Badatelsky zaměřené laboratorní práce na problematiku hustoty a plování těles

Jiří Kohout

Oddělení fyziky, Katedra matematiky, fyziky a technické výchovy, Fakulta pedagogická ZČU

Abstrakt

Hustota patří společně s plováním těles dle Archimédova zákona k problematickým tématům výuky, jedná se o tzv. kritická místa kurikula. V příspěvku jsou představeny tři náměty na badatelsky zaměřené laboratorní práce týkající se této oblasti. V nich bude využita závislost hustoty vody na teplotě a salinitě.

Úvod, motivace

Hustota a plování těles byly na základě předchozích komplexních výzkumů [1] identifikovány jako tzv. kritická místa kurikula, tj. v podstatě oblasti, kde žáci základních škol (ZŠ) často nedosahují očekávaných výstupů. V souvislosti s tím je diskutována rovněž otázka časového zařazení těchto témat. Typicky je hustota probírána v 6. ročníku ZŠ společně s dalšími fyzikálními veličinami, plování je poté věnována pozornost v mechanice kapalin v 2. pololetí 7. ročníku. I s ohledem na to, že až u 40 % ZŠ je fyzika v 6. ročníku pouze v rozsahu jedné hodiny týdně [2], však vzniká otázka, zda hustotu nepřesunout do 7. ročníku, kde by mohla být vhodně propojena s problematikou plování. Ta je ostatně užívána jako motivace k zavedení veličiny hustota v klasicky pojatých učebnicích [3], přičemž je odkazováno na zkušenost žáků případně poznatky z 1. stupně ZŠ. Problematika hustoty a jejího vlivu na plování těles ve vodě je z kvalitativního úhlu pohledu často řešena v rámci pro žáky zajímavých tzv. *Sink or float* experimentů. Při nich žáci odhadují, zda daný objekt bude plavat či nikoliv popř. uvádějí důvody, proč u dvou obdobných objektů jeden plave a druhý nikoliv (typické příklady uváděné na internetu jsou třeba jablka vs. hrušky nebo pomeranče vs. limetky).

Sink or float

Na internetu je možné nalézt řadu materiálů (videí, pracovních listů apod.) k uvedené problematice. Tématu byla věnována pozornost i výzkumně, když ve studii [4] bylo zjištěno, že žáci 8. tříd tureckých základních škol mají značné slabiny v určení toho, které faktory rozhodují o tom, zda se objekt potopí či nikoliv. Autoři uvedené studie vyvinuli konceptuální test identifikující tyto problémy a zároveň navrhli jednoduchou experimentální aktivitu sloužící k jejich překonání. Materiály dostupné online jsou velmi často zaměřeny na to, zda budou plavat (či se utopí) jednotlivé druhy ovoce a zeleniny, což pravděpodobně souvisí s tím, že jde o méně snadno odhadnutelné objekty ve srovnání s jinými. Je však třeba upozornit na to, že uvedené materiály zpravidla kalkulují s tím, že daný druh ovoce se buď potopí, nebo nepotopí, a téměř nikdy nepřipouštějí v praxi často se objevující situaci, že výsledek experimentu závisí na konkrétní odrůdě, podmínkách růstu, míře zralosti apod. Příkladem může být třeba kvíz [5], kde jsou zahrnuta (a vyhodnocována systémem 0-1) mimo jiné rajská jablíčka, hrušky, švestky či broskve, což jsou všechno druhy, u nichž mohou v závislosti na okolnostech nastat obě možnosti. Při výuce je tak třeba být ve využívání uvedených materiálů opatrný a brát v úvahu, že u řady druhů ovoce a zeleniny je výsledek experimentu nejistý. To je však výhoda z hlediska kvantitativního uchopení tématu, protože uvedené demonstruje, že dané ovoce či zelenina se z hlediska hustoty pohybuje velmi blízko hodnotě pro vodu, která je za normálních okolností téměř přesně 1 000 kg/m3. Její hustotu je však možné měnit v poměrně značném rozmezí změnou teploty nebo rozpuštěním vhodné látky, kde se nabízí kuchyňská sůl (tvořená v drtivé většině chloridem sodným). Cílem tohoto textu je proto představit tři konkrétní náměty na laboratorní práce využívající toho, že hustota některých druhů ovoce a zeleniny je blízká hustotě vody a je tak možné docílit situace, že ovoce např. ve studené vodě plavě a v teplé se potápí. To následně umožní stanovit poměrně přesně jeho hustotu. K tomu je však třeba mít dobrou představu o závislosti hustoty vody na teplotě a salinitě, jíž bude věnována další část příspěvku.

