبر يمكن حساب كمية الحرارة وتحديد الطاقة الحرارية المنطلقة أو المكتسبة من خلال ملاحظة التغير في درجة حرارة مادة معينة ، مثل الماء. وبشكل عام، فإننا نتجاهل كمية الحرارة الممتصة بواسطة المتفاعلات عندما تكون كمية المتفاعلات ضئيلة بالنسبة لكمية الماء. يبيّن الجدول 6-2 الحرارة النوعية لبعض المواد الشائعة.

الجدول 2-6 الحرارة النوعية لبعض المواد الشائعة.

ال المادة	الحرارة النوعية (J/Kg°C)	ال المادة	الحرارة النوعية (J/Kg°C)
الهواء عند 1 atm	1006	الزيت	1900
الماء	4184	الخرسانة	880
الألومنيوم	900	الزجاج	800
الفولاذ	470	الذهب	129
الفضة	235	الخشب	2300-1300

مثال 1

قام عامل لحام بتسخين قطعة من الفولاذ كتلتها g 100. إذا علمت أن كمية الطاقة المكتسبة تساوي J 93100 ، احسب مقدار التغير في درجة حرارة قطعة الفولاذ (الحرارة النوعية للفولاذ 470 J/kg°C).

الحل

$$Q = mc \Delta T \rightarrow \Delta T = \frac{Q}{mc} = \frac{93100 \text{ J}}{(0.1 \text{ kg}) (470 \text{ J/kg°C})} = 1981°C$$

مثال 2

تم حرق قطعة من رقائق البطاطس كتلتها g 0.01 في مُسَعِّر حراري يحتوي على g 500 من الماء. ارتفعت درجة حرارة الماء من 25°C إلى 50°C. ما كمية الطاقة الحرارية مقدرة بوحدة الكالوري (Calorie) في قطعة رقائق البطاطس، علمًا بأنَّ كل كالوري واحد للطعام يساوي (1 Calorie = 4184 J) (J = 4184)

والحرارة النوعية للماء = 4184 J/kg°C

الحل

كتلة رقائق البطاطس ضئيلة جدًا مقارنة بكتلة الماء. لذلك، فإننا نفترض أن الطاقة الحرارية الناتجة عن التفاعل قد امتصتها كتلة الماء فقط، ونتجاهل الطاقة الحرارية التي امتصتها رقائق البطاطس.

$$Q = mc \Delta T = (0.5 \text{ kg}) (4184 \text{ J/kg°C}) (50°C - 25°C) = 52300 \text{ J}$$

لتحويل كمية الطاقة من جول إلى وحدة الكالوري للطعام نقسم الجواب على 4184:

$$Q_{\text{Cal}} = \frac{Q_{\text{joules}}}{4184} = 12.5 \text{ Calories}$$

المحتوى الحراري (H)

ينص قانون حفظ الطاقة على أن الطاقة لا تفني ولا تستحدث، بل تتغير من صورة إلى أخرى. سنهتم في هذه الوحدة بدراسة شكل محدد من أشكال الطاقة، يسمى **المحتوى الحراري** Enthalpy. المحتوى الحراري هو كمية الطاقة المخزنة في المادة عند تكوينها. تتأثر هذه الطاقة بدرجة الحرارة وحالة المادة والضغط والحجم. لذلك، فإن المحتوى الحراري (H) يساوي الطاقة الداخلية (U) مضافة إلى حاصل ضرب الضغط في الحجم (PV)؛ وبالتالي فإن المعادلة تكون: $H = U + PV$. إلا أن الطاقة التي تكون في شكل ضوء، أو حركة، أو جاذبية أرضية، لا تُعد من صور المحتوى الحراري، مثلها مثل الطاقة الكهربائية والطاقة النووية أيضًا.

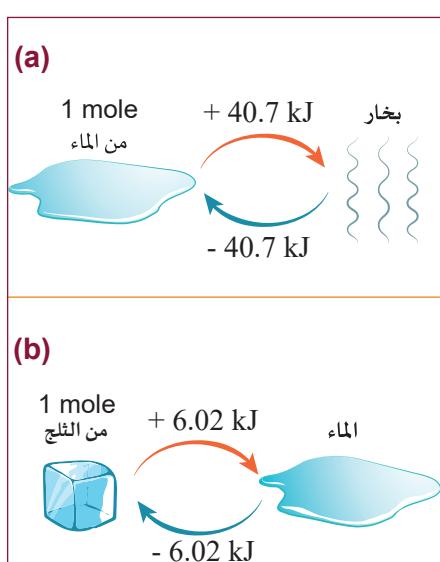
نقطة مرجعية: المحتوى الحراري، H، هو مقدار الطاقة الكيميائية المخزنة في المادة عند تكوينها، وتأثر بتغير درجة الحرارة والضغط والحجم عند حدوث تغيرات في حالة المادة: $H = U + PV$.

لا يمكن قياس المحتوى الحراري للمادة بشكل مطلق. فإن الكثير من العمليات ينتج عنها حدوث تغيرات في المحتوى الحراري، كالتفاعلات الكيميائية، وتغيرات الحالة، وتغيرات درجة الحرارة، وتمدد الغاز وضغطه. يمثل التغيير في المحتوى الحراري عند ضغط ثابت بالمعادلة الآتية: $\Delta H = \Delta U + P\Delta V$.

نقطة مرجعية: التغيير في المحتوى الحراري ΔH هو كمية الحرارة المنطلقة أو الممتصة بواسطة التفاعل أو النظام ويساوي الفرق بين مجموع المحتوى الحراري للنواتج ومجموع المحتوى الحراري للمتفاعلات.

عندما يكون الضغط والحجم ثابتين، يكون التغيير في المحتوى الحراري ΔH مساوياً للتغيير في الطاقة الداخلية ΔU ، ويكون هذا التغيير مساوياً للطاقة الحرارية المنتقلة: $\Delta H = \Delta U \rightarrow \Delta H = Q$.

نقطة مرجعية: عندما يكون الضغط والحجم (PV) ثابتين، فإن: $\Delta H = Q$.



الشكل 8-6 (a) الحرارة المولية للتبيُّخ
(b) الحرارة المولية للانصهار.

يُرافق التغيير في الحالة الفيزيائية في أغلب الأحيان تغييراً في المحتوى الحراري كما يبين **الشكل 8-6** وعلى سبيل المثال:

- الحرارة المولية للتبيُّخ، ورمزها ΔH_{vap} : سيحتاج مول واحد من الماء إلى 40.7 kJ/mol عند درجة حرارة تبلغ 100°C ليتحول إلى بخار عند درجة الحرارة نفسها. (**الشكل 8-6(a)**).

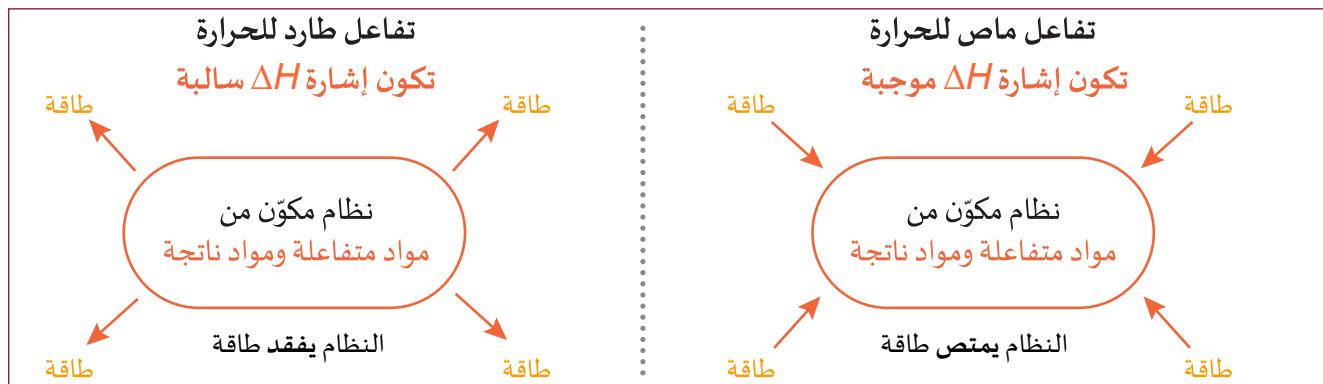
- الحرارة المولية للانصهار، ورمزها ΔH_{fus} : يجب امتصاص طاقة مقدارها 6.02 kJ/mol واحد من الثلج عند درجة الحرارة 0°C ليتحول إلى ماء عند درجة الحرارة نفسها (**الشكل 8-6(b)**).

- الحرارة المولية للتسامي، ورمزها ΔH_{sub} : إذا تحول 1 mole من الثلج إلى بخار عند درجة حرارة تبلغ 100°C، فإنَّ التغيير في الطاقة سيكون 54.15 kJ/mol.

التغييرات الماخصة والطاردة للحرارة

يُصاحب التفاعلات الكيميائية على الدوام تغييرًا في الطاقة من خلال التغيير في المحتوى الحراري. ومن المعروف أن المحتوى الحراري يمثل الطاقة المخزنة في النظام. وبالتالي، فإن أي عملية تغيير في النظام قد تُنقص أو تُزيد في المحتوى الحراري (الشكل 9-6).

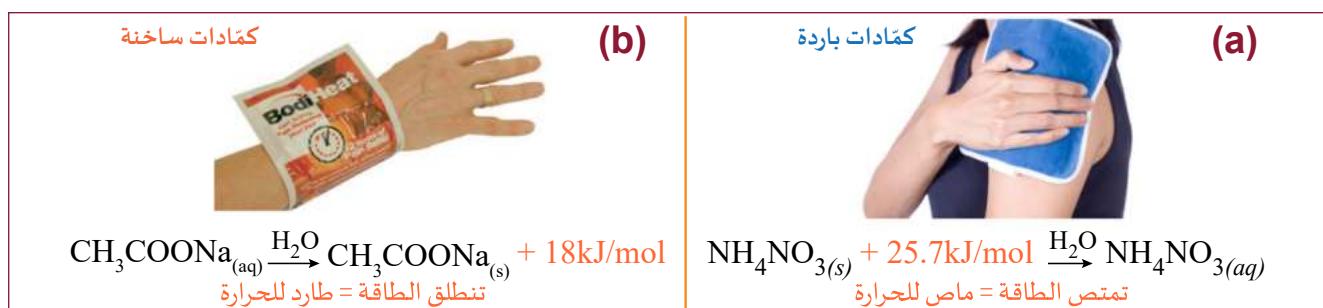
- خلال التفاعل الماخص للطاقة الحرارية، يمتص النظام الحرارة من الوسط المحيط، وتكون قيمة التغيير في المحتوى الحراري موجبة: $\Delta H > 0$.
- أما التفاعل الذي يطلق الطاقة الحرارية، فيُصنف بأنه طارد للحرارة، ويكون التغيير في المحتوى الحراري قيمة سالبة: $\Delta H < 0$.



الشكل 9-6 نظام طارد للحرارة وآخر ماخص للحرارة.

أمثلة على تغييرات ماخصة وطاردة للحرارة

- تُعد الكمامات الساخنة والباردة أمثلة جيدة على التغييرات الماخصة للحرارة والطاردة للحرارة.
- تحتوي أحد أنواع الكمامات الباردة على نيترات الأمونيوم الصلبة. عند عصر الكمادة تذوب نيترات الأمونيوم في الماء، وتُعد عملية ذوبانها ماخصة للحرارة، إذ تُمتص 25.7 kJ/mol من محلول، ما يجعل الكمادة باردة، لأن في التغييرات الماخصة للحرارة تُمتص الطاقة الحرارية (الشكل 6-10a).
- تحتوي الكمامات الساخنة على محلول فوق مشبع من أسيتات الصوديوم. درجة تجمُّد هذا المُرَكَّب تساوي 54°C . بمجرد عصر أسيتات الصوديوم تبدأ «بالتجمُّد» أي التحول إلى مادة صلبة، وتُطلق طاقة حرارة تجمُّدها، فتسخن وتتحول إلى حالتها الصلبة. تُعد هذه العملية طارد للحرارة، لأنها تُطلق الطاقة الحرارية (الشكل 6-10b). نستنتج مما سبق أن الكمامات الباردة أو الساخنة تستخدم طاقة تغيير الحالة لامتصاص الطاقة أو إطلاقها.

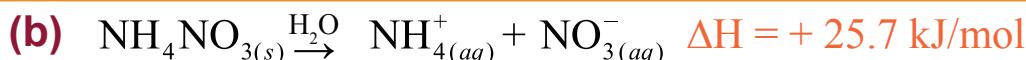


الشكل 10-6 (a) يتم امتصاص الطاقة، (b) يتم انطلاق الطاقة.

المعادلة الكيميائية الحرارية

عند القيام بتقييم التغير في المحتوى الحراري لتفاعل ما، علينا أن نحدد المتفاعلات والنواتج. أما الوسط المحيط فهو كل شيء آخر بما فيه الماء الذي تذوب فيه المتفاعلات والنواتج. وبالتالي، فإن المعادلة الكيميائية التي تبين التغير في المحتوى الحراري تسمى **المعادلة الكيميائية الحرارية Thermochemical equation**.

تمثيل الطاقة في التفاعلات الماصة للحرارة

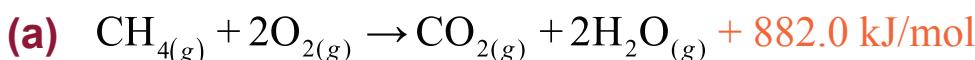


الشكل 11-6 المعادلة الكيميائية الحرارية لعملية ذوبان نيترات الأمونيوم في الماء.

1. يمكن كتابة كمية الطاقة الممتصة مع المتفاعلات في التفاعلات الماصة للحرارة **الشكل 11-6** أو كتابة التغير في المحتوى الحراري ΔH على يمين المعادلة بحيث تكون قيمة ΔH موجبة في التفاعلات الماصة للحرارة، **الشكل 11-6**.

2. يمكن كتابة كمية الطاقة المنطلقة مع النواتج في التفاعلات الطاردة للحرارة كما في **الشكل 12-6**. أو كتابة التغير في المحتوى الحراري ΔH على يمين المعادلة بحيث تكون قيمة ΔH سالبة في التفاعلات الطاردة للحرارة **الشكل 12-6**.

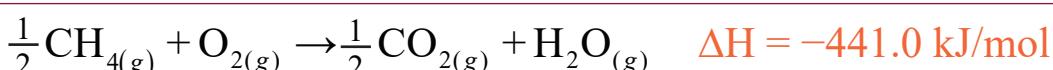
تمثيل الطاقة في التفاعلات الطاردة للحرارة



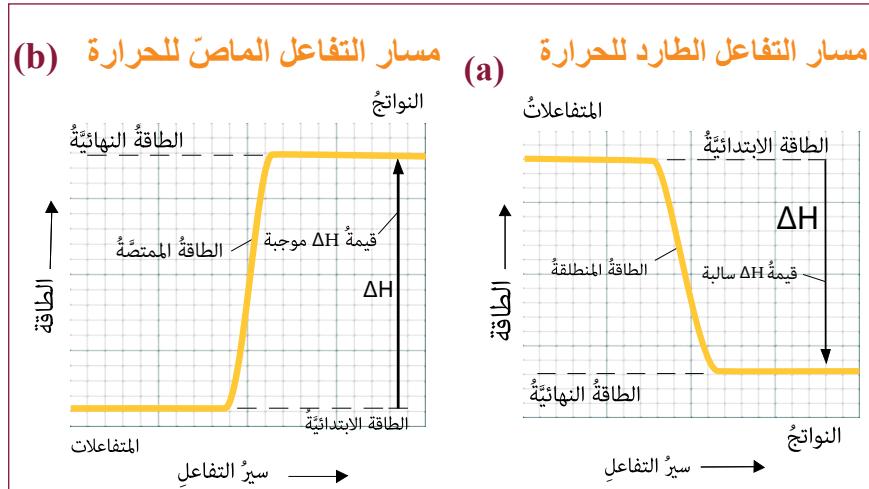
الشكل 12-6 المعادلة الكيميائية الحرارية لتفاعل احتراق الميثان.

يطلق التفاعل الطارد للحرارة في **الشكل 12-6**، طاقة مقدارها 882 kJ لكل مول واحد من الميثان المحترق. تُبيّن المعادلة الكيميائية الحرارية أنَّ قيمة المحتوى الحراري ΔH لهذا التفاعل تساوي -882 kJ/mol ، لذا يُعد التفاعل طارداً للحرارة حيث يكون التغير في المحتوى الحراري $\Delta H < 0$.

تُبيّن المعادلة الكيميائية الحرارية لاحتراق غاز الميثان أن كل 1 mole منه يحترق بوجود 2 moles من غاز الأكسجين، وينتج عنه 1 mole من غاز ثاني أكسيد الكربون، و 2 moles من بخار الماء. عندما تتغير الكميات الداخلة في التفاعل بمقدار معامل معين في المعادلة الكيميائية الحرارية، يجب أن تُضرب قيمة التغير في المحتوى الحراري لهذه المعادلة في قيمة هذا المعامل نفسه. وكذلك، إذا تم خفض قيمة المعاملات إلى النصف، فإن المعادلة وقيمة التغير في المحتوى الحراري لهذا التفاعل تكونان كما يبيّن **الشكل 13-6**.



الشكل 13-6 المعادلة الكيميائية الحرارية لاحتراق نصف مول من الميثان بوجود مول واحد من الأكسجين.



الشكل 14-6 مسار تغيرات الطاقة الحرارية (a) للتفاعل طارد للحرارة (b) للتفاعل الماصل للحرارة.

إشارة ΔH إشارة المحتوى الحراري يساوي الفرق بين طاقة الناتج وطاقة المتفاعلات، فإن إشارة ΔH تكون عندئذٍ سالبة، ويفقد النظام الطاقة كما يبين الرسم البياني في الشكل a14-6.

العكس صحيح في التفاعلات الماصلة للحرارة، لأن طاقة الناتج هي أكبر من طاقة المتفاعلات. لذلك، فإن النظام يمتص الطاقة، ويكون التغير النهائي في المحتوى الحراري خلال حدوث التفاعل تغييرًا موجباً، وتكون إشارة ΔH موجبة كما يبين الرسم البياني في الشكل b14-6.

تغيرات الحالة

- كيف يتغير المحتوى الحراري عندما تنصهر مادة ما أو تتجمد؟
- كيف يتغير المحتوى الحراري عندما يغلي سائل ما أو يتكتاف؟
- كيف يتغير المحتوى الحراري عندما تتسامي مادة صلبة وتحول إلى غاز أو يتربس غاز ما ويتحول إلى صلب؟

كيف تُبرد مكعبات الثلج مشروبك؟

في الأيام الحارة، جميعنا نحتاج إلى إضافة مكعبات الثلج إلى المشروبات المختلفة. نعلم جميعاً أن انصهار الثلج يخفف من تركيز المشروب. لماذا لا نستخدم مادة صلبة غير قابلة للانصهار لتبريد المشروبات؟



السبب في الحقيقة هو أن المواد الصلبة هذه أقل فعالية في تبريد المشروب من الثلج نفسه، وذلك لأن معظم الطاقة الحرارية التي يمتصها الثلج من المشروب هي من خلال تغيير الحالة. مكعب ثلج كتلته 50 يمتص حوالي 1836 J لترتفع درجة حرارته من 0°C إلى -18°C . بينما، عندما ينصهر هذا المكعب من الثلج عند درجة حرارة 0°C في المشروب فإنه يمتص 16750 J . وبالتالي فإن تغيير الحالة يمتص تسعة مرات من الطاقة الحرارية أكثر من تغيير درجة حرارة نفس الكمية من الثلج.

إشارة ΔH

التغير في المحتوى الحراري ΔH يصف محتوى الطاقة للنظام الذي يتكون في الغالب من المواد الناتجة والمواد المتفاعلة. عندما نقول إن التفاعل طارد للحرارة فإننا نعني أن طاقة المواد المتفاعلة أكبر من طاقة المواد الناتجة ولأن التغير في

الحالة القياسية

تعد عملية حساب التغير في المحتوى الحراري لتفاعل ما، عملية مهمة لفهم عملية انطلاق الطاقة أو امتصاصها خلال التفاعل. ويجب على الكيميائيين أن يحسبوا أولاً قيمة حرارة التكين للكثير من المركبات في الحالة القياسية. تشير **الحالة القياسية Standard state** إلى المواد المتفاعلة التي تكون عند الظروف الآتية:

- قيمة الضغط تساوي 1 atm.
- قيمة تركيز المحاليل تساوي 1 M.
- لم تحدِّد IUPAC درجة حرارة محددة من قبل. ومع ذلك، فإن درجة الحرارة المستخدمة في معظم الظروف القياسية تساوي 25°C (298.15 K)، وهي الدرجة التي تُعادل درجة حرارة الغرفة. ويتم تمثيل التغير في المحتوى الحراري عند هذه الظروف بالرمز ΔH° .

حرارة الاحتراق القياسية ΔH°

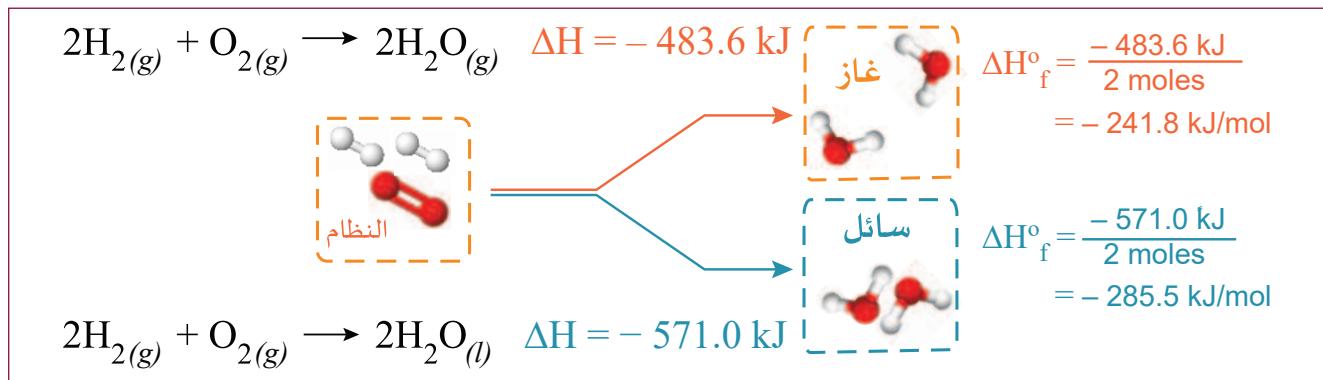
• **حرارة الاحتراق القياسية Standard enthalpy change of combustion**، هي كمية الحرارة المنطلقة عند احتراق 1 mole من المادة احتراقاً تاماً بوجود كمية وفيرة من الأكسجين في الظروف القياسية ويتم تمثيلها بالرمز ΔH° . وقد أدرجت بعض القيم لحرارة الاحتراق القياسية في الجدول 3-6.

الجدول 3-6 بعض قيم حرارة الاحتراق القياسية.

