

Termografické vyhodnocení tání ledu ve vodě

Vladimír Vochozka, Pavla Wegenkittlová

Pedagogická fakulta, Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

Abstrakt

Dominantním jevem rozdílného tání kostek ledu ve sladké a slané vodě je konvekce. Konvekci lze v pokusu demonstrovat kvalitativně pozorováním ledových kostek z obarvené vody, kvantitativně teplotními bodovými čidly anebo termovizní kamerou, která umožňuje jak kvalitativní, tak kvantitativní vyhodnocení průběhu.

V příspěvku jsou diskutovány přínosy a omezení jednotlivých technik vyhodnocení pokusu.

Tepelná výměna prouděním

Sdílení tepla lze dělit na tepelnou výměnu vedením (kondukcí), prouděním (konvekce) a sáláním (záření, radiace) [1]. Školní pokusy demonstrující proudění kapalin s kostkami ledu je možné dohledat v mnoha učebnicích v různých obměnách. Výsledkem demonstrací je prokázání proudění v kapalině v závislosti na rozdílné hustotě způsobené odlišnou teplotou.

Pokusy s potravinářským barvivem

Pro vizualizaci přítomnosti proudění je použito potravinářské barvivo. Voda je smíchána s modrým potravinářským barvivem a následně přelita do formy na led. Sladká voda (sladká voda je název pro vodu přirozeně se vyskytující na povrchu Země [2]) má hustotu 998 kg/m^3 při $19,6 \text{ }^\circ\text{C}$ a slaná voda (slaná voda je voda, která obsahuje chemické látky způsobující její slanost – salinitu [3]) má hustotu 1170 kg/m^3 při $19,6 \text{ }^\circ\text{C}$. Aby bylo možné získat vodu s takto vysokou hustotou, je při přípravě voda ohřívána na vařiči za vsypávání kuchyňské soli až do získání nasyceného roztoku.

Při demonstraci jsou pozorovány tři odlišné situace: tradiční kombinace sladké vody a kostky ledu (ve všech obrázcích vlevo), slaná voda s kostkou ledu (umístěna vždy uprostřed) a sladká voda s kostkou ledu s vloženou maticí uvnitř (v obrázcích vpravo). V každém případě je kapalina v tepelné rovnováze s okolím. Do každé nádoby je vhozena kostka ledu z co nejmenší výšky (Obr. 1.).



Obr. 1. Nádoba s vodou po vhození kostky ledu, vlevo sladká voda, uprostřed slaná voda, vpravo sladká voda s kostkou ledu s vloženou maticí.

K tání kostky dochází okamžitě. Vizuálně nejzajímavější je tání kostky ledu ve sladké vodě. Odtátá voda klesá ke dnu nádoby. Ve slané vodě se odtátá voda drží u volné hladiny. Voda v nádobě se zatíženou kostkou ledu je jemně zbarvena od volné hladiny až ke dnu nádoby. Mezi kostkou ledu a vodou se přenáší teplo vedením, a proto během klesání ke dnu dochází k obarvení z celého povrchu kostky ledu.

Ve chvíli, kdy roztála přibližně polovina kostky ledu (fotografie nejsou pořízeny ve stejný čas, protože doba tání je odlišná) můžeme pozorovat v prvním případě probíhající proudění (Obr. 2. vlevo).



Obr. 2. Nádoba s vodou v polovině celkového času tání kostky ledu.

Zbarvení vody v celém objemu vody evokuje představu proudění. U slané vody je vidět jasně ostré rozhraní mezi vodou, která odtála z kostky ledu, a zbytkem vody. U zatížené kostky je vidět zbarvenější oblast přibližně ve dvou třetinách celkového objemu. Zkreslení je způsobeno zbarvením volné hladiny a horních oblastí klesáním kostky ke dnu, jak již bylo popsáno dříve.

Poslední série fotografií zachytává okamžik, kdy došlo k roztátí kostky ledu (Obr. 3.).



Obr. 3. Nádoba s vodou na konci celkového času tání kostky ledu.

