

Předmět: BOZE

Úloha č. Akumulace tepelné energie se změnou skupenství.

Cíl úlohy

Cílem úlohy je seznámit studenty s akumulací tepelné energie prostřednictvím látek se změnou skupenství. Úkolem je stanovit tepelnou kapacitu kalorimetru, proměřit a porovnat mezi sebou průběhy ohřevů látek vložených do kalorimetru a stanovit tepelné ztráty kalorimetru.

Kontrolní otázky

Jaké jsou způsoby akumulace tepelné energie?

Co ovlivňuje tepelné ztráty zásobníků pro ukládání tepelné energie?

Které látky jsou vhodné pro dlouhodobou akumulaci tepelné energie?

Zadání úlohy:

Stanovte tepelnou kapacitu kalorimetru C_k .

Do grafu vynesete průběh teploty vody a vody s vloženými polštářky obsahující octan sodný při jejich ohřevu v kalorimetru. Získané průběhy porovnejte a při jejich rozdílnostech stanovte příčiny daného jevu.

Porovnejte množství energie akumulované ve stejném množství vody a octanu sodném.

Teoretický rozbor

Teplo

Teplo Q je skalární fyzikální veličina, která vyjadřuje velikost přenesené energie mezi termodynamickou soustavou a okolím nebo mezi dvěma termodynamickými soustavami při tepelné výměně. Za termodynamickou soustavu považujeme takovou soustavu, která je od okolí oddělena rozhraním (skutečným nebo myšleným). [8]

Teplo, které termodynamická soustava přijme z okolí, považujeme za kladné.

Teplo vyzářené termodynamickou soustavou do okolí je záporné. [2]

Tepelná kapacita

Tepelná kapacita C tělesa vyjadřuje konstantu úměrnosti mezi množstvím tepla dQ dodaného, nebo odevzdaného, tělesu a změnou jeho teploty dT . Platí:

$$dQ = C \cdot dT$$

$$C = \frac{dQ}{dT} \quad (1)$$

Tepelná kapacita C tělesa vztažená na jednotku hmotnosti vyjadřuje měrná tepelná kapacita látky c :

$$c = \frac{C}{m} \quad (2)$$

látka	c_{20} [kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	l_t [kJ·kg ⁻¹]
hliník	0,896	399
měď	0,383	204
železo	0,452	289
křemík	0,703	1 650
olej transformátorový	1,890	-
voda	4,180	332,4
octan sodný - trihydrát	2,82	269

Tab. 1 Měrná tepelná kapacita při 20 °C a měrné skupenské teplo tání vybraných látek. [4], [5]

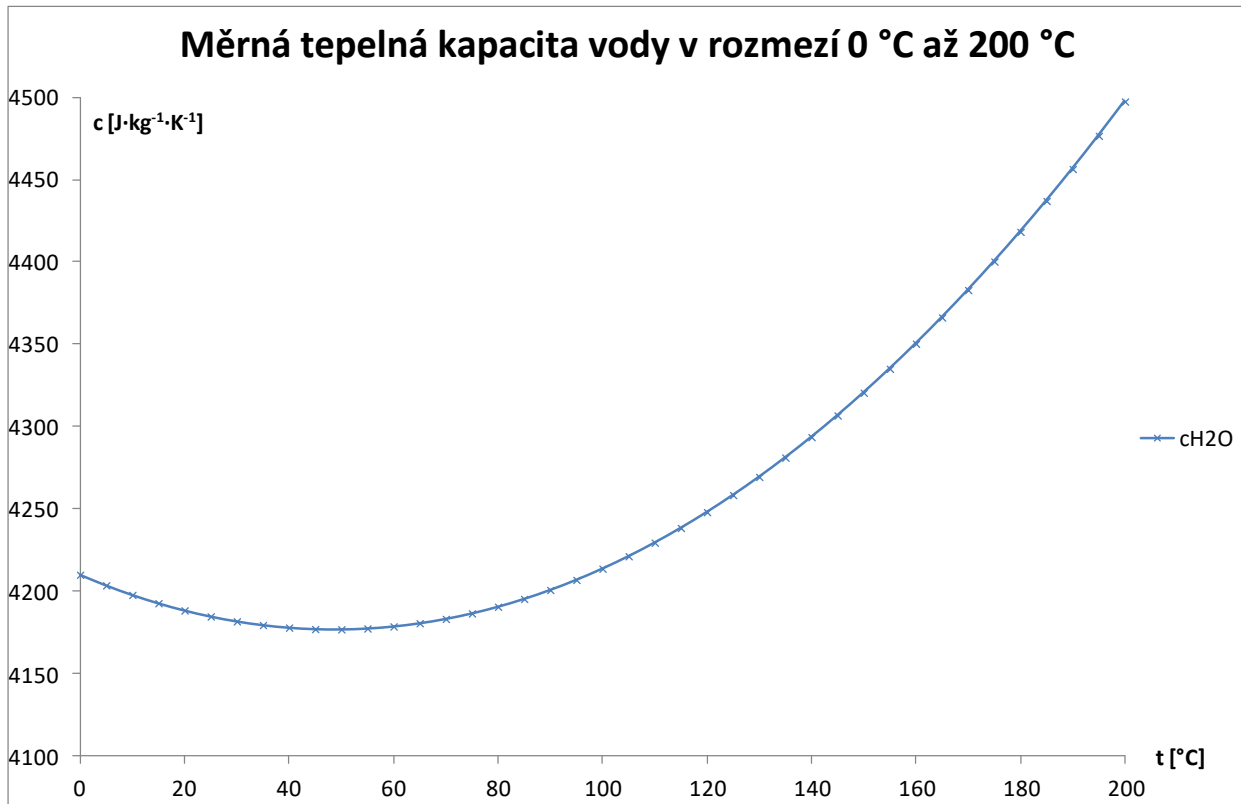
Ze vztahů (1) a (2) lze vyjádřit teplo Q potřebné k dodání nebo odebrání tělesu o hmotnosti m s definovanou měrnou tepelnou kapacitou c o požadovanou změnu teploty ΔT :

