Úloha III.E ... se solí

12 bodů; průměr 8,84; řešilo 64 studentů

Určete měrnou tepelnou kapacitu kuchyňské soli. *Jarda si solí chladí čaj.*

Úvod

Měrná tepelná kapacita c charakterizuje schopnost tělesa změnit teplotu v závislosti na jeho hmotnosti a na množství dodaného tepla. Rozměr této veličiny je $[c] = \mathrm{J{\cdot}kg^{-1}{\cdot}K^{-1}}$, měrná tepelná kapacita tedy určuje množství tepla Q nutné k ohřátí tělesa o hmotnosti 1 kg o 1 °C. Jedná se o materiálovou veličinu, tudíž se liší materiál od materiálu. Velmi často se setkáváme s měrnou tepelnou kapacitou vody $c_{\mathrm{H_2O}} = 4180\,\mathrm{J{\cdot}kg^{-1}{\cdot}K^{-1}}$, což je v porovnání s ostatními materiály relativně vysoká hodnota, např. kovy mají měrnou tepelnou kapacitu v rozsahu $100\text{–}500\,\mathrm{J{\cdot}kg^{-1}{\cdot}K^{-1}}$. Pro ohřátí vody tedy potřebujeme velké množství tepla, čehož lze využít například při vytápění ústředním topením, jelikož voda v sobě zadrží velké množství energie, kterou je pak schopna předat radiátoru a celé místnosti.

Teorie

Pro určení měrné tepelné kapacity soli vyjdeme z kalorimetrické rovnice

$$Q_{\mathrm{in}} = Q_{\mathrm{out}}\,.$$

Ta nám popisuje výměnu tepla mezi dvěma systémy: velikost tepla Q_{out} dodaného prvním systémem se musí rovnat teplu Q_{in} přijatému druhým systémem. Jednotlivá tepla se následně určí jako

$$Q = mc(t - t_0)\,,$$

kde m značí hmotnost tělesa, t_0 počáteční teplotu, t ustálenou teplota a c měrnou tepelnou kapacitu.

Celý pokus budeme provádět v kalorimetru, to je nádoba izolovaná od okolí, kterou obecně charakterizujeme její tepelnou kapacitou C_{k}. Sůl snadno seženeme ve formě krystalů v sypkém stavu. Pokud bychom ale prováděli experiment jen s krystaly a kalorimetrem, vzduch by neumožnil rovnoměrné ohřívání celého systému, protože se jedná o tepelný izolant, a nemohli bychom tedy použít uvedený středoškolský vzoreček. Sůl nejprve smícháme s olejem; jelikož se v něm prakticky nerozpouští, budeme moci zanedbat jakékoliv další chemické reakce, které by probíhaly, pokud bychom smísili sůl s např. vodou.

Princip našeho měření tedy spočívá v tom, že budeme zkoumat přenos tepla mezi třemi materiály, konkrétně mezi pevnou solí, olejem a kalorimetrem. Výchozí rovnice má tedy tvar

$$\begin{aligned} Q_{\mathrm{o}} &= Q_{\mathrm{k}} + Q_{\mathrm{s}}\,, \\ m_{\mathrm{o}}c_{\mathrm{o}}(t - t_{\mathrm{o}}) &= C_{\mathrm{k}}(t_{\mathrm{s}} - t) + m_{\mathrm{s}}c_{\mathrm{s}}(t_{\mathrm{s}} - t)\,. \end{aligned}$$

V rovnici předpokládáme, že olej bude ohřívat jak sůl, tak kalorimetr. Vyjádřením výsledné teploty

$$t(t_{\mathrm{o}}) = \frac{m_{\mathrm{o}}c_{\mathrm{o}}t_{\mathrm{o}} + m_{\mathrm{s}}c_{\mathrm{s}}t_{\mathrm{s}} + C_{\mathrm{k}}t_{\mathrm{s}}}{m_{\mathrm{o}}c_{\mathrm{o}} + m_{\mathrm{s}}c_{\mathrm{s}} + C_{\mathrm{k}}}$$

získáme její závislost na teplotě oleje na dvou neznámých: c_{s} a C_{k}. Zbylé veličiny se budeme snažit udržet v co nejmenším rozptylu. Nakonec předpokládáme, že se měrná tepelná kapacita v závislosti na teplotě nemění a že u žádné látky nedojde ke změně skupenství.

Uspořádání a provedení experimentu

Abychom dosáhli co nejmenších rozdílů teplot pro počáteční teplotu t_s, rozhodli jsme se před experimentem připravit ledovou lázeň. Do mísy jsme přidali vodu, led, 5 sáčků soli s hmotností $m_\mathrm{s} = 100\,\mathrm{g}$ a termosku. Následně jsme počkali, až se teplota směsi ustálí. Před začátkem měření jsme v lázni naměřili teplotu v rozpětí 0 až 1 °C. Předpokládáme tedy, že se na stejných hodnotách ustálily i teploty sáčků se solí a termosky.

