شارح: حاصل الإذابة

في هذا الشارح، سوف نتعلَّم كيف نفسِّر حاصل الإذابة ونحسبه.

يوجد العديد من المواد الأيونية التي يمكننا تصنيفها قابلةً للذوبان، مثل كلوريد الصوديوم. ومع ذلك، هناك أيضًا العديد من المواد التي نعتبرها غير قابلة للذوبان، مثل كبريتات الباريوم أو كربونات الكالسيوم. كما أن هناك بعض المواد الأيونية التي قد نعتبرها شحيحة الذوبان، مثل هيدروكسيد الكالسيوم.

عندما تُوصَف مادة بأنها غير قابلة للذوبان فعادةً ما يعني هذا أن المادة لا تذوب في الماء على الإطلاق. ومع ذلك، بالنسبة إلى المواد غير القابلة للذوبان، مثل كبريتات الباريوم أو هيدروكسيد النحاس الثنائي، فإنها في الواقع يمكن أن تذوب في الماء، لكن بكميات صغيرة جدًّا فقط.

إذا أردنا التعبير عن هذا الذوبان في صورة اتزان لأيون فلز عام، M^+، وأنيون عام، A^-، يمكننا كتابة معادلة الذوبان على النحو الآتي:

$$\text{MA}(s) \rightleftharpoons \text{M}^+(aq) + \text{A}^-(aq)$$

هنا، يمكننا أن نتخيَّل أن التوازن يقع بعيدًا جدًّا في اتجاه الطرف الأيسر مع وجود عدد قليل جدًّا من الأيونات في المحلول.

يمكن التعبير عن هذا الاتزان في صورة ثابت اتزان يُعرَف بحاصل الإذابة، K_{sp}. ويمكن كتابة K_{sp} لهذه المعادلة العامة على النحو الآتي:

$$K_{\text{sp}} = [\text{M}^+][\text{A}^-].$$

مثال ١: تكوين معادلة حاصل الإذابة لمُركَّب عام غير عضوي

ما معادلة حاصل الإذابة لمُركَّب عام غير عضوي بالصيغة MA؟

الحل

يتضمَّن حاصلُ الإذابة لمُركَّب حاصلَ ضرب تركيز الأيونات مرفوعًا كلٌّ منها لأس يساوي معاملها التكافُئي. يتفكَّك هذا المركب العام MA إلى أيون واحد موجب M^+ وأيون واحد سالب A^-. تُستخدَم الأقواس المربعة للإشارة إلى أن هذا هو التركيز، وأن حاصل ضربهما يساوي K_{sp}.

ومن ثَمَّ، فإن المعادلة هي $K_{\text{sp}} = [\text{M}^+][\text{A}^-]$.

تُشير الأقواس المربعة هنا إلى التركيز مقيسًا بوحدة $\mathrm{mol\cdot dm^{-3}}$ أو $\mathrm{mol/L}$، وبهذا، تكون وحدات معادلة حاصل الإذابة هذا بالأخص هي $\mathrm{mol^2\cdot dm^{-6}}$، وذلك على النحو المحسوب الآتي:

$$\mathrm{mol\cdot dm^{-3} \times mol\cdot dm^{-3} = \left(mol\cdot dm^{-3}\right)^2 = mol^2\cdot dm^{-6}}.$$

يختلف هذا النوع المُحدَّد من ثوابت الاتزان عن الأنواع الأخرى؛ حيث تُقسَم عادةً بعض قيم النواتج على بعض قيم المتفاعلات. على سبيل المثال، يُحسَب ثابت الاتزان للتركيز من خلال ضرب تركيزات النواتج معًا، ثم قسمة هذه القيمة على حاصل ضرب تركيزات المتفاعلات. في حالة حاصل الإذابة تكون المتفاعلات في هذا الاتزان غير المتجانس هي المادة الصلبة غير القابلة للذوبان، وتكون الكمية التي تتغيَّر من بداية الذوبان إلى الاتزان صغيرة جدًّا؛ حيث يمكن اعتبارها مقدارًا ثابتًا؛ ومن ثَمَّ تُدمَج في K_{sp}.

تعريف: حاصل الإذابة

حاصل الإذابة $\left(K_{\mathrm{sp}}\right)$ لمُركَّب هو حاصل ضرب تركيزات الأيونات في محلول مُشبَّع مرفوعًا كلٌّ منها لأس يساوي معاملها التكافُئي.