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T. \quad (3)$$

Měrná tepelná kapacita látek nemá konstantní hodnotu, je teplotně závislá. S klesající teplotou se měrná tepelná kapacita většiny látek snižuje a při teplotě blízké 0 K má velmi malou hodnotu. V tabulkách se běžně udává měrná tepelná kapacita látky vztažená k teplotě 20 °C, označovaná jako c_{20} . U plynů a par je hodnota měrné tepelné kapacity nejen funkcí teploty, ale také tlaku a zejména podmínek, za kterých dochází k předávání tepla. Podle toho rozeznáváme měrnou tepelnou kapacitu za stálého tlaku c_p a stálého objemu c_v . [10]

Měrnou tepelnou kapacitu vody lze v rozmezí teplot $t = 0\text{ °C} \div 200\text{ °C}$ popsat rovnicí: [11]

$$c_{H_2O} = 4210 - 1,363 \cdot t + 0,014 \cdot t^2 \quad (4)$$



Obr. 1 Graf závislosti měrné tepelné kapacity vody na teplotě dle rovnice (4).

Tepelná kapacita C je teplotně závislá fyzikální veličina a při výpočtech se obvykle používá střední hodnota \bar{C} v daném teplotním intervalu ΔT :

$$\bar{C} = \frac{Q}{\Delta T} = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} = \frac{Q}{m \cdot (T_2 - T_1)}, \quad (5)$$

kde T_1 je počáteční teplota a T_2 koncová teplota.

Dochází-li při tepelné výměně mezi termodynamickou soustavou a okolím ke změně teploty, označujeme toto teplo za citelné.

