

Oldási entalpia meghatározása

Elméleti alap: P.W. Atkins: *Fizikai Kémia*, 26.1–3 (4. kiadás), vagy 25.1–3 (6. kiadás) fejezetek.

Gyakorlat típusa: Egyéni.

Gyakorlat célja: Bemutatni, hogyan történik a különböző folyamatokkal együtt járó hő mérése és a mért adatokból termodinamikai mennyiségek számítása.

1. Bevezetés

A különböző fizikai és/vagy kémiai folyamatokat kísérő hőelnyelés vagy hőfelszabadulás mérésének módszere a kalorimetria. Amennyiben a folyamat során a térfogati munkán kívül más munkavégzés nincs, akkor izobár, reverzibilis esetben a hő egyenlő az entalpiaváltozással¹. A kalorimetria mérőeszköze a kaloriméter. A nemizoterm kaloriméterekben a vizsgált rendszer (és/vagy környezete) hőmérséklet-változásából számíthatjuk a hőt. Ezekhez a számításokhoz figyelembe kell venni a következőket:

1. A rendszer felmelegedésének vagy lehűlésének mértéke a vizsgált rendszerben lévő anyagok hőkapacitásától függ. Az állandó nyomáson vett hőkapacitás definícióját a

$$C_p = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_p$$

egyenlettel adhatjuk meg, vagyis a hőkapacitás számértékben az a hő, amely a rendszer hőmérsékletét 1 K-nel (vagy 1 °C-kal) változtatja meg. Ez az érték általában nem független a kiindulási hőmérséklettől, de a gyakorlaton alkalmazott hőmérséklet-tartományban állandónak tekinthető a kísérleti hibahatáron belül. Ez azt jelenti, hogy a hő (Q) egyszerűen

$$Q = \Delta H = C_p \cdot \Delta T = C_p \cdot (T_{\text{végső}} - T_{\text{kiindulási}})$$

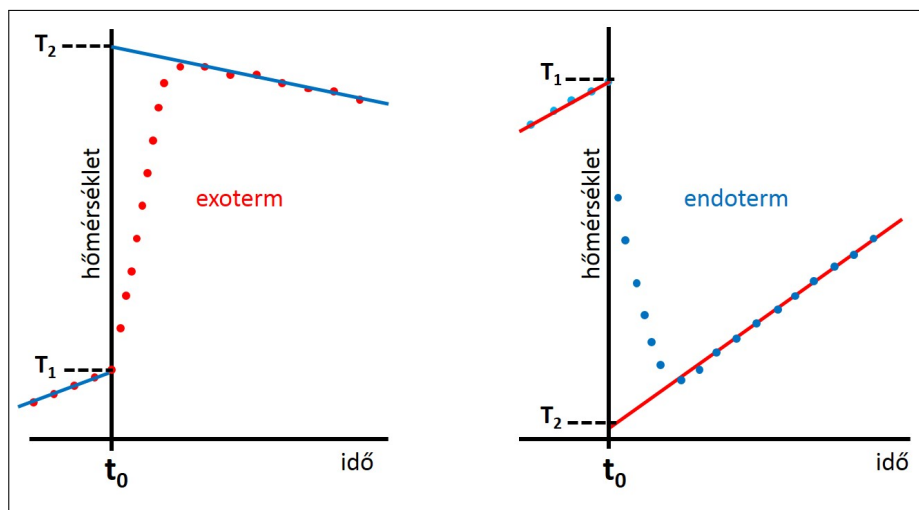
Egy kaloriméterrel mért adatok értékeléséhez mindenképpen ismerni kell a rendszerben lévő anyagok hőkapacitását.

A hőkapacitás értékét egykomponensű rendszereknél egységnyi anyagmennyiségre vonatkoztatva célszerű megadni ($C_{p,m}$). Többkomponensű rendszereknél az egységnyi tömegre vonatkoztatott fajlagos hőkapacitást használjuk (c_p). (A továbbiakban a p indexeket elhagyjuk az egyszerűség kedvéért, de minden hőkapacitás állandó nyomásra vonatkozik.)