Použitá termoska je vyrobena z nerezové oceli 18/8, tedy ze 18% a 8% příměsi chromu, resp. niklu. Její tepelná kapacita[1] je $c_\mathrm{k} = 0{,}5\,\mathrm{kJ{\cdot}°C^{-1}{\cdot}kg^{-1}}$. Pro měrnou tepelnou kapacitu slunečnicového oleje[2] použijeme hodnotu $c_\mathrm{o} = (2{,}0 \pm 0{,}2)\,\mathrm{kJ{\cdot}°C^{-1}{\cdot}kg^{-1}}$.

Experiment jsme provedli pro celkem 5 počátečních teplot oleje t_o, vizte tab. 1. První experiment jsme provedli za pokojové teploty $t_{\mathrm{o}1} = 18{,}3\,°\mathrm{C}$, na níž se ustálila volně ležící nádoba s olejem o hmotnosti $m_\mathrm{o} = 100\,\mathrm{g}$. Do osušené termosky jsme nejdříve vložili sůl, tu jsme zalili olejem a vše následně promíchali teploměrem. Výsledné teploty společně s nejistotami jsou uvedeny též v tab. 1.

Tabulka 1: Počáteční teplota oleje t_o a výsledná teplota soli a oleje t.

$\frac{t_\mathrm{o}}{°\mathrm{C}}$	$\frac{t}{°\mathrm{C}}$
18 ± 1	12 ± 1
55 ± 3	34 ± 2
130 ± 7	74 ± 4
186 ± 9	102 ± 5
202 ± 10	135 ± 7

Obdobně jsme provedli i další 4 měření. Před nimi jsme ve smaltovaném hrnečku na indukčním sporáku ohřáli olej. Po překročení určité teploty jsme hrneček ze sporáku odebrali a chvíli počkali na ustálení teploty na teploměru. Následně jsme horký olej nalili do termosky s připravenou solí. Termoska byla vždy mezi jednotlivými měřeními ponořena do ledové lázně, aby měla stejnou teplotu jako sáčky se solí. Jelikož byla termoláhev kovová, lze předpokládat relativně rychlé ustálení teploty.

Výsledné teploty jsou vidět jak v tab. 1, tak i na obr. 1. Naměřené hodnoty jsme proložili upravenou funkcí z teorie. Vzhledem ke stejné hmotnosti oleje a soli platí $m = m_\mathrm{s} = m_\mathrm{o} = 100\,\mathrm{g}$, a jelikož byly sůl i termoláhev v téže lední lázni, předpokládáme $t_\mathrm{s} = 0\,°\mathrm{C}$. Po rozepsání tepelné kapacity kalorimetru $C_\mathrm{k} = c_\mathrm{k} m_\mathrm{k}$ získáváme

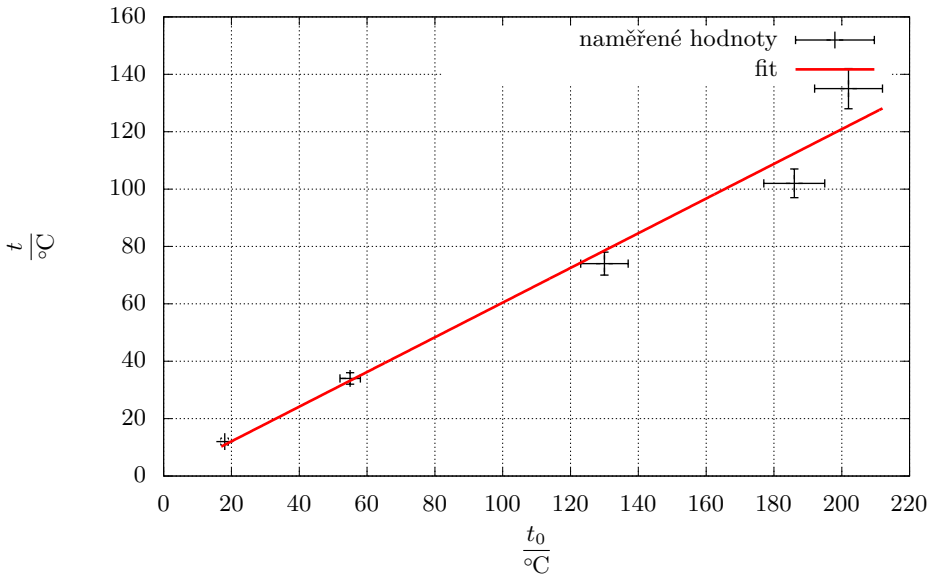
$$t(t_\mathrm{o}) = \frac{c_\mathrm{o} t_\mathrm{o}}{c_\mathrm{s} + c_\mathrm{o} + c_\mathrm{k} \frac{m_\mathrm{k}}{m}}\,.$$

Hmotnost kalorimetru $m_\mathrm{k} = (85 \pm 2)\,\mathrm{g}$ jsme určili změřením ponořené části termosky, odhadem její tloušťky a odhadem hustoty použité oceli. Proložením dat funkcí $t(t_\mathrm{o})$ a doplněním známých parametrů získáme přímku v obr. 1 a výslednou hodnotu kapacity soli

$$c_\mathrm{s} = (0{,}9 \pm 0{,}1)\,\mathrm{kJ{\cdot}°C^{-1}{\cdot}kg^{-1}}$$

[1] `https://www.amardeepsteel.com/blog/18-8-stainless-steel.html`

[2] `DOI:10.1007/s10973-005-0050-x`



Obrázek 1: Závislost ustálené teploty směsi t na počáteční teplotě oleje t_0 s lineárním fitem.