U kombinace kostky ledu a sladké vody je vidět zbarvení vody v celém objemu, s tím, že u dna je barva sytější. Roztátá obarvená voda ve slaném roztoku tvoří jasně viditelně oddělené rozhraní. Okolí kostky s maticí je sytěji zbarveno oproti zbylému objemu vody, která má již od začátku částečné zbarvení.

Nechtěný efekt částečně obarvené vody u kostky ledu s maticí lze vyřešit použitím nádoby s větším objemem (Obr. 4.), kde se obarvená voda zředí s větším množstvím vody a nebude působit rušivě.



Obr. 4. Nádoba s vodou po vhození kostky ledu, vlevo sladká voda, uprostřed slaná voda, vpravo sladká voda s kostkou ledu s vloženou maticí.

Průběh tání kostek je analogický s předchozím (Obr. 5.).



Obr. 5. Nádoba s vodou v polovině celkového času tání kostky ledu.

Dle předpokladu je na konci tání výsledek pokusu přijatelnější pro kombinaci sladká voda a kostka ledu s maticí. Drobné zabarvení objemu je méně intenzivní (Obr. 6. vpravo).



Obr. 6. Nádoba s vodou na konci celkového času tání kostky ledu.

U sladké vody a kostky ledu (Obr. 6. vlevo) je vidět tmavší část v dolní polovině objemu nádoby. Výsledek je podobný jako u předchozího pokusu s menší nádobou s kostkou ledu s maticí ve sladké vodě, což může být nevhodně interpretováno jako důkaz absence proudění v celém objemu.

Změny v době tání se projeví více v případě vhození většího množství kostek. Rozdíl v čase tání kostek v našem případě je shrnut v tabulce.

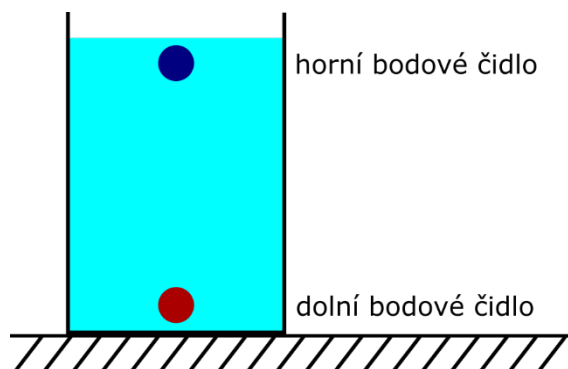
Tabulka 1. Doba tání kostek ledu.

kombinace	sladká voda	slaná voda	sladká voda
	kostka ledu	kostka ledu	zatížená kostka
1 kostka	8 min	13 min	13 min
2 kostky	10 min	28 min	26 min
3 kostky	14 min	54 min	52 min

Pokusy s dataloggerem

Teplota vody byla měřena bezdrátovými bodovými teplotními čidly Vernier Go Direct Surface Temperature Sensor, která měří v rozsahu od -25 do 125 °C s přesností $\pm 0,5$ °C [4]. Záznam naměřených dat byl proveden softwarem Vernier Graphical Analysis 4.10.

Měření začínalo vždy s předstihem před vhozením kostek ledu. Stejně jako v předchozích i následujících pokusech byla voda v tepelné rovnováze s okolím. Čidla byla pevně upevněna v oblasti volné hladiny vody a u dna nádoby, aby nedocházelo k jejich pohybu a měření v jiných hloubkách (Obr. 7.).