2. A vizsgált folyamat sokszor nem pillanatszerűen megy végbe, ami lehetőséget ad a környezettel történő hőcserére, vagyis a meghatározandó hő egy része eltűnik. Ez vagy – általában drága – hőszigetelő anyagok és bonyolult technikai megoldások alkalmazásával küszöbölhető ki, vagy a folyamat elő- és utóélete vizsgálatával. Ez utóbbi módszert szemlélteti az 1. ábra, ahol a bal oldali görbe egy hőfelszabadulással, a jobb oldali pedig egy hőelnyeléssel járó folyamat mért hőmérséklet-változását szemlélteti. A vizsgálandó folyamat a t_0 időpillanatban kezdődik, de a rendszer hőmérsékletét már jóval előtte követjük. A hőmérséklet követésének kezdete és a folyamat kezdete közötti időtartamot előperiódusnak nevezzük. A főperiódus kezdete t_0 és a vizsgált folyamat teljes lejátszódásának időtartamát foglalja magában. A főperiódus alatt a hőmérséklet-változást a folyamat hője határozza meg, de már elkezdődik a környezettel történő hőcsere is. Az ezután következő utóperiódusban a folyamat már lejátszódott, itt már csak a hőcsere határozza meg a hőmérséklet változását. Amíg az elő- és főperiódus között nagyon éles határ húzható t_0 -nál, addig a fő és utóperiódus között az átmenet folyamatos, amit az 1. ábra is szemléltet. Ha az előperiódusban tapasztalható hőmérséklet-változást² –

¹ Amennyiben a mérések nem állandó nyomáson, hanem állandó térfogaton történnek, akkor a belső energia változása határozható meg, de minden egyéb analóg a továbbiakban leírtakkal.

² Ez a hőmérséklet-változás a vizsgált rendszeren kívüli okokra (pl. keverő melegeződése) vezethető vissza és a gyakorlatban a kaloriméter járásának hívják.



1. ábra. Kalorimetriás hőmérséklet – idő görbék és azok értékelésének szemléltetése.

linearitást feltételezve – extrapoláljuk a t_0 időpillanatra, akkor megkapjuk a T_1 értéket, ami a rendszer hőmérséklete a folyamat indulásának pillanatában. Ha az utóperiódust extrapoláljuk visszafelé a t_0 időpontra – ugyancsak linearitást feltételezve –, akkor a T_2 értéket kapjuk meg. Ez az a hőmérséklet, amit akkor mérnénk, ha a vizsgált folyamat egy pillanat alatt végbemenne, vagyis nem lenne idő a környezettel való hőcserére. A $T_2 - T_1$ különbség a folyamat okozta teljes hőmérséklet-változás, ha nincs a környezettel hőcsere³.

3. A folyamat hője nemcsak a vizsgált rendszer hőmérsékletét változtatja, hanem a kaloriméter részeiét is. Egy kaloriméter alkatrészei általában nem változnak, így az egyes részek hőkapacitásainak összege állandó, ami egy értéként, a kaloriméter hőkapacitásaként (C_{kal}) adható meg. Ez egy adott készülékre jellemző, hasonló mérési körülmények között állandó érték, ami megadja azt a hőt, amely a kaloriméter hőmérsékletének 1 K-nel történő változtatásához szükséges. Egy kaloriméter hőkapacitása a következőkben leírt módon határozható meg.