فيما يأتي مثال:

$$\mathrm{MA}(s) \rightleftharpoons m\,\mathrm{M^+}(aq) + a\,\mathrm{A^-}(aq)$$
$$K_{\mathrm{sp}} = [\mathrm{M^+}]^m[\mathrm{A^-}]^a.$$

عندما يساوي K_{sp} حاصل ضرب تركيز الأيونات، يُقال إن المحلول مشبَّع:

$$K_{\mathrm{sp}} = [\mathrm{M^+}][\mathrm{A^-}].$$

لكن عندما يصبح حاصل ضرب تركيز الأيونات أكبر من قيمة K_{sp}، يبدأ الراسب في التكوُّن:

$$K_{\mathrm{sp}} < [\mathrm{M^+}][\mathrm{A^-}].$$

وأخيرًا، عندما يكون K_{sp} أكبر من حاصل ضرب تركيز الأيونات، فإن كمية أكبر من المادة الصلبة ستذوب قبل الوصول إلى الاتزان:

$$K_{\mathrm{sp}} > [\mathrm{M^+}][\mathrm{A^-}].$$

إضافةً إلى ذلك، نعلم جميعًا أنه من السهل إذابة كمية أكبر من السكر في الشاي الساخن بدلًا من الشاي البارد، ولذلك لا عجب من أن قيم K_{sp} تعتمد على درجة الحرارة وتختلف تبعًا لقيمة درجة الحرارة التي تُقاس عندها.

قبل أن نتناول كيفية حساب حاصل الإذابة، من المهم أن نكتب معادلة K_{sp} بطريقة صحيحة تعبِّر عن المواد الأيونية التي تحتوي على أكثر من أيون من نفس النوع:

$$\mathrm{MA_2}(s) \rightleftharpoons \mathrm{M^+}(aq) + 2\mathrm{A^-}(aq) \qquad K_{\mathrm{sp}} = [\mathrm{M^+}][\mathrm{A^-}]^2.$$

صيغة فوسفات النيكل هي $Ni_3(PO_4)_2$، وهكذا يمكن كتابة K_{sp} على النحو الآتي:

$$K_{sp} = [Ni^{2+}]^3[PO_4^{3-}]^2.$$

يمكن حساب الوحدات على النحو الآتي:

$$\left(\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}\right)^3 \times \left(\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}\right)^2 = \left(\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}\right)^5 = \text{mol}^5\cdot\text{dm}^{-15}.$$

لاحِظ في الأمثلة السابقة كيف أثَّرت الأسس المختلفة التي رُفِع إليها كلُّ تركيز من التركيزات على وحدات K_{sp}.

مثال ٢: تكوين معادلة حاصل الإذابة لكربونات الفاناديوم الثلاثي

ما معادلة حاصل الإذابة لكربونات الفاناديوم الثلاثي $(V_2(CO_3)_3)$؟

الحل

يمكن تعريف حاصل الإذابة بأنه حاصل ضرب تركيزات الأيونات في محلول مُشبَّع مرفوعًا كلٌّ منها لأس يساوي معاملها التكافُئي. في هذه الحالة، سيكون الأيونان الموجودان في المحلول هما الفاناديوم +3 والكربونات −2. عندما تذوب كربونات الفاناديوم في الماء يتكوَّن أيونان من الفاناديوم +3 وثلاثة أيونات من الكربونات −2:

$$V_2(CO_3)_3(s) \rightleftharpoons 2\,V^{3+}(aq) + 3\,CO_3^{2-}(aq)$$

لذلك، علينا رَفْع تركيز أيونات الفاناديوم +3 للأس اثنين، ورَفْع تركيز أيونات الكربونات للأس ثلاثة، لنحصل على المعادلة النهائية:

$$K_{sp} = [V^{3+}]^2[CO_3^{2-}]^3.$$

تعتمد الأسئلة المتعلِّقة بـ K_{sp} إما على حساب قيم K_{sp} من تركيزات مُعطاة وإما على حساب التركيزات والمعلومات ذات الصلة من قيم K_{sp}. نعلم أنه في حالة المواد الأيونية غير القابلة للذوبان يقع الاتزان بشكل كبير ناحية المتفاعلات؛ ومن ثَمَّ لا عجب في أن قيم K_{sp} صغيرة للغاية.

على سبيل المثال، قيمة K_{sp} لبروميد الفضة تساوي $5.35 \times 10^{-13}\ \text{mol}^2\cdot\text{dm}^{-6}$. باستخدام هذه القيمة يمكننا تحديد كمية بروميد الفضة، بالجرام التي ستذوب فعليًا في $1\ \text{dm}^3$ $(1\,000\ \text{mL})$ من الماء.