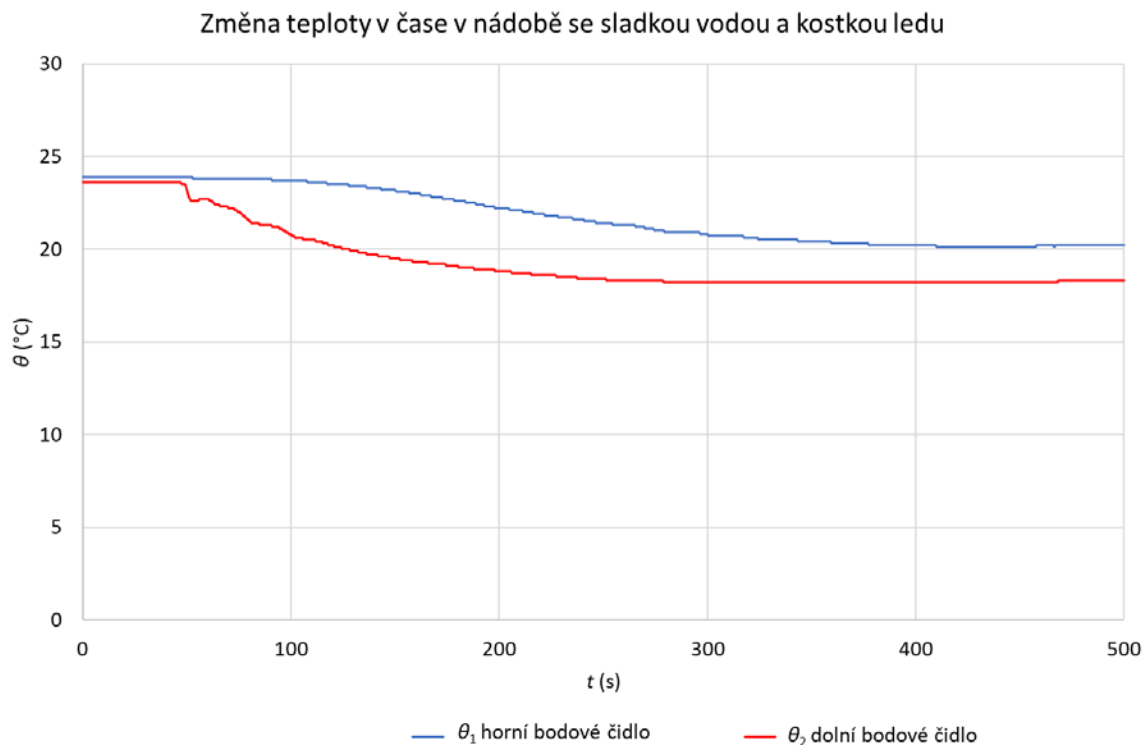


Obr. 7. Náčrtek umístění bodových čidel při pokusu.

Sladká voda a kostky ledu

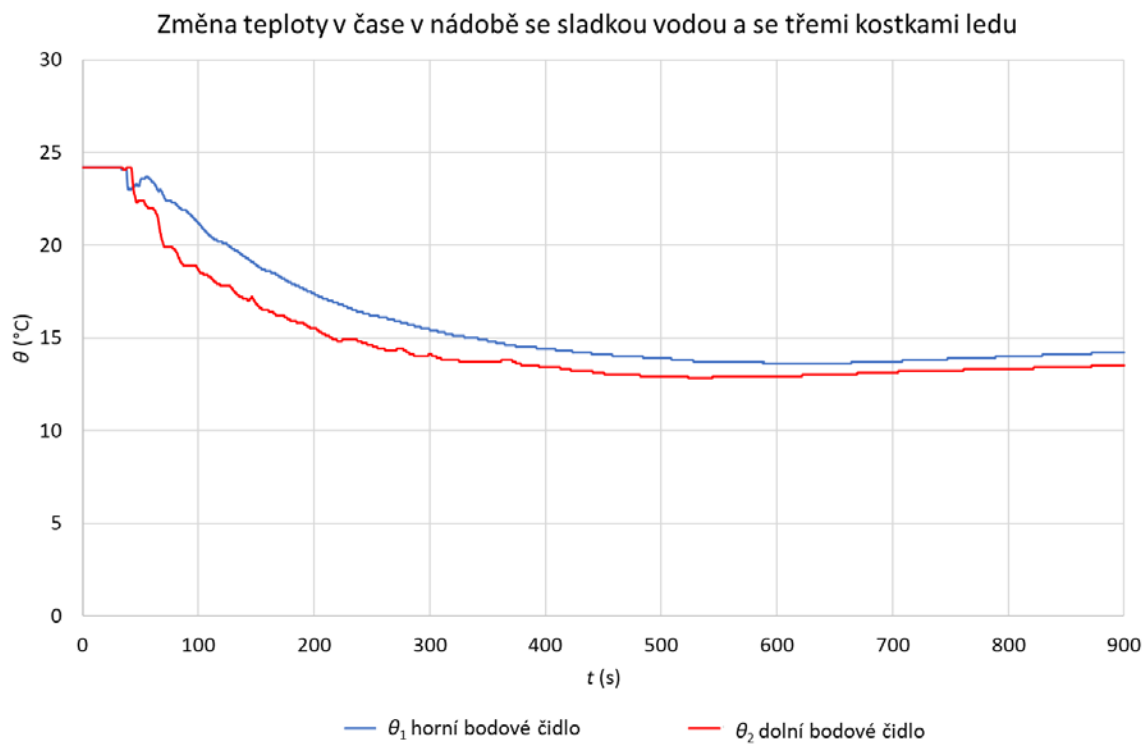
Z naměřených hodnot byly vytvořeny grafy změny teploty v čase. Modrá křivka vždy označuje změnu teploty bodového čidla u volné vodní hladiny, červená křivka pak bodové čidlo u dna nádoby.