Skupenské teplo

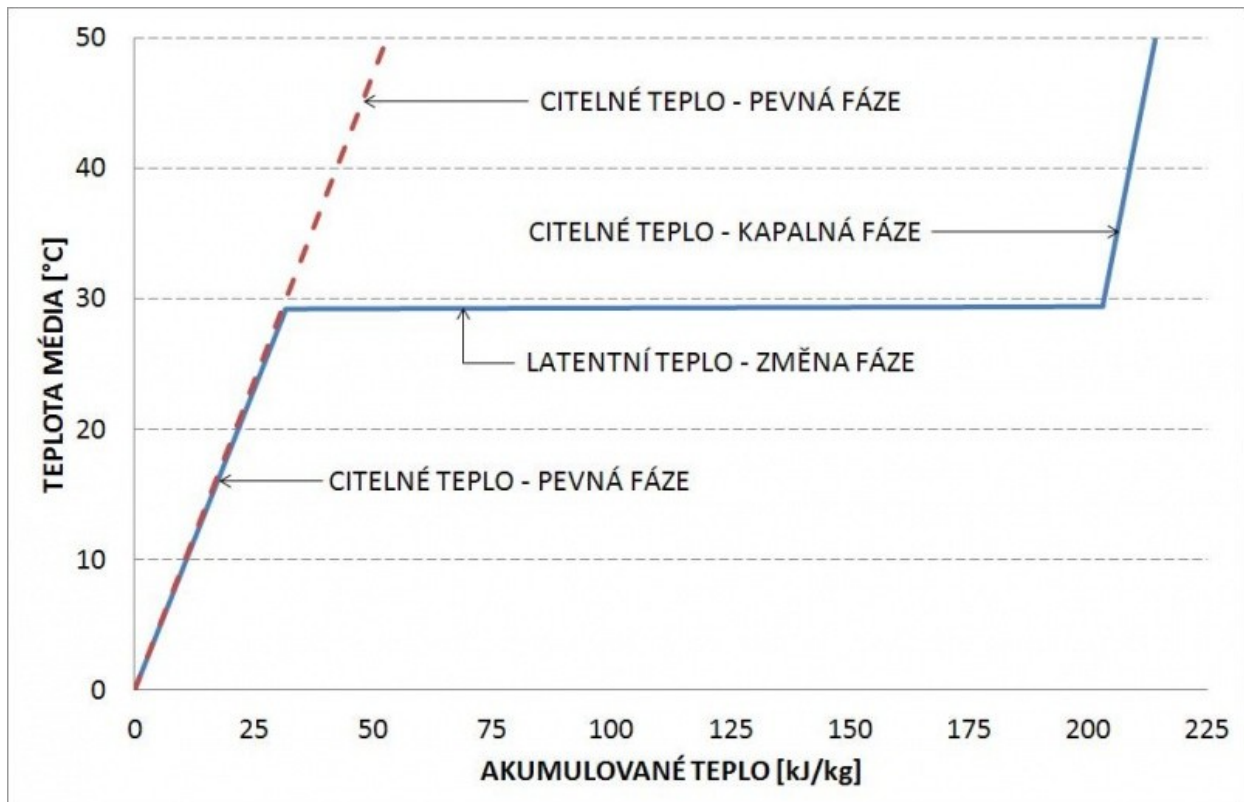
Skupenské, neboli latentní teplo L označuje teplo potřebné ke změně skupenství tělesa nebo látky o hmotnosti m . Měrné skupenské teplo l je skupenské teplo L vztažené k jednotce hmotnosti:

$$l = \frac{L}{m}. \quad (6)$$

Podle fázové změny skupenství rozlišujeme:

- skupenské teplo tání;
- skupenské teplo tuhnutí;

- skupenské teplo vypařování;
- skupenské teplo kondenzace;
- skupenské teplo sublimace;
- skupenské teplo desublimace.



Obr. 2 Porovnání citelného a latentního tepla. [7]

Kalorimetrická rovnice

Kalorimetrická rovnice vyjadřuje energetickou bilanci při tepelné výměně mezi tělesy umístěnými v kalorimetru. Tuto rovnici lze uplatnit ke zkoumání vlastností látek umístěných v kalorimetru.

Kalorimetrická rovnice v obecném tvaru:

$$Q_h = Q_c + Q_k$$

$$m_h \cdot c_h \cdot (T_h - T) = m_c \cdot c_c \cdot (T - T_c) + C_k \cdot (T - T_c) \quad (7)$$

kde Q_h je teplo předané chladnější látce a kalorimetru, Q_c teplo přijaté ohřívanou látkou a Q_k teplo potřebné k ohřátí kalorimetru. Teplota T_h je počáteční teplota teplejší látky, T_c počáteční teplota ohřívané látky a kalorimetru a T výsledná teplota soustavy po jejím ustálení.

U kalorimetrů, u nichž není zhotovena tepelná izolace všech stěn, dochází k přestupu tepla do okolí. Přestup tepla rovinnou stěnou je vyjádřen vztahem:

$$Q = \lambda \cdot \frac{S}{d} \cdot \Delta T, \quad (8)$$

kde λ vyjadřuje součinitel tepelné vodivosti, S povrch stěny, d tloušťku stěny a ΔT rozdíl teplot mezi vnitřním a venkovním prostorem.

K měření tepla, tepelné kapacity, resp. měrné tepelné kapacity slouží kalorimetr. Podle účelu použití, konstrukce, způsobu výměny tepla apod. lze dělit kalorimetry do několika kategorií.