Závislost hustoty vody na teplotě a salinitě

Je všeobecně známo, že hustota vody závisí na teplotě atypickým způsobem, když maximální hodnota je zaznamenána pro teplotu cca 4 °C (tzv. *anomálie vody*). S teplotou rostoucí nad tuto hodnotu hustota roste, nárůst však není v širším intervalu teplot možné pokládat ani přibližně za lineární, protože třeba mezi 10 °C a 20 °C je rozdíl hustot cca 1,5 kg/m3, zatímco mezi 80 °C a 90 °C je to již zhruba 6 kg/m3. Nelineární je i závislost na salinitě (definované v gramech rozpuštěné soli na 1 kg roztoku, nikoliv na 1 kg čisté vody), ačkoliv zde odchylka od lineárního průběhu není zdaleka tak výrazná a v prvním přiblížení lze kalkulovat s tím, že nárůst salinity o 10 g/kg odpovídá zvýšení hustoty o cca 8 kg/m3.

Číselné hodnoty lze dohledávat v tabulkách, výhodnější je však použít kalkulačku v Excelu dostupnou na webové stránce [6], v níž je k výpočtu hustoty jako funkce teploty a salinity využit dosti komplikovaný (ale velmi přesný) vztah uvedený v [7]. Z praktického hlediska je důležité si vyjasnit, v jakém rozmezí se reálně hustota ohřáté resp. osolené vody může pohybovat. Při teplotě 100 °C a nulové salinitě je hustota 958 kg/m3, což určuje dolní mez. Horní mez by byla teoreticky dána rozpustností chloridu sodného ve vodě, jež při teplotě 20 °C činí 36 g NaCl na 100 g vody, což by odpovídalo maximální salinitě cca 265 g na kg roztoku a hustotě přibližně 1215 kg/m3. V reálu by však bylo rozpuštění takhle velkého množství soli ve vodě z mnoha hledisek nepraktické (rozpouštění by i při intenzivním míchání trvalo poměrně dlouho), rozumné je připravit roztok se salinitou nejvýše zhruba 150 g/kg a s hustotou zhruba 1115 kg/m3. Pro laboratorní úlohy je tak vhodné připravit objekty s hustotou v tomto rozmezí.

Se zde provedenými úvahami souvisí jedna zajímavá problémová úloha: Jak je možné, že u jezera jménem Mrtvé moře je standardně uváděna salinita vyšší (nejméně 277 g/kg, viz [8]), než by odpovídalo nasycenému roztoku NaCl? Vysvětlení spočívá v tom, že v Mrtvém moři je (na rozdíl od oceánů) jiné chemické složení solí, když převažuje chlorid hořečnatý mající podstatně vyšší rozpustnost ve vodě (nejméně 52 g na 100 g vody) ve srovnání s chloridem sodným. Vyšší hodnota je tak reálná a Mrtvé moře není v tomto ohledu rekordmanem, protože jezero Gaet’ale v Etiopii má salinitu ještě podstatě větší (převažují tam chloridy vápenatý a hořečnatý, chlorid sodný je zastoupen minimálně).