Diskuze

Hlavním zdrojem nejistoty při měření byl nepochybně kuchyňský teploměr. Teploměr neměl dostatečně rychlý čítač hodnot, což se nejvíce projevilo při ohřívání oleje: po odebrání smaltovaného hrnečku ze sporáku totiž teplota oleje měřená na teploměru chvíli rostla, poté se ustálila a následně začala klesat. Jelikož nevíme, s jak velkým zpožděním měříme, a výrobce neuvádí nejistotu teploměru, rozhodli jsme se relativní nejistotou měření nadhodnotit na 5%. Velmi horký olej zároveň rychle ztrácí teplo do okolí, proto jsme při měření, konkrétně při přelévání oleje do termosky, postupovali co nejrychleji.

U teplot vyšších než 100 °C jsme slyšeli zvuk charakteristický pro odpařování vody. To bylo pravděpodobně způsobené odpařením vlhkosti uvnitř soli. To pro vyšší teploty přispěje k nižší výsledné teplotě, avšak předpokládáme, že množství vody uložené v soli je velmi malé.

Do kalorimetrické rovnice bychom měli samozřejmě zahrnout i vliv teploměru samotného. Teploměr měl totiž obvykle při začátku měření směsi počáteční teplotu rovnou teplotě oleje, avšak vzhledem k rozměrům teploměru nepředpokládáme velké ztráty.

Celkově předpokládáme, že máme systematicky podhodnocené výsledné teploty, jak kvůli vlivům zmíněným výše, tak kvůli ztrátám tepla do okolí. Hlavní ztráty budou způsobeny ohřevem vzduchu: ne všechno teplo Q_{in} se spotřebuje na ohřev oleje s kalorimetrem. Tento vliv bychom mohli kvantifikovat zavedením dalšího parametru q v rovnici $qQ_{\text{in}} = Q_{\text{out}}$. Avšak není zaručeno, že bude účinnost q pro různé počáteční teploty t_{o} stejná. Nižší výsledné teploty se projeví v nadhodnocení měrné tepelné kapacity soli.

V úvodní teorii předpokládáme, že jsou měrné tepelné kapacity zúčastněných materiálů

konstantní. Jak lze vidět z tabelovaných hodnot,[3] například u soli dochází přibližně k lineárnímu růstu měrné tepelné kapacity v závislosti na teplotě. Pro sůl jsou změny v kapacitě přibližně v řádu jednotek procent, pro olej přibližně 10 %. Přesněji bychom tedy měli říkat, že jsme změřili střední hodnotu měrné tepelné kapacity soli pro teplotní rozmezí 10 °C až 130 °C.

Naměřená hodnota $c_\mathrm{s} = (0{,}9 \pm 0{,}1)\,\mathrm{kJ{\cdot}{^\circ}C^{-1}{\cdot}kg^{-1}}$ v rámci nejistoty odpovídá tabelované hodnotě soli [4] $c_{\text{s-tab}} = 853\,\mathrm{J{\cdot}{^\circ}C^{-1}{\cdot}kg^{-1}}$. Velké rozpětí výsledku je důsledkem výše popsaných vlivů.

Závěr

Pomocí kalorimetrické metody jsme smícháním slunečnicového oleje a kuchyňské soli určili měrnou tepelnou kapacitu soli jako $c_\mathrm{s} = (0{,}9 \pm 0{,}1)\,\mathrm{kJ{\cdot}{^\circ}C^{-1}{\cdot}kg^{-1}}$. Tato hodnota v rámci statistické nejistoty odpovídá tabelované hodnotě pro pokojovou teplotu $c_{\text{s-tab}} = 853\,\mathrm{J{\cdot}{^\circ}C^{-1}{\cdot}kg^{-1}}$. Hlavní vliv na měření měl rychle chladnoucí olej a použitý kuchyňský teploměr. Pro vyšší teploty měla vliv též závislost tepelné kapacity na teplotě.

Patrik Kašpárek
patrik.kasparek@fykos.cz

Fyzikální korespondenční seminář je organizován studenty MFF UK. Je zastřešen Oddělením propagace a mediální komunikace MFF UK a podporován Ústavem teoretické fyziky MFF UK, jeho zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků. Realizace projektu byla podpořena Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy.

Toto dílo je šířeno pod licencí Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported.
Pro zobrazení kopie této licence navštivte https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/.

[3] https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C7647145&Mask=2#Thermo-Condensed
[4] https://en.wikipedia.org/wiki/Sodium_chloride_(data_page)