حرارة الاحتراق القياسية (kJ/mol)	التفاعل	المادة
-285.8	$H_{2(g)} + \frac{1}{2}O_{2(g)} \rightarrow H_2O_{(l)}$	الهيدروجين
-393.5	$C_{(s)} + O_{2(g)} \rightarrow CO_{2(g)}$	الكريون
-890.8	$CH_{4(g)} + 2O_{2(g)} \rightarrow CO_{2(g)} + 2H_2O_{(l)}$	الميثان
-1366.8	$C_2H_5OH_{(l)} + 3O_{2(g)} \rightarrow 2CO_{2(g)} + 3H_2O_{(l)}$	الإيثanol
-283.0	$CO_{(g)} + \frac{1}{2}O_{2(g)} \rightarrow CO_{2(g)}$	أول أكسيد الكربون
-601.6	$Mg_{(s)} + \frac{1}{2}O_{2(g)} \rightarrow MgO_{(s)}$	المغنيسيوم
-296.8	$S_{(s)} + O_{2(g)} \rightarrow SO_{2(g)}$	الكربون

حرارة التكوين القياسية ΔH°_f

حرارة التكوين القياسية **Standard enthalpy change of formation** لأي مركب هو التغيير في المحتوى الحراري عندما يتكون 1 mole من المادة من عناصرها الأساسية (الأولية) في الظروف القياسية، ويتم تمثيلها بالرمز ΔH°_f ، مع العلم بأن حرارة التكوين القياسية تختلف للمادة نفسها عندما تكون في الحالة الغازية أو السائلة أو الصلبة كما يبين الشكل 15-6.



الشكل 15-6 حرارة التكوين القياسية للماء في الحالتين الغازية والسائلة.

يُبيّن الشكل 15-6 أنه: عندما يتكون 2 moles من الماء السائل، فإن قيمة التغيير في المحتوى الحراري تبلغ -571 kJ ؛ وبالتالي، فإن قيمة حرارة التكوين القياسية ΔH°_f لها هي التغيير في المحتوى الحراري لكل مول من الماء السائل الناتج، وتساوي $-571/2 = -285.5 \text{ kJ/mol}$. أما حرارة التكوين القياسية لمول واحد من بخار الماء فهي -241.8 kJ/mol .

أُدرجت قيم حرارة التكوين القياسية لعدد من المركبات في الجدول 4-6، مع الإشارة إلى أن معظم هذه القيم سالبة، لأن الطاقة تنطلق عندما تتكون هذه المركبات من عناصرها النقيّة. ولأننا نهتم في العادة بالتغييرات في المحتوى الحراري، فقد حُدِّدت قيمة حرارة التكوين لبعض العناصر النقيّة، مثل الغازات ثنائية الذرّات ($\text{O}_2, \text{N}_2, \text{H}_2$)، بأنّها تساوي صفرًا حيث لا يوجد فرق في المحتوى الحراري بين ذراتها المتماثلة.

الجدول 4-6 قيم حرارة التكوين القياسية لبعض المواد الشائعة.

ΔH°_f kJ/mol	الصيغة الكيميائية	المادة	ΔH°_f kJ/mol	الصيغة الكيميائية	المادة
-238.4	CH_3OH	الميثanol (l)	0.0	O_2	الأكسجين (g)
-277.0	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	الإيثanol (l)	0.0	H_2	الهيدروجين (g)
-824.2	Fe_2O_3	أكسيد الحديد (III) (s)	0.0	N_2	النيتروجين (g)
-771.4	CuSO_4	كربونات النحاس (II) (s)	-393.5	CO_2	ثاني أكسيد الكربون (g)
-1271	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$	الجلوكوز (s)	-285.5	H_2O	الماء (l)
+143	O_3	الأوزون (g)	-241.8	H_2O	الماء (g)
-411.12	NaCl	ملح الطعام (s)	-74.87	CH_4	الميثان (g)
-407.3	NaCl	ملح الطعام (aq)	-83.8	C_2H_6	الإيثان (g)

التغير في المحتوى الحراري القياسي للتفاعل

يحسب التغير في المحتوى الحراري للتفاعل من خلال معادلة حسابية يطرح خلالها مجموع حرارة التكوين للمتفاعلات من مجموع حرارة التكوين للنواتج بحسب المعادلة 6-2 الآتية:

المعادلة 6-2 التغير في المحتوى الحراري القياسي للتفاعل.

التغير في المحتوى الحراري القياسي للتفاعل (kJ/mol)	ΔH° تفاعل	التغير في المحتوى الحراري القياسي للتفاعل	2-6
حرارة التكوين القياسية للمتفاعلات (kJ/mol)	ΔH_f° متفاعلات		
حرارة التكوين القياسية للنواتج (kJ/mol)	ΔH_f° نواتج	$\Delta H^\circ = \sum_{\text{تفاعل}} \Delta H_f^\circ - \sum_{\text{نواتج}} \Delta H_f^\circ$	

تذكّر أن الظروف القياسية للتفاعل لاستخدام المعادلة 6-2 هي عند ضغط 1 atm ودرجة حرارة الغرفة أي 25°C . لذلك، فإذا لم تكن ظروف التفاعل عند الظروف القياسية فيجب تعديل حساب قياس التغير في المحتوى الحراري للتفاعل، وذلك بزيادة أو إنقاص الفرق في التغير في المحتوى الحراري للتفاعل عند الظروف الحالية والظروف القياسية.

مثال 3



استخدم الجدول 6-4 لحساب التغير في المحتوى الحراري لتفاعل احتراق الإيثان عند الظروف القياسية



احسب التغير في المحتوى الحراري لتفاعل احتراق مول واحد من الإيثان (حرارة الاحتراق القياسية للإيثان).

الحل

نطّبّق المعادلة 6-2.

ΔH_f° متفاعلات	ΔH_f° نواتج
$(\text{C}_2\text{H}_6)_{(g)}$ 2mol $\times -83.8 \text{ kJ/mol}$	$(\text{CO}_{2})_{(g)}$ 4mol $\times -393.5 \text{ kJ/mol}$
$(\text{O}_{2})_{(g)}$ 7mol $\times 0.00 \text{ kJ/mol}$	$(\text{H}_2\text{O})_{(g)}$ 6mol $\times -241.8 \text{ kJ/mol}$
-167.6 kJ/mol	-3024.8 kJ/mol

$$\begin{aligned} \Delta H^\circ &= \sum_{\text{تفاعل}} \Delta H_f^\circ - \sum_{\text{نواتج}} \Delta H_f^\circ \\ &= -3024.8 \text{ kJ/mol} - (-167.6 \text{ kJ/mol}) \\ &= \boxed{-2857.2 \text{ kJ}} \end{aligned}$$

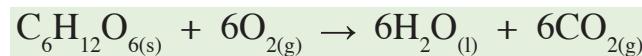
التغير في المحتوى الحراري للتفاعل بحسب المعادلة الكيميائية الموزونة هو -2857.2 kJ - لحساب التغير في المحتوى الحراري لتفاعل احتراق مول واحد من الإيثان نقسم هذه القيمة على 2 لأن المعادلة الموزونة تبين وجود مولين من الإيثان:

$$\Delta H_c^\circ = \frac{-2857.2}{2} = \boxed{-1428.6 \text{ kJ/mol}}$$

مول واحد من الإيثان

مثال 4

احسب التغيير في المحتوى الحراري لتفاعل احتراق g 100 من الجلوكوز خلال عملية التنفس الخلوي والذي يحدث حسب المعادلة الكيميائية الموزونة الآتية:



الحل نستخدم الجدول 6-4 لنجد حرارة التكوين القياسية لكل من المواد المتفاعلة والمواد الناتجة، ثم نستخدم المعادلة 6-2 لحساب التغيير في المحتوى الحراري لاحتراق الجلوكوز.

متفاعلات ΔH_f°	نواتج ΔH_f°
$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_{6(s)}$ 1 mol $\times -1271 \text{ kJ/mol}$	$\text{CO}_{2(g)}$ 6 mol $\times -393.5 \text{ kJ/mol}$
$6\text{O}_{2(g)}$ 6 mol $\times 0.00 \text{ kJ/mol}$	$\text{H}_2\text{O}_{(l)}$ 6 mol $\times -285.5 \text{ kJ/mol}$
-1271 kJ	-4074.0 kJ

$$\begin{aligned} \Delta H_c^\circ &= \sum \Delta H_f^\circ_{\text{نواتج}} - \sum \Delta H_f^\circ_{\text{متفاعلات}} \\ &= -4074 \text{ kJ} - (-1271 \text{ kJ}) \\ &= \boxed{-2803 \text{ kJ/mol}} \end{aligned}$$

التفاعل ينتج 2803 kJ لكل مول واحد من الجلوكوز. نستخدم الكتلة المولية للجلوكوز (180.16 g/mol) لحساب التغيير في المحتوى الحراري لكتلة g 100 من الجلوكوز.

$$\Delta H = 100 \text{ g glucose} \times \left(\frac{1 \text{ mol glucose}}{180.16 \text{ g glucose}} \right) \left(\frac{-2803 \text{ kJ}}{1 \text{ mol glucose}} \right) = \boxed{-1555.8 \text{ kJ}}$$

مثال 5

تساعد الأشعة فوق البنفسجية على تحويل غاز الأكسجين إلى غاز الأوزون في طبقة الغلاف الجوي العليا. والمعادلة الكيميائية الحرارية أعطيت على النحو الآتي:



احسب حرارة التكوين القياسية للأوزون.

الحل

المطلوب حساب حرارة تكوين 1 mole من الأوزون، وقد أعطيت المعادلة السابقة لتكوين 2 moles من الأوزون. لذلك، فإن المعادلة الكيميائية الحرارية لحساب ΔH_f° ستكون على النحو الآتي:



نقسم عدد المولات الموجودة في المعادلة على 2: وحساب ΔH_f° ، نقسم قيمة ΔH° على 2 أيضًا:

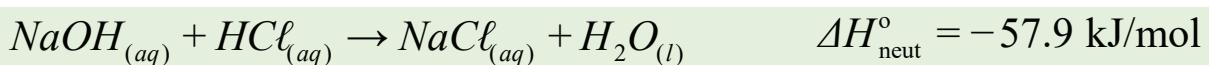
$$\Delta H_f^\circ = \frac{+286 \text{ kJ}}{2} = \boxed{+143 \text{ kJ/mol}}$$

حرارة التعادل القياسية $\Delta H_{\text{neut}}^{\circ}$

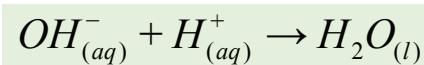
كمية الحرارة المنطقية عند تكوين (1 mole) من الماء عند تعادل حمض مع قاعدة في المحاليل المخففة في الظروف القياسية تُسمى **حرارة التعادل القياسية**، Standard enthalpy change of neutralization، ويتم تمثيلها بالرمز $\Delta H_{\text{neut}}^{\circ}$ ، وتكون قيمتها دائمًا أقلً من الصفر (قيمة سالبة).

تعادل حمض قوي وقاعدة قوية

عندما يحدث تعادل بين حمض قوي وقاعدة قوية عند الظروف القياسية، تكون قيمة التغير في المحتوى الحراري بين 57 kJ/mol و 58 kJ/mol ، نأخذ مثلاً التفاعل الذي يحدث بين هيدروكسيد الصوديوم وحمض الهيدروكلوريك (قاعدة قوية وحمض قوي) المُبيَّن في المعادلة الكيميائية الآتية:



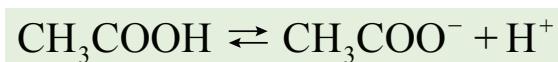
في هذا التفاعل، تتفاعل أيونات الهيدروجين من الحمض القوي مع أيونات الهيدروكسيد من القاعدة القوية، لتكوين الماء على النحو الآتي:



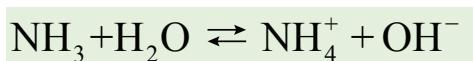
وهذا هو التفاعل نفسه الذي يحدث بين الأحماض القوية والقواعد القوية جميعها. من هذا المنطلق، يكون التغير في المحتوى الحراري متشابهًا في هذه التفاعلات جميعها، بغض النظر عن أسماء الأحماض والقواعد القوية المستخدمة.

تعادل حمض ضعيف وقاعدة ضعيفة

يتَّأَيَّنُ الحمض الضعيف أو القاعدة الضعيفة تَأَيَّنًا جزئيًّا في الماء: في التراكيز الشائعة لحمض الأسيتيك يتَّأَيَّنُ ما نسبته 1% تقريبًا من الحمض وفق المعادلة الآتية:



وبشكل مشابه، فإنَّ التراكيز الشائعة للقاعدة الضعيفة، ك محلول الأمونيا، تسمح بتفَّكِّر ما نسبته 1% فقط من القاعدة وفق المعادلة الآتية:



بشكل عام قيم حرارة التعادل القياسية لتفاعل حمض ضعيف مع قاعدة ضعيفة، تُعد الأقل بين تفاعلات التعادل التي تحتوي أي من الأحماض القوية أو القواعد القوية، على سبيل المثال تفاعل حمض الأسيتيك مع محلول الأمونيا الموضح في المعادلة الكيميائية الحرارية الآتية:



ذلك لأنَّ جزءًا من الطاقة المنطقية أثناء تكوين الماء يستهلك في تأين الحمض الضعيف والقاعدة الضعيفة، وينتج عن ذلك تغير في المحتوى الحراري أقل من التغير في المحتوى الحراري لتفاعل تعادل الأحماض القوية مع القواعد القوية.

حرارة الذوبان القياسية ΔH_{soln}°



الشكل 16-6 مادة قابلة للذوبان في مذيب.

ينتج محلول عندما تتم إضافة مادة قابلة للذوبان إلى مذيب (الشكل 16-6). ويمكن أن يكون إنتاج محلول عملية طاردة للحرارة أو ماصة لها. وعلى سبيل المثال، فإن عملية إذابة NaCl في الماء تعد عملية ماصة للحرارة، أما ذوبان KOH فيُعد عملية طاردة للحرارة.

يُطلق على التغيير في المحتوى الحراري عندما يذوب 1 mole من المادة المذابة (عند ظروف قياسية) في مذيب إلى أن يتكون محلول مخفف جدًا اسم

حرارة الذوبان القياسية $\text{Standard enthalpy change of solution}$

ويتم تمثيلها بالرمز ΔH_{soln}° . يمكن استخدام المعادلة 3-6 لحساب حرارة الذوبان القياسية، حيث تمثل Q كمية الحرارة المنتقلة، و n عدد摩لات المادة التي ذابت في المذيب. كما يمكن استخدام هذه العلاقة لحساب أي تغيير حراري قياسي مثل حرارة التعادل القياسي. (كما في المثال رقم 7)

حرارة الذوبان القياسية (kJ/mol)	ΔH_{soln}°	حساب حرارة الذوبان القياسية	3-6
كمية الحرارة المنتقلة (kJ)	Q	$\Delta H_{soln}^\circ = \frac{Q}{n}$	
عدد المولات	n		

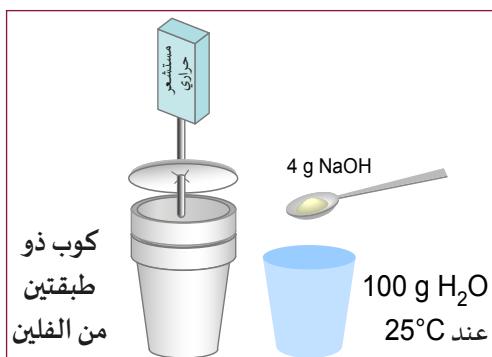
يمكن تفسير حرارة الذوبان القياسية في الخطوات الآتية:

1. تتفكك الروابط الموجودة داخل المادة المذابة، وتُعد هذه الخطوة عملية ماصة للحرارة.
2. تتفكك الروابط الموجودة داخل المذيب، وتُعد هذه الخطوة عملية ماصة للحرارة أيضًا.
3. تتكون روابط جديدة بين المادة المذابة والمذيب، وتُعد هذه الخطوة عملية طاردة للحرارة.
4. تكون قيمة حرارة الذوبان محصلة الطاقة الممتصة للتفكك والطاقة المنطلقة عند تكوين محلول.

الجدول 5-6 قيم حرارة الذوبان القياسية لعدد من الأملاح الذائبة في الماء.

ΔH_{soln}° kJ/mol	المادة المذابة	ΔH_{soln}° kJ/mol	المادة المذابة
-23.26	LiBr (s)	+14.78	NH_4Cl (s)
-0.60	NaBr (s)	+3.88	NaCl (s)
+25.69	NH_4NO_3 (s)	+17.22	KCl (s)
+22.59	AgNO_3 (s)	-37.03	LiCl (s)
+20.5	NaNO_3 (s)	+16.78	NH_4Br (s)
+34.89	KNO_3 (s)	+19.87	KBr (s)

مثال 6



الشكل 6-17 تجربة المُسَعِّرَة.

تمت إضافة 4 g من هيدروكسيد الصوديوم الصلب $\text{NaOH}_{(s)}$ إلى 100 mL (100 g) من الماء المُقطر الموضوع في مسّعّر على هيئه كوب فليني. كانت درجة حرارة الماء الابتدائية 25°C، ثم ارتفعت إلى 35°C. احسب حرارة الذوبان القياسية لهيدروكسيد الصوديوم الصلب NaOH. (علمًا بأن الحرارة النوعية للماء تساوي 4184 J°C kg).

الحل

العلاقان الرياضياتي للثان سوف تُستخدمان في هذا المثال هما:

$$\Delta H_{soln}^{\circ} = \frac{Q}{n} \quad Q = mc\Delta T$$

ويكون حساب التغيير في درجة الحرارة على النحو الآتي:

$$\Delta T = T_f - T_i = 35 - 25 = 10^{\circ}\text{C}$$

الخطوة التالية هي حساب الحرارة المُنتَقِلة للماء. يجب أن نستخدم كتلة الماء بوحدة kg:

$$Q = mc\Delta T = (0.1 \text{ kg})(4184 \text{ J/kg°C})(10^{\circ}\text{C}) = 4184 \text{ J}$$

ولأن الحرارة منتقلة فيجب أن تكون قيمتها سالبة يُمكننا كتابة الحرارة المُنتَقِلة بوحدة kJ وهي تساوي تقريرًا -4.2 kJ.

قيمة حرارة الذوبان القياسية للمحلول تساوي كمية الحرارة المُنتَقِلة لكل مول. ولكن، كم يبلغ عدد مولات المادة المُذابنة في محلول؟

عدد المولات يساوي كتلة المادة المُذابنة مقسومة على كتلتها المولية

والكتلة المولية لمُركب NaOH :

$$\text{الكتلة المولية NaOH} = 22.99 + 16 + 1.008 = 39.998 \text{ g/mol}$$

عندئذ، يبلغ عدد المولات:

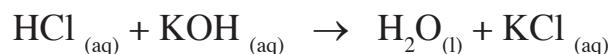
$$n = \frac{m}{M} = \frac{4 \text{ g}}{39.998 \text{ g/mol}} = 0.1 \text{ mol}$$

وأخيرًا، يتم حساب حرارة الذوبان القياسية للمحلول لكل مول، على النحو الآتي:

$$\Delta H_{soln}^{\circ} = \frac{Q}{n} = \frac{-4.2 \text{ kJ}}{0.1 \text{ mol}} = -42 \text{ kJ/mol}$$



في تجربة لحساب التغير في المحتوى الحراري تم إضافة 50ml من 0.5M محلول هيدروكسيد البوتاسيوم بسرعة إلى 50ml من 0.5M محلول حمض الهيدروكلوريك في كأس زجاجية وتفاعل الحادث توضحه المعادلة الآتية:



وكانت درجة الحرارة الأولية لتفاعل 19.5°C وتم قياس درجة الحرارة النهائية فكانت 23.1°C أجب عن الأسئلة الآتية:

1. حدد مع توضيح السبب نوع التفاعل (طارد أم ماص للحرارة).
 2. احسب التغير في المحتوى الحراري لتفاعل السابق (علمًا بأن الحرارة النوعية للماء تساوي 4184 $\text{J}/^{\circ}\text{C kg}$).
 3. احسب حرارة التعادل القياسية.
 4. هل يتواافق الناتج مع دراستك؟ فسر إجابتك.
 5. ماذا تتوقع أن يكون مصدر الخطأ في التجربة السابقة؟
-

الحل

العلاقان الرياضياتية بين اللتان سوف تُستخدمان في هذا المثال هما:

$$\Delta H^{\circ}_{\text{neut}} = Q/n$$

$$Q = mc\Delta T$$

1. التفاعل طارد للحرارة ويمكن استنتاج ذلك من ارتفاع درجة الحرارة من 19.5°C إلى 23.1°C حيث أن تفاعلات الأحماض والقواعد (أو القلوبيات) تكون طاردة للحرارة.

2. لحساب التغير في المحتوى الحراري:

نحسب التغيير في درجة الحرارة على النحو الآتي:

$$\Delta T = T_f - T_i$$

$$= 23.1 - 19.5 = 3.6^{\circ}\text{C}$$

الخطوة التالية هي حساب التغير في المحتوى الحراري للتفاعل

يجب أن نستخدم مجموع كتل الحمض والقاعدة (لاحظ أن المحاليل مخففة لذلك يمكن اعتبار الحجم هو نفس الكتلة كما في الماء) بوحدة kg:

$$Q = mc\Delta T = (0.1 \text{ kg})(4184 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C})(3.6^{\circ}\text{C}) = 1506.24 \text{ J}$$

ولأن الحرارة منطلقة فيجب أن تكون قيمتها سالبة يمكننا كتابة الحرارة المُنتقلة بوحدة kJ وهي تساوي تقريرًا -1.5 kJ .

3. قيمة حرارة التعادل القياسية تساوي كمية الحرارة المنطلقة لكل مول من الماء لتفاعل التعادل.

عدد مولات الماء يساوي عدد مولات أي من الحمض أو القاعدة.

وبالتالي نحسب عدد مولات الحمض التي تساوي مolarية الحمض ضرب حجمه باللتر

$$n = M \times V_{(\text{L})}$$

$$n = 0.5 \times 0.05 = 0.025 \text{ mol}$$

وأخيرًا، يتم حساب حرارة التعادل القياسية للمحلول لكل مول، على النحو الآتي:

$$\Delta H_{\text{neut}}^{\circ} = Q/n$$

$$= -1.5 / 0.025$$

$$\Delta H_{\text{neut}}^{\circ} = -60 \text{ kJ/mol}$$

4. الناتج لا يتوافق مع قيمة حرارة التعادل القياسية لحمض قوي وقاعدة قوية وهي -57.9 kJ/mol

5. قد يكون مصدر الخطأ في التجربة دقة القياسات لكل من الحجوم ودرجات الحرارة وأيضاً فقدان الحرارة لعدم استخدام مسurer أو كوب من البولي ستيرين.



التغيير في المحتوى الحراري

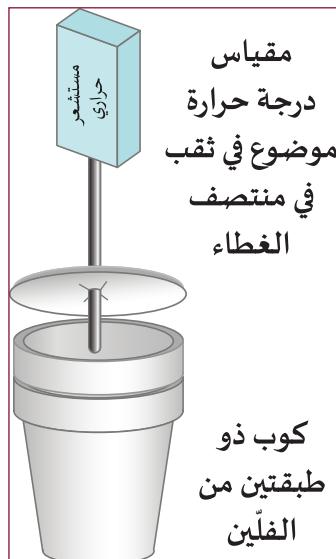
سؤال الاستقصاء

كيف نحسب التغيير في المحتوى الحراري لتفاعل؟

المواد المطلوبة

مُستشعر (مقياس) درجة حرارة، محلول HCl تركيزه 1 M، شريط مغنيسيوم، أكسيد المغنيسيوم، مackbar مدرج، كوب من الفلين عدد (2)، غطاء كوب فليني يحتوي على ثقب في منتصفه لإدخال مقياس درجة الحرارة، ميزان، عبوة غسيل تحتوي على ماء مُقطّر.