Dle podmínek, za kterých kalorimetry pracují, lze dělit kalorimetry na izotermické a adiabatické. Izotermický děj je charakterizován konstantní teplotou soustavy, z toho plyne, že při uvolňování nebo dodávání energie v kalorimetru je veškeré teplo spotřebováno na fázovou přeměnu látky nebo kompenzováno dotápěním nebo chlazením kalorimetru. Při adiabatickém ději nedochází k výměně tepla mezi soustavou a okolím, veškeré teplo je spotřebováno k ohřátí nebo ochlazení kalorimetru a jeho obsahu, měří se změna teploty soustavy.

Kalorimetry s elektrickým ohřevem pracují na principu přeměny elektrické energie E na tepelnou energii Q . Přeměna energie spočívá v ohřevu odporového tělesa, s definovaným odporem R , průchodem elektrického proudu I za čas τ . Uvolněné teplo je označováno jako Jouleovo. Velikost Jouleova tepla lze zapsat:

$$Q = E = P \cdot \tau = U \cdot I \cdot \tau = R \cdot I^2 \cdot \tau = \frac{U^2}{R} \cdot \tau \quad (9)$$
$$[Q] = 1J = 1W \cdot s$$

Převod mezi jednotkami *Joule* a *Watt* je patrný z výše uvedeného vztahu. Platí, že energii o velikosti 1 *J* odpovídá výkon 1 *W* dodaný za 1 s. Jiným vyjádřením velikosti energie může být 1 *kWh* = 3,6 · 10⁶ *J* = 3,6 *MJ*.

Akumulace tepelné energie

Akumulace tepelné energie spočívá v ukládání tepelné energie v době jejího přebytku a následně k jejímu čerpání v době jejího nedostatku. Ideální látka vhodná k akumulaci tepla má vysokou tepelnou kapacitu, chemickou stabilitu a nízkou cenu. Zásobníky pro akumulaci tepelné energie jsou konstruovány tak, aby byl minimalizován přestup tepla do okolí.

Proces akumulace tepelné energie lze dle fyzikálně chemického procesu dělit na:

- akumulaci citelného tepla;
- akumulaci latentního tepla;
- akumulace jiné podstaty (absorpce vodní páry, chemické procesy). [1]

Akumulace citelného tepla je nejjednodušším způsobem akumulace tepla. Využívá principu ohřevu látky za dodávání tepelné energie nebo jejího ochlazování při odebírání tepelné energie. Nejvyužívanější látkou pro akumulaci citelného tepla je voda, její jednoznačnou výhodou je největší měrná tepelná kapacita ($c_{20} = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) a nízká cena. Dalšími látkami využívanými k akumulaci tepla jsou např. kamenivo, jíly apod.

Akumulace latentního tepla využívá k vázání tepelné energie fázovou změnu pracovní látky, nejčastěji z pevné fáze na kapalnou. Oproti akumulaci citelného tepla probíhá děj při konstantní teplotě, navíc objem pracovního média potřebného k akumulaci stejného množství energie bývá menší (vysoké hodnoty skupenského tepla tání). Požadavkem na pracovní látku je vhodná teplota tání s ohledem na aplikaci čerpání tepelné energie do systému (např. pro ohřev TUV rozmezí teplot 55 ÷ 65 °C), vysoká hodnota tepelné vodivosti, malá objemová změna při změně fáze, nesmí být korozivní a toxická. Komerční označení těchto látek je PCM (z anglického Phase Change Materials). [3], [6]

Pro ukládání latentního tepla se používají např.:

parafíny (alkany C_nH_{2n+2} pro $n \in (40; 50)$; $l_t = 200 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1} = 150 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$; $t_{\text{tání/tuhnutí}} = 55 \div 60 \text{ }^\circ\text{C}$);
 Glauberova sůl (dekahydrát síranu sodného, $\text{Na}_2\text{SO}_4\cdot 10\text{H}_2\text{O}$; $l_t = 254 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1} = 377 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$;
 $t_{\text{tání/tuhnutí}} = 32,4 \text{ }^\circ\text{C}$);
 trihydrát octanu sodného ($\text{NaCH}_3\text{CO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$; $l_t = 269 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$; $t_{\text{tání}} = 58 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_{\text{tuhnutí}} = 15^\circ\text{C}$). [5], [6], [9]

K ukládání tepelné energie lze využívat i podchlazování kapalin. Jedná se o jev, kdy převedeme pevnou látku do kapalné fáze ohřevem na teplotu tání s následným ochlazením této kapaliny. Při dosažení teploty tuhnutí však nedochází ke krystalizaci této látky, ta zůstává nadále kapalná – stává se podchlazenou kapalinou. Krystalizaci podchlazené kapaliny lze vyvolat vnějším impulzem, který způsobí vznik krystalizačního centra. Toto centrum následně způsobí přenos procesu krystalizace do celého objemu podchlazené kapaliny spojeným s uvolňováním tepelné energie, akumulované podchlazenou kapalinou.