Náměty na laboratorní práce

Námět 1 – hustota částí pomeranče

První z uvažovaných námětů se týká kvantitativního prozkoumání klasického případu, kdy neoloupaný pomeranč nebo citron plavou na hladině, zatímco oloupané se potopí. Úkolem žáků je stanovit hustotu celého citrusu, jeho vnitřku a kůry a to s využitím přímého určení hustoty z definičního vztahu (tj. stanovení hmotnosti a objemu) a rovněž z plování objektů ve vodě o dané hustotě. Úloha je zadávána jako částečně badatelská, žáci tudíž nemají k dispozici přesnou posloupnost a popis kroků, které mají realizovat. Využít mohou odměrný válec, teploměr, digitální váhy, rychlovarnou konvici, sůl, míchátko a odkaz na kalkulačku pro výpočet hustoty dle přechozí části tohoto článku.

Asi nejlepší postup je nejprve prozkoumat hustotu neoloupaného pomeranče na základě určení jeho hmotnosti a objemu, a v ideálním případě (záleží na typu pomeranče, některé plavou i v horké vodě) i na základě toho, že se v horké vodě potopí a při jejím chladnutí vyplave při určité teplotě na hladinu. V dalším kroku pomeranč oloupeme, přesvědčíme se o tom, že vnitřek se ve vodě potopí a začneme postupně zvyšovat salinitu roztoku. Při dostatečně vysoké salinitě vnitřek pomeranče vyplave, z čehož určíme jeho hustotu. Při znalosti hmotnosti snadno určíme objem vnitřku pomeranče (to je možné udělat i pomocí odměrného válce, ale výpočet bude v praxi asi přesnější) a dopočítáme objem kůry. Kůru zvážíme a ze znalosti objemu a hmotnosti určíme finálně i její hustotu, jež by se měřením získávala těžko (kůra plave na hladině a její objem se pomocí odměrného válce určí jen velmi nesnadno a nepřesně). Realizace této práce v rámci hodinového laboratorního cvičení ukázala, že aktivita žáky sexty relativně bavila a byli schopni samostatně zvládnout základní kroky k určení hustoty jednotlivých částí a dospět ke kvalitativně rozumným výsledkům. Zároveň se však ukázalo, že nepromýšleli do detailu postup tak, aby bylo dosaženo co nejvyšší přesnosti a obecně nevěnovali přílišnou pozornost chybám měření.

Námět 2 – hustota různých druhů rajských jablíček

Druhý námět na laboratorní práci vychází ze skutečnosti, že rajská jablíčka mají hustotu velmi blízkou hodnotě 1000 kg/m3, přičemž závisí především na odrůdě a stáří. Je tak možné studovat několik různých druhů rajčat a určovat u nich hustotu ideálně na základě plování tak, že je postupně měněna hustota vody a je zjišťováno, kdy předtím potopená rajčata vyplavou na hladinu. Bylo realizováno měření s keříkovými rajčaty typu Roma (země původu Holandsko) a s dvěma druhy cherry rajčat (odrůda Dattel, Maroko a odrůda Rubín, Česká republika). Od každého druhu byly zkoumány čtyři exempláře. Ve vodě z kohoutku Roma rajčata plavala, zatímco oba druhy cherry rajčat se potopila (platilo pro všechny exempláře). Ve vroucí vodě z rychlovarné konvice se Roma rajčata potopila, ale během chladnutí poměrně rychle vyplavala všechna na hladinu. S ohledem na výše popsanou závislost hustoty vody na teplotě tak lze jejich hustotu stanovit na cca 965 kg/m3 (v uvedeném experimentu jde o odhad, protože teplota nebyla měřena, při samotné laboratorní práci je samozřejmě toto měření vhodné zajistit, přičemž je třeba dávat pozor na to, že teplota u dna je jiná než na povrchu).