الإجراءات المختبرية



الشكل 6-18 مُسْعِر الكوب

1. ضع مسْعِر الكوب الفليني الفارغ ذي الطبقتين على الميزان، وسُجِّل كتلته.
2. ضع 60.0 mL من محلول HCl تركيزه 1.0 M في المُسْعِر، ثم ضعه على الميزان، وسُجِّل الكتلة الكلية، ثم احسب كتلة HCl وسُجِّلها.
3. ضع قطعة من شريط المغنيسيوم على الميزان، على أن تكون كتلتها تساوي 0.6 g تقريباً، وسُجِّل الكتلة الفعلية لشريط Mg .
4. أضف بحذر شديد شريط Mg إلى داخل المُسْعِر الذي يحتوي على حمض HCl ، ثم ضع الغطاء الفليني فوق الكوب الذي يحتوي على الخليط، وأدخل مقياس درجة الحرارة في الثقب الموجود في منتصف الغطاء (الشكل 6-18).
5. توقّف عن جمع البيانات عندما يتوقف مستوى درجة الحرارة عن الفليني. الارتفاع، ثم سُجِّل أعلى درجة حرارة وصل إليها المخلوط، واحسب التغيير في درجة الحرارة.
6. عندما يكتمل التفاعل، صب المخلوط في الحوض، واغسل الكوب بعناية (من 3 إلى 4 مرات) بماء الصنبور، ثم جفّف مسْعِر الكوب الفليني من الداخل والخارج ليكون جاهزاً لتفاعل التالي.
7. كرّ التجربة باستخدام MgO على أنه مادة متفاعلة.

الأسئلة:

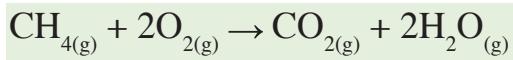
1. احسب الحرارة المُنتقلة في التجربة.
2. ما التغيير في المحتوى الحراري لتفاعل؟
3. هل تم تنفيذ التجربة عند ظروف قياسية؟
4. صُف ما تعلّمته عن التفاعلات التي تُجرى في المُسْعِر في هذا الاستقصاء.

تقويم الدرس 1-6

1. إذا كان التغير في المحتوى الحراري لتفاعل ما يحمل إشارة موجبة، $+\Delta H$ ، فما نوع هذا التفاعل؟ وضح إجابتك.

2. ما الفرق بين الحرارة المولية للتبخر والحرارة المولية للانصهار؟

3. احسب التغير في المحتوى الحراري لتفاعل الممثل بالمعادلة الآتية:



ثم صنف هذا التفاعل: هل التفاعل ماص للحرارة أم طارد للحرارة؟

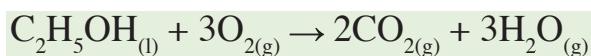
4. هل يكتسب الوسط المحيط بالتفاعل طاقة أم يفقدها ، إذا كانت المواد المتفاعلة تمتلك طاقة أكثر من المواد الناتجة؟ فسر إجابتك.

5. استخدم المعادلة الكيميائية الحرارية لتبخر الماء الآتية:



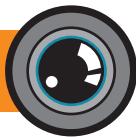
- a. لحساب قيمة ΔH لتبخر 3 moles من الماء.
- b. لحساب قيمة ΔH لتبخر g من الماء.
- c. لحساب قيمة ΔH لتكاثف g من الماء.

6. استخدم المعلومات المدرجة في الجدول أدناه لحساب التغير في المحتوى الحراري الذي يحدث أثناء عملية احتراق الإيثanol مستخدماً حرارة التكوين القياسية للمواد المبينة في المعادلة الآتية:



$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}_{(l)}$	$\text{O}_{2(g)}$	$\text{CO}_{2(g)}$	$\text{H}_2\text{O}_{(g)}$
$\Delta H_f^0 = -277 \text{ kJ/mol}$	$\Delta H_f^0 = 0 \text{ kJ/mol}$	$\Delta H_f^0 = -393.5 \text{ kJ/mol}$	$\Delta H_f^0 = -241.8 \text{ kJ/mol}$

7. تمت إضافة 1.92 g من ملح $\text{KBr}_{(s)}$ إلى 100 g من الماء الموضوع في وعاء معزول، فانخفضت درجة الحرارة بمقدار 0.766°C . احسب حرارة الذوبان القياسية للملح إذا علمت أن الحرارة النوعية للماء هي $4184 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$.



فريتز هابر 1868-1934 Fritz Haber



الشكل 6-19 فريتز هابر (1868-1934).

كان فريتز هابر كيميائياً ألمانياً معروفاً بعمله في دورات الطاقة. وقد حاز على كثير من الجوائز والأوسمة لـ إسهاماته الواسعة ومنها:

جائزة نوبل في الكيمياء في العام 1918 م.

وسام بنسن لجمعية بنسن في العام 1918 م.

نائب رئيس الاتحاد الدولي للكيمياء البحثة والتطبيقية في العام 1931 م.

ولد فريتز هابر في بروسيا، وهي التي تُعرف اليوم باسم بولندا. التحق بمدارس شهيرة فيها، واجتاز امتحانات الدراسة الثانوية في

سبتمبر من العام 1886 م. ثم التحق بجامعة فريديريك فيلهلم في برلين لدراسة الكيمياء. انتقل بعد ذلك إلى جامعة هايدلبرغ، ودرس بإشراف البروفسور روبرت بنسن، لينتقل بعد عام إلى الكلية التقنية في شارلوتنبورغ، حيث خدم عاماً واحداً في فوج المدفعية السادس الميداني، ثم عاد إلى إكمال دراسته وحصل على شهادة الدكتوراه بدرجة امتياز من جامعة فريديريك فيلهلم في العام 1891 م.

بعد حصوله على شهادة الدكتوراه، ذهب هابر للعمل مع والده، ثم أخذ بعض الدروس في التلمذة المهنية والصناعية. إلا أنه لجأ بعد ذلك إلى مهنة أكاديمية في العام 1892 م. وبين الفترة الممتدة من 1894 م إلى 1911 م، طور فريتز هابر عملية هابر-بوش بالتعاون مع مُساعدته، حيث أسهمت هذه العملية في إنتاج الأمونيا على نطاق واسع، وكان ذلك خطوة كبيرة في الصناعة الزراعية. هذه العملية هي التي أهلته للفوز بجائزة نوبل في العام 1918 م.

في العام 1919 م، طور فريتز هابر وماكس بورن-هابر، التي تسمح بحساب طاقات الشبكة البلورية. ومنذ العام 1919 م، خدم ألمانيا خلال الحرب العالمية الأولى بـ مشاركته في تطوير الأسلحة الكيميائية، لكنه اضطر في الحرب العالمية الثانية إلى الفرار من ألمانيا، وقبل في فلسطين التي كانت تحت الانتداب البريطاني منصب مدير في معهد سيف للأبحاث. أُصيب هابر بنوبة قلبية قاتلة في 29 يناير في العام 1934 وهو عائد إلى الشرق الأوسط من مقر إقامته في فندق سويسري.

الوحدة 6

مراجعة الوحدة

الدرس 6-1: المحتوى الحراري

- **المُسْعِرَة** (قياس كمية الطاقة الحرارية) **Calorimetry** هي أحد فروع العلوم الفيزيائية الذي يدرس التبادل الحراري بين المواد.
- يمكن صنع **مسَعِرٌ حراري** **Calorimeter** بسيط باستخدام كوبين من الفلين مع غطاء ومقاييس درجة حرارة، ومحرك.
- **الحرارة النوعية** **Specific heat capacity** لأية مادة هي كمية الطاقة اللازمة لتغيير درجة حرارة 1kg من المادة بمقدار 1°C .
- يكون **التغيير في المحتوى الحراري** **Enthalpy change** مساوياً للتغيير في الطاقة الحرارية الذي يتم قياسه عند ضغط ثابت.
- الشروط التي تُحدّد **الحالة القياسية** **Standard state** هي درجة حرارة مقدارها 25°C ، وضغط مقداره 1 atm وتركيز 1 M للمحاليل.
- عندما يحترق مول واحد من المركب بشكل كامل مع الأكسجين في الظروف القياسية، يُشار إلى التغيير في المحتوى الحراري على أنه **حرارة الاحتراق القياسية** **Standard enthalpy change of combustion**.
- عندما يتكون 1 mole من مادة ما، من العناصر الأساسية الموجودة في حالاتها القياسية، يُشار إلى التغيير في المحتوى الحراري على أنه **حرارة التكوين القياسية** **Standard enthalpy change of formation**.
- عند إنتاج 1 mole من الماء نتيجة تفاعل بين حمض وقاعدة في الظروف القياسية، يُشار إلى التغيير في المحتوى الحراري على أنه **حرارة التعادل القياسية** **Standard enthalpy change of neutralization**.
- عندما يذوب 1 mole من المادة المذابة في مذيب إلى أن يتحقق التخفيف اللانهائي، يُشار إلى التغيير في المحتوى الحراري على أنه **حرارة الذوبان القياسية** **Standard enthalpy change of solution**.

أسئلة اختيار من متعدد

1. إذا كانت قيمة ΔH لتفاعل ما تساوي $+71.7 \text{ kJ/mol}$ ، فما نوع هذا التفاعل؟ 
- .a. تعادل .b. احتراق
.c. طارد للحرارة .d. ماص للحرارة
2. أي من العناصر الآتية لا يمتلك حرارة تكوين قياسية تساوي قيمتها صفرًا عند درجة حرارة 25°C ، وضغط مقداره 1 atm ؟ 
- $\text{O}_{2(g)}$.c .a $\text{H}_{2(g)}$
 $\text{Fe}_{(g)}$.d .b $\text{N}_{2(g)}$
3. يمكن للتفاعل الكيميائي أن يحدث في خطوة واحدة أو خطوتين. أي من العبارات الآتية تعبّر بشكل صحيح عن قانون هس؟ 
- .a. حفظ الكتلة لا يعتمد على مسار التفاعل.
.b. التغيير في المحتوى الحراري في تفاعل الخطوة الواحدة هو الأقل
.c. النواتج من مسار الخطوة الواحدة هي نفسها النواتج من المسار ذي الخطوتين.
.d. التغيير في المحتوى الحراري في تفاعل الخطوة الواحدة هو عبارة عن جمع التغيير في المحتوى الحراري لتفاعلتين في مسار الخطوتين.
4. أي من أنواع التفاعلات الآتية يكون المحتوى الحراري ذا قيمة سالبة؟ 
- .a. ماص للحرارة، إذ يقل المحتوى الحراري للنظام.
.b. طارد للحرارة، إذ يقل المحتوى الحراري للنظام.
.c. طارد للحرارة، إذ يزداد المحتوى الحراري للنظام.
.d. ماص للحرارة، إذ يزداد المحتوى الحراري للنظام.
5. المواد الآتية: A و B و C هي عناصر. احسب ثم اختر حرارة التكوين القياسية الصحيحة للمركب ABC_2 مستخدماً المعادلات الكيميائية الحرارية الآتية: 
- $\text{A} + \text{B} \rightarrow \text{AB}$ $\Delta H_1 = + 50 \text{ kJ/mol}$ + 50 kJ/mol .a
 $\text{AB} + \text{C}_2 \rightarrow \text{ABC}_2$ $\Delta H_2 = + 125 \text{ kJ/mol}$ + 75 kJ/mol .b
+ 125 kJ/mol .c
+ 175 kJ/mol .d
6. أي من العناصر الآتية ليس في حالته القياسية؟ 
- $\text{Hg}_{(s)}$.c .a $\text{Li}_{(s)}$
 $\text{Ag}_{(s)}$.d .b $\text{Fe}_{(s)}$

7. أيٌ من المصطلحات الآتية يعني: مقدار الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة 1 kg من مادة ما 1°C ؟



- a. المحتوى الحراري.
- b. الحالة القياسية.
- c. الحرارة النوعية.
- d. المُسَعِّرِيَّة (قياس كمية الطاقة الحرارية).

8. أيٌ من العبارات الآتية تُعدُّ أفضل تعريف لحرارة التكوين القياسية؟



- a. التغيير الكلي في المحتوى الحراري لإزالة إلكترون من أيون أو ذرة.
- b. التغيير الكلي في المحتوى الحراري بالإضافة إلى إلكترون إلى أيون أو ذرة.
- c. التغيير الكلي في المحتوى الحراري لتكوين مول واحد من مُركب ما من عناصره.
- d. التغيير الكلي في المحتوى الحراري لتكوين مول واحد من مُركب أيوني من أيوناته الغازية.

9. تم استخدام مُسَعِّر حراري بسيط لتحديد المحتوى الحراري لاحتراق الإيثانول، وكانت القيمة التي تم الحصول عليها من التجربة أقلَّ من القيمة الفعلية. ما السبب في ذلك؟



- a. الاحتراق كامل.
- b. سوء التهوية.
- c. قياسات دقيقة جدًا لدرجة الحرارة.
- d. فقدان الطاقة الحرارية لمُحيط التفاعل.

10. سُخِّن 4.0 g من الزجاج من 274 K إلى 314 K فامتص طاقة حرارية مقدارها 32 J . الحرارة النوعية لهذا النوع من الزجاج هي:



- .0.20kJ/g.K .c
- .200.0J/kg.K .a
- .20.0J/mol.K .d
- .20.0J/g.K .b

أسئلة الإجابات القصيرة

الدرس 6-1: المحتوى الحراري

11. ما المقصود بالحرارة النوعية للمادة؟



12. حدث تفاعل طارد للحرارة في مُسَعِّر حراري، حيث تم استخدام مقياس درجة الحرارة لقياس درجة حرارة التفاعل، ثم استُخدم وعاء غير معزول بدلاً من المُسَعِّر الحراري. قارن بين الحرارة المقاومة في الوعاء غير المعزول والحرارة المقاومة في المُسَعِّر الحراري؟ ووضح إجاباتك.



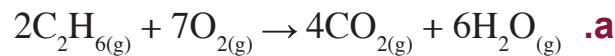
13. إذا كانت المواد المُتَفَاعِلَة لتفاعلٍ ما تمتلك طاقة أكثر من المواد الناتجة، فهل سيكتب الوسط المحيط حول التفاعل الطاقة، أم يفقدها؟



تقويم الوحدة

14. استخدم الجدول الآتي لحساب التغيير في المحتوى الحراري لاحتراق الإيثان والبروبان:

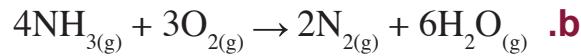
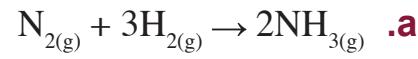
$C_2H_{6(g)}$	$C_3H_{8(g)}$	$CO_{2(g)}$	$H_2O_{(g)}$
$\Delta H_f = -83.8$ kJ/mol	$\Delta H_f = -104.7$ kJ/mol	$\Delta H_f = -393.5$ kJ/mol	$\Delta H_f = -241.8$ kJ/mol



15. ما المقصود بحرارة التكوين القياسية؟ *

16. احسب التغيير في المحتوى الحراري للتفاعلين الآتيين مستخدماً حرارة التكوين القياسية الواردة في الجدول الآتي:

$NH_{3(g)}$	$H_2O_{(g)}$
$\Delta H_f^\circ = -46.0$ kJ/mol	$\Delta H_f^\circ = -241.8$ kJ/mol



17. تمت إضافة 50 mL من محلول $HCl_{(aq)}$ تركيزه 1 M إلى 50 mL من محلول $NaOH_{(aq)}$ تركيزه 1 M عند درجة حرارة مقدارها $22.0^\circ C$ في مُسَعِّر حراري، فارتفعت درجة الحرارة إلى $28.9^\circ C$. اكتب مُعادلة التفاعل، واحسب حرارة التعادل القياسية للتفاعل.

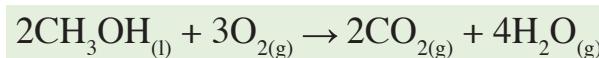
18. تمت إذابة 3 g من $CaCl_{2(s)}$ في 150 g من الماء في مُسَعِّر حراري، وكانت درجة الحرارة الابتدائية للماء تساوي $22.4^\circ C$ ، ثم ارتفعت إلى $25.8^\circ C$ أثناء حدوث التفاعل.

a. احسب كمية الطاقة الحرارية المُنتقلة في التفاعل، إذا كانت الحرارة النوعية للمحلول الناتج تساوي $4.18 \text{ J/g}^\circ C$.

b. هل يكون التفاعل طارداً للحرارة أم ماصاً للحرارة؟

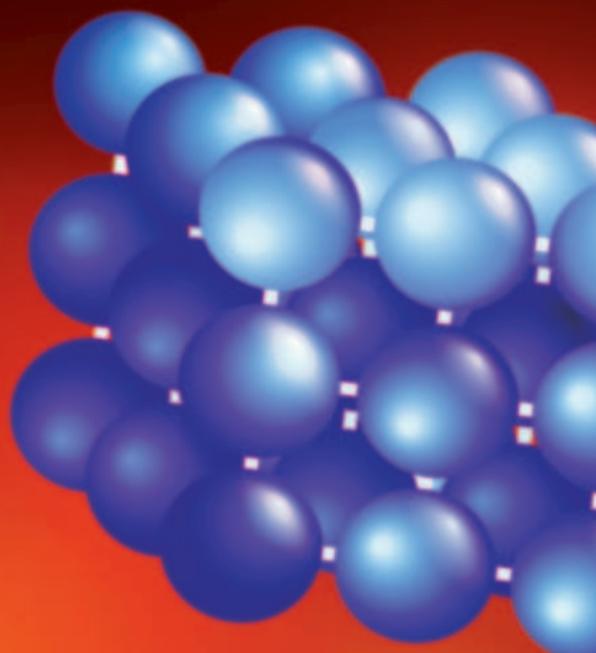
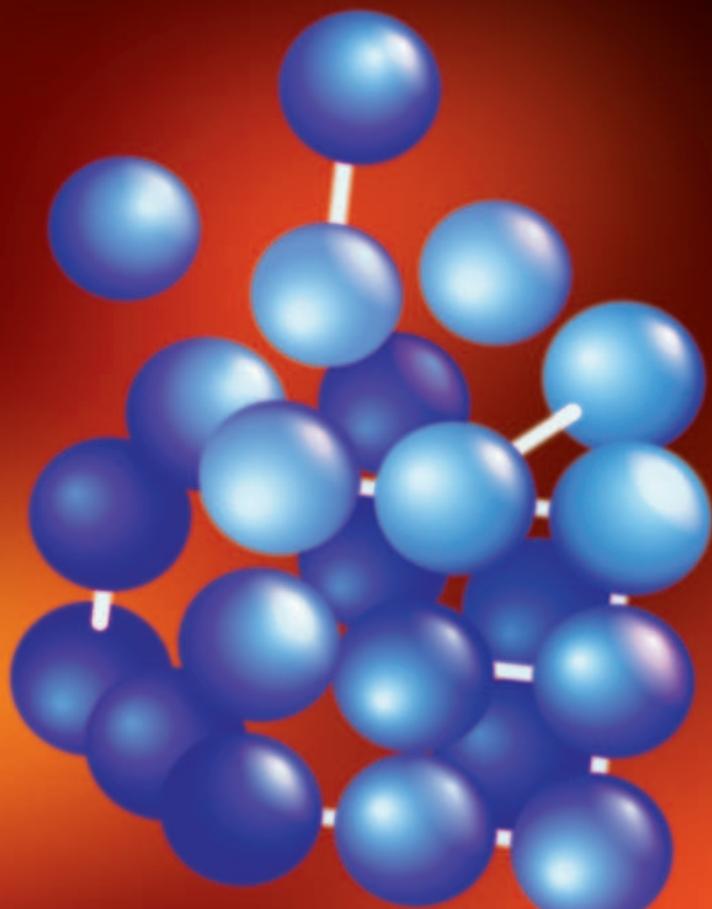
c. احسب حرارة الذوبان القياسية لكل مول من $CaCl_2$.

19. تم احتراق 10 g من الميثانول مع فائض من غاز الأكسجين بحسب المعايير الكيميائية الآتية:



a. احسب التغيير في المحتوى الحراري للتفاعل السابق بالاستعانة بالجدول 6-4 ص 79.

b. حدث هذا التفاعل في مُسَعِّر حراري يحتوي على 250 g من الماء عند درجة حرارة إبتدائية $25^\circ C$ احسب درجة الحرارة النهائية عند ثبات الضغط (الحرارة النوعية للماء = $4184 \text{ J/kg}^\circ C$).



الوحدة 7

الإنترودبي (العشوائية) والطاقة الحرارة

Entropy and Free Energy

في هذه الوحدة

C1210

الدرس 1-7: الإنترودبي (S)

مقدمة الوحدة

يقدم الدرس 1-7 للطلاب مفهوم الإنترولي (العشوائية). وقد عرّف هذا الدرس الإنترولي بطريقة وصفية بسيطة: إنه قياس عشوائية الجسيمات وأضطرابها في نظام معين. وصفت الإنترولي أيضاً بأنها القوة المؤثرة الموجودة في الكون، والتي تؤثر في التغيرات التي تحدث في المواد الكيميائية والأنظمة اليومية. وتم تعريف القانون الثاني للديناميكا الحرارية من حيث التغيرات التي تحدث في الإنترولي داخل الكون وبين الأنظمة وما يحيط بها.

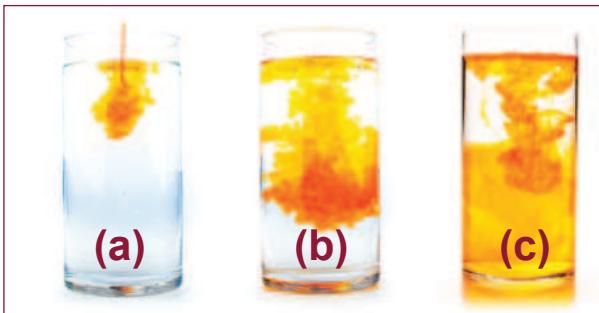
الأنشطة والتجارب

(7-1 الإنترولي (S))

الدرس 1-7

الإنترولي (S)

Entropy (S)



الشكل 1-7 انتشار صبغة طعام برتقالية اللون في جميع أنحاء الكأس الذي يحتوي على الماء.



الشكل 2-7 (a) العشوائية وعدم التنظيم (b) الترتيب المنظم.

المفردات



Spontaneity	التلقائية
Entropy	الإنترولي (العشوائية)
	القانون الثاني للديناميكا الحرارية
Second law of thermodynamics	

إذا أضيفت عدة نقاط من صبغة طعام برتقالية اللون إلى كأس يحتوي على الماء (الشكل 7) فإن هذه الصبغة سوف تنتشر في جميع أنحاء الماء الموجود في الكأس (الشكلان 7, b1-7, c1-7) إلى أن يصبح لون الماء برتقالياً موحداً، وتكون جزيئات الصبغة البرتقالية موزعة بشكل عشوائي بين جزيئات الماء. في الحياة اليومية، قد تلاحظ الأشياء الموضوعة بشكل عشوائي في غرفة المكتب (الشكل 7a2) أو تلاحظ الترتيب المنظم (الشكل 7b2).

في هذا الدرس، سوف نستكشف القوة المؤثرة الموجودة في الكون، والتي تفضل العشوائية على النظام (الترتيب)، فهذه القوة المؤثرة، الإنترولي، تؤثر في التغيرات التي تحدث في المواد الكيميائية والأنظمة اليومية.

مخرجات التعلم

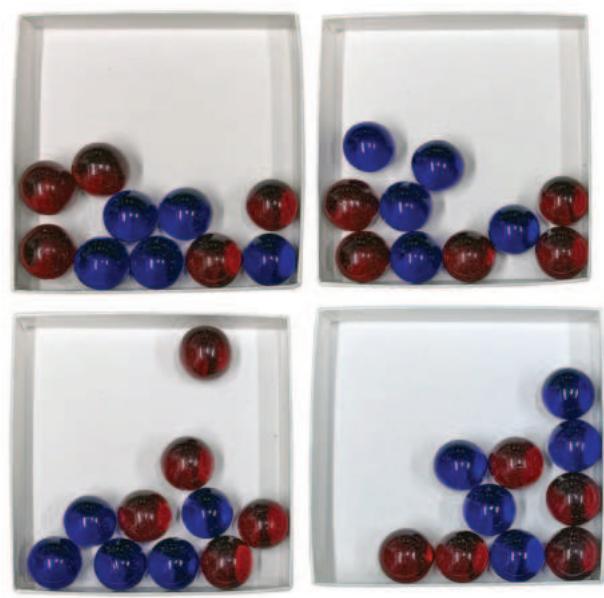
C1210.1 يناقش كيف وفق القانون الثاني للديناميكا الحرارية بين الميل الطبيعي في الكون نحو الحد الأدنى من الطاقة الكامنة، والحد الأقصى من الإنترولي (العشوائية)، ويصف كيفية تطبيق هذا الميل أو الاتجاه على الأنظمة الكيميائية.