يمكن كتابة اتزان ذوبان بروميد الفضة على النحو الآتي:

$$AgBr(s) \rightleftharpoons Ag^+(aq) + Br^-(aq).$$

هذا يُعطينا المعادلة لـ K_{sp}:

$$K_{sp}(AgBr) = [Ag^+][Br^-] = 5.35 \times 10^{-13}\ \text{mol}^2\cdot\text{dm}^{-6}.$$

نعلم أنه عند ذوبان المادة الأيونية تَنتُج كميات متساوية من أيونات الفضة وأيونات البروميد. هذا يجعلنا نقول إن:

$$[\mathrm{Ag^+}] = [\mathrm{Br^-}] = X.$$

يمكننا بعد ذلك التعويض بـ X في معادلة الاتزان:

$$K_{\mathrm{sp}}(\mathrm{AgBr}) = [\mathrm{Ag^+}][\mathrm{Br^-}] = 5.35 \times 10^{-13}\ \mathrm{mol^2 \cdot dm^{-6}} = X^2.$$

ويمكننا إيجاد قيمة X بأخذ الجذر التربيعي:

$$X = \sqrt{5.35 \times 10^{-13}} = 7.31 \times 10^{-7}\ \mathrm{mol \cdot dm^{-3}}.$$

ومن ثَمَّ، يمكننا ملاحظة ذوبان 7.31×10^{-7} مول من بروميد الفضة في $1\ \mathrm{dm^{-3}}$ ($1\,000\ \mathrm{mL}$) من الماء. وأخيرًا، يمكننا استخدام الكتلة المولية لبروميد الفضة ($188\ \mathrm{g/mol}$) وعدد المولات لتحديد مقدار الكتلة المذابة:

$$\begin{aligned}\text{الكتلة} &= n \times M_r \\ &= 7.31 \times 10^{-7}\ \mathrm{mol} \times 188\ \mathrm{g/mol} \\ &= 1.37 \times 10^{-4}\ \mathrm{g}.\end{aligned}$$

توضِّح لنا القيمة النهائية ذوبان $0.000137\ \mathrm{g}$ من بروميد الفضة في $1\ \mathrm{dm^3}$ ($1\,000\ \mathrm{mL}$) من الماء عند درجة حرارة $298\ \mathrm{K}$.

لقد رأينا للتو في المثال السابق أن حاصل إذابة بروميد الفضة يساوي $5.35 \times 10^{-13}\ \mathrm{mol^2 \cdot dm^{-6}}$. ولكن لا يمكننا أن نقدِّر بعدُ ما تعنيه هذه القيمة مقارنةً بحاصل إذابة المواد الصلبة الأيونية الأخرى. في الجدول الآتي، يمكننا أن نرى المزيد من الأمثلة على المواد الصلبة الأيونية المختلفة، وحاصل الإذابة لهذه المواد الصلبة، والكمية بالجرام التي يمكننا إذابتها في $1\ \mathrm{L}$ من الماء عند درجة حرارة $298\ \mathrm{K}$.

المادة الصلبة الأيونية	الصيغة الكيميائية	كتلة الصيغة النسبية، M_r ($\mathrm{g/mol}$)	تناقص K_{sp} ($\mathrm{mol^2 \cdot L^{-6}}$)	الذوبان في الماء ($\mathrm{g/L}$، $298\ \mathrm{K}$)
فلوريد الليثيوم	LiF	26	1.84×10^{-3}	1.12
كبريتات الباريوم	$\mathrm{BaSO_4}$	233	1.08×10^{-10}	2.42×10^{-3}
بروميد الفضة	AgBr	188	5.35×10^{-13}	1.37×10^{-4}
كربونات الرصاص الثنائي	$\mathrm{PbCO_3}$	267	7.40×10^{-14}	7.26×10^{-5}
سيلينيد الزنك	ZnSe	144	3.60×10^{-26}	2.73×10^{-11}

كما نرى من الجدول، يوضِّح الاتجاه أنه كلما قلَّ حاصل الإذابة، قلَّت أيضًا كمية المادة الأيونية التي يمكننا إذابتها في حجم ثابت من الماء. ولكن علينا تذكُّر أن كتلة الصيغة النسبية وعدد مولات الأيونات الموجودة في المحلول يلعب كلاهما دورًا في كمية المادة التي يمكن إذابتها. وقد يكون هناك بعض الاستثناءات لهذا التوجُّه العام في حاصل الإذابة لمادتين كيميائيتين مختلفتين لهما مقداران متشابهان.

مثال ٣: حساب كتلة كربونات الزنك التي ستذوب في 1 000 ملليلتر من الماء

بافتراض أن حاصل إذابة كربونات الزنك يساوي $1.46 \times 10^{-11}\ \text{mol}^2\cdot\text{L}^{-2}$ عند 298 K، ما عدد جرامات كربونات الزنك التي كتلتها المولية 125.38 g/mol والتي سوف تذوب في 1 000 mL من الماء؟ اكتب إجابتك بالترميز العلمي، لأقرب منزلتين عشريتين.