První graf (Obr. 8.) ukazuje průběh změny teploty po vhození jedné kostky ledu do sladké vody, přičemž pozorujeme současnou změnu teploty v okolí obou čidel. Můžeme tak vyslovit tvrzení, že vlivem proudění dochází k měřitelné změně teploty vody v celém objemu nádoby.



Obr. 8. Graf změny teplot v nádobě se sladkou vodou a tající kostkou ledu.

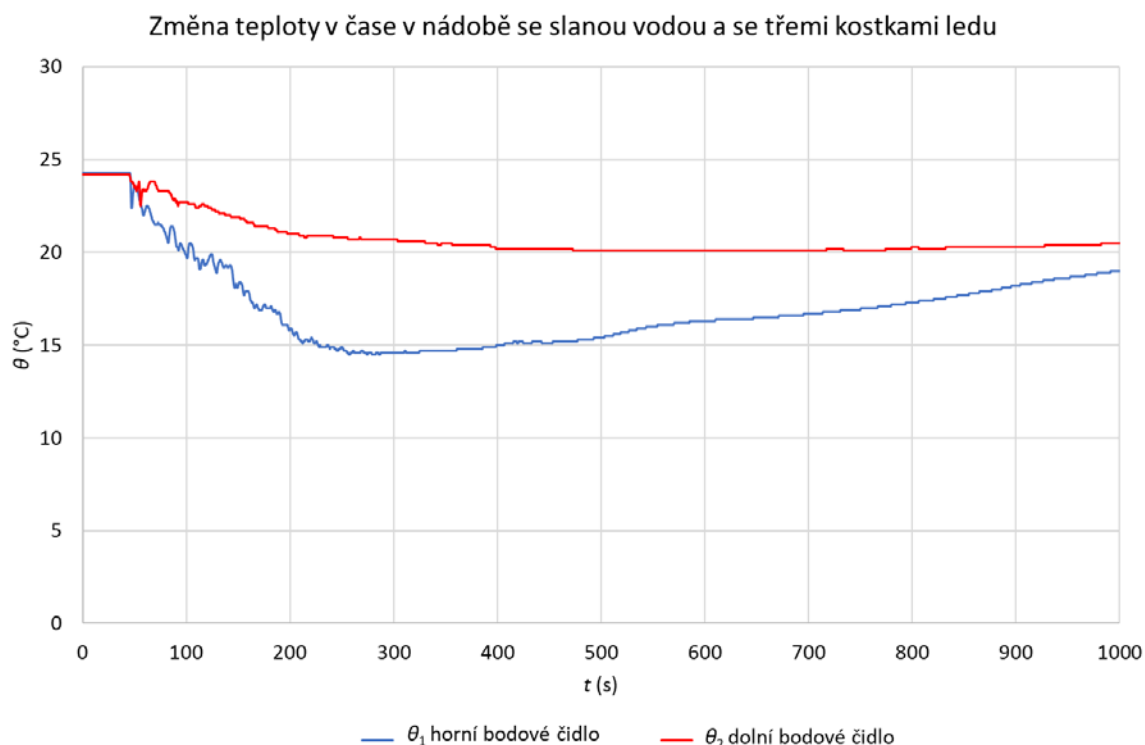
Prokazatelnější výsledky získáme v případě použití tří kostek ledu. Průběh změny teplot je jasně viditelný (Obr. 9.).