C1210.2 يذكر ويشرح العوامل التي تؤدي إلى زيادة في الإنترولي (العشوائية) في النظام الكيميائي.

كيف يمكن تمثيل العشوائية؟



الشكل 3-7 الترتيب 1.



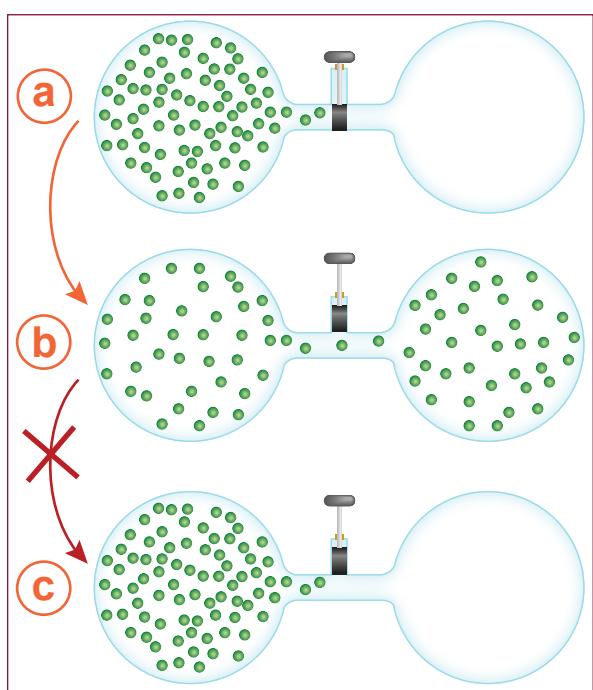
الشكل 4-7 بعض الترتيبات المحتملة.

- للتعرف على مفهوم العشوائية، نفذ التجربة الآتية:
1. ضع خمس كرات زجاجية حمراء، وخمس كرات زجاجية أخرى زرقاء في صندوق صغير مفتوح من الأعلى، أو في وعاء مسطح القاع، له حواف ويكون مفتوحاً من الأعلى.
 2. ربّ ال الكرات الزجاجية كما هو مبين في الشكل 3-7.
 3. هز الصندوق أو الوعاء مدة 5 ثوان.
 4. ألق نظرة في داخله، ولاحظ ترتيب الكرات الزجاجية.
 5. ارسم مجموعة من الأشكال توضح ترتيب الكرات الزجاجية قبل عملية هز الصندوق أو الوعاء وبعدها.
 6. كرر الخطوات من 2 إلى 5 باستخدام الترتيب نفسه المبين في الشكل 3-7 . قد تلاحظ ترتيباً مماثلاً لأحد الترتيبات الظاهرة في الشكل 4-7.

الأسئلة:

- a. هل يمكن توقع ترتيب محدّد أو نمط معين للكرات الزجاجية بعد كل محاولة؟
- b. إذا كان بإمكانك ذلك، فهل سيطال الترتيب أو النمط جميع الكرات الزجاجية أو سيقتصر ذلك على كرات محددة؟
- c. وضح ما يحدث في عشوائية الكرات الزجاجية من حيث ازدياد العشوائية أو نقصانها، وذلك عندما يتم هز الصندوق أو الوعاء.
- d. إذا نفذت المزيد من المحاولات وقد تم هز الصندوق أو الوعاء خاللها عدة مرات، فهل تتوقع أن تكون الكرات الزجاجية مرتبة مثل ترتيبها الأساسي كما في الشكل 3-7 ؟
- e. إذا نفذت محاولات إضافية باستخدام مزيد من الكرات الزجاجية في داخل الصندوق أو الوعاء، فهل ترى أن توقع النمط سيكون أسهل إذا بنيت توقعك على العدد الأقل من الكرات الزجاجية؟ وما الذي يمكن أن يحدث إذا بنيت توقعك على جميع الكرات الزجاجية؟
- f. لماذا يُتوقع ألا تنجح هذه التجربة مع الكرات الزجاجية التي لها اللون نفسه؟

العمليات التلقائية والإنترولي



الشكل 5-7 تجربة افتراضية لجسيمات غاز لتوضيح الحركة الطبيعية "الأمامية فقط" لبعض العمليات بشكل عملي.

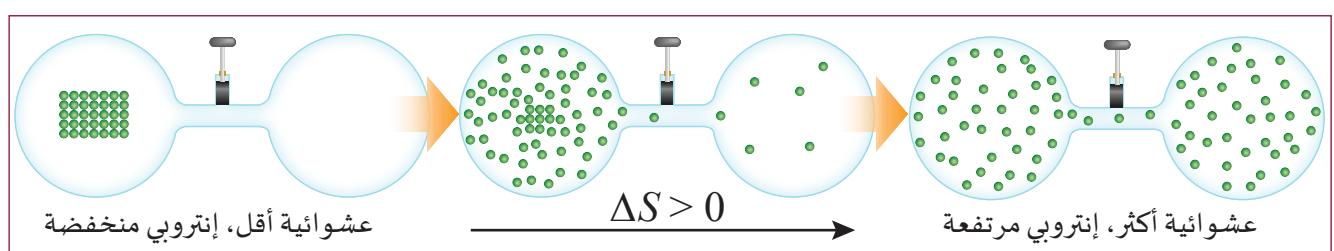
نلاحظ في الطبيعة أنَّ عمليات محددة تسير في اتجاه واحد، ولا تسير نهائياً في الاتجاه المعاكس له. ولعلَّ أفضل مثال على ذلك هو تمدد الغاز كما هو مبين في الشكل 5-7: إذا فتح الصمام، فإنَّ حالة النظام سوف تسير بشكل تلقائي من (a) إلى (b)، وسوف نلاحظ أنَّ النظام لن يسير بشكل تلقائي نهائياً من (b) إلى (c). لماذا تُعد العملية العكسية (من b إلى c) غير ممكنة؟ لا يوجد شيء في قوانين الحركة يمنع تحرك الجزيئات بمفردها إلى اليسار أو إلى اليمين في الشكل 5-7، إلا أنَّ النظام كله لا يسير بشكل تلقائي من (b) إلى (c) بسبب الاحتمالية. إنَّ الفرصة بأن تعود الجزيئات جميعها بشكل عشوائي إلى الوعاء الأيسر ضعيفة جداً، وقد تساوي صفرًا.

التلقائية Spontaneity تعني أن يحدث النظام (التفاعل) بشكل طبيعي من دون تأثير خارجي. ولوصف ميل الأنظمة للحركة نحو الأمام فقط، وليس بالاتجاه المعاكس، فإننا نحتاج إلى كمية جديدة تُسمى الإنترولي. **والإنترولي (العشوائية) Entropy** هي قياس درجة العشوائية أو الفوضى في نظام ما. في معظم الحالات تتحرك الأنظمة بشكل تلقائي فقط باتجاه ازدياد الإنترولي (العشوائية).

الإنترولي قياس درجة العشوائية (عدم الانتظام) الموجودة في نظام ما.

يتمّ تمثيل الإنترولي بالرمز "S"، ولها وحدة قياس، عبارة عن وحدة الطاقة (J) مقسومة على وحدة درجة الحرارة (K)، أي (J/K) .

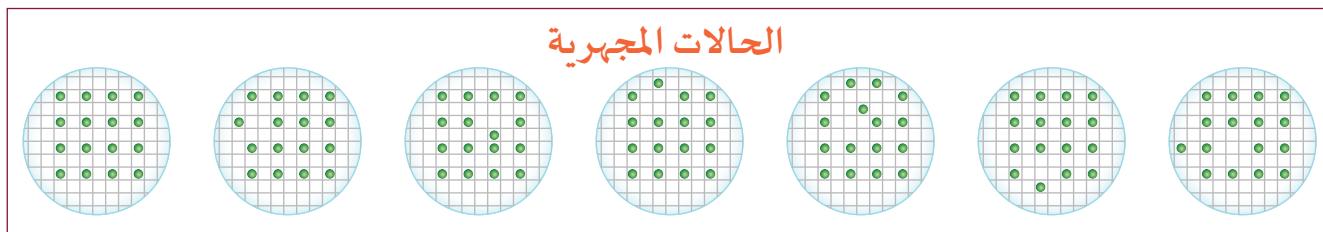
وكما المحتوى الحراري (H)، فإن الإنترولي هي قوة مؤثرة موجودة في الكون، حيث يُفضل النظام الانتقال من الحالة الأقل عشوائية (الأكثر نظاماً) إلى الحالة الأكثر عشوائية (الأقل نظاماً). ومثل هذا التغيير يمكن تمثيله بإشارة موجبة للإنترولي $(\Delta S +)$ كما هو مبين في الشكل 6-7.



الشكل 6-7 تتحرك الأنظمة بشكل تلقائي نحو زيادة الإنترولي.

الحالات المجهرية

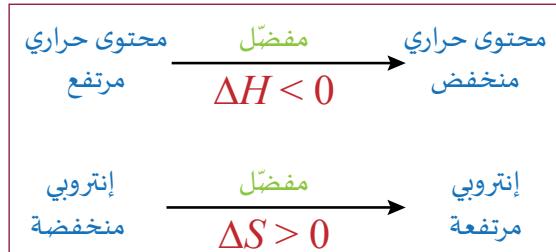
إن الكميات العينية (Macroscopic)، مثل التركيز، هي عبارة عن متوسط عدد الجسيمات المجهرية جماعها الموجودة في النظام في وحدة حجم محددة، حيث يوجد الكثير من الطرائق لترتيب مجموعة الجسيمات، فيكون لكل مجموعة التركيز نفسه. لذلك، فإن كل ترتيب مختلف للجسيمات هو حالة مجهرية Microstate. وتقيس الإنترولي عدد الحالات المجهرية المختلفة التي لها الحالة العينية نفسها التي يمكن ملاحظتها. وعلى سبيل المثال، فإن الشكل 7-7 يبيّن سبع حالات مجهرية لها متوسط التركيز نفسه.



الشكل 7-7 تمتلك الحالات المجهرية متوسط التركيز نفسه، ولكن بترتيب مختلف للجسيمات المجهرية.

ولمعرفة لماذا يتوجه النظام نحو قيمة إنترولي أعلى، علينا الربط بين الحالات المجهرية المحتملة للحالة العينية نفسها. فكلما زادت إحتمالية وجود حالات مجهرية أكثر لحالة عينية معينة تزداد الإنترولي. لذلك مع زيادة عدد الجسيمات في النظام تزداد الحركة العشوائية لهذه الجسيمات مما يسبب زيادة عدد الحالات المجهرية التي تحرّك النظام إلى إنترولي مرتفعة.

في النظام الواقعي، عدد الجسيمات لمول واحد من مادة ما يساوي عدد أفوجادرو N_A ، وهذا مساوٍ تقريباً لـ 6.02×10^{23} ، مما يدلّ على حتمية وجود الكثير من الحالات المجهرية للمادة في حالات عينية معينة مثل درجة الحرارة والكثافة وغيرها.



اتجاه العمليات الكيميائية

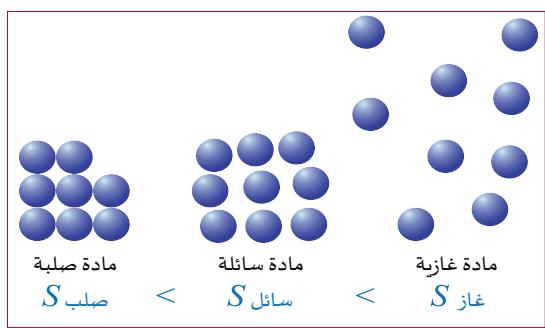
تميل الأنظمة إلى الاتجاه من الوضع الذي تكون فيه الطاقة الكامنة مرتفعة إلى الوضع الذي تكون فيه الطاقة الكامنة منخفضة. ويتم تمثيل هذا في المعادلات الكيميائية الطاردة للحرارة من خلال الإشارة السالبة للتغيير في المحتوى الحراري ($-\Delta H$). حيث أن التفاعلات الكيميائية تحدث بشكل طبيعي بالاتجاه الذي يجعل $\Delta H < 0$ (الشكل 8-7). يصل إلى طاقة كلية منخفضة.

الشكل 8-7 ملخص للتغيرات المفضلة التي تحدث في المحتوى الحراري والإنترولي.

بالإضافة إلى ذلك، هناك عامل آخر يؤثّر في اتجاه العملية الكيميائية، فالعملية التلقائية تسير في الاتجاه الذي يزيد الإنترولي الكلية للكون (النظام + الوسط المحيط).

ومن المتوقع أن قيمة إنترولي النظام قد تقلّ، أما الإنترولي الكلية للنظام وما يحيط به فيجب أن تزداد. إن المحتوى الحراري والإنترولي هما قوتان مؤثّران متعاكستان في ما يتعلّق بالتغييرات التي تحدث في الكون، ويفضّل النظام أن يتّجه إلى الوضع الذي يكون فيه المحتوى الحراري للنظام منخفضاً وإنترولي مرتفعة (الشكل 8-7).

العوامل التي تزيد الإنترولي



الشكل 7-7 مقارنة الإنترولي لحالات مختلفة لمادة معطاء.

تغير الحالة الفيزيائية: وهو أهم عامل يساعد في توقع ازدياد الإنترولي أو نقصانها. تتميز الحالة الصلبة بأنها الحالة التي تمتلك العشوائية الأقل (الأكثر إنتظاماً) وذلك لأن لجسيماتها حركة اهتزازية ولكنها ثابتة في مكانها. وتكون الإنترولي لديها هي الأقل. وعند انصهار المادة الصلبة تبقى الجسيمات قريبة بعضها من بعض، لكن مع مجال أكبر للحركة، عندئذ يصبح النظام أكثر عشوائية، وتصبح الإنترولي أعلى. وعند تبخر السائل تتحرك الجسيمات بسرعة أكبر فيصبح النظام أكثر عشوائية وأعلى إنترولي، فالحالة الغازية تتميز بأنها الحالة التي تمتلك العشوائية الأكثر (الأقل إنتظاماً) ويكون لديها أعلى إنترولي (الشكل 7-9). لذلك، فإن الإنترولي تزداد عندما يحول تفاعل كيميائي ما المواد المتفاعلة من حالة لها إنترولي منخفضة إلى مواد ناتجة في حالة لها إنترولي مرتفعة مثل تحول الماء السائل إلى بخار ماء.

مثال آخر، تفاعل تفكك نيترات الأمونيوم الصلبة لإنتاج غاز النيتروجين وغاز الأكسجين والماء السائل بحسب المعادلة الكيميائية الآتية:

$$2\text{NH}_4\text{NO}_{3(s)} \rightarrow 2\text{N}_{2(g)} + 4\text{H}_2\text{O}_{(l)} + \text{O}_{2(g)}$$

في هذه الحالة يؤدي إنتاج مواد غازية متعددة من مادة صلبة واحدة إلى زيادة إنترولي النظام.

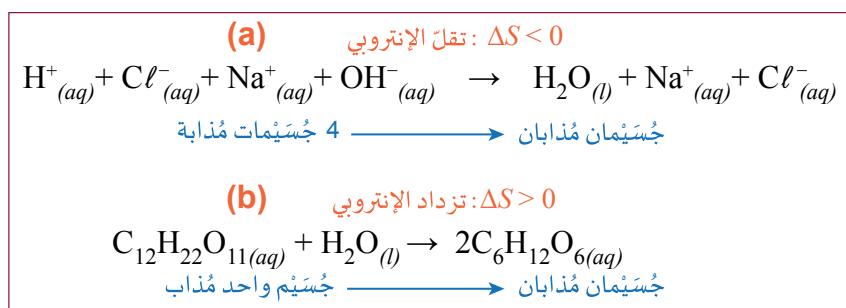
زيادة درجة الحرارة: عند زيادة درجة الحرارة تزداد الطاقة الحركية للجسيمات فتتحرك وتتصادم بشكل أسرع مما يجعلها تبتعد فتزداد الإنترولي.

زيادة عدد الجسيمات: تزداد الإنترولي عندما يمتلك التفاعل عدد جسيمات أكثر جهة المواد الناتجة مقارنة بجهة المواد المتفاعلة. وفي التفاعل الممثل بالمعادلة الكيميائية الآتية:

$$2\text{NO}_{2(g)} \rightarrow 2\text{NO}_{(g)} + \text{O}_{2(g)}$$

ينتج ثلاثة مولات من الغاز من تفكك مولين اثنين من الغاز وبذلك تزداد إنترولي النظام.

وبشكل عام، يُعد تغير عدد الجسيمات في الحالة الغازية في تفاعل ما، العامل الأكثر تأثيراً في ازدياد الإنترولي أو نقصانها.



الشكل 10-7 العلاقة بين الإنترولي وكل من: (a) نقصان عدد جسيمات المادة المذابة، و(b) ازدياد عدد جسيمات المادة المذابة.

عندما يقل عدد جسيمات المادة المذابة، تقل إنترولي النظام (الشكل 7-a10)، أما عندما يزداد عدد جسيمات المادة المذابة، فإن إنترولي النظام تزداد (الشكل 7-b1).

زيادة حجم الغاز: إن العملية التي تزيد حجم الغاز (زيادة المسافة بين جزيئات الغاز) عند درجة حرارة ثابتة سوف تزيد إنترولي الغاز.

القانون الثاني للديناميكا الحرارية

ينص **القانون الثاني للديناميكا الحرارية** **Second law of thermodynamics** على أن: العمليات التلقائية تسير فقط في الاتجاه الذي تزداد فيه الإنترولي الكلية للكون.

ويمكن تمثيل القانون الثاني للديناميكا الحرارية بالمعادلة 1-7، على النحو الآتي:

القانون الثاني للديناميكا الحرارية	1-7
$\Delta S_{\text{universe}} = (\Delta S_{\text{system}} + \Delta S_{\text{surroundings}}) > 0$	

يتوقع القانون الثاني للديناميكا الحرارية أنه، حتى عندما تنخفض إنترولي النظام ($\Delta S_{\text{system}} < 0$)، فإن الوسط المحيط به سيواجه ازدياداً كبيراً وكافياً في الإنترولي ($\Delta S_{\text{surroundings}} > 0$) فتزاد إنترولي الكون كله ($\Delta S_{\text{universe}} > 0$). القانون الثاني للديناميكا الحرارية مختلف جدًا عن قانون حفظ الطاقة (القانون الأول للديناميكا الحرارية)، فالإنترولي غير محفوظة، والإنترولي الكلية للكون تزداد دائمًا.

مثال 1



إذا علمت أن قيمة التغير في الإنترولي لتفاعل تلقائي ما (نظام) يساوي: $\Delta S_{\text{system}} = -45 \text{ J/K}$
 (1) ما قيمة التغير في إنترولي الوسط المحيط بالنظام؟

(2) هل تُظهر القيمة المعطاة في هذا المثال للتغير في إنترولي النظام ازدياداً في الإنترولي أم انخفاضاً فيه؟

الحل

(1) باستخدام القانون الثاني للديناميكا الحرارية:

$$\Delta S_{\text{surroundings}} > -\Delta S_{\text{system}}$$

$$\Delta S_{\text{surroundings}} > -(-45 \text{ J/K})$$

$$\Delta S_{\text{surroundings}} > +45 \text{ J/K}$$

(2) تقل قيمة التغير في إنترولي النظام لأن إشارته سالبة.

يمكن حساب التغير في المحتوى الحراري (ΔH) لنظام ما، إلا أنه من غير الممكن حساب المحتوى الحراري (H) للنظام نفسه لعدم وجود طريقة لتحديد النقطة الصفرية للمحتوى الحراري. ومع ذلك، فإنه بالإمكان حساب كل من التغير في الإنترولي (ΔS) والإنترولي (S) لمادة ما، وهذا بفضل القانون الثالث للديناميكا الحرارية. هل يمكنك أن تكتشف سبب ذلك؟



التغييرات في الإنترولي نتيجة التدفق الحراري (انتقال الحرارة)

يتم تمثيل التغيير في الإنترولي نتيجة التدفق الحراري بالمعادلة 7-2. وفي الكثير من العمليات الحسابية، تكون وحدة قياس الإنترولي عبارة عن Joules/Kelvin أو (J/K). عند حل الأمثلة، يراعى أن قيمة الإنترولي المولية تسجل في جداول قياسية بوحدات قياس أخرى مثل Joules/mol.Kelvin أو (J/mol.K).

التغيير في الإنترولي (J/K)	ΔS	التغيير في الإنترولي	2-7
كمية الحرارة (J)	Q		
درجة الحرارة المطلقة (K)	T	$\Delta S = \frac{Q}{T}$	

عند تطبيق القانون الثاني للديناميكا الحرارية، يجب عليك دائمًا الأخذ بالحسبان النظام والوسط المحيط معاً، فالوسط المحيط بالنظام بالطبع لا يتضمن الكون كله، حيث يتضمن الوسط المحيط بالنظام كلّ المواد التي تكتسب الحرارة من النظام.

مثال 2



غمّرت كمية مقدارها g 100 من محلول مخفّف عند درجة حرارة مقدارها 20°C في حمام ثلجي كانت درجة حرارته 0°C . افترض أنّ الحمام الثلجي يمتص الحرارة كله دون أن تغيّر درجة حرارته؛ فإذا علمت أنّ الحرارة النوعية للماء تساوي $4184 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C}$ ، احسب التغيير في إنترولي النظام (المحلول) والوسط المحيط به (حمام الثلج)، وطبق القانون الثاني للديناميكا الحرارية.

الحل

نعمل في البداية على تبسيط الافتراض بأنّ الحرارة كله فقدت من محلول عند درجة حرارة مقدارها 20°C ، واكتسبت بواسطة حمام الثلج عند درجة حرارة مقدارها 0°C . بما أنّ محلول مخفّف لذلك تعتبر كتلته أكثّرها ماء وبذلك تستخدم الحرارة النوعية للماء في حساب كمية الطاقة الحرارية المكتسبة من النظام.

$$Q = mc\Delta T = (0.1 \text{ kg})(4184 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C})(20^{\circ}\text{C}) = 8368 \text{ J}$$

احسب التغيير في إنترولي النظام باستخدام المعادلة 7-2، لاحظ أن إشارة ΔS سالبة، لأنّ النظام فقد الحرارة.

$$T(K) = 20^{\circ}\text{C} + 273 = 293 \text{ K}$$

$$\Delta S_{\text{system}} = -\frac{Q}{T} = \frac{-8368 \text{ J}}{293 \text{ K}} = -28.6 \text{ J/K}$$

تكون إشارة التغيير في إنترولي الوسط المحيط موجبة، لأنّ الحرارة اكتسبت من المحيط.

$$T(K) = 0^{\circ}\text{C} + 273 = 273 \text{ K}$$

$$\Delta S_{\text{surr}} = \frac{Q}{T} = \frac{+8368 \text{ J}}{273 \text{ K}} = +30.7 \text{ J/K}$$

طبق القانون الثاني للديناميكا الحرارية لنوضح أنّ إشارة التغيير الكلّي في إنترولي الكون كله تكون موجبة. ولهذا السبب، فإنّ الحرارة تتدفق من الساخن إلى البارد.

$$\Delta S_{\text{universe}} = \Delta S_{\text{system}} + \Delta S_{\text{surr}} = -28.6 + 30.7 = +2.1 \text{ J/K}$$

التغييرات في الإنترودي نتيجة تغيرات الحالة

إن التغيير في حالة المادة يصاحبه دائمًا تغيير في الإنترودي. ولأن تغييرات الحالة تحدث عند درجة حرارة ثابتة، فإن تغييرات الحالة هذه تكون انعكاسية، وهذا يعني أن معاملة التغيير في الإنترودي لعملية الانصهار والتجمد تكون نفسها، باستثناء عكس الإشارة.