الحل

يمكننا البدء بكتابة معادلة ذوبان كربونات الزنك عند الاتزان:

$$\text{ZnCO}_3(s) \rightleftharpoons \text{Zn}^{2+}(aq) + \text{CO}_3{}^{2-}(aq)$$

ومن ثَمَّ، يمكننا كتابة معادلة K_{sp}:

$$\begin{aligned} K_{\text{sp}}(\text{ZnCO}_3) &= [\text{Zn}^{2+}][\text{CO}_3{}^{2-}] \\ &= 1.46 \times 10^{-11}. \end{aligned}$$

من هذه المعادلة يمكننا أيضًا تحديد وحدات K_{sp}؛ وهي $\text{mol}^2\cdot\text{L}^{-2}$.

نعلم أنه عند الاتزان تكون تركيزات أيونات الزنك مساوية لتركيزات أيونات الكربونات، ويمكن أن نرمز لذلك بالرمز X:

$$[\text{Zn}^{2+}] = [\text{CO}_3{}^{2-}] = X.$$

يمكننا الآن التعويض بقيمة حاصل الإذابة K_{sp} المُعطاة في السؤال:

$$[\text{Zn}^{2+}][\text{CO}_3{}^{2-}] = 1.46 \times 10^{-11} = X^2.$$

يمكننا إيجاد قيمة X بأخذ الجذر التربيعي:

$$X = \sqrt{1.46 \times 10^{-11}} = 3.82 \times 10^{-6}\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}.$$

ومن ثَمَّ، يمكننا ملاحظة ذوبان 3.82×10^{-6} مول من كربونات الزنك في 1 000 mL من الماء.

وأخيرًا، نستخدم الكتلة المولية لحساب عدد جرامات كربونات الزنك التي ستذوب:

$$\text{كتلة } \text{ZnCO}_3 \text{ المذابة} = 3.82 \times 10^{-6}\ \text{mol} \times 125.38\ \text{g}\cdot\text{mol}^{-1} = 4.79 \times 10^{-4}\ \text{g}.$$

يمكننا أيضًا فعل ذلك الأمر بطريقة عكسية، وحساب قيمة K_{sp} من كمية المادة التي ذابت في الماء لتكوِّن محلولًا مُشبَّعًا.

مثال ٤: حساب قيمة K_{sp} لمحلول مشبَّع من هيدروكسيد النحاس الثنائي

يحتوي محلول مشبَّع من هيدروكسيد النحاس الثنائي $Cu(OH)_2$ على 1.72×10^{-5} g من $(Cu(OH)_2)$ في كل $1\ dm^3$ (1 L) من الماء. بمراعاة أن الكتلة المولية لـ $(Cu(OH)_2)$ تساوي 97.56 g/mol، أجب عن الأسئلة الآتية.

١. ما قيمة K_{sp} بدون وحدات، لأقرب منزلتين عشريتين بالترميز العلمي؟

٢. ما وحدة K_{sp} لهذا الهيدروكسيد؟

أ. $mol^5 \cdot dm^{-15}$

ب. $mol^4 \cdot dm^{-12}$

ج. $mol \cdot dm^{-3}$

د. $mol^2 \cdot dm^{-6}$

هـ. $mol^3 \cdot dm^{-9}$

الحل

الجزء الأول

أولًا، يمكننا كتابة معادلة K_{sp}:

$$K_{sp}(Cu(OH)_2) = [Cu^{2+}][OH^-]^2.$$

لكي نحسب K_{sp}، علينا أولًا حساب تركيز الأيونات عند الاتزان باستخدام العلاقة:

$$\text{التركيز} = \frac{n}{V}$$

حيث n هو عدد المولات، V هو الحجم.

يمكننا حساب عدد المولات باستخدام الكتلة المولية وكتلة هيدروكسيد النحاس الثنائي:

$$\begin{aligned} n &= \frac{m}{M} \\ &= \frac{1.72 \times 10^{-5}\ \text{g}}{97.56\ \text{g} \cdot \text{mol}^{-1}} \\ &= 1.763\ldots \times 10^{-7}\ \text{mol}. \end{aligned}$$

بما أن الحجم يساوي $1\ dm^3$، فإن التركيز ببساطة يساوي n. ومن ثَمَّ، فإن تركيز الأيونات عند الاتزان يساوي $1.763\ldots \times 10^{-7}$ mol.