Obr. 9. Graf změny teplot s třemi tajícími kostkami.

Slaná voda a kostky ledu

Při vhození jedné kostky ledu do slané vody se opakovaně nedařilo najít vhodné umístění bodového čidla a všechna měření a tvorba grafů skončila neúspěšně. Množství odtáté vody tvořilo tak úzký profil, že bylo nutné použít více kostek ledu, přesněji tři kusy (Obr. 10.).

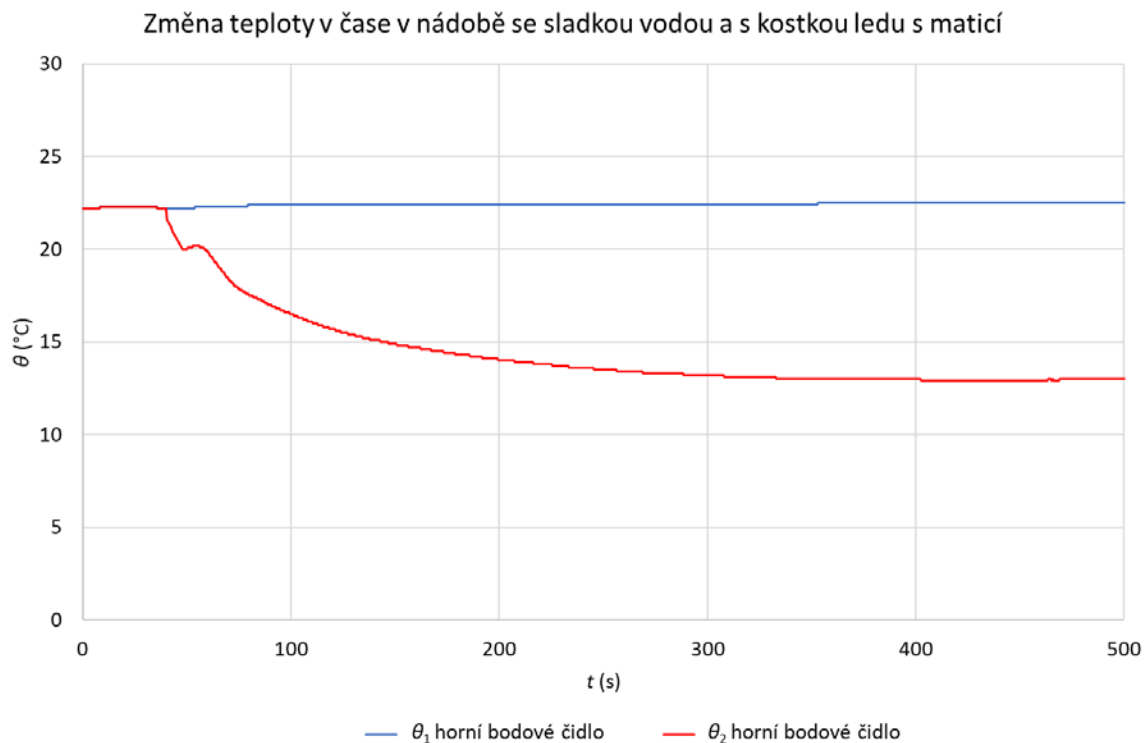


Obr. 10. Graf změny teplot v nádobě se slanou vodou a tajícími kostkami ledu.