A kaloriméterben lévő m_a tömegű, $T_{1,a}$ hőmérsékletű vízhez m_b tömegű, T_b hőmérsékletű vizet adunk, és az előző pontban részletezett módon mérjük a hőmérséklet változását. Ha a hőmérséklet kiegyenlítődése csak a vízben történne, akkor az elméleti közös hőmérséklet ($T_{2,\text{elm}}$) az

$$m_a \cdot (T_{2,\text{elm}} - T_{1,a}) = -m_b \cdot (T_{2,\text{elm}} - T_b) \quad (1)$$

egyenlőség alapján lenne számolható. A valóságban azonban $T_{2,\text{közös}}$ a közös hőmérséklet, mivel a hő egy részét a kaloriméter alkatrészei veszik fel, amelyek hőmérséklete $T_{1,a}$ -ról szintén $T_{2,\text{közös}}$ -re változik. Ez a tény a

$$c_v \cdot (m_a + m_b) \cdot (T_{2,\text{elm}} - T_{2,\text{közös}}) = C_{\text{kal}} \cdot (T_{2,\text{közös}} - T_{1,a}) \quad (2)$$

egyenlettel fejezhető ki, ahol c_v a víz állandó nyomáson vett fajlagos hőkapacitása. Az (1) egyenletből $T_{2,\text{elm}}$ -t kifejezve és (2)-be helyettesítve a

$$C_{\text{kal}} = c_v \cdot \left(m_b \cdot \frac{T_b - T_{2,\text{közös}}}{T_{2,\text{közös}} - T_{1,a}} - m_a \right) \quad (3)$$

összefüggéshez jutunk, amely alapján a mérési adatokból számolható a kaloriméter hőkapacitása.

³A továbbiakban a különböző folyamatokhoz tartozó T_1 és T_2 értéket egy, az alsó indexben feltüntetett betűvel különböztetjük meg egymástól.

1.1. Szilárd anyagok oldási entalpiájának meghatározása

Az oldási entalpia (oldáshő) az 1 mol vegyület teljes oldódását kísérő hő állandó nyomáson. Egy szilárd anyag oldását a következő, hővel járó folyamatokra bonthatjuk fel:

- Az $m_{\text{szilárd}}$ tömegű feloldandó anyag hőmérséklete a szoba T_r hőmérsékletéről T_1 -re változik.
- Az oldás alatt az m_v tömegű víz, az $m_{\text{szilárd}}$ tömegű oldott anyag, valamint a kaloriméter részeinek hőmérséklete T_1 -ről T_2 -re változik.

Ha az oldással járó hőt Q -val jelöljük, akkor a fentiek alapján

$$Q = c_{\text{szilárd}} \cdot m_{\text{szilárd}} \cdot (T_1 - T_r) + (c_{\text{oldat}} \cdot (m_v + m_{\text{szilárd}}) + C_{\text{kal}}) \cdot (T_2 - T_1) = -\Delta H_{\text{oldódás}} \cdot n_{\text{szilárd}}, \quad (4)$$

ahol $c_{\text{szilárd}}$ és c_{oldat} az oldandó szilárd anyag, valamint az oldat fajlagos hőkapacitása, $n_{\text{szilárd}}$ a feloldott szilárd vegyület anyagmennyisége és $\Delta H_{\text{oldódás}}$ a szilárd anyag moláris oldási entalpiája vízben.

1.2. Hőkapacitások meghatározása

A fentiekből látható, hogy az oldáshő egyszerűen meghatározható a hőmérséklet változásának mérésével, ha ismertek a hőkapacitások, és azok állandónak tekinthetők a mérés hőmérséklet-tartományában. Ezeket az értékeket kézikönyvek táblázataiban találhatjuk meg. Ha ilyen táblázatok nem állnak rendelkezésre, akkor a következő módon adhatók meg a szükséges értékek:

- A víz hőkapacitása a gyakorlat során $c_v = 4,183 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$ -nek vehető.
- Híg, vagy közepes töménységű oldatokban kb. 1 %-os pontossággal becsülhető a fajlagos hőkapacitás értéke a Dimoplon-egyenlet alapján:

$$C_{\text{oldat}} = w_v \cdot c_v + w_{\text{szilárd}} \cdot c_{\text{szilárd}}, \quad (5)$$

ahol w_v a víz, valamint $w_{\text{szilárd}}$ az oldott anyag tömegtörtje.