بعد ذلك، نجعل تركيز الأيونات يساوي X:

$$1.763\ldots \times 10^{-7}\ \mathrm{mol} = X.$$

نعلم أن تركيز أيونات الهيدروكسيد عند الاتزان يساوي ضِعْف تركيز أيونات النحاس:

$$\mathrm{Cu(OH)_2}(s) \rightleftharpoons \mathrm{Cu^{2+}}(aq) + 2\,\mathrm{OH^-}(aq)$$

نكافئ هذا بـ X، ونبسِّط كالآتي:

$$K_{\mathrm{sp}}(\mathrm{Cu(OH)_2}) = [\mathrm{Cu^{2+}}][\mathrm{OH^-}]^2 = [X][2X]^2 = 4X^3.$$

نوجد بعد ذلك قيمة K_{sp} باستخدام تركيز X الذي حسبناه سابقًا:

$$4X^3 = 4 \times \left(1.763\ldots \times 10^{-7}\right)^3 = 2.19 \times 10^{-20}.$$

الجزء الثاني

إذا نظرنا إلى معادلة K_{sp}، يمكننا أن نرى أن هناك ثلاث حالات للتركيز: $K_{\mathrm{sp}}\ (\mathrm{Cu(OH)_2}) = [\mathrm{Cu^{2+}}][\mathrm{OH^-}]^2$. تُشير كل مجموعة من الأقواس المربعة إلى تركيز بوحدة $\mathrm{mol{\cdot}dm^{-3}}$. وبذلك يكون لدينا $\mathrm{mol{\cdot}dm^{-3}} \times \left(\mathrm{mol{\cdot}dm^{-3}}\right)^2$، الذي يُعطينا عند تبسيطه $\mathrm{mol^3{\cdot}dm^{-9}}$.

بالنسبة إلى بروميد الفضة، كان يجب علينا استخدام الجذر التربيعي لإيجاد قيمة X^2 وحساب التركيز. لكن بالنسبة إلى بعض المواد الأيونية التي تحتوي على أكثر من أنيون أو كاتيون واحد، فقد يكون من الضروري استخدام جذور أكثر تعقيدًا.

هيا نتناول محلولًا مائيًا من هيدروكسيد الألومنيوم. إذا علمنا أن قيمة $K_{\mathrm{sp}} = 3 \times 10^{-34}\ \mathrm{mol^4{\cdot}dm^{-12}}$، فكيف يمكننا حساب تركيز $\mathrm{Al^{3+}}$ في محلول مُشبَّع من هيدروكسيد الألومنيوم؟

في البداية، سنكتب معادلة الاتزان K_{sp}:

$$\mathrm{Al(OH)_3}(s) \rightleftharpoons \mathrm{Al^{3+}}(aq) + 3\mathrm{OH^-}(aq)$$
$$K_{\mathrm{sp}}(\mathrm{Al(OH)_3}) = [\mathrm{Al^{3+}}][\mathrm{OH^-}]^3.$$

يمكننا التعويض بعد ذلك بـ X:

$$\begin{aligned}[\mathrm{Al^{3+}}] &= X \times (3X)^3 \\ &= 27X^4.\end{aligned}$$

ويمكننا بعد ذلك التعويض بقيمة K_{sp} وإيجاد قيمة X:

$$K_{sp} = 3.0 \times 10^{-34}\ \text{mol}^4 \cdot \text{dm}^{-12} = 27X^4$$
$$\frac{3.0 \times 10^{-34}\ \text{mol}^4 \cdot \text{dm}^{-12}}{27} = X^4$$
$$\sqrt[4]{\frac{3.0 \times 10^{-34}\ \text{mol}^4 \cdot \text{dm}^{-12}}{27}} = X.$$

يمكننا الآن إيجاد قيمة X لنحصل على تركيز أيونات Al^{3+} في المحلول المشبَّع:

$$X = 1.83 \times 10^{-9}\ \text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}.$$

النقاط الرئيسية

- حاصل الإذابة هو ثابت اتزان غير متجانس.
- يمكن تعريف حاصل الإذابة بأنه حاصل ضرب تركيزات الأيونات في محلول مُشبَّع مرفوعًا كلٌّ منها لأس يساوي معاملها التكافُئي.
- عندما يساوي حاصلُ الإذابة حاصلَ ضرب تركيز الأيونات يكون المحلول مُشبَّعًا.
- يعتمد حاصل الإذابة على درجة الحرارة، وتكون قيمه عادةً عند 298 K.
- قد تتطلَّب بعض المواد الأيونية استخدام الجذور التكعيبية أو الجذور الرباعية عند حساب التركيز من K_{sp}.