Praktickým příkladem tohoto jevu je ohřívání trihydrátu octanu sodného $\text{NaCH}_3\text{CO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$. Dosažením teploty tání $58 \text{ }^\circ\text{C}$ dochází k uvolňování krystalicky vázané vody, která rozpouští octan sodný a vzniká přesycený vodný roztok octanu sodného. Pokud ochladíme octan sodný na teplotu tuhnutí $15 \text{ }^\circ\text{C}$, kdy by mělo dojít ke krystalizaci, zůstává stále kapalinou – stává se tzv. podchlazenou kapalinou. Krystalizaci lze následně vyvolat např. nalitím této kapaliny na krystalek trihydrátu octanu sodného za vzniku okamžité krystalizace vodného roztoku a růstu „krápníků“. Tohoto jevu se využívá také ve hřejivých polštářcích. Uvnitř hřejivých polštářků je octan sodný jako podchlazená kapalina (nejčastěji pokojové teploty), proces krystalizace je vyvolán mechanickým prolomením plíšku za vzniku krystalizačního centra. Krystalizace probíhá celým objemem za současného uvolňování tepelné energie rovné skupenskému teplu tuhnutí, teplota dosahuje až k $58 \text{ }^\circ\text{C}$. [5]

V akumulčních zásobnících pro dlouhodobé ukládání tepelné energie (sezónní zásobník) je využití trihydrátu octanu sodného výhodné. Ukládání energie v zásobníku probíhá ve dvou fázích, ohřívání octanu a jeho následné podchlazení. Měrná tepelná kapacita trihydrátu octanu sodného v pevném stavu $c_{o,p} = 2,82 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, v kapalném stavu $c_{o,k} = 3,05 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Pro rozpuštění všech krystalů je nutné dosáhnout teploty $84 \text{ }^\circ\text{C}$, přidáním nepatrného množství vody (0,44 %) do trihydrátu octanu sodného dojde ke snížení této teploty na $t_k = 65 \text{ }^\circ\text{C}$. Přidáním vody a dalších aditiv, pro zamezení oddělení pevné a kapalné fáze a stabilizaci tepelně-akumulačních vlastností látky v čase, dojde ke snížení měrného latentního tepla na hodnotu $l_t = 265 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$. Teplota tání je $t_t = 58 \text{ }^\circ\text{C}$. [5]

Pro ohřev 1 kg octanu z teploty $t_p = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ na $t_k = 65 \text{ }^\circ\text{C}$ spotřebujeme teplo q_{n1} o velikosti:

$$\begin{aligned} q_{n1} &= c_{o,p} \cdot (T_t - T_p) + l_t + c_{o,k} \cdot (T_k - T_t) = \\ &= 2,82 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot ((58 + 273,15) - (25 + 273,15)) \text{ K} + 265 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} + \\ &+ 3,05 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot ((65 + 273,15) - (58 + 273,15)) \text{ K} = 379,41 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \end{aligned} \quad (10)$$

Druhá fáze nabíjení zásobníku spočívá v podchlazení kapalného trihydrátu octanu sodného na teplotu okolí (návrhových 25 °C), tomu odpovídá odebrané množství tepla q_{n2} o velikosti:

$$\begin{aligned} q_{n2} &= c_{o,k} \cdot (T_p - T_k) = 3,05 \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot ((25 + 273,15) - (65 + 273,15)) \text{K} = \\ &= -122 \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \end{aligned} \quad (11)$$

Množství akumulovaného tepla v zásobníku určeného k dlouhodobému uložení q_u je tedy:

$$q_u = q_{n1} + q_{n2} = 379,41 \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 122 \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} = 257,41 \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}. \quad (12)$$

Toto množství tepla je již trvale uloženo a nedochází k jeho poklesu, neboť teplota akumulační látky a teplota okolí je shodná. Odvedené teplo potřebné k podchlazení lze také využít. Princip ukládání energie do octanu sodného je zobrazen na Obr. 3.