Cherry rajčata byla ponořena do vody o objemu 400 ml, přičemž byla postupně přidávána a rozmíchávána kuchyňská sůl (v krocích po 5 g, hmotnost stanovena pomocí digitálních vah s přesností ±1 g). Zatímco rajčata odrůdy Dattel vyplavala po přidání 15 g soli, u rajčat odrůdy Rubín toto nastalo až při 25 g. Výpočtem pomocí výše popsané kalkulačky pak bylo zjištěno, že hustota první odrůdy je cca 1030 kg/m3, zatímco druhé 1050 kg/m3. Mezi jednotlivými exempláři přitom nebyl zjištěn žádný rozdíl.

Žáci by si při měření této úlohy měli uvědomit, že ačkoliv měření hustoty na základě vyplavání objektu v roztoku dané teploty resp. salinity je přirozeně zatíženo chybou způsobenou hned několika faktory (odvažování soli, její nedokonalé rozmíchání apod.), přesnost by zde měla být výrazně vyšší než u výpočtu hustoty přímo z definic, kdy je hmotnost rajčete určena pomocí vah a jeho objem pomocí odměrného válce. Je třeba si uvědomit, že třeba u cherry rajčat (hmotnost typicky 10-15 g) způsobí v tomto experimentu chybné určení hmotnosti soli o 1 g u následně vypočtené hustoty chybu cca 2 kg/m3, zatímco stejná odchylka u hmotnosti rajčete při určování hustoty z definice by způsobila chybu řádově větší (až 100 kg/m3).

Námět 3 – stárnutí rajského jablíčka (dlouhodobá domácí lab. práce)

Tento námět vychází ze závislosti hustoty rajských jablíček na jejich stáří, která se mění v důsledku biochemických procesů spojených s jejich dozráváním. Jde o námět na dlouhodobý domácí úkol, kdy žák získá nezralé rajské jablíčko a bude vždy po několika dnech zjišťovat, zda plave či se utopí, určovat jeho hustotu (na základě definice nebo pomocí plování ve vodě o dané teplotě a salinitě) a pořizovat fotodokumentaci demonstrující vývoj rajčete. Typická závislost hustoty na době uplynulé od sklizení rajčete (pro export, tj. ještě zelené) je uvedena pro danou odrůdu v Grafu 1 vytvořeném na základě dat z [9]. U ostatních odrůd se konkrétní hodnoty budou poněkud lišit, nicméně základní trend (nejprve nárůst, poté pokles a přibližně parabolický průběh s vysokou hodnotou spolehlivosti R2) zůstává stejný.

Graf1. Závislost hustoty na době skladování

Vědecká relevance tématu

Poslední výše uvedenou laboratorní práci je možné rozšířit o mezipředmětové vztahy, kdy má žák za úkol zjistit, co je příčinou změn hustoty. Tyto změny přitom souvisí velmi úzce s respirací rajčat, které je věnována značná pozornost v odborné literatuře (např. [10]). Rajská jablíčka přitom hrají v podstatě roli modelového organismu, přičemž poznatky získané při studiu jejich zrání je možné aplikovat na další druhy ovoce a zeleniny [10]. Uvedený příklad demonstruje, že tato problematika není jen potenciálně zajímavé cvičení ve školské fyzice, ale má podstatné dopady směrem k fytologii, zemědělským vědám a dalším disciplínám.

Velmi výrazný a v literatuře hojně diskutovaný je tento trend u hroznového vína. Bylo například demonstrováno, že hustota kuliček vína velice úzce souvisí nejen s jeho cukernatostí, ale také s obsahem řady významných látek jako jsou flavonoidy či anthocyanin [11]. To následně významně ovlivňuje antioxidační vlastnosti produktů. Podobně byly experimentálně zkoumány a matematicky modelovány změny hustoty kuliček hroznového vína od skončení květenství až po sklizeň [12]. Bylo prokázáno, že hustota je spolehlivou metrikou popisující růstové procesy a umožňující posoudit aktuální stádium vývoje, což je významné pro monitorování procesu v praxi. Uvedené příklady jsou přirozeně jen ilustrační a bez hlubších souvislostí, jež by vyžadovaly odpovídající znalosti z oborů, jimiž se autor textu (a asi ani výrazná většina učitelů fyziky) nezabývá. Mohou však žákům v případě potřeby ilustrovat skutečnost, že hustota ovoce a její určování má v širokém spektru oborů lidské činnosti jasný praktický význam a nejedná se tedy pouze o „výmysl“ učitele fyziky bez hlubšího významu.