- Szilárd anyagok moláris hőkapacitását legegyszerűbben a Kopp-szabály alapján becsülhetjük meg, ami kimondja, hogy egy szilárd vegyület moláris hőkapacitása közelíthető a vegyületet alkotó elemek (nem az atomok!) moláris hőkapacitásai és sztöchiometriai együtthatói szorzatának összegével⁴.

$$C_m = \sum_{i=1}^n v_i \cdot C_{m,i}$$

Pl. szilárd Na_2CO_3 -ra:

$$C_m(\text{Na}_2\text{CO}_3) = 2 \cdot C_m(\text{Na}) + C_m(\text{C}) + \frac{3}{2} \cdot C_m(\text{O}_2),$$

ahol az elemek megfelelő adatait az 1. táblázat tartalmazza. Az így számolható moláris hőkapacitásokat át kell számolni fajlagos hőkapacitásra, ha ezeket a (3)–(5) egyenletekben akarjuk használni. A számításhoz szükséges relatív atomtömegek a Függelék periódusos rendszerében is megtalálhatók.

⁴Ez a szabály néhány vegyületre nem alkalmazható, de a gyakorlaton vizsgálható szilárd anyagokra megfelelő.

1. táblázat. Néhány elem átlagos moláris hőkapacitása a 283–311 K hőmérséklet-tartományban, $\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$ mértékegységben megadva.

elem	$C_{p,m}$	elem	$C_{p,m}$	elem	$C_{p,m}$	elem	$C_{p,m}$	elem	$C_{p,m}$
Al	24,1	B	11,9	Br ₂	37,7	C	9,7	Ca	26,4
Cu	24,6	H ₂	28,7	I ₂	37,7	K	28,8	Mg	24,4
N ₂	28,4	Na	27,6	O ₂	26,0	P	23,2	S	23,8
								Zn	25,3

2. A mérés kivitelezése

A gyakorlat során a feladat egy só oldási entalpiájának meghatározása kalorimetriás módszerrel. A „kaloriméter” a gyakorlat során egy keverőbottal és egy hőmérővel ellátott főzőpohár. A gyakorlat kezdetekor a gyakorlatvezető kijelöli a vizsgálandó sót és a tervezendő hőmérséklet-változást 4–9 °C között. Ha a gyakorlatvezető mást nem mond, akkor a vizsgálandó só az ammónium-nitrát és a tervezett hőmérséklet-változás 5 °C.

Először kísérletileg meghatározzuk, milyen tömegarányban kell a sót vízben oldani, hogy az oldás során bekövetkező hőmérséklet-változás közelítőleg megegyezzen a tervezettel. Ehhez egy tiszta, száraz, 50 cm³-es főzőpohárba táramérleggel kimérünk ~20 g vizet, beletesszünk egy mágneses keverőbotot, majd a főzőpoharat egy mágneses keverőre állítjuk. A forgó keverőbot sebességét és pozícióját úgy állítjuk be, hogy a bot ne ugráljon, stabilan forogjon és legyen mellette hely a hőmérőnek is. A hőmérő elhelyezésénél ügyeljünk arra, hogy a forgó keverőbot ne ütközzön a hőmérővel. Leolvassuk a kezdeti hőmérsékletet. Hozzáadunk a vízhez ~0,5 g sót (ld. még az első megjegyzést is), és oldás közben figyeljük a kialakuló hőmérséklet-maximumot vagy minimumot. Ez a pont biztosan a teljes oldódás előtt következik be, tovább nem érdemes mérni.

A kapott hőmérséklet-változás ismeretében ki tudjuk számítani, mekkora tömegű sót kell a kalorimetriás méréseknél ~50 g vízben oldani ahhoz, hogy a tervezett hőmérséklet-változást tapasztaljuk. Amennyiben az előkísérletben nem változott annyit a hőmérséklet, hogy a só szükséges tömegét legalább 20 %-os pontossággal megbecsüljük, akkor megismételjük a kísérletet kétszer annyi tömegű sóval, ha ez sem vezet eredményre, akkor négyszer annyival, és így tovább.