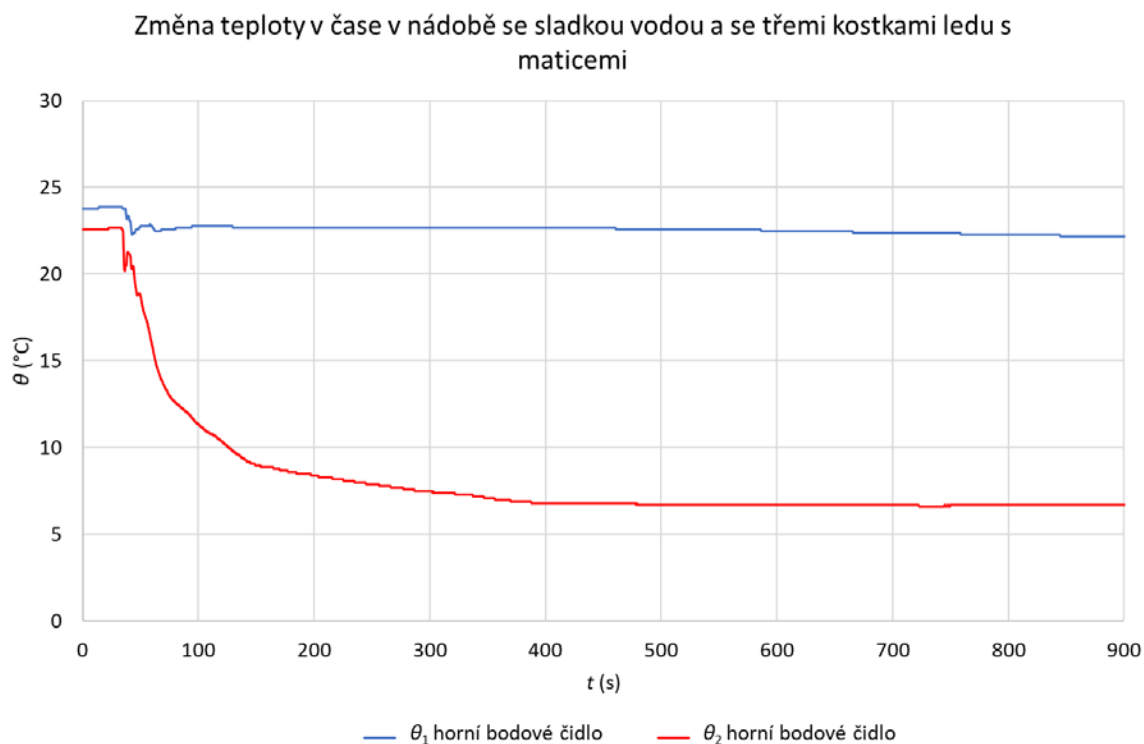
V grafu vidíme změnu teploty u volné vodní hladiny až o 10 °C. Změnu teploty indikuje i teplotní čidlo u dna nádoby.

Sladká voda a kostky ledu s maticemi

Při použití kostek ledu s maticemi a sladké vody je průběh přehledný jako v prvním případě (Obr. 11, 12.).



Obr. 11. Graf změny teplot v nádobě se sladkou vodou a tající kostkou ledu s maticí.



Obr. 12. Graf změny teplot s třemi tajícími kostkami s maticemi.

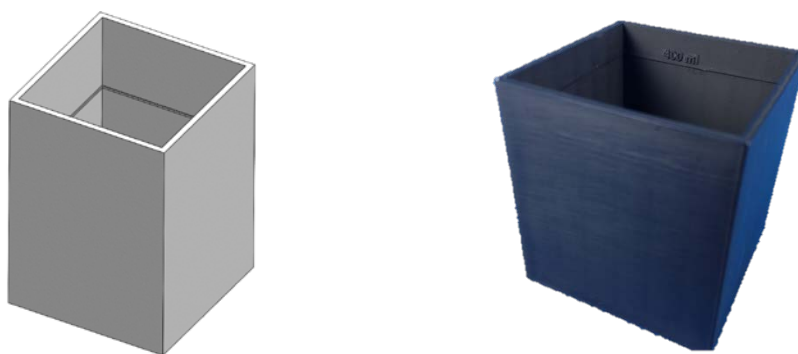
V grafech můžeme pozorovat změnu teploty pouze u dna nádoby, která dokazuje přenos tepla pouze vedením, k proudění nedochází.