ولحساب الإنترودي لتغيير الحالة، نستخدم الحرارة المولية لتغيير الحالة، ودرجة الحرارة التي تتغير عندها حالة المادة بحسب المعادلة 3-7.

التغيير في الإنترودي (kJ/K)	ΔS	الإنترودي لتغيير الحالة	3-7
الحرارة المولية للانصهار (kJ/mol)	ΔH_{fus}	$\Delta S = \frac{\Delta H_{vap}}{T_B}$ و $\Delta S = \frac{\Delta H_{fus}}{T_M}$	
درجة الانصهار (K)	T_M		
الحرارة المولية للتبلور (kJ/mol)	ΔH_{vap}		
درجة الغليان (K)	T_B	الانصهار أو التجمد	الغليان أو التكاثف

مثال 3



استخدم القانون الثاني للديناميكا الحرارية لتوضح أن الثلج ينصهر بشكل تلقائي عند درجة حرارة مقدارها 10°C ، ولكنه لا ينصهر بشكل تلقائي عند درجة حرارة مقدارها -10°C . إذا علمت أن الحرارة المولية لانصهار الماء (الثلج) تساوي 6.02 kJ/mol .

الحل

العملية تلقائية إذا كانت $\Delta S_{\text{universe}} > 0$ ، نفترض أن الحرارة قد امتصت بواسطة الثلج (النظام) عند درجة الانصهار (0°C)، وفقدت من الوسط المحيط عند درجة الحرارة $+10^{\circ}\text{C}$ ، أو عند -10°C .

$$\Delta S_{\text{system}} = \frac{\Delta H_{fus}}{T_M} = \frac{6.02 \text{ kJ/mol}}{273 \text{ K}} = +0.022 \text{ kJ/mol.K}$$

تكون إشارة تغيير إنترودي المحيط ΔS سالبة، لأن المحيط فقد الحرارة.

عند -10°C	عند $+10^{\circ}\text{C}$
$\Delta S_{\text{surr}} = \frac{-6.02 \text{ kJ/mol}}{263 \text{ K}}$ $= -0.023 \text{ kJ/mol.K}$	$\Delta S_{\text{surr}} = \frac{-6.02 \text{ kJ/mol}}{283 \text{ K}}$ $= -0.021 \text{ kJ/mol.K}$
$\Delta S_{\text{universe}} = \Delta S_{\text{system}} + \Delta S_{\text{surr}}$ $= +0.022 - 0.023$ $= -0.001 \text{ kJ/mol.K}$	$\Delta S_{\text{universe}} = \Delta S_{\text{system}} + \Delta S_{\text{surr}}$ $= +0.022 - 0.021$ $= +0.001 \text{ kJ/mol.K}$

عند درجة حرارة مقدارها -10°C تكون $\Delta S_{\text{universe}} < 0$. لهذا، فإن العملية غير تلقائية، أما عند درجة حرارة مقدارها $+10^{\circ}\text{C}$ فتكون $\Delta S_{\text{universe}} > 0$ ، فتكون العملية تلقائية.

التفاعلات التي لا تحدث في الظروف القياسية

افترض أن لديك التفاعلين الكيميائيين الآتيين. ما التغيير المتوقع في الإنترولي؟ وما التفسير المنطقي لحدوث هذا التغيير؟



يحدث التفاعل (1) في الحالة الغازية، فعندما يقل عدد جسيمات الغاز، فإن إنترولي النظام تقل في الظروف القياسية.

ومع ذلك، ومن خلال التغيير في المحتوى الحراري، فإننا سنلاحظ أن هذا التفاعل طارد للحرارة، أما في المواقف الحقيقة العملية فنادرًا ما تكون الظروف القياسية، أي درجة حرارة غاز H_2 ، وضغطه أكبر في أغلب الأحيان من الشروط القياسية بكثير، لذلك في الظروف الفعلية تزداد إنترولي النظام. ويعتمد التغيير الفعلي في الإنترولي على الشروط النهائية التي يكون لها غاز H_2 .



الشكل 11-7 يُستخدم تفاعل الثيرمايت لصهر الفلزات.

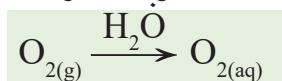
أما التفاعل (2) فإن المعادلة الكيميائية تبين أن جميع مكونات هذا التفاعل في الحالة الصلبة عند الظروف القياسية. ولأن عدد الجسيمات بقي كما هو، فإن التغيير في الإنترولي سيكون ضئيلًا، بسبب الاختلافات في التركيب البلوري ولا يمكن التنبؤ بالتغيير في الإنترولي من خلال المعادلة فقط.

وعند إجراء هذا التفاعل عملياً، نجد إن كمية الحرارة المهاطلة من هذا التفاعل ستتحول المواد الناتجة إلى مواد سائلة ومواد غازية، مما يسبب زيادة في الإنترولي. ويمثل التفاعل (2) تفاعل الثيرمايت، وهو تفاعل يستخدم بشكل شائع في عملية لحام الفلزات بصهرها وتحويلها إلى مادة سائلة (الشكل 11-7).

مثال 4



(1) توقع ثم فسر التغيير في الإنترولي خلال عملية ذوبان غاز الأكسجين في الماء بحسب المعادلة الآتية:



(2) هل تكون إشارة ΔS لهذا التفاعل موجبة أم سالبة؟

الحل

- جسيمات الغاز لديها إنترولي أعلى لأنها تتحرك بحرية وعشوائية أكثر مما هي عليه عندما تذوب هذه الجسيمات في السائل الذي يحد من حركتها، وبالتالي يقلل من حركتها العشوائية. لذلك نتوقع أن تنخفض إنترولي هذا النظام الذي يتحول خلاله الأكسجين من الحالة الغازية إلى مادة ذائبة في المذيب.
- يشار إلى الانخفاض في الإنترولي من خلال إشارة ΔS السالبة ($-\Delta S$).

مثال 5



(1) توقع ثم فسر التغيير في إنترولي التفاعل الآتي:

(2) هل تكون إشارة ΔS لهذا التفاعل موجبة أم سالبة؟

الحل

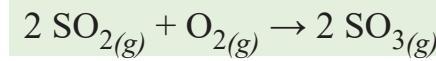
(1) لقد تكونت مادة غازية من مادة صلبة. لهذا، فإنّ من المتوقع أن تزداد الإنترولي.

(2) يشار إلى الزيادة في الإنترولي من خلال إشارة ΔS الموجبة (+).

مثال 6

تُستخدم عملية التلامس (contact process) في إنتاج حمض الكبريتيك صناعيًّا (H_2SO_4).

خلال هذه العملية، ينتج غاز ثالث أكسيد الكبريت بحسب التفاعل الآتي:



(1) هل تزداد الإنترولي أثناء حدوث هذا التفاعل أم تقل؟

(2) هل تكون إشارة ΔS لهذا التفاعل موجبة أم سالبة؟

الحل

(1) التفاعل غازي بشكل كامل. لذا، فإنّ من المتوقع أن يؤدي التغيير في عدد جزيئات الغاز إلى تغيير في الإنترولي. ولأن ثلاثة جزيئات من الغاز في المواد المتفاعلة قد أنتجت جزيئين اثنين من الغازات في المواد الناتجة، فإنّنا نستنتج أن هناك تناقصاً في عدد جزيئات الغاز أثناء حدوث هذا التفاعل، فتقلل إنترولي النظام.

(2) يشار إلى النقصان في إنترولي النظام، من خلال إشارة ΔS السالبة (-).

مثال 7

يحرق غاز البروبان عند درجة حرارة مقدارها 25°C بحسب المعادلة الكيميائية الموزونة الآتية:

(1) هل تزداد الإنترولي أثناء حدوث هذا التفاعل أم تقل؟

(2) حدد اثنين من العوامل المؤثرة على الإنترولي في هذا التفاعل؟

الحل

التفاعل غازي بشكل كامل. ولأن ستة جزيئات من الغاز في المواد المتفاعلة قد أنتجت سبعة جزيئات من الغازات في المواد الناتجة، فإنّنا نستنتج أن هناك زيادة في عدد جزيئات الغاز أثناء حدوث هذا التفاعل، فتزيد إنترولي النظام. (2) العوامل المؤثرة على الإنترولي في هذا النظام: زيادة عدد جزيئات النواتج عن المتفاعلات. وارتفاع درجة الحرارة للنظام (تفاعل طارد للحرارة).



الإنترولي (5)

1-7

كيف يمكن أن تتوقع أن تغيرات الإنترولي سوف تزداد أو تقل؟ وعلام تدل إشارة التغير في الإنترولي؟

سؤال الاستقصاء

ورقة عمل بعنوان الإنترولي – العمل في مجموعات ثنائية.

المواد المطلوبة

الإرشادات الالزمة لتوقع ازدياد الإنترولي أو نقصانها

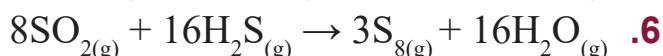
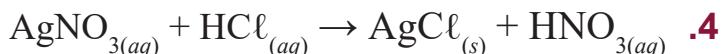
- عندما تزداد العشوائية (عدم الإنظام) لنظام ما، تزداد إنترولي هذا النظام.
- أهم عامل يساعد في توقع تغيرات الإنترولي هو التغير في الحالة، والذي يحدث عندما تتغير المواد المتفاعلة وتصبح مواد ناتجة. الحالة السائلة لمادة ما تمتلك إنترولي أعلى مما هي عليه عندما تكون في حالتها الصلبة، والحالة الغازية لمادة ما تمتلك إنترولي أعلى مما هي عليه عندما تكون في حالتها السائلة.
- في التفاعلات الكيميائية التي تتضمن مواد في الحالة الغازية، يكون التغير في عدد جزيئات الغاز هو العامل الأكثر تأثيراً لتوقع التغير في الإنترولي.
- يمكن التعرف على التغير في الإنترولي من خلال الإشارة التي تسبق ΔS ، حيث إنَّ الزيادة في الإنترولي تُمثل بالقيمة الموجبة ($+\Delta S$)، وينمَّي النقصان في الإنترولي بالقيمة السالبة ($-\Delta S$).

النشاط:

لكل من الأنظمة الآتية، توقع هل تزداد الإنترولي أو تقل، محدداً إشارة التغير في الإنترولي في كل نظام هل هي موجبة أم سالبة؟ قدم سبباً منطقياً لكل توقع وكل إشارة لإنترولي ΔS .

1. تكافُف بخار الماء.

2. تسامي الثلج الجاف ($\text{CO}_{2(s)}$)



9. ذوبان قطعة السكر في كأس الشاي.

10. الأحصنة عند بوابة البداية في سباق ما، والأحصنة بعد مضي 30 ثانية من فتح البوابة.

11. صقران يحلقان باتجاه فرع على شجرة ما، ونفس الصقران وهما واقفان على فرع الشجرة نفسه.

12. اذكر مثالاً غير كيميائي لتوضيح تغير الإنترولي.

اختر الإجابة الصحيحة للأسئلة من 1 إلى 4:

1. أيٌّ من الآتي هو المقياس المرتبط بكمية الإنترولي؟ 

- a. الطاقة الحرارية
- b. الطاقة الحركية
- c. الطاقة الكامنة
- d. العشوائية (عدم الإنظام)

2. أيٌّ من العلاقات الآتية تعبر بشكل صحيح عن علاقة الإنترولي بحالات المادة؟ 

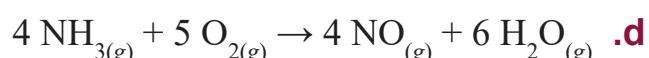
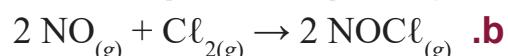
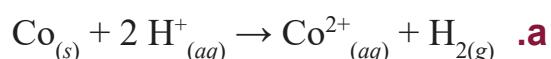
- a. $S_{غاز} > S_{سائل} > S_{صلب}$
- b. $S_{غاز} < S_{سائل} < S_{صلب}$
- c. $S_{غاز} < S_{صلب} < S_{سائل}$
- d. $S_{غاز} > S_{سائل} > S_{صلب}$

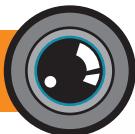
3. أيٌّ من الجمل الآتية تعبر بشكل صحيح عن القانون الثاني للديناميكا الحرارية؟ 

- a. يجب أن تقل إنترولي الكون لكل تفاعل تلقائي.
- b. يجب أن تزداد إنترولي الكون لكل تفاعل تلقائي.
- c. يجب أن تكون إنترولي الكون محفوظة لكل تفاعل تلقائي.
- d. يمكن أن تزداد إنترولي الكون أو تقل لكل تفاعل تلقائي.

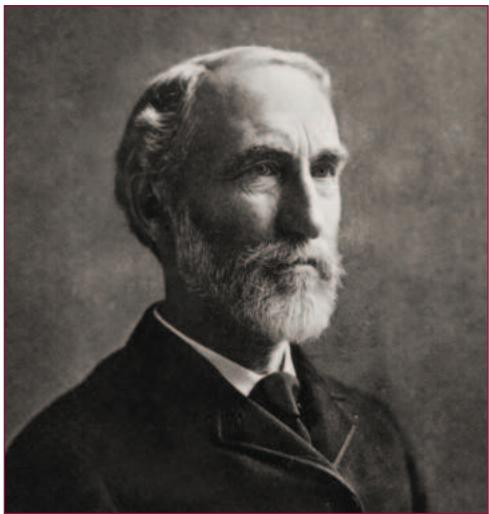
4. كم يكون مقدار الإنترولي للوسط المحيط إذا كان التغيير في إنترولي النظام $+15 \text{ J/K}$ ؟ 

- a. أقل من -15 J/K
- b. أقل من $+15 \text{ J/K}$
- c. أكبر من -15 J/K
- d. أكبر من $+15 \text{ J/K}$

5. هل تزداد الإنترولي أو تقل في التفاعلات الممثلة بالمعادلات الآتية؟ فسر إجابتك. 



جوشيا ويلارد جبس 1839-1903م

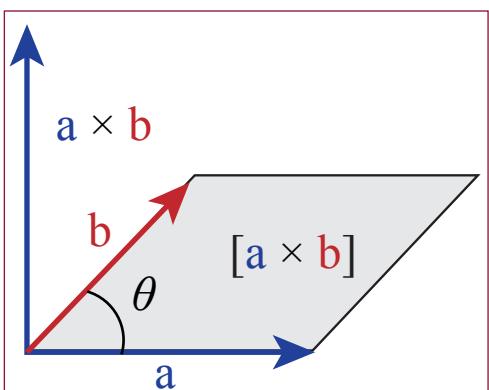


الشكل 7-23 جوشيا ويلارد جبس.

ولد جوشيا ويلارد جبس الابن (الشكل 7-23) في مدينة نيو هافن، في ولاية كونيتيكت، الولايات المتحدة، في العام 1839. كان أسلافه من جانب الأم ومن جانب الأب من العلماء المعروفيين في الجزء الشمالي الشرقي من الولايات المتحدة. التحق جبس في جامعة ييل في نيو هافن بولاية كونيتيكت في العام 1854 عن عمر يناهز 15 عاماً. تخرج في جامعة ييل في العام 1858 وكان من الأوائل في دفعته. في العام 1863 حصل جوشيا على أول شهادة دكتوراه في الهندسة من جامعة ييل في الولايات المتحدة. وفي العام 1871 وفي جامعة ييل، كان جبس أول أستاذ في الفيزياء الرياضية يُعين في الولايات المتحدة.

كان جبس منظراً عبقرياً. وقد نُقل عن ألبرت أينشتاين قوله في جبس إنه كان "أعظم عقل في التاريخ الأمريكي". في العام 1866، حصل جبس على براءة اختراع لتصميم نظام فرمولة لعربات السكك الحديدية. وخلال سبعينيات القرن التاسع عشر's 1870، قاده عمله في الديناميكا الحرارية النظرية إلى اشتراك معادلة طاقة عُرفت باسمه. وقد اخترع بالتعاون مع جيمس كليرك ماكسويل ولودفيج بولتزمان مجال الميكانيكا الإحصائية، وهو مصطلح صاغه جبس بنفسه.

اخترع جبس أيضاً حساب متجهات التفاضل والتكامل الحديث (الشكل 24.7) ما سهل إلى حد كبير نهج حل المسائل التي تتطوي على قياسات لها قيمة واتجاه. ومن المعلوم أن هذه الطريقة لا تزال تستخدم حتى يومنا هذا. قضى جبس معظم حياته في مدينة نيو هافن وحولها. وقد وصف بأنه رجل متواضع ولطيف لم يسع قط إلى الشهرة.



الشكل 7-24 مثال على متجهات حساب التفاضل والتكامل.

كان جبس فارساً ماهراً، وقد شوهد كثيراً وهو يقود العربية حول نيو هافن. توفي جبس في العام 1903 في نيو هافن ودفن هناك. وكان الفيزيائي البريطاني ج. ج. طومسون ممّن حضر جنازته.

الوحدة 7

مراجعة الوحدة

الدرس 7-1: الإنترولي (العشوائية) والطاقة الحرية (S)

- تعني **التلقائية Spontaneity** أن يحدث النظام بشكل طبيعي ومن دون تدخل خارجي.
- تُعرف **الإنترولي (العشوائية) Entropy** بأنها قياس للعشوائية (عدم الإنظام) الموجودة في نظام ما ووحدة قياسها $J/mol \cdot K$.
- تقيس الإنترولي عدد الحالات المجهريّة المختلفة التي تنتج في الحالة العينية نفسها.
- من المفضل بالنسبة للنظام أن يتغيّر، بحيث تزداد الإنترولي الكلية للكون.
- ينص **القانون الثاني للديناميكا الحرارية Second law of thermodynamics** على أن الإنترولي الكلية للكون يجب أن تزداد لتفاعل التلقائي.
- تختلف الإنترولي وفقاً لحالات المادة، وتكون على النحو الآتي:

$$S_{\text{غاز}} < S_{\text{سائل}} < S_{\text{صلب}}$$

- إن التغيير الذي يحدث في الحالة أثناء حدوث التفاعل الكيميائي هو العامل الأكثُر تأثيراً في تحديد ازدياد الإنترولي أو نقصانها.

ملخص القوانين الواردة في هذه الوحدة

$\Delta S_{\text{universe}} = (\Delta S_{\text{system}} + \Delta S_{\text{surr}}) > 0$	القانون الثاني للديناميكا الحرارية
$\Delta S = \frac{Q}{T}$	التغيير في الإنترولي
$\Delta S = \frac{\Delta H_{\text{fus}}}{T_M}$ الانصهار أو التجمد	الإنترولي للتغيير الحالة (الانصهار أو التجمد)
$\Delta S = \frac{\Delta H_{\text{vap}}}{T_B}$ الغليان أو التكاثف	الإنترولي للتغيير الحالة (الغليان أو التكاثف)

أسئلة اختيار من متعدد

1. أيٌّ مما يأتي هو قياس العشوائية (الفوضى) في النظام؟ 

- a. درجة الحرارة
- c. الطاقة الكامنة
- b. المحتوى الحراري

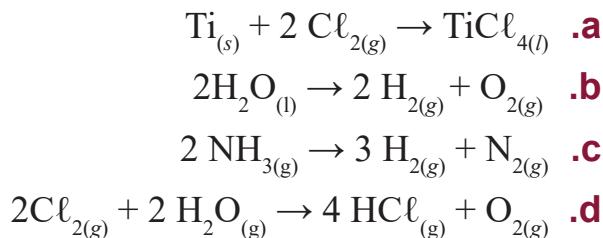
2. أيٌّ من حالات المادة الآتية ترتبط بأدنى مستوى من الإنترودي؟ 

- a. السائلة
- c. الغازية
- b. الصلبة

3. أيٌّ مما يأتي يجب أن يكون صحيحاً إذا كان التفاعل الكيميائي يحدث تلقائياً؟ 

- a. تزداد إنترودي الكون.
- c. قد تزيد الإنترودي الكون أو تقلّ.

4. أيٌّ من التفاعلات الآتية يتوقع أن تنخفض فيه الإنترودي؟ 



الدرس 1-7: الإنترودي (S)

5. عَرِّف مصطلح الإنترودي. 

6. ما وحدة الإنترودي المحتملة؟ 

7. أيّة حالة من حالات المادة يكون لها إنترودي أكبر من الحالات الأخرى؟ اشرح إجابتك من حيث ترتيب الجُسيمات. 

8. وفقاً لقانون الديناميكا الحرارية الثاني، وعندما يحدث تفاعل تلقائي، هل تزداد إنترودي الكون أم تنقص؟ 

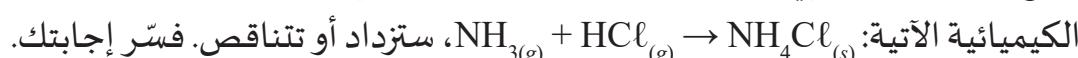
9. إذا انخفضت قيمة الإنترودي لتفاعل تلقائي بمقدار 185 J/K . فما التغيير الذي يجب أن يحدث في إنترودي المحيط؟ 

10. ما قيمة التغيير في الإنترولي محدداً الإشارة والوحدة، لتفاعل تغيير فيه الإنترولي من:

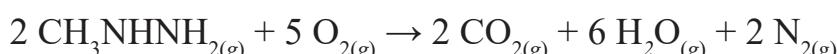
?800 J/K إلى 530 J/K (a)

?552 J/K إلى 720 J/K (b)

11. توقع ما إذا كانت إنترولي التفاعل بين غاز الأمونيا وغاز كلوريد الهيدروجين، والممثل بالمعادلة



12. توقع ما إذا كانت إنترولي التفاعل الممثل بالمعادلة الكيميائية الآتية:



ستزداد أو تتناقص. أعط تفسيراً منطقياً لإجابتك.

13. ما الإشارة المتوقعة لإنترولي تفاعل يتم فيه تحويل 2moles من جزيئات غاز على أنه

متفاعل إلى 3moles من جزيئات غاز آخر على أنه مادة ناتجة؟

14. عندما يصبح النظام أكثر عشوائية (غير منظم) فما الذي سيحدث للإنترولي؟



الوحدة 8

تقنيات التحليل الحديثة Modern Analytical Techniques

في هذه الوحدة

C1211

الدرس 1-8: مطياف الكتلة

مقدمة الوحدة

تعرض هذه الوحدة أهم تكنيات التحليل الحديثة في عمليات تحليل المركبات وتحديد تركيبها ليدرك الطالب ويقدر أهمية هذه التكنيات في العلوم.

يناقش الدرس 1-8 تكنيات التحليل لمطیاف الكتلة، موضحاً للطلاب طريقة تحديد الصيغة الكيميائية لمادة ما باستخدام معلومات يتم الحصول عليها من الطيف الكتلي لها، ومن العناصر المكونة لهذه المادة والمحددة مسبقاً، سيتعرف الطلاب خلال هذا الدرس إلى كيفية عمل مقياس مطیاف الكتلة، وكيفية تفسير الطيف الكتلي.