Závěr

Tento příspěvek uvádí informace k využití kvalitativních *sink or float* experimentů s ovocem a zeleninou ve výuce a zároveň představuje tři náměty na badatelsky pojaté kvantitativní laboratorní práce zaměřené na toto téma. Tato na přípravu celkem nenáročná cvičení jsou svojí povahou blízká každodenní zkušenosti žáků a mohou tak přispět k jejich lepšímu vnímání fyziky. Zároveň však mají jasný vztah i směrem k zemědělským a vinařským vědám a dalším oborům. Jde tak o téma, kde se školská fyzika dostává s celkem rozumně uchopitelným obsahem poměrně blízko k tomu, co je velmi důležité v jiné vědní disciplíně. To by mohlo přispět k získání lepšího povědomí o všeobecném významu fyziky u žáků.

Literatura

[1] Kohout J., Mollerová M., Masopust P., Feřt L., Slavík J. *Kritická místa kurikula na základní škole pohledem mezinárodního šetření TIMSS a českých učitelů–poznatky z fyziky.* Pedagogická orientace 29, No 1 (2019), p.5-42.

[2] Mollerová M., Kohout J., Feřt L., Masopust P. *Nedostatek aprobovaných učitelů fyziky na západě Čech: bude hůř.* Matematika–fyzika–informatika 27, No 1 (2018), p. 46-54.

[3] Rauner K., Havel V., Höfer G., Kepka J., Petřík J., Prokšová J., Randa M. *Fyzika pro 6. ročník základní školy a primu víceletého gymnázia.* Fraus, Plzeň, 2004. ISBN 80-7238-210-1.

[4] Ünal S., Coştu B. *Problematic issue for students: Does it sink or float?* Asia-Pacific Forum on Science Learning and Teaching 6, No 1 (June 2005), p. 1-16.

[5] Dostupné online: <https://www.sporcle.com/games/WackyZacky/sink-or-float> [cit. 1.9.2020].

[6] Dostupné online: <http://web.colby.edu/ch217public/files/2012/04/density-of-water.xlsx> [cit. 1.9.2020].

[7] McCutcheon SC., Martin JL., Barnwell TO. *Water Quality.* In Handbook of Hydrology. Ed: D.R. Maidment. McGraw-Hill, New York, NY, 1993 (p. 11.3).

[8] Lensky NG., Dvorkin Y., Lyakhovsky V., Gertman I., Gavrieli I. *Water, salt, and energy balances of the Dead Sea.* Water Resources Research 41, No 12 (2005), Article No. W12418.

[9] Tigist A., Workneh TS., Woldetsadik K. *Effects of variety on yield, physical properties and storability of tomato under ambient conditions.* African Journal of Agricultural Research 7, No 45 (2016), p. 6005-6015.

[10] Colombié S., Beauvoit B., Nazaret C., Bénard C., Vercambre G., Le Gall S., ... & Moing A. *Respiration climacteric in tomato fruits elucidated by constraint‐based modelling.* New Phytologist 213, No 4 (2017), p. 1726-1739.

[11] Liu X., Li J., Tian Y, Liao M., Zhang Z. *Influence of Berry Heterogeneity on phenolics and antioxidant activity of grapes and wines: a primary study of the new winegrape cultivar meili (Vitis vinifera L.).* PLoS One 11, No 2 (2016), Article No. e0151276.

[12] Letchov G., Roychev, V. *Growth kinetics of grape berry density (Vitis vinifera L.‘Black Corinth’).* Vitis 56 (2017), p. 155-159.