Při stejném teplotním rozdílu by množství tepla akumulovaného do vody q_{H2O} činilo:

$$\begin{aligned} q_{H2O} &= c_{20} \cdot (T_k - T_p) = 4,18 \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot ((65 + 273,15) - (25 + 273,15)) \text{K} = \\ &= 167,2 \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \end{aligned} \quad (13)$$

Z porovnání těchto dvou zásobníků je patrné, že množství tepla uloženého do jednotky hmotnosti trihydrátu octanu sodného je vyšší než u zásobníku obsahujícího vodu, u nějž by však docházelo k dalším tepelným ztrátám vlivem rozdílných teplot mezi mediem a okolím.

K vybíjení zásobníku dochází při změně skupenství trihydrátu octanu sodného z kapalného na pevné – proces solidifikace. Při tomto ději se uvolní akumulované teplo o velikosti 257,41 kJ·kg⁻¹. Část tepla $q_{u,t}$ se spotřebuje na ohřev octanu v pevném skupenství o teplotě 25 °C na teplotu 58 °C odpovídající skupenské změně:

$$\begin{aligned} q_{u,t} &= c_{o,p} \cdot (T_t - T_p) = 2,82 \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot ((58 + 273,15) - (25 + 273,15)) \text{K} = \\ &= 93,06 \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \end{aligned} \quad (14)$$

Zbylé tepla $q_{u,c}$ se odebere izotermicky, tj. při konstantní teplotě 58 °C:

$$q_{u,c} = q_u - q_{u,t} = 257,41 \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 93,06 \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} = 164,35 \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (15)$$

Dalším odběrem tepla již dochází k poklesu teploty octanu v zásobníku, při koncové teplotě $t_n = 35$ °C lze ze zásobníku odebrat množství tepla q_t o velikosti:

$$\begin{aligned} q_t &= c_{o,p} \cdot (T_t - T_n) = 2,82 \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot ((58 + 273,15) - (35 + 273,15)) \text{K} = \\ &= 64,86 \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \end{aligned} \quad (16)$$

Princip čerpání energie z octanu sodného je patrný z Obr. 4.

Z výše uvedeného výpočtu je patrné, že velikost skupenského tepla tání a tuhnutí pro stejnou látku nemusí mít stejnou velikost. Abychom byli schopni rozpustit 1 kg trihydrátu octanu

sodného ve výchozím stavu o teplotě 58 °C, musíme dosáhnout teploty 65 °C pro úplné rozpuštění krystalů, tomu odpovídá dodané teplo o velikosti:

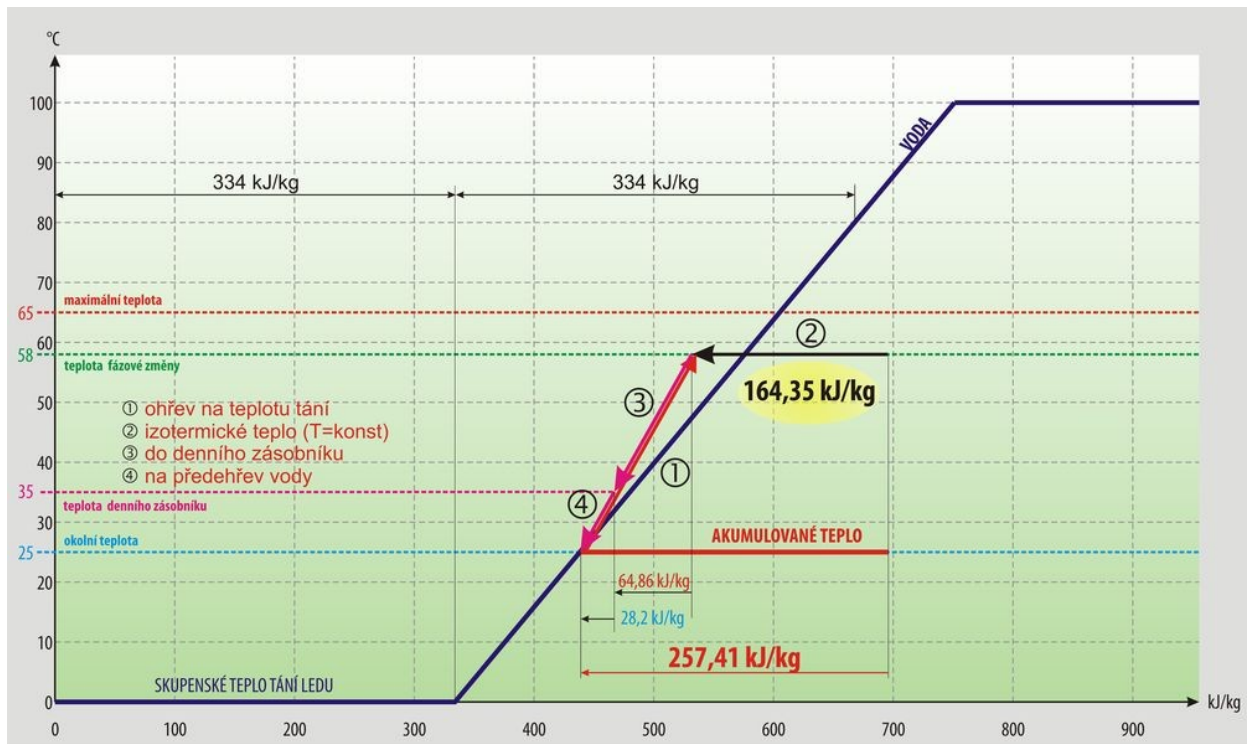
$$\begin{aligned}
 q_{\text{tání}} &= l_t + c_{o,k} \cdot (T_k - T_t) = \\
 &= 265 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} + 3,05 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot ((65 + 273,15) - (58 + 273,15)) \text{ K} = \\
 &= 286,35 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