الأنشطة والتجارب

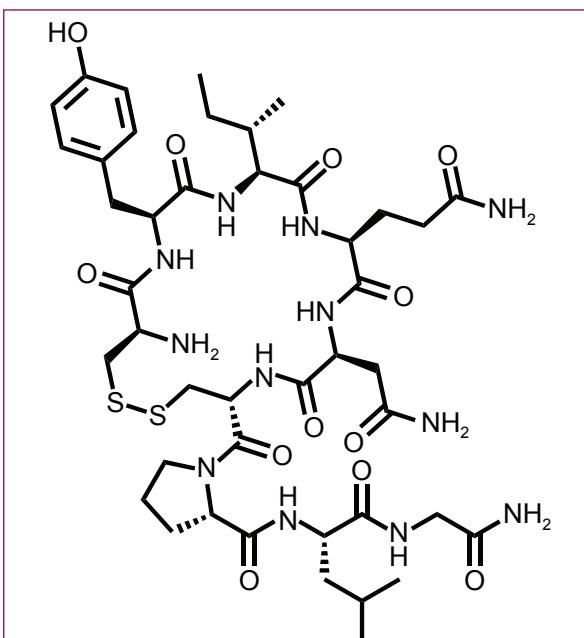
1-8 تفسير الطيف الكتلي

الدرس 1-8

مطياف الكتلة Mass Spectrometry



الشكل 1-8 أحد العلماء وهو يتفحّص عينة قبل تحليلها.



الشكل 2-8 التركيب البنيائي لهرمون الأوكسيتوسين.

تستخدم المختبرات التحليلية أنواعاً عديدة من تقنيات التحليل التي تُمكّن العلماء (الشكل 1-8) من تحديد كلٍّ من الصيغ الكيميائية والتراكيب البنائية لجزيئات المواد. في بعض الأحيان، تكون جزيئات هذه المواد صغيرة للغاية، كما هو الحال في مركب البنزين C_6H_6 ؛ إلا أن هذه الجزيئات تكون في الغالب أكثر تعقيداً، مثل هرمون الأوكسيتوسين $C_{43}H_{66}N_{12}O_{12}S_2$ (الشكل 2-8). ويمكن تحديد التراكيب البنائية لجزيئات بعض البروتينات التي تحتوي على المئات أو الآلاف من الذرات باستخدام مزيج من التقنيات التحليلية.

في هذا الدرس، سيتم التعرف على إحدى هذه التقنيات التحليلية وهي مطياف الكتلة. هذه التقنية تُستخدم لتحديد كتلة الجزيئات، وكتل الأجزاء المكونة لهذه الجزيئات. وباستخدام هذه المعلومات، يمكن تحديد الصيغة الكيميائية والتراكيب البنائية لهذه الجزيئات.

المفردات



Isotopes	النّظائر
Mass spectrometry	مطياف الكتلة
Analyte	المادة المُحلّلة
Mass spectrometer	مقياس مطياف الكتلة

مخرجات التّعلّم

C1211.1 مطياف الكتلة – يستخدم الكتل الذرية الدقيقة، والكتلة الجزيئية الدقيقة؛ لتحديد الصيغة الجزيئية للمركب.

آلة حاسبة للكتل الجزئية

في هذا الدرس، سيتم استخدام طريقة المحاولة والخطأ لاستنتاج الصيغة الكيميائية لمادة ما من عناصرها المكونة لها، وكتلتها الجزيئية اعتماداً على ما تم تحديده من الطيف الكتلي والقيم الدقيقة للكتل الذرية. وسيقدم لك هذا النشاط أداة لإنجاز هذه المهمة بسرعة أكبر.

الهدف من النشاط

الشكل 3-8 مثال على عرض لجدول بيانات.

تصميم جدول بيانات يُمكّن المستخدم من إدخال
أعداد مختلفة من الذرات التي لها **نظائر Isotopes**
مختلفة، وحساب الكتلة الجزيئية لمركب بشكل
تلقائي، وبيان (الشكل 3-8) مثلاً على ما قد يبدو
عليه جدول البيانات عندما يكتمل.

الإجراءات (اعمل في مجموعات ثنائية)

1. ابدأ بإعداد جدول بيانات مشابه للجدول المبين في (الشكل 3-8)، بحيث يحتوي على الذرات الأربع الأكثر شيوعاً في الجزيئات العضوية، وعلى كتلها الذرية الدقيقة (0.0001 ± 0.0001 amu) الموجودة في الصفحة التالية في (الجدول 1-8).

2. استخدم بعض خصائص الجدول، مثل الخط الغامق، ومحاذاة الخلية، وتعبئة الخلية، وحدود الخلية، لإعطاء الجدول مظهراً أكثر احترافية.

3. تحتوي الخلايا G3 إلى G6 صيغة رياضية ينتج عنها حاصل ضرب القيم الموجودة في الصفوف المقابلة الموجودة في العمودين C وE، حيث تم تنسيق هذه الخلايا لعرض القيم إلى رابع منزلة عشرية.

4. تحتوي الخلية G7 على صيغة رياضية ينتج عنها مجموع الكتل الكلية التي فوقها، وقد تم تنسيقها لعرض القيم إلى رابع منزلة عشرية.

5. اختبر جدول البيانات عن طريق إدخال أعداد مختلفة من الذرات في العمود E، وقارن الكتلة الجزيئية الناتجة مع الكتلة الجزيئية لنفس الذرات التي تم حسابها بشكل يدوي.

6. توسيع في جدول البيانات بإضافة النظائر الآتية على الأقل: ${}^{79}\text{Br}$, ${}^{81}\text{Br}$, ${}^{13}\text{C}$, ${}^{17}\text{O}$, ${}^{18}\text{O}$, ${}^{15}\text{N}$, ${}^2\text{H}$.

7. باستخدام جدول البيانات، احسب كتلة الجزيئات الآتية، وافترض بأنّ الذرات التي ليس لها كتلة ذرية مكتوبة في الصيغة هي من النظائر الأكثر وفرة.



جدول يحتوي على قيم كتل ذرية دقيقة لنظرائر بعض العناصر

الجدول 1-8 قيم كتل ذرية دقيقة لنظرائر بعض العناصر.

الوفرة النسبية (%)	الكتلة (amu)	الاسم
90.57	19.9924	نيون-20
0.26	20.9939	نيون-21
9.17	21.9914	نيون-22
99.63	14.0031	نيتروجين-14
0.37	15.0001	نيتروجين-15
99.762	15.9949	أكسجين-16
40.038	16.9991	أكسجين-17
0.200	17.9992	أكسجين-18
100.00	30.9738	فسفور-31
95.02	31.9721	كبريت-32
0.75	32.9715	كبريت-33
4.21	33.9679	كبريت-34
0.02	35.9671	كبريت-36
0.10	123.9059	زينون-124
0.09	125.9043	زينون-126
1.91	127.9035	زينون-128
26.40	128.9048	زينون-129
4.10	129.9035	زينون-130
21.20	130.9051	زينون-131
26.90	131.9041	زينون-132
10.40	133.9054	زينون-134
8.90	135.9072	زينون-136

الوفرة النسبية (%)	الكتلة (amu)	الاسم
0.337	35.9676	أرجون-36
0.063	37.9627	أرجون-38
99.60	39.9624	أرجون-40
19.8	10.0129	بورون-10
80.2	11.0093	بورون-11
50.69	78.9183	بروم-79
49.31	80.9163	بروم-80
98.9	12.0000	كربون-12
1.1	13.0034	كربون-13
75.77	34.9689	كلور-35
24.23	36.9659	كلور-37
100.00	18.9984	فلور-19
0.0001	3.0160	هيليوم-3
99.9999	4.0026	هيليوم-4
99.985	1.0078	هيدروجين-1
0.015	2.0141	هيدروجين-2
100.00	126.9045	يود-127
0.35	77.9204	كريبيتون-78
2.25	79.9164	كريبيتون-80
11.60	81.9135	كريبيتون-82
11.50	82.9141	كريبيتون-83
57.00	83.9115	كريبيتون-84
17.30	85.9106	كريبيتون-86

مطياف الكتلة تقنية تحليل حديثة

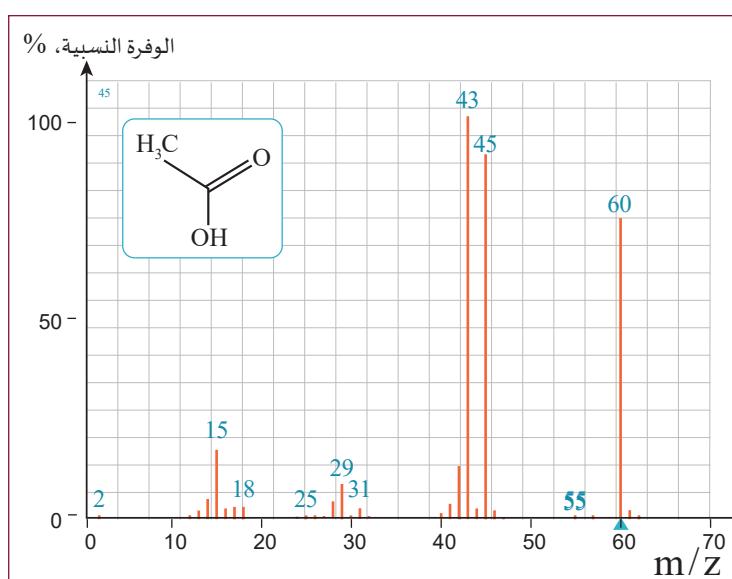
مطياف الكتلة **Mass spectrometry** هي تقنية تحليل حديثة يمكن من خلالها تحديد كتلة الأيونات الناتجة عن **المادة المُحللة Analyte** (مادة تم تحليلها)، وُتُستخدم هذه التقنية لتحديد الكتلة الجزيئية أو التركيب البنائي للمادة المُحللة. ويُستخدم جهاز يُسمى **مقياس مطياف الكتلة Mass spectrometer** (الشكل 4-8) في هذا النوع من عمليات التحليل.



الشكل 4-8 (a) و (b) نوعان مختلفان من أجهزة مقياس مطياف الكتلة.

يبين الطيف الكتلي الوفرة النسبية لكل نوع من أنواع الأيونات مقابل نسبة الكتلة إلى الشحنة (m/z) لهذا الأيون، ويُبين (الشكل 4-5) طيفاً كتلياً نموذجياً لمادة تم تحليلها.

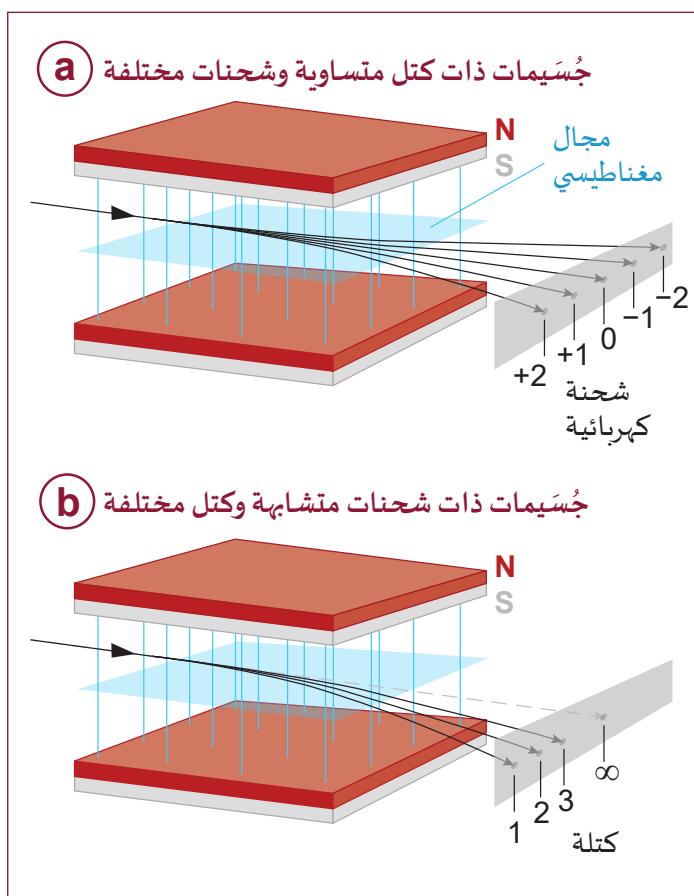
هناك أنواع كثيرة مختلفة من أجهزة مقياس مطياف الكتلة للمواد المُحللة التي لها خصائص محددة ومميزة، فقد يقترن أحد مقاييس مطياف الكتلة بجهاز تحليلي آخر، مثل الفصل اللوني الغازي الذي سُتُّتم مناقشته في (الدرس 3-3)، فنحصل بذلك على معلومات إضافية عن هذه المادة المُحللة.



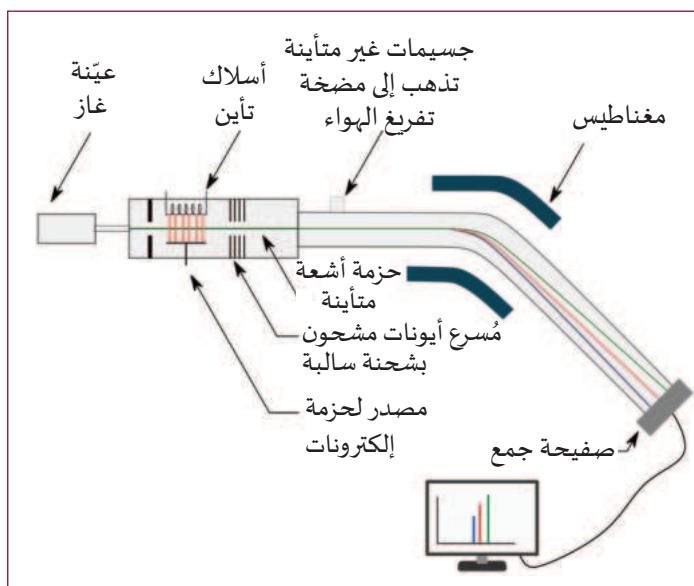
الشكل 5-8 الطيف الكتلي لحمض الأسيتيك (حمض الإيثانويك).

تُعطى الوفرة النسبية غالباً في هيئة نسبة مئوية (%)، أمّا وحدة قياس m/z فغالباً تُهمّل ولكنها تُفسّر على أنها وحدة كتل ذرية (amu). إنّ المادة المُحللة تتحطم إلى أجزاء أثناء إجراء التحليل الطيفي الكتلي لها، حيث تمثل كلّ قمة موجودة على الطيف الكتلي جزءاً مختلفاً من هذه المادة، أمّا الجزء الذي تكون بالوفرة الأكثر، فيتمّ تعين وفترته النسبية بأنّها تساوي 100%， وتُسمى قمتها هذه "القمة الأساسية"، حيث تُعطى قيم الوفرة للأجزاء الأخرى نسبة إلى هذه القمة.

كيف يعمل مقياس مطیاف الكتلة؟



الشكل 6-8 انحراف (a) جسيمات ذات كتل متساوية وشحنات مختلفة، و (b) جسيمات ذات شحنات (+) متشابهة، وكتل مختلفة.



الشكل 7-8 رسم تخطيطي لمقياس مطیاف الكتلة.

يستند مطیاف الكتلة إلى المبدأ الذي ينصّ على أن الجسيمات المشحونة المتحرّكة تنحرّف عن مسارها بتأثير من المجال المغناطيسي.

- الجسيمات التي لها شحنة أكبر تنحرّف بشكل أكبر لأنّ القوّة المغناطيسية تكون أكبر (الشكل 6-8(a)).
- الجسيمات التي لها كتلة أكبر تنحرّف بشكل أقل لأنّ هذه الكتلة الكبيرة ستتحرّك ببطء (الشكل 6-8(b)).

ولذلك فإنّ مقدار الانحراف للجسيم المشحون في مجال مغناطيسي يتناسب طردياً مع شحنة الجسيم وعكسياً مع كتلته:

$$\frac{\text{الشحنة}}{\text{الكتلة}} \propto \frac{1}{\alpha \text{ الانحراف}}$$

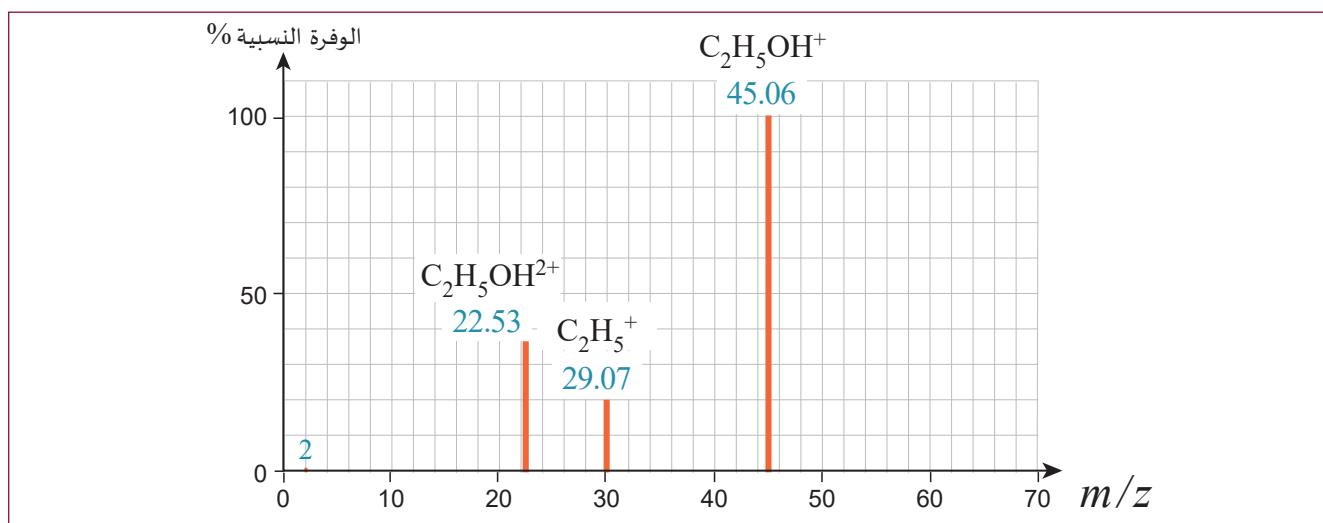
يبين (الشكل 7-8) رسمًا تخطيطيًّا لمطیاف كتلة عملي، تكون المادة المُحلّلة في البداية في هيئة غاز ثم تتأيّن. يحدث هذا التأيّن بمرور الغاز عبر أسلاك ساخنة. وبمجرد أن تمتلك الجزيئات شحنة، فإنّها تتسارع في هيئة حزمة أشعة باستخدام صفيحة ذات شحنة سالبة تحتوي على ثقب في مركزها يسمح لحزمة الأشعة بالمرور عبره، ثم يتم جمع هذه الأيونات بعد مرورها عبر مغناطيس الانحراف.

يتم حفظ الجزء الداخلي لمقياس مطیاف الكتلة كله داخل مكان مفرغ من الهواء لتجنب حدوث تصادمات بين الأيونات المتسارعة وأي جزيئات غاز أخرى، كما تعمل مضخة تفريغ الهواء على إزالة الجسيمات التي لم تتأيّن.

عملية التأين تنتج أيونات عديدة

يجب أن تتأين المادة المُحلّلة، لأن الجسيمات المتعادلة لا تنحرف بتأثير المجال المغناطيسي، لذا، فإن هناك طرائق مختلفة تُستخدم لعملية التأين، مثل حزمة الإلكترونات، أو الأسلاك الساخنة، أو حزمة أشعة الليزر. وتكون الحالة المثالية بأن يفقد كل جزء إلكترونًا واحدًا أثناء عملية التأين لتكوين أيون جزيئي (يرمز إليه بالرمز M^+). على سبيل المثال: عند تحليل مركب الإيثanol C_2H_5OH ، سوف يتأين ليصبح في هيئة أيون $C_2H_5OH^+$ ، أما الأيونات التي تحمل شحنة سالبة فلن يتم قياسها في العادة إلا إذا تم عكس قطبية مجال التسارع والمجال المغناطيسي.

تُعرض البيانات المقاسة في مطياف الكتلة على هيئة نسبة، تكون فيها الكتلة مقسومة على الشحنة (m/z)، هذه النسبة تتناسب عكسيًا مع مقدار الانحراف، ويتم تمثيلها على المحور الأفقي (السيني)، ويمثل المحور العمودي (الصادي) الوفرة النسبية للجسيمات التي تم رصدها. وبشكل عام، يتم تعين أعلى قمة بأنها تحمل القيمة 100 لضبط المقياس ومعاييره؛ تمثل القمة التي لها أكبر كتلة على الطيف الكتلي، الكتلة الجزيئية للمادة المُحلّلة. على سبيل المثال: يمتلك C_2H_5OH كتلة مقدارها 45.06 g/mol لذا، فإن $m/z = 45.06$ يمتلك قيمة $C_2H_5OH^+$.



الشكل 8-8 تفسير بيانات مطياف الكتلة (الطيف الكتلي للإيثanol).

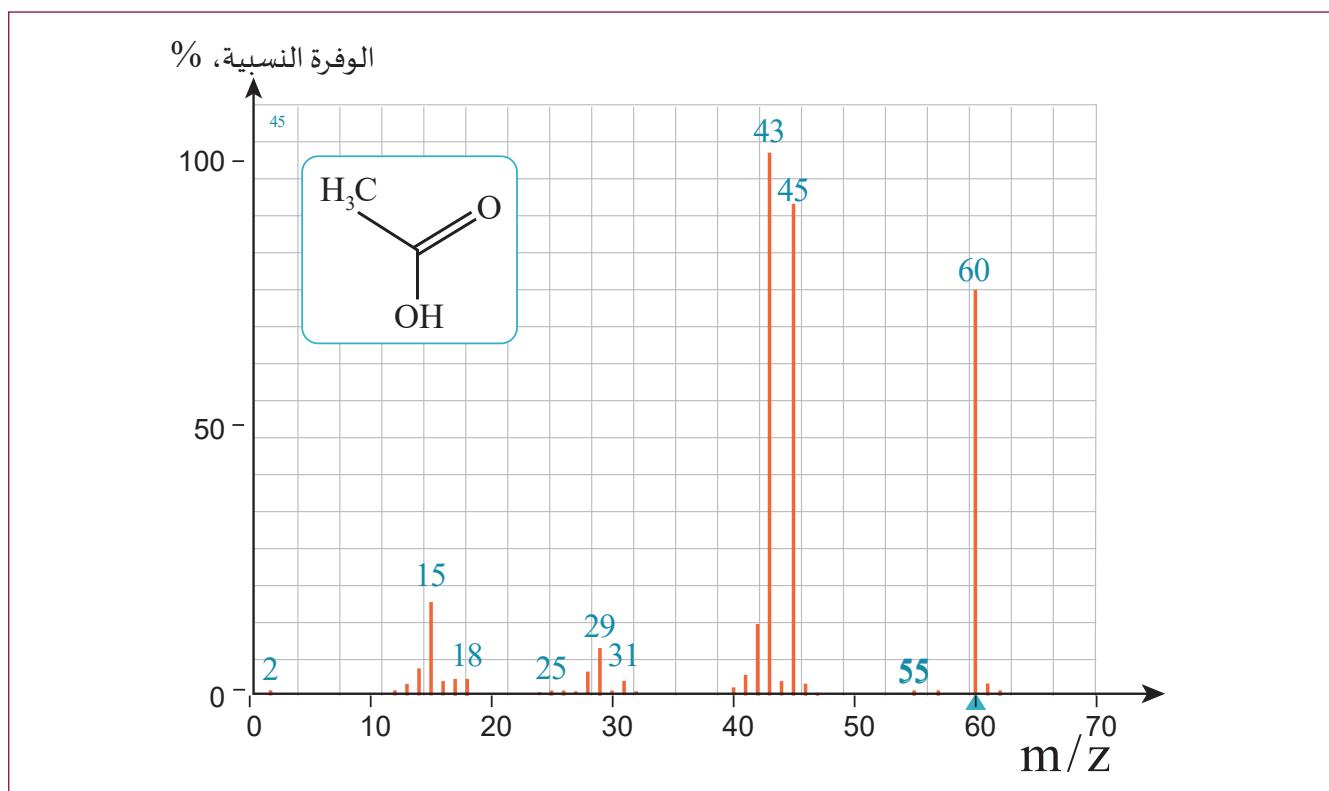
تكون عملية تفسير بيانات مطياف الكتلة معقدة بسبب عاملين، هما:

1. تكون الأيونات الجزيئية غير مستقرة، وسوف تتحطم في أكثر الأحيان إلى أجزاء أصغر منها. على سبيل المثال: يمكن أن يتحطم C_2H_5OH إلى جزئين هما: $C_2H_5^+$ ، و OH^- . لذا، سيكون هنالك أيون آخر ذو شحنة موجبة له قيمة m/z مختلفة، تساوي 29.07 كما هو مبين في (الشكل 8-8). لاحظ أن أيونات OH^- لا تظهر في الطيف الكتلي، لأن الأيونات التي تحمل شحنة سالبة لا يتم تسريعها.
2. تمتلك معظم الأجزاء المتحطم شحنة موجبة مقدارها $(+1)$. لذا، تكون قيمة m/z تساوي كتلة الجزء المتحطم. وقد يفقد هذا الجزء المتحطم الإلكترونين اثنين، ويكتسب شحنة موجبة مقدارها $(+2)$. وعندها ستكون كتلة الجزء المتحطم الثاني تساوي نصف قيمة m/z ، وهذا موضح في القمة التي تقع عند القيمة $m/z = 22.53$ (الشكل 8-8).