Pokusy s termokamerou

Rozložení povrchové teploty bylo prováděno termokamerou LabIR-CAM, která je postavena na čipu FLIR Lepton 3. Základními parametry jsou rozlišení 160×120 px, frekvence 9 Hz a citlivost $0,05 \text{ }^\circ\text{C}$. [5]

Termogramy byly analyzovány v programu LabIR 1.5.15. Barevnou paletou bylo zvoleno „železo“ s pevně stanoveným rozsahem od $10,0$ do $20,0 \text{ }^\circ\text{C}$. Hodnota emisivity byla nastavena na $0,95$; zdánlivě odražená teplota $20 \text{ }^\circ\text{C}$; vzdálenost $0,5 \text{ m}$; atmosférická teplota $20 \text{ }^\circ\text{C}$ a relativní vlhkost 53% .

Pro potřeby měření byla v programu SolidWorks 2020 vymodelována nádoba tvaru kvádru, aby bylo možné pozorovat termokamerou jednu ze stěn, pro termografii ideální rovinnou plochu (Obr. 13.).



Obr. 13. Vlevo vymodelovaná nádoba o objemu 400 ml . Vpravo vytisknutá nádoba s povrchovou úpravou.

Pro tisk na 3D tiskárně byla zvolena černá tisková struna z materiálu PLA pro jeho vhodné vlastnosti z hlediska tepelné vodivosti (tabulka 2).

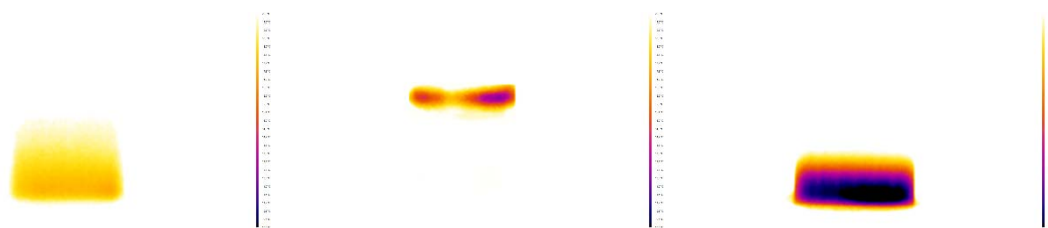
Tabulka 2. Tepelná vodivost materiálů. [6]

materiál	tepelná vodivost λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
PLA	0,13
ABS	0,17
PET-G	0,29

Povrch nádoby byl nabarven lakem LabIR HERP-LT-MWIR-BK-11, který má definovanou emisivitu ($\epsilon = 0,95$ [7]).

Stejně jako u předchozích pokusů byla nádoba v dostatečném předstihu umístěna do zatemněné místnosti, bez tepelných zdrojů. Časový předstih je nutný k získání termodynamické rovnováhy mezi vodou, nádobami a okolním vzduchem.

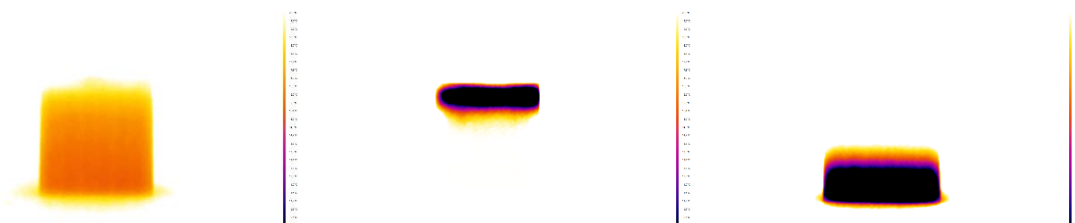
Po vhození kostek do nádob není v prvních sekundách nic pozorovatelné, nejdříve musí dojít k přenosu tepla mezi vodou a kostkou ledu, poté mezi stěnou nádoby a vodou. Zajímavé jsou termogramy již po 180 sekundách, kdy je možné pozorovat změnu povrchové teploty stěny nádoby (Obr. 14.).