Pro vyvolání krystalizace látky je nutno dosáhnout teploty nejméně 58 °C, tj. musíme odebrat teplo potřebné pro dosažení 65 °C. Při tuhnutí je pak uvolněno teplo o velikosti nejméně 265 kJ·kg⁻¹, tj. při nepodchlazení kapalného trihydrátu octanu sodného.

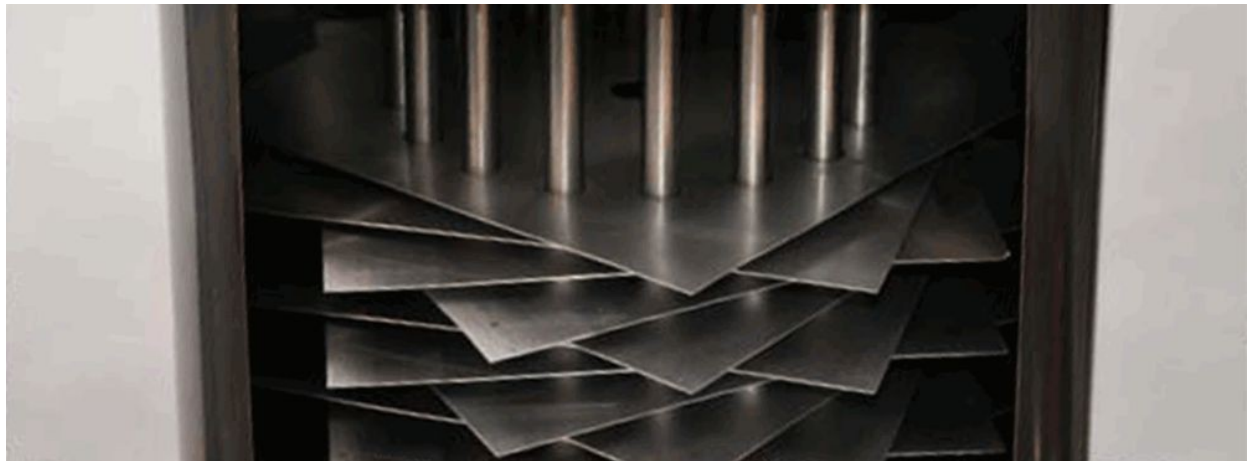
Experimentálně je prokázáno, že výše zmíněný proces ukládání tepelné energie, při změně fáze, probíhá lépe u menších výměníků, přičemž u výměníků o hmotnosti tepelně-akumulační látky nad 250 kg může být tento proces již nestabilní. Opakovatelnost tohoto procesu v dlouhodobém horizontu již není spolehlivá. [5]



Obr. 3 Princip ukládání tepelné energie do trihydrátu octanu sodného v porovnání s vodou. [5]



Obr. 4 Princip čerpání tepelné energie z trihydrátu octanu sodného. [5]



Obr. 5 Vnitřní uspořádání výměníku tepla využívajícího ukládání tepelné energie do trihydrátu octanu sodného. [5]

Postup měření

Stanovení tepelné kapacity kalorimetru:

Na základě známé měrné tepelné kapacity vody stanovte tepelnou kapacitu kalorimetru C_k .