Ezután következnek az oldási entalpia meghatározásához szükséges kísérletek. Ezt hasonlóan végezzük, mint az előkísérletet. Egy tiszta, száraz, 100 cm³-es főzőpohárba táramérleg segítségével bemérünk kb. 50 g vizet, 0,01 g pontossággal ismerve a víz tömegét (m_v). Ezután egy 25 cm³-es tiszta, száraz főzőpohár tömegét mérjük meg 0,01 g pontossággal, majd ebbe mérjük a számított tömegű szilárd anyagot. Amennyiben a szilárd anyag nem higroszkópos, akkor a 25 cm³-es pohár helyett az anyag papíron is bemérhető. A vizet tartalmazó főzőpohárba beletesszük a mágneses keverőbotot, a poharat a keverőre tesszük, majd a fentiekhez hasonlóan behelyezzük a hőmérőt. Ezután forgó keverőbot mellett 3 percen keresztül kb. fél percnként leolvassuk a víz hőmérsékletét, ez lesz az előperiódus. Ezután a szilárd anyagot beleöntjük a vízbe, de az esetlegesen a főzőpohárban maradt anyagot *nem* mossuk bele, hanem félretesszük a 25 cm³-es főzőpoharat! A szilárd anyag vízbe öntése a t_0 időpillanat, ezt az időt is feljegyezzük. Ezután amilyen sűrűn csak tudjuk, leolvassuk a hőmérséklet-értékeket és a hozzájuk tartozó időt. Ezt addig folytatjuk, amíg a gyors hőmérséklet-változás lelassul vagy iránya meg nem fordul, eddig tart a főperiódus⁵. Az utóperiódusban 5 percen keresztül kb. fél-egy percnként jegyezzük le a hőmérsékletet. A mérés befejezése után a félretett 25 cm³-es főzőpoharat (vagy a papírt) újra lemérjük, hogy kiszámolhassuk a ténylegesen feloldódott anyag pontos tömegét (m_s).

Ezután a fenti mérést megismételjük úgy, hogy ugyanazt a 100 cm³-es főzőpoharat használjuk, az ismételt mérés előtt megtisztítva és kiszárítva. *A pohár kiszárítását kis mennyiségű technikai acetonnal való öblítéssel*

⁵A főperiódus ideje nagyban függ a só oldódásának sebességétől, gyors oldódás esetén csak kevés pontot tudunk leolvasni.

végezzük.

A következőkben a kaloriméter hőkapacitását határozzuk meg, ugyanabban a 100 cm^3 -es főzőpohárban. Ez annál pontosabb lesz, minél hasonlóbb körülményeket biztosítunk az előző mérésekéhez. Ezt az (1) egyenletben definiált m_a és m_b tömegű víz kezdeti hőmérsékleteinek és a konkrét tömegeknek a megválasztásával érhetjük el a következők szerint:

- Ha a szilárd anyag oldása során csökkent a hőmérséklet, akkor $T_b \sim 0^\circ\text{C}$ -os vizet készítünk víz és jég keverékével, és ebből vesszük az m_b tömegű hozzáadandó vizet. Amennyiben a szilárd anyag oldása hőt termelt, akkor $T_b \sim 50^\circ\text{C}$ -os vizet melegítünk a hozzáadandó vízhez.
- T_{1a} értéket közelítően megbecsüljük az előző mérések T_1 értékeinek átlagával.
- $T_{2,elm}$ értéket közelítően megbecsüljük az előző mérések T_1 értékétől leginkább eltérő mért hőmérséklettel.
- A mérésben használt víz össztömege nagyjából egyezzen meg az előző kísérletekben vizsgált oldat össztömegével: $m_a + m_b = m_v + m_{szilárd}$. Ezen összefüggés, az (1) egyenlet, valamint a becsült hőmérséklet-értékek segítségével a használandó m_a és m_b tömegek számolhatók.