تحليل الطيف الكتلي

لتحليل بعض القمم الموجودة في الطيف الكتلي لحمض الإيثانويك (حمض الأسيتيك) CH_3COOH المبين في (الشكل 9-8).

- القمة التي لها أعلى قيمة m/z تمثل في الغالب كتلة المادة المُحللة (العينة)، في هذا المثال، تمثل القمة التي لها القيمة $m/z = 60$ الأيون الجزيئي (M^+) (CH_3COOH^+).
- القمة الأساسية التي توجد عند القيمة $m/z = 43$ تمثل الجزء المقطم (الأيون) CH_3CO^+ ، أما الزوج المقابل لهذا الجزء المقطم فهو OH^- ، والأيونات التي تحمل شحنة سالبة لا يمكن الكشف عنها إلا بعكس الأقطاب والمجال المغناطيسي لمطياف الكتلة كما سبق الشرح.
- وباستخدام المحاولة والخطأ لمعرفة التركيب البنائي لجزيء حمض الأسيتيك فإن الجزء المقطم CH_3CO^+ يتوافق مع قيمة $m/z = 45$ ، وسيمتلك الجزء المقطم COO^+ القيمة $m/z = 45$ أيضًا. ومع ذلك، فإن الوفرة النسبية في الطبيعة لعنصر C^{13} تساوي 1.10% فقط. لهذا، فإذا كان هذا الجزء المقطم موجودًا، فإن وفرته النسبية ستكون منخفضة للغاية.
- الجزء المقطم CH_3^+ هو المسؤول عن القمة التي تقع عند القيمة $m/z = 15$.
- القمة التي تقع عند القيمة $m/z = 29$ تكون مصاحبة لأيون الفورميك HCO^+ ، وهو يمتلك تركيبًا بنائيًا غير موجود في جزيء حمض الأسيتيك. لهذا، فهو عبارة عن ناتج إعادة ترتيب الذرات أثناء عملية التقطيم، إذ أن إعادة الترتيب التي تحدث أثناء عملية التقطيم هي عملية متوقعة الحدوث.



أمثلة على تحديد الصيغة الجزيئية

يمكن أن تُنتج أجهزة طيف الكتلة ذات الدقة العالية طيفاً له كتل دقيقة للغاية (± 0.0001 amu)، ويمكن أيضاً تحديد الصيغة الجزيئية للمادة محللة من هذه الأطيفات إذا عُرفت العناصر المكونة للمادة محللة.

مثال 1



لُوِّحظَ أنَّ قمة الأيون الجزيئي لمادة ما الناتجة عن جهاز طيف كتلي ذي دقة عالية، موجودة عند القيمة 31.0421 amu، وكان معلوماً أنَّ هذه المادة تحتوي على النظائر الآتية فقط: 1H و ^{12}C و ^{14}N . حدد الصيغة الكيميائية لهذه المادة.

الحل

الجدول الذي يحتوي على قيم الكتل الذرية الدقيقة (قيم ذات أربع منازل عشرية على الأقل) ضروري لحل هذا النوع من الأمثلة: يزودنا (الجدول 1-8) صفحة 192 بهذه البيانات. إنَّ استخدام جدول البيانات (المُعد سابقاً في النشاط صفحة 191) يجعل عملية الحل أكثر سهولة. بتغيير عدد الذرات، سوف يحصل جدول البيانات الكتلة الجزيئية الجديدة بشكل تلقائي، وسيتم تحديد الصيغة الكيميائية باستخدام طريقة المحاولة والخطأ كما هو موضح بطريقة الحل الآتية:

- يجب جمع الكتل الذرية الدقيقة للنظائر المكونة للمادة للحصول على الكتلة الجزيئية لهذه المادة.
- تحتوي المادة على ذرة واحدة على الأقل من النظائر المكونة لها، وعملية جمع كتل هذه الذرات الثلاث سينتج عنها كتلة مقدارها 27.0109 amu.

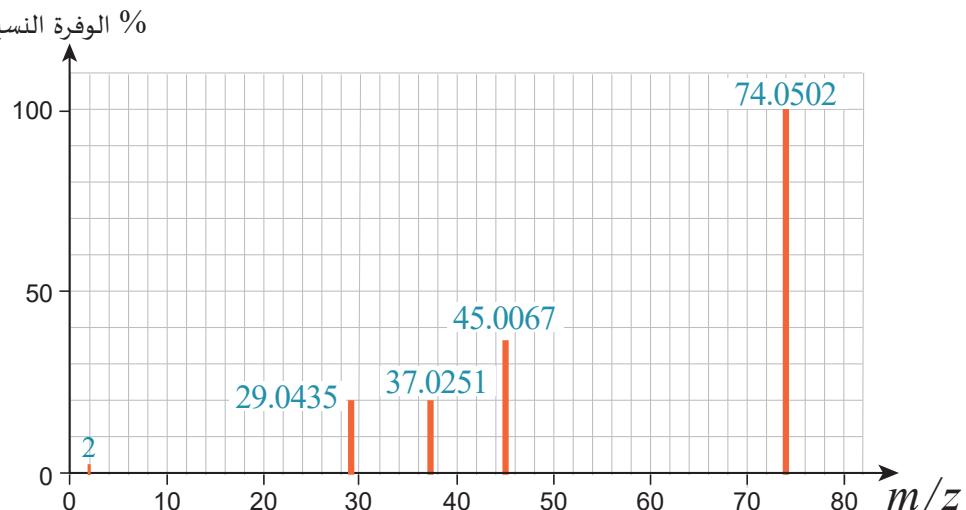
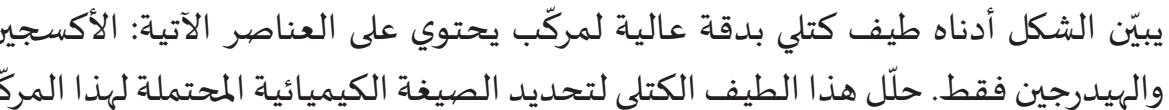
1H	=	1.0078 amu	\times	1	=	1.0078 amu
^{12}C	=	12.000 amu	\times	1	=	12.000 amu
^{14}N	=	14.0031 amu	\times	1	=	14.0031 amu
الكتلة الجزيئية					=	27.0109 amu

- إنَّ عملية جمع ذرَّة إضافية واحدة من كلٍّ من ^{12}C أو ^{14}N ينتج عنها كتلة جزيئية تتجاوز القيمة المحددة التي تساوي 31.0421 amu. لذا، فإنَّ الصيغة الجزيئية يجب أن تحتوي المزيد من ذرَّات 1H وباستخدام طريقة المحاولة والخطأ سنجد أننا بحاجة إلى خمس ذرَّات من 1H في الصيغة الجزيئية للحصول على كتلة مقدارها 31.0421 amu.

- لذا، يتم تحديد الصيغة الكيميائية للمادة بأنها CH_5N .

1H	=	1.0078 amu	\times	5	=	5.0390 amu
^{12}C	=	12.000 amu	\times	1	=	12.000 amu
^{14}N	=	14.0031 amu	\times	1	=	14.0031 amu
الكتلة الجزيئية					=	31.0421 amu

مثال 2



الحل

- إذا افترضنا أن القمة التي تقع عند القيمة $m/z = 74.0502$ تمثل الأيون الجزيئي، M^+ ، فإنّ القمة التي تقع عند القيمة $m/z = 37.0251$ والتي تساوي نصف القيمة 74.0502 ، تمثل المادة محللة التي تأيتت بشكل مضاعف، M^{2+} .
 - أما القمتان الصغيرتان، فمن المرجح أنهما تمثلان جزأين منفردين قد تأيتا من المادة محللة، لأنّ $74.0502 = 45.0067 + 29.0435$. لذا، نفترض قيماً تقريبية للكتل الذرية، ونحسب كتل الأجزاء المحطمة الشائعة والمألوفة لنا، وسيكون هنالك تطابق مع الأيون $COOH^+$ والذي يقع عند القيمة $m/z = 45$.

العنصر	الكتلة الذرية التقريبية	CH ₃ OH	CH ₄	CH ₂ (OH) ₂	COOH	C ₂ H ₆
C	12	1	1	1	1	2
O	16	1	0	2	2	0
H	1	4	4	4	1	6
المجموع		32	16	48	45	30

- قيمة الكتلة المولية للمركب C_2H_6 تكون قريبة من قيمة القمة التي تقع عند $m/z = 29.0435$. فإذا نزعنا ذرة هيدروجين واحدة من هذا المركب، فسوف نحصل على تطابق جيد مع الأيون $C_2H_5^+$.
 - حسب قيمة الكتلة المولية للمركب $C_2H_5COOH^+$ فتكون قيمتها تساوي 74.0502. لذا، فإنَّ بيانات الطيف الكتلي تشير إلى أن الصيغة الكيميائية المحتملة لهذا المركب هي C_2H_5COOH .

مثال 3

حدّد الصيغة الكيميائية لمادة عضوية كتلتها الجزيئية تساوي 60.0210 amu، وتحتوي على النظائر الآتية فقط، وهي: ^1H و ^{12}C و ^{16}O .

الحل

^1H	=	1.0078 amu	\times	1	=	1.0078 amu
^{12}C	=	12.0000 amu	\times	1	=	12.0000 amu
^{16}O	=	15.9949 amu	\times	1	=	15.9949 amu
الكتلة الجزيئية			=	29.0027 amu		

- تحتوي المادة على ذرة واحدة على الأقل من كل واحدة من النظائر المكونة لها، وسينتج عن عملية جمع كتل هذه الذرات الثلاث كتلة مقدارها 29.0027 amu كما هو مبين في الجدول:

من غير المحتمل أن يحتوي الجزيء على ذرة كربون واحدة وذرة أكسجين واحدة فقط، لأننا سنحتاج إلى الكثير من ذرات الهيدروجين للوصول إلى كتلة جزيئية مقدارها 60.0027 amu.

- لذلك يمكن زيادة عدد ذرات الكربون إلى أقصى عدد ممكن من دون تجاوز قيمة الكتلة الجزيئية، ثم زيادة عدد ذرات الهيدروجين إلى أن يتم الوصول إلى قيمة كتلة تكون قريبة من القيمة 60 amu ستنتجان كتلة جزيئية مقدارها 60.0573 amu كما هو مبين في الجدول:

قيمة هذه الكتلة قريبة، وينتظر عنها الصيغة الكيميائية $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$.

^1H	=	1.0078 amu	\times	1	=	1.0078 amu
^{12}C	=	12.0000 amu	\times	1	=	12.0000 amu
^{16}O	=	15.9949 amu	\times	3	=	47.9847 amu
الكتلة الجزيئية			=	60.9925 amu		

- وهناك احتمال آخر: زيادة عدد ذرات الأكسجين إلى أقصى حد ممكن من دون تجاوز قيمة الكتلة الجزيئية، تحتاج إلى ثلات ذرات أكسجين فقط، لأن هذا العدد سيتجاوز الكتلة الجزيئية بمقدار 0.9715 amu.

- كما يمكن زيادة عدد ذرات الأكسجين والكربون بمقدار ذرتين لكل منها وبالتالي تحتاج إلى أربع ذرات هيدروجين، وسينتج عن ذلك الكتلة الجزيئية المطابقة للكتلة الجزيئية للمادة العضوية الموجودة في نص المثال.

لذا، فإن الصيغة الكيميائية للمادة هي $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$.



1-8

تفسير الطيف الكتلي

ما المعلومات التي يزودنا بها الطيف الكتلي؟	سؤال الاستقصاء
أوراق عمل "تفسير الطيف الكتلي".	المواد المطلوبة

الخطوات (أعمل في مجموعات ثنائية):

سيتم إعداد طيف كتلي باستخدام المعلومات المتوفرة لمركب n-دوبيكان ($C_{12}H_{26}$) (n-dodecane) دوديكان.

وتم إعداد نموذج مدرج غير معنون في أوراق عمل هذا النشاط.

1. ضع عنواناً للمحورين (الصادي والسيني) الموجودين على النموذج، وحدد المقاييس المناسبة على هذين المحورين.

2. احسب قيمة الكتلة، وقيمة نسبة الكتلة/الشحنة (m/z) للجسيمات الموجودة في (الجدول 8-2) إلى أقرب amu، ثم ارسم هذه القمم على الطيف عند قيم الوفرة النسبية التي تم تزويدها بها.

3. استخدم جدول البيانات المُعد في النشاط صفحة 189 لحساب كتل الأيونات الجزيئية.

الأسئلة:

a. ما الصيغة الكيميائية للأيون الجزيئي (M^+)؟

الجدول 8-8 قيم الوفرة النسبية للأجزاء المحطمة لمركب n-دوبيكان ($M^+ = C_4H_9^{2+}$).

m/z	الكتلة (amu)	الصيغة	الوفرة النسبية
		M^+	5%
		CH_3^+	1%
		$C_2H_5^+$	15%
		$C_3H_5^+$	38%
		$C_3H_7^+$	69%
		$C_4H_7^+$	19%
		$C_4H_9^+$	100%
		$C_5H_{11}^+$	55%
		$C_6H_{13}^+$	33%

b. فسر وجود قمة لها قيمة m/z أكبر مما هي $m/z = 171$ للأيون الجزيئي عند القيمة

c. كم ستكون قيمة m/z للجزء المحطط الذي يحمل الصيغة الكيميائية $C_4H_9^{2+}$ ؟

d. لماذا لا تظهر قمم الأجزاء المحطمة التي تحتوي على النظير H^2 والذي يتكون بشكل طبيعي؟

e. ما الأيون الذي يمثل الجزء المحطط الأكثر شيوعاً لمركب n-دوبيكان؟

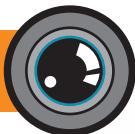
f. توقع الصيغة الأكثر احتمالاً للجزء المحطط لمركب n-دوبيكان والذي له قيمة $m/z = 70$.

يمتلك البروم نظيران يتكونان بشكل طبيعي. أجري بحثاً عن الطيف الكتلي للبروم (Br_2).
وأشر إلى النسبة المئوية لمدى وفرة هذين النظيرين، ثم حدد صيغ الأجزاء المحطمة المرتبطة بالقمم الخمس الموجودة في الطيف الكتلي، ثم ضع عنواناً لأعداد الكتل الذرية للنظيرين الموجودين في الصيغ الكيميائية.





1. أي من العبارات الآتية تصف مصطلح "المادة المُحلّلة"؟ 
- a. شخص يحلّل مادة ما.
b. مادة ما تم تحليلها.
c. عملية تحليل لمادة ما.
d. جهاز يستخدم لتحليل مادة ما.
2. أي من الأزواج الآتية يُمثل المحورين الصادي والسيني للطيف الكتلي؟ 
- a. الكتلة والشحنة.
b. الوفرة النسبية والشحنة.
c. الوفرة النسبية والكتلة.
d. الوفرة النسبية والكتلة/الشحنة (m/z)
3. ما نوع الجسيمات التي يتم الكشف عنها غالباً في مقياس مطياف الكتلة؟ 
- a. الأيونات ذات الشحنة الموجبة.
b. الأيونات ذات الشحنة السالبة.
c. الأيونات ذات الشحنة الموجبة والسائلة معاً.
d. الأيونات ذات الشحنة الموجبة، والجزئيات المتعادلة.
4. ماذا يجب أن يحدث لعينة جزيئات موجودة في مقياس مطياف الكتلة؟ 
- a. يجب أن تصبح الجزيئات متأينة.
b. يجب أن تبقى الجزيئات متعادلة.
c. يجب أن يتم تحويل العينة إلى مادة سائلة.
d. يجب أن يتم تحويل العينة إلى مادة صلبة.
5. أي من الأسباب الآتية يمكن أن تؤدي إلى تكون أجزاء محطمة لها الصيغ الكيميائية نفسها ولكن كتلها مختلفة؟ 
- a. وجود النظائر.
b. وجود المتشكلات.
c. وجود المتأصلات.
d. تكون أيونات مختلفة الشحنة السالبة.
6. أي من الأيونات المحطمة الآتية له قيمة $m/z = 31$ ؟ 
- CH₃O⁺ .c SH⁺ .a
CH₂NH₂⁺ .d CH₂F⁺ .b
7. ما الوفرة النسبية للقمة الأساسية الموجودة على الطيف الكتلي؟ 
8. حدد الصيغة الكيميائية لمركب هيدروكربوني علماً بأن قمة أيونه الجزيئي تقع عند القيمة $m/z = 84.0936$. 



جوزيف جون طومسون: 1856-1940 Joseph Jones Thomson



الشكل 10-6 جوزيف جون طومسون (1856-1940).

ولد السير جوزيف جون طومسون في مقاطعة شيشام، في مدينة مانشستر، في إنجلترا في 18 من شهر ديسمبر من العام 1856م. التحق بما تسمىاليوم جامعة مانشستر وهو في 14 من عمره، ثم انتقل إلى كلية ترينتي في كامبردج، في إنجلترا، حيث حصل منها على درجتي البكالوريوس والماجستير في الفنون. ثم عُين أستاداً في جامعة كامبردج في العام 1884م، وفي العام 1890م تزوج من روز إлизابيث باجيت، وأنجب منها طفلية، وهم روز باجيت طومسون، والسير جورج إدوارد طومسون. وعلى الرغم من أن طومسون يُعد الأكثُر شهرة لاكتشافه الإلكتروني، ونموذج الذرة الخاص به والمسمى "قطير البرقوق"، فقد قدم إسهامات أخرى كثيرة للعلوم، بما فيها بناء أول مطياف للكتلة في العام 1912م.

نشأ مطياف الكتلة الذي بناه طومسون من اكتشافات العالمين أيجوين جولدستين، وويليام وين، وفي العام 1886م، اكتشف

العالم جولدستين الأشعة المنبعثة من مصعد (أنود) أنابيب تفريغ الغاز، وسماها أشعة القناة canal ray. وفي العام 1899، أوضح العالم وين أن أشعة القناة هذه يمكن أن تنحرف عن مسارها بسبب تأثير المجالات الكهربائية والمغناطيسية. وباستخدام مطياف الكتلة الجديد الذي صممته أيضاً، فقد بين طومسون هو ومساعده ف. و. آستون للمرة الأولى وجود نظائر غير مشعة كانت عبارة عن نظائر النيون، وهي النيون-20، والنيون-22.

حصل طومسون على جائزة نوبل في الفيزياء في العام 1906م، وعلى ميدالية كوبلي في العام 1914م. وبشكل مشابه لإنجازاته العلمية، فقد يكون مذهلاً بالنسبة إليك معرفة القائمة التي تضم بعض أبرز تلاميذه، ومن بينهم: إرنست رذرфорد، وروبرت أوبنهايمر، وماكس بورن، ونيلز بور. وقد تأهّل ثمانية من تلاميذه للحصول على جائزة نوبل في الفيزياء والكيمياء، وحصل ابنه جورج، والذي كان أحد تلاميذه أيضاً، على جائزة نوبل في الفيزياء العام 1937م على إثباته الخصائص شبه الموجية للإلكترونات.

توفي طومسون في 30 من شهر آب من العام 1940م، ودُفن في مقاطعة ويست مينستر، أبي، في مدينة لندن في إنجلترا بجانب قبر السير إسحق نيوتن وإرنست رذرфорد.

الوحدة 8

مراجعة الوحدة

الدرس 8-1: مطياف الكتلة

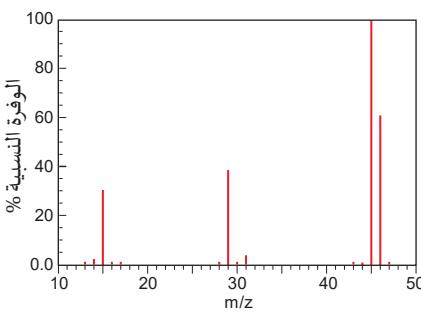
- تساعد تقنية التحليل **مطياف الكتلة** Mass spectroscopy في تحديد الصيغة الجزيئية للمادة المحلولّة وكتلتها.
- يعلم **مقياس مطياف الكتلة** Mass spectrometer على تأين جزيئات المادة المحلولّة، وتحويلها إلى أجزاء مشحونة بشحنة موجبة، فتسارع الأجزاء وتفصل ويُكشف عنها.
- يُنتج مقياس مطياف الكتلة قمماً ذات قيم وفرة نسبية مختلفة على الطيف الكتلي للأجزاء المختلفة للمادة المحلولّة، والتي تمثل دالة لنسبة كتلة هذه الأجزاء إلى شحنتها (m/z).
- تسمى القمة ذات الوفرة النسبية الأعلى "القمة الأساسية".
- تمثل القمة التي لها أعلى قيمة m/z كتلة المادة المحلولّة.
- يمكن تحديد الصيغة الكيميائية للمادة المحلولّة باستخدام مطياف الكتلة والعناصر المكوّنة للمادة المحلولّة.