Obr. 14. Termogramy nádob s vodou přibližně v polovině roztátého objemu kostky ledu, vlevo sladká voda, uprostřed slaná voda, vpravo sladká voda s kostkou ledu s vloženou maticí.

V nádobě se sladkou vodou a kostkou ledu je vidět postupná změna teploty v celém objemu, která začíná u dna nádoby. Povrch nádoby se slanou vodou a kostkou ledu mění teplotu v horní části, sladká voda ve třetí nádobě s kostkou ledu s maticí se chová opačně, jak šlo předpokládat z předchozích pokusů a učiva fyziky základní školy.

Přehledný výsledek nabízí i termogramy na konci tání kostek ledu. Všechny tři nádoby mají pozorovatelné změny teploty dle očekávání (Obr. 15.).



Obr. 15. Termogramy nádob s vodou na konci celkového času tání kostky ledu.

Sladká voda s ledem vykazuje změnu teploty v celém objemu. Slaná voda má pozorovatelný pás vody o jiné teplotě u volné hladiny. Sladká voda s kostkou ledu s maticí má pozorovatelný pás u dna nádoby. Obě nádoby se sladkou vodou mají i pozorovatelný přenos tepla vedením, oblast s nižší teplotou, mezi podstavou nádoby a deskou stolu.

Závěr

Vyhodnocení termovizní technikou přináší netradiční pohled na rozložení teploty povrchu nádoby, která odpovídá přibližně změnám teploty vody.

Kvalitativní analýzu neradiometrických termogramů, tedy sledování rozdílných teplot povrchů na základě odlišné pseudobarvy, lze považovat za alternativu k vizualizaci proudění s použitím potravinářského barviva.

Kvantitativní analýza radiometrických termogramů umožňuje diskutovat teploty povrchů vybraných oblastí a může být alternativou k měření bodovými čidly.

Literatura

- [1] Volf, I., Jarešová, M., & Ouhrabka, M. *Přenos tepla: Studijní text pro řešitele FO a ostatní zájemce o fyziku*, 14. <http://fyzikalniolympiada.cz/texty/texttz.pdf>
- [2] Němec, J., Hladný, J. *Voda v České republice*. Praha: Consult, 2006. 253 s. ISBN 80-903482-1-1

- [3] *Fyzikální vlastnosti mořské vody*. (2014). *Klimatologie A Hydrogeografie Pro Učitele* | Pedagogická fakulta Masarykovy Univerzity. Retrieved October 14, 2020, from https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/pedf/ps14/fyz_geogr/web/pages/12-2-fyzikalni-vlastnosti.html
- [4] *Go Direct® Surface Temperature: (Order Code GDX-ST)*. (2018). *Go Direct® Surface Temperature Sensor User Manual*. Retrieved September 14, 2020, from <https://www.vernier.com/files/manuals/gdx-st/gdx-st.pdf>
- [5] *LabIR-CAM: Termovize do škol*. (2020). Retrieved September 14, 2020, from <https://termovize.zcu.cz/ke-stazeni>
- [6] Běžák, K. *Tepelná vodivost u nestandardních materiálů pro TZB* [online]. Brno, 2019 [cit. 2020-09-14]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/137650>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav technických zařízení budov. Vedoucí práce Pavel Uher.
- [7] *Termovizní barva pro běžné aplikace: HERP-LT-MWIR-BK-11*. (2020). *Termovizní Měření | Labir®*. Retrieved September 14, 2020, from <https://paints.labir.cz/homepage/barva-pro-bezne-aplikace>