Miután a számolás eredményét a gyakorlatvezető ellenőrizte, a méréseket az előzőekhez hasonlóan végezzük, három különbséggel:

- Az m_a tömegű, szobahőmérsékletű víz, a főzőpohár és a keverőbot együttes tömegét megmérjük a mérés kezdete előtt.
- A főperiódus minél gyorsabb indítása végett a számolt m_b tömegű vizet mérőhengerrel, gyorsan adjuk a többi vízhez, a hozzáadott víz tömegét úgyszólván tömegmérésekből határozzuk meg. A használandó mérőhengert a hűtött vagy felmelegített vízzel együtt hűtsük vagy melegítsük egy $300 - 600\text{ cm}^3$ -es főzőpohárban a hőveszteségek elkerülése érdekében. A második hőmérőt a lehűtött vagy felmelegített vízbe tesszük (lehetőleg a mérőhengerbe), és a szükséges mennyiségű víz kivételekor leolvassuk a pontos hőmérsékletet. Az eltérő hőmérsékletű vizek keveredése nagyon gyorsan végbemegy, ezért előfordulhat, hogy a főperiódusban csak egy-két pontot lehet leolvasni.
- Az utóperiódus után a 100 cm^3 -es főzőpohár tömegét a benne lévő vízzel és keverőbottal együtt újra megmérjük, hogy m_b pontos értékét kiszámolhassuk.

A kaloriméter hőkapacitásának meghatározásához elegendő egy mérést végezni.

3. A mérési adatok kiértékelése

- A mért $T - t$ adatpárokat átlátható táblázatokba rendezzük, a főperiódus kezdetének idejét is feltüntetve.
- Mind a három mérési sorozatot ábrázoljuk úgy, hogy az ábrán feltüntetjük a t_0 idő pillanatot. A tengelyek tartományát úgy kell megválasztani, hogy a T_1 és T_2 (vagy $T_{2,közös}$) értékek egyszerű grafikus extrapolációval meghatározhatók legyenek. Határozzuk meg ezeknek a hőmérsékleteknek a számértékét mind a három mérésben (lásd 1. ábra)! Nem szükséges megadni az illesztett egyenesek statisztikai paramétereit.
- Az utolsó mérésből a (3) egyenlet segítségével kiszámoljuk a C_{kal} értékét.
- A Kopp-szabály és a moláris tömeg segítségével kiszámoljuk a vizsgált só moláris és fajlagos hőkapacitását ($C_{m,szilárd}$ és $c_{szilárd}$), majd az (5)-tel megadott Dimoplon-egyenlettel kiszámoljuk a vizsgált oldat fajlagos hőkapacitását (c_{oldat}). Amennyiben a vizsgált só eredetileg is tartalmaz kristályvizet, akkor $C_{m,szilárd}$, $c_{szilárd}$ és c_{oldat} értékeit a kristályvízmentes sóra kell kiszámolni, $m_{szilárd}$ bemért értékét csökkenteni kell a bemért kristályvíz tömegével, míg ugyanezzel a tömeggel növelni kell m_v értékét.

2. táblázat. A mérési eredmények összefoglalása.

	m_v (g)	$m_{\text{szilárd}}$ (g)	$n_{\text{szilárd}}$ (mol)	T_1 (°C)	T_2 (°C)	T_r (°C)	$C_{m,\text{szilárd}}$ (J/mol/K)	$c_{\text{szilárd}}$ (J/g/K)	c_{oldat} (J/g/K)	$\Delta H_{\text{oldási}}$ (kJ/mol)
1. mérés										
2. mérés										
	m_a (g)	m_b (g)	T_{1a} (°C)	T_b (°C)	$T_{2,\text{közös}}$ (°C)	C_{kal} (J/K)				
3. mérés										

- Az első két mérésből a (4) egyenlet segítségével kiszámoljuk a vizsgált só oldási entalpiáját, és átlagukat adjuk meg végeredményként. A mért adatokat és a számolások részeredményeit foglaljuk össze a 2. táblázatnak megfelelően (néhány adat értéke több sorban is ugyanaz).
- Keressünk irodalmi adatot (a forrás feltüntetésével) a kérdéses oldási entalpia értékére és ezt hasonlítjuk össze a mért adattal! Próbáljuk megadni az esetleges jelentős különbségek magyarázatát!