أسئلة اختيار من متعدد

1. أيٌ من القيم الآتية تصف الشحنة الاعتيادية الموجودة على أجزاء المادة المُحللة الناتجة عن مقياس مطياف الكتلة؟
- +2 .c -1 .a
+1 .b .d. متعادلة
2. أيٌ من الجمل الآتية تصف القمة الأساسية الموجودة في الطيف الكتلي؟
- .a. هي القمة التي لها قيمة m/z الأدنى.
.b. هي القمة التي لها قيمة m/z الأعلى.
.c. هي القمة التي لها قيمة الوفرة النسبية الأدنى.
.d. هي القمة التي لها قيمة الوفرة النسبية الأعلى.
3. أيٌ من الجمل الآتية تصف القمة الموجودة على الطيف الكتلي الذي يعطي الكتلة الجزيئية للمادة المُحللة؟
- .a. هي القمة التي لها قيمة m/z الأدنى.
.b. هي القمة التي لها قيمة m/z الأعلى.
.c. هي القمة التي لها قيمة الوفرة النسبية الأدنى.
.d. هي القمة التي لها قيمة الوفرة النسبية الأعلى.
4. أيٌ من الصيغ الآتية تمثل الصيغة الكيميائية للأيون الجزيئي (M^+) لمركب 1-بروبانول (C_3H_7OH) الناتج في مقياس مطياف الكتلة؟
- $C_3H_7OH^+$.c $C_3H_7^+$.a
 C_3H_7OH .d $C_3H_7O^+$.b
5. أيٌ جزء من الأجزاء الآتية له قيمة $m/z = 44$ ؟
- $C_2H_4O^+$.c NO_2^+ .a
 CH_3CO^+ .d $C_3H_7^+$.b
6. ما قيمة m/z للجزء $^{13}CH_2O^+$ ؟
- 31 .c 29 .a
32 .d 30 .b

أسئلة الإجابات القصيرة

الدرس 8-1: مطیاف الكتلة

- * 7. تم تحليل مادة تتكون من كربون، وهيدروجين، وأكسجين فقط في مقياس مطیاف كتلة عالي الدقة، ف تكونت قمة الأيون الجزيئي عند القيمة $m/z = 86.0729$. حدد الصيغة الكيميائية لهذه المادة.
- * 8. حدد الصيغة الكيميائية لاستر لا يحتوي على أية مجموعة وظيفية متفرعة، تكونت قمة أيونه الجزيئي عند القيمة $m/z = 130.0990$.
9. استناداً إلى الطيف الكتلي لثنائي إيثيل الإيثر الموجود إلى اليسار، ما قيمة m/z لكل من: قمته الأساسية، وقمة أيونه الجزيئي؟
- 
- * 10. ما الصيغتان الكيميائيتان لمركب نيتروجين، بحيث تكون قمتا الأيونين الجزيئين لهما عند القيمتين: $m/z = 18.0220$ و $m/z = 18.0328$ ؟ ملاحظة: خذ بالحسبان النظائر الأقل وفرة.
- * 11. ما الصيغة الكيميائية لمركب تكونت قمة أيونه الجزيئي عند القيمة $m/z = 73.0889$ ، إذا علمت أنه يتكون من الكربون والهيدروجين والنيتروجين فقط؟
- * 12. أجري بحثاً عن الطيف الكتلي لحمض الهيدروكلوريك (HCl)، وحدد الصيغة الكيميائية للقمم الأربع التي لها قيم m/z الأعلى. ووضح، من حيث وفرة النظائر، السبب الذي جعل القمة الأساسية مرتبطة بتلك الصيغة الكيميائية المحددة.
- * 13. ارسم طيفاً كتلياً له قمة أساسية عند القيمة $m/z = 31$ ، وقمة للأيون الجزيئي (M^+) عند القيمة $m/z = 32$ ، حيث تمتلك قمة الأيون الجزيئي وفرة نسبية مقدارها 75%. يتضمن الرسم أيضاً ثلاثة قمم: الأولى عند القيمة $m/z = 29$ ووفرتها النسبية تساوي 50%， والثانية عند القيمة $m/z = 15$ ووفرتها النسبية تساوي 10%， والثالثة عند القيمة $m/z = 30$ ووفرتها النسبية تساوي 5%.

الشكر والتقدير

جميع الرسوم الفنية الواردة في هذا العمل صممتها شركة تطوير العلوم والتكنولوجيا والهندسة والرياضيات (STEM) في الولايات المتحدة الأمريكية. وهي وحدها تملك الحق القانوني لإنجازة استخدام تلك الرسوم.

يشكر المؤلفون والناشرون المصادر الآتية على السماح لهم باستخدام ملكياتهم الفكرية كما أنهم ممتنون لهم لموافقتهم على نشر الصور.

Illustration: Muhammad Farouk/Shutterstock; Photo: DnD-Production/Shutterstock; 3D image: FXartist/Shutterstock; Illustration: Alexander Sergeevich/Shutterstock; Stamp art: spatuletail/Shutterstock; Design: unit and lesson spreads: Jane Holland Design Illustration: Designua/Shutterstock; Photo: Rabbitmindphoto/Shutterstock; Illustration: Andrey Suslov/Shutterstock; Illustration: zffoto/Shutterstock; Photo: Ken Stocker/Shutterstock; Photo: Kobkit Chamchod/Shutterstock 1218821710; Design: unit and lesson spreads: Jane Holland Design Photo: Nobuhiro Asada/Shutterstock; Photo: AjayTvm/Shutterstock; 3D Image: ktsdesign/Shutterstock; Photo: Abdelrahman Hassanein/Shutterstock; 3D image: KateStudio/Shutterstock; Photo illustration: adike/Shutterstock; 3D image: Giovanni Cancemi/Shutterstock; 3D Illustration: Axel_Kock/Shutterstock; Design: unit and lesson spreads: Jane Holland Design 3D Illustration: Image Craft/Shutterstock; Photo: ThePowerPlant/Shutterstock; Photo: pogonici/Shutterstock; Photo Ton Photographer 7824/Shutterstock; Illustration: elenabsl/Shutterstock; Photo: David Evison/Shutterstock; Photo: Augustine Bin Jumat/Shutterstock; Design: unit and lesson spreads: Jane Holland Design Illustration: Muhammad Farouk/Shutterstock 1800616687, DnD-Production/Shutterstock 278922299, 3D image: VFXartist/Shutterstock 1483410965, illustration: Alexander Sergeevich/Shutterstock 1230374893, Stamp art: spatuletail/Shutterstock 1812900445, Design: unit and lesson spreads: Jane Holland Design, Illustration: Designua/Shutterstock 1472540423, photo: Rabbitmindphoto/Shutterstock 1487654072, Illustration: Andrey Suslov/Shutterstock 589410938, Illustration: zffoto/Shutterstock 389695105, Photo: Ken Stocker/Shutterstock 1082226821, Design: unit and lesson spreads: Jane Holland Design, Photo: Nobuhiro Asada/Shutterstock, 144455530, Photo: AjayTvm/Shutterstock 757231510, 3D Image: ktsdesign/Shutterstock 430949605, Photo: Abdelrahman Hassanein/Shutterstock 1230989149, 3D image: KateStudio/Shutterstock 1159868263, Photo illustration: adike/Shutterstock 1036533352, 3D image: Giovanni Cancemi/Shutterstock 76423743, 3D Illustration: Axel_Kock/Shutterstock 1625661736, Design: unit and lesson spreads: Jane Holland Design, 3D Illustration: Image Craft/Shutterstock 1466789552, ThePowerPlant/Shutterstock 1652355403, Photo: pogonici/Shutterstock 262939175, Photo Ton Photographer 7824/Shutterstock 1074125777, Illustration: elenabsl/Shutterstock 1567621081, Photo: David Evison/Shutterstock 77061922, Photo: Augustine Bin Jumat/Shutterstock 71913914, Design: unit and lesson spreads: Jane Holland Design

Janaka Dharmasena / Shutterstock, Nasky/ Shutterstock, adike/ Shutterstock, Richard Peterson/ Shutterstock, stihii/ Shutterstock, NoPainNoGain/ Shutterstock, Teguh Mujiono/ Shutterstock, Improvisor/ Shutterstock, Jose Luis Calvo/ Shutterstock, Rattiya Thongdumhyu/ Shutterstock, Peter Hermes Furian/ Shutterstock, Sebastian Kaulitzki/ Shutterstock, VectorMine/ Shutterstock, bsd/ Shutterstock, Blamb/ Shutterstock, MikeMartin / Shutterstock, Photographee.eu/ Shutterstock, Jason Boyce/ Shutterstock, Maridav, Eugene Onischenko/ Shutterstock, CI Photos/ Shutterstock, Sergey Nivens, Vasyl Shulga/ Shutterstock, Sea Wave, Tanya Sid/ Shutterstock, belushi, / Shutterstock, Birger Olovson, Dionisvera/ Shutterstock

1.28 sportpoint / Shutterstock, ChrisVanLennepPhoto, Jacob Lund, sattahipbeach,/Shutterstock, Catalin Grigoriu/Shutterstock, Designua/Shutterstock, LightField Studios/Shutterstock, lotan/Shutterstock, Designua/Shutterstock, Paweł Graczyk/Shutterstock, Studio BKK/Shutterstock, Kateryna Kon/Shutterstock, GraphicsRF/Shutterstock, nayef hammouri/Shutterstock, adike/Shutterstock, Maridav/Shutterstock, Lukas Budinsky, Jacob Lund/Shutterstock, iPreech Studio/Shutterstock, ChiccoDodiFC/Shutterstock, Blazej Lyjak/Shutterstock, design36/Shutterstock, udaix/Shutterstock, Animashka, electra/Shutterstock, Viktoria_P/Shutterstock, Thomas C. Altman/Altman Science, Emre Terim, Aksanaku/Shutterstock, Blamb/Shutterstock, Tefi/Shutterstock, icsnaps/Shutterstock, Artemida-ps/Shutterstock, OLESHKO GANNA/ Shutterstock Ahinna/Shutterstock, Public Domain/Shutterstock, Public domain/Shutterstock, Juan Gaertner/Shutterstock, Andrey_Popov/Shutterstock, iambasic_Studio/Shutterstock, Sirirat/Shutterstock, ibreakstock/Shutterstock, Belish, Arthur Didyk/Shutterstock, Yenu Shih, Eugene Onischenko/Shutterstock, Robert Przybysz/Shutterstock, matimix/Shutterstock, Alex Kravtsov/Shutterstock, Babka/Shutterstock, Makalex69/Shutterstock, illustratorgraphic/Shutterstock, OSTILL is Franck Camhi, Eugene Onischenko, /Shutterstock, Sergey Nivens/Shutterstock, Alan Freed/Shutterstock, Microgen/Shutterstock, Alfredo Ottonello/Shutterstock, Dmitrydesign/Shutterstock, ZouZou (jumping/Shutterstock, alphaspirit/Shutterstock, George Rudy/Shutterstock, Kati Finell/Shutterstock, haeryung stock images/Shutterstock, sportpoint/Shutterstock, Gwoeli/Shutterstock, Fauad A. Saad/Shutterstock, Oksana Volina/Shutterstock, VectorMine/Shutterstock, sportoakimirk/Shutterstock, Sergii Chemov/ homydesign/ Ivan Sm/Shutterstock, vectorfusionart/Shutterstock, Inspiring/Shutterstock, courtyardpix/Shutterstock, Designua/Shutterstock, Toa55/ Digital Storm/Shutterstock, David Prahi/ mezzotint/ brizmaker/Shutterstock, Fauad A. Saad/Shutterstock, yanik88/ sportpoint/ Andrea Izzotti/Shutterstock, sezer66/ Thomas C. Altman sportpoint/Shutterstock, Mauricio Graiki/Shutterstock, Swapan Photography/ Shawn Hampel/ cloki/ Dan Thornberg/Shutterstock, Georgios Kollidas/Shutterstock, Lia Koltyrina/Shutterstock, matsabe/Shutterstock, Ksenia Raykova/Shutterstock, Bill McKelvie/Shutterstock, Andrey Burmakin/ kuruneko/ ZoranOrcik/Shutterstock, Imagesines/Shutterstock, Diagram/Shutterstock, HelloRF Zcool/ Andrey Burmakin//Shutterstock, Alex Kravtsov/ sirtravelalot/ Suzanna Tucker/Shutterstock, Graph/Shutterstock, Gwoeii/Shutterstock, Graph/ Oleksii Sidorov/Shutterstock, sizov/ LUKinMEDIA/Shutterstock, BUY THIS/Shutterstock, Stock image/Shutterstock, TLaoPhotography/Shutterstock,

TASER/Shutterstock, Roger costa morera/Shutterstock, Preto Perola/ HomeArt/Shutterstock, topimages/ NDT/ KKulikov/Shutterstock, OSTILL is Franck Camhi/ Wikipedia Ljupco Smokovski/ Alexander Kirch/ Stefan Schurr/ Jonah_H/Shutterstock, Brocreative/ Motion Arts/ Dan Thornberg/Shutterstock, Thomas C. Altman/Altman Science, faboi/ TASER/ faboi/Shutterstock, Miriam Doerr Martin Frommherz/ Bjoern Wylezich/Shutterstock, Inna Bigun/ Shutterstock, Steven_Mol/Shutterstock, goffkein.pro/Shutterstock, EugenePut/ RomanVX/Shutterstock, fotoliza/ Shutterstock, IDKFA/Shutterstock, Yosanon Y/ VarnakovR/Shutterstock, Rost9/ Tyler Boyes/ Dimarion/Shutterstock, Maridav/Shutterstock, Dmitry Markov152/Shutterstock, Rudenkois/Shutterstock, Patthana Nirangkul/Shutterstock, KpixMining/ Moon Light PhotoStudio/Shutterstock, -V-/ koya979/ amfroey/ Andrey Armyagov/Shutterstock, Billion Photos/Shutterstock, Christopher Boswell/ DenisVolkov/Shutterstock, Hein Nouwens/ Dragance137/Shutterstock, Everett Collection/ BrunoRosa/ sportspoint/Shutterstock, Dennis van de Water/Shutterstock, Michael Rolands/ Shutterstock, Thomas C. Altman/Altman Science marekuliasz/ Melinda Nagy/Shutterstock, Brostock/ Digital Storm/Shutterstock, D.Pimborough/ SolidMaks/ Stanislaw Mikulski/Shutterstock, Wikipedia, Dainis Derics/Shutterstock, Doug Lemke/Shutterstock, dotshock/Shutterstock, Dmitry Yashkin/Shutterstock, Jose L. Stephens/Shutterstock, PCHT/Shutterstock, Chokniti Khongchum/Shutterstock, BlueRingMedia/Shutterstock, Quick Shot/ J_K/ Vibrant ImageStudio/Shutterstock, Thomas C. Altman/Altman ScienceStudioMolekuul/Shutterstock, OlegD/Shutterstock, Rudmer Zwerver/Shutterstock, Fouad A. Saad/ dioch/Shutterstock, Magcom/ StudioMolekuul/Shutterstock, Trooper2000/Shutterstock, kwanchai.c/ inewsfoto/ Chamille White/Shutterstock, Fotokostic/Shutterstock, LuckyStep/Shutterstock, Prill/Shutterstock, Shine Nucha/ Toa55/ Idambies/Shutterstock, Chokniti Khongchum/ Perception 7/Shutterstock, AlexLMX/Shutterstock, Iricat/ petrroudny43/ Yuriy Seleznev/Shutterstock,

Shaijo/Shutterstock, Patrick Salsbury/ Altman Science, Balli8Tic/Shutterstock, losmandarinas/Shutterstock, Wlad74/Shutterstock, Dudarev Mikhail/Shutterstock, VectorMine/Shutterstock, Michael Stifter/Shutterstock, Tom Wang/Shutterstock, Everett Historical/Shutterstock, PhotoHouse/Shutterstock, Callipso/Shutterstock, alice-photo/Shutterstock, udaix/Shutterstock, Designua/Shutterstock, magnetix/Shutterstock, enzozo/Shutterstock, Designua/Shutterstock, Vshivkova/Shutterstock, ktsdesign/Shutterstock, angellodeco/Shutterstock, Billion Photos/Shutterstock, Ody_Stocker/Shutterstock, kanyanat wongsa/Shutterstock, Zita/Shutterstock, Aha-Soft/Shutterstock, Gorodenkoff/Shutterstock, Designua/Shutterstock, Katy Pack/ nevodka/Shutterstock, Rattiy Thongdumhyu/Shutterstock, Kateryna Kon/Shutterstock, Juan Gaertner/Shutterstock, Elena Pavlovich/ Shawn Hempel/Shutterstock, Spectral-Design/Shutterstock, Katiekk/Shutterstock, Natali_Mis/Shutterstock, OSweetNature/Shutterstock, Soleil Nordic/Shutterstock, Dmitry Kalinovsky/ elenabsl/Shutterstock, Lorna Roberts/ THAIFINN/Shutterstock, DrimaFilm/Shutterstock, Mari-Leaf/Shutterstock, 3d_man/Shutterstock, Designua/Shutterstock, Nathan Devery/Shutterstock, gritsalak karalak/Shutterstock, Olga Rudyk/Shutterstock, petrroudny43/Shutterstock, Kapitosh/Shutterstock, Nate troyer/Shutterstock, machimorales/Shutterstock, acceptphoto/Shutterstock, Tomasz Klejdysz/Shutterstock, Kaentian Street/Shutterstock, Designua/Shutterstock, Sawat Benyenngam/Shutterstock, JIANG HONGYAN/ Mvolodmyr/Shutterstock, Dr Morley Read/Shutterstock, symbiot/ sigit wiyono/ Linas T/Shutterstock, Thomas C. Altman/Altman Science, Fourleaflover/Shutterstock, igorstevanovic/ HEDADZI PE/CHAN/nexusby/Shutterstock, Panchenko Vladimir/Shutterstock,

Peter Hermes Furian/Shutterstock, Everett Historical/Shutterstock, OSweetNature/Shutterstock, Triff/Shutterstock, Fouad A. Saad/Shutterstock, KanKhem/Shutterstock, Cq photo juy/Shutterstock, CandMe/Shutterstock, dani3315/vrx/ /Shutterstock, Mishakov Valery/ sivVector/Shutterstock, Efman/Shutterstock, Art-Perfect/Shutterstock, Negro Elkha/Shutterstock, Designua/Shutterstock, Benson HE/ udaix/Shutterstock, Fouad A. Saad/Shutterstock, BetterPhoto/Shutterstock, Mega Pixel/Shutterstock, StudioMolekuul/ /Shutterstock, urfin/Shutterstock, kondr.konst/Shutterstock, suteelak phundang/ shltz/Shutterstock, Aonprom Photo/Shutterstock, Andrew Balcombe/ Don Mammoser/ Vladimir Gjorgiev/Shutterstock, Richard Whitcombe/Shutterstock, Chase Dekker/Shutterstock, paulynn/ Anna Hoychuk/ Dalibro/Shutterstock, Yana Gershanik/ Lalandrew/Shutterstock, Alaettin YILDIRIM/Shutterstock, Matej Kastelic/Shutterstock, Poring Studio/Shutterstock, g_dasha/Shutterstock, Billion Photos/Shutterstock, shtukicrew/Shutterstock, Amy Newton-McConnel/ Ongkan/Shutterstock, bonchan/Shutterstock, MITstudio/Shutterstock, 200dgr/Shutterstock, SpelaG91/ UlrikaArt/ Luis Echeverri Urrea/Shutterstock, Rich Carey/Shutterstock, Davdeka/Shutterstock, Newman Studio/Shutterstock,

gstraub/Shutterstock; Jenny_Tr/Shutterstock; Fer Gregory/Shutterstock; Crystal-K/Shutterstock; 3Dsculptor/Shutterstock; ibreakstock/Shutterstock; BeataGFX/Shutterstock; ZikG/Shutterstock; focal point/Shutterstock; u3d/Shutterstock; Bob Morse/Morse Scientific Inc ;Tuba Rehman/Shutterstock; Arpon Pongkasetkam/Shutterstock; JPC-PROD/Shutterstock; Lutsenko_Oleksandr/Shutterstock; gstraub/Shutterstock; ggw/Shutterstock; Kim Christensen/Shutterstock; Blue Lemon Photo Shutterstock; StudioMolekuul/Shutterstock; botazsolti/Shutterstock; Kriengsak tarasri/Shutterstock; David Plo Caviedes/Shutterstock, Toltemara/Shutterstock; sasha2109/Shutterstock; Leysani/Shutterstock; ggw/Shutterstock; Ajamal/Shutterstock; helfei/Shutterstock; Fablok/Shutterstock; gogoiso/Shutterstock; HAFIZULLAHYATIM/Shutterstock; ninikas/Shutterstock; Monkey Business Images/Shutterstock; public domain , Surasak_Photo/Shutterstock; White_Fox/Shutterstock; chemistrygod/Shutterstock; SUWIT NGAOKAEW/Shutterstock; Bob Morse/Morse Scientific, Inc.; StudioMolekuul/Shutterstock; Rabbitmindphoto/Shutterstock; petrroudny43/Shutterstock; kesipun/Shutterstock; wellphoto/Shutterstock; Toa55/Shutterstock; PNOIARSA/Shutterstock; ggw/Shutterstock; Rattiya Thongdumhyu/Shutterstock; Satienpong P/Shutterstock; DariaRen/Shutterstock; tanewpix168/Shutterstock;



السلام عليكم ورحمة الله وبركاته

نرحب بكم في

موقع منتديات صقر الجنوب التعليمية [المنهاج القطري](#)

ويسعدنا ويشرفا ان نستمر معكم في تقديم

كل ما هو جديد للمنهاج المحدث المطورة ولجميع
المستويات والمواد

ملفات نجمعها من كل مكان ونضعها لكم في مكان واحد
ليسهل تحميلها

علما ان جميع ما ننشر مجاني 100%



أخي الزائر - أخي الزائرة انا دعمكم لنا هو انمامكم لنا
 فهو شرف كبير لنا

صفحتنا على الفيس بوك [هنا](#)

مجموعتنا على الفيس بوك [هنا](#)

مجموعتنا على التلقرام [هنا](#)

قنواتنا على اليوتيوب [هنا](#)

جميع ملفاتنا نرفعها على مركز تحميل خاص في [صقر الجنوب](#)

نحن نسعى دائما الى تقديم كل ما هو افضل لكم و هذا وعد منا ان شاء الله
شجعونا دائما حتى نواصل في العطاء و [نسأل](#) الله ان يوفقنا و يسدد خطانا

في حال واجهتك اي مشكلة في تحميل اي ملف
من [منتديات صقر الجنوب](#) [المنهاج القطري](#)
[صفحة اتصل بنا](#)



قنوات تيليجرام منهاج قطر الفصل الأول والثاني محدث

[قناة المستوى الثالث](#)

[قناة المستوى الثاني](#)

[قناة المستوى الأول](#)

[قناة المستوى السادس](#)

[قناة المستوى الخامس](#)

[قناة المستوى الرابع](#)

[قناة المستوى التاسع](#)

[قناة المستوى الثامن](#)

[قناة المستوى السابع](#)

[قناة المستوى الثاني عشر](#)

[قناة المستوى الحادى عشر](#)

[قناة المستوى العاشر](#)



فَنَّوْتَ الْيُوْتَيُوبِ التَّعْلِيمِيَّةِ لِأَمْرَأَجَعِ الْقَطَرِيِّ مِنِ الْسَّطْوَى ١٠-٠١

قناة المستوى الثالث

قناة المستوى الثاني

قناة المستوى الأول

قناة المستوى السادس

قناة المستوى الخامس

قناة المستوى الرابع

قناة المستوى الثاني عشر

قناة المستوى الثامن

قناة المستوى السادس عشر

قناة المستوى الثاني عشر

قناة المستوى السادس عشر

قناة المستوى العاشر



مجموعات الفيس بوك للمنهاج القطري الفصل الاول والفصل الثاني محدث

[رياض الاطفال](#)

[مجموعة المستوى الثالث](#)

[مجموعة المستوى الثاني](#)

[مجموعة المستوى الأول](#)

[مجموعة المستوى السادس](#)

[مجموعة المستوى الخامس](#)

[مجموعة المستوى الرابع](#)

[مجموعة المستوى التاسع](#)

[مجموعة المستوى الثامن](#)

[مجموعة المستوى السابع](#)

[مجموعة المستوى الثاني عشر](#)

[مجموعة المستوى الحادى عشر](#)

[مجموعة المستوى العاشر](#)

[صفحتنا على الفيس بوك](#)

الهدف الرئيسي
لتنمية صقر الجنوب
هو

منصة تعليمية مجانية

هدفنا النفع ونشر العام

نشر العام مجاناً لطلب من يطلب العام في جميع أنحاء العالم
لا نفرض أي رسوم أو نفقات على العضويات في الواقع
على أننا مجانية بدون تسجيل عضوية

لنستمر في البقاء أن شاء الله

يمكن أن تساهم في استقرارنا والتحفيظ

عنا مصاريف السيرفر والاستضافة

مهما كانت مساحتها صغيرة أو كبيرة، لها أثر كبير في استقرار
الواقع لتقديم خدمات المجانية من ملفات مصرية ومنقولات
من خلاله دعمنا على مسابنا الخاص على

[من خلال الضغط هنا PayPal](#)