Megjegyzések:

- Előfordulhat, hogy a kiadott szilárd anyag kristályai összetapadtak. Ekkor a kísérletek megkezdése előtt a rendelkezésre álló dörzsmozsárral 5–10 g-ot el kell porítani. Ezt azonban nem szabad csinálni, ha az anyag higroszkópos, vagy gyárilag tömörített szemcsékből áll (pl. NaOH, KOH)!
- Egyes sók (főként a gyárilag tömörített szemcsék) oldódása nagyon lassú lehet, ha a keverőbot forgása túlságosan lassú. A keverésnek legalább olyan gyorsnak kell lennie, hogy az oldat felszínén kialakuljon egy enyhe, csúcsára állított kúp.
- A gyakorlat során számos jelölést vezetünk be. Ezeket még a laboratóriumi munka előtt meg kell érteni, és nem szabad ezeket összekeverni. Ellenkező esetben nagy a valószínűsége annak, hogy valamit nem mérünk meg, ami a kiértékelés folyamán szükséges lenne.
- Mivel a számolásokhoz használt egyenletek mindegyikében csak hőmérséklet-különbségekkel kell szorozni, ezért akár °C-ban, akár K-ben megadott hőmérséklet értékeket lehet használni a számolások során.

Ellenőrző kérdések

1. Mi a kalorimetria és a kaloriméter?
2. Definiálja a hőkapacitást? Mi a különbség az állandó nyomáson és az állandó térfogaton vett hőkapacitások között?
3. Mi a moláris és mi a fajlagos hőkapacitás? Hogyan jelöljük ezeket?
4. Magyarázza el 3–4 mondatban, mi az elő, fő- és utóperiódus egy mérés során?
5. Adja meg a kaloriméter hőkapacitásának definícióját! Miért fontos meghatározni ezt az értéket?
6. Mi az oldási entalpia?
7. Mi a Dimoplon-egyenlet és mire használható?
8. Mi a Kopp-szabály?
9. Hogyan határozza meg a gyakorlat során az oldandó szilárd anyag bemérendő tömegét?
10. Hogyan biztosítja a hasonló mérési körülményeket a kaloriméter hőkapacitásának meghatározásakor és az oldódás vizsgálatokor?
11. 0,5 g szilárd NaOH-t 20,3 g vízben feloldva a tapasztalt hőmérséklet-változás 6,1 °C. Hány gramm NaOH-t kell feloldani 49,3 g vízben, ha 5,3 °C-os hőmérséklet-változást szeretnénk?
12. X g, 25,0 °C-os és Y g, 50,0 °C-os vizet kell összeönteni úgy, hogy a keveredés után összesen 56,71 g, 31,2 °C-os vizet kapjunk. Mennyi X és Y értéke, ha nincs hőveszteség?
13. 50,73 g vízben oldunk 4,17 g KNO₃-ot. Mekkora lesz a kapott oldat fajlagos hőkapacitása a Dimoplon-egyenlet alapján? $c_v = 4,183 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $C_{m, \text{KNO}_3} = 82,0 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ és $M_{r, \text{KNO}_3} = 101,10$.
14. Mekkora az Al₂(SO₄)₃ moláris hőkapacitása a Kopp-szabály alapján? Az elemek moláris hőkapacitásai J mol⁻¹ K⁻¹ egységben: Al: 24,1; S: 23,8 és O₂: 26.