- Pro potřeby měření volte hmotnost vody m_c a m_h přibližně shodnou, celkově v rozmezí $0,7 \div 1,0$ kg.
- Naplňte kalorimetr chladnější vodou o hmotnosti m_c , ponechte ustálit a odečtěte teplotu t_c .
- Do kalorimetru přilijte teplejší vodu o hmotnosti m_h a teplotě t_h , k ohřevu vody použijte rychlovarnou konvici. Vodu není nutno přivádět k bodu varu, postačí ohřev na teplotu přibližně 70 °C (voda v konvici začíná „syčet“). Při manipulaci s teplou vodou dbejte zvýšené opatrnosti! Rychlovarnou konvici odpojte od sítě.
- Kalorimetr uzavřete a zamíchejte.
- Odečtěte teplotu vody v kalorimetru t po ustálení trvajícím cca 2 minuty.
- Na základě naměřených hodnot stanovte tepelnou kapacitu kalorimetru C_k dle vztahu (7).
- Výslednou hodnotu tepelné kapacity kalorimetru C_k konzultujte s vyučujícím.

Určení tepelné energie potřebné pro ohřev vody na 75 °C:

- Do kalorimetru nalijte vlažnou vodu o hmotnosti m . Minimální objem vody pro ponoření topné spirály činí $0,4$ l. Pro měření je optimální hmotnost vody $0,6$ kg.
- Kalorimetr uzavřete, změřte teplotu t_o po ustálení a vypočtěte teplo Q potřebné pro ohřev vody na požadovanou teplotu 75 °C (použijte vypočtenou hodnotu C_k).
- Kalorimetr připojte ke zdroji, napěťový výstup nastavte na maximum, proudový výstup na minimum. Zapněte zdroj a na proudovém výstupu nastavte maximální výstupní proud $I \sim 4,4$ A.
- Za občasného míchání odečítejte potřebný čas a teplotu vody v kalorimetru až do dosažení požadovaných 75 °C. Je vhodné zaznamenat čas při každém zvýšení teploty o 2 °C.
- Odečtěte proud I a napětí U zdroje, stanovte výkon P topné spirály a teoretickou dobu ohřevu τ potřebnou pro ohřev daného množství vody dle vztahu (7) a (9).
- Po dosažení požadovaného ohřevu nastavte proudový výstup na minimum a vypněte zdroj.
- Naměřené hodnoty vynesete do grafu a zjistíte, zda je průběh ohřevu lineární. Pokud průběh není lineárním, vysvětlíte čím je to způsobeno. Vycházejte z rovnice přestupu tepla (8).
- Stanovte poměr mezi teoreticky stanoveným množstvím tepla a skutečným množstvím tepla potřebným k ohřevu vody na 75 °C a zdůvodněte rozdílnost hodnot.

Ohřev vody s octanovými polštářky na 75 °C:

- Do kalorimetru vložte 2 polštářky s octanem sodným v pevném skupenství a doplňte vodou. Celkovou hmotnost systému voda/octan nastavte stejnou jako v předcházejícím bodě tohoto postupu.
- Kalorimetr uzavřete tak, aby polštářky byly z obou stran topné spirály (dbejte zvýšené opatrnosti pro zamezení poškození topné spirály). Změřte počáteční teplotu t_{p0} .
- Kalorimetr připojte ke zdroji, napěťový výstup nastavte na maximum, proudový výstup na minimum. Zapněte zdroj a na proudovém výstupu nastavte shodný proud jako v předcházejícím bodě tohoto postupu.

- d) Při ohřevu vody s octanovými polštářky je nutné neustálé míchání z důvodu rovnoměrného prohřívání systému! Teplotu a čas odečítejte obdobně jako u měření ohřevu vody tohoto postupu, cílovou teplotu volte 75 °C.
- e) Naměřené hodnoty vynesete do grafu a zjistíte, zda je průběh ohřevu lineární. Průběh porovnejte se znázorněným principem ukládání tepelné energie do octanu dle Obr. 3 a uveďte, proč se naměřená charakteristika liší. Při vynášení hodnot do grafu je vhodné provést rozdělení na 2 až 3 lineární úseky dle času potřebného pro ohřev o 2 °C. Polštářky ponechte nabitě pro další skupinu.
- f) Průběhy ohřevu vody a vody s octanovými polštářky vynesete do společného grafu, porovnejte mezi sebou a okomentujte.

Čerpání tepelné energie z octanových polštářků:

- a) Stanovte velikost tepelné energie uložené ve 2 octanových polštářcích, je-li ukončeno čerpání tepla při teplotě 30 °C. Vycházejte z rovnice (15) a (16). Porovnejte s energií akumulovanou do vody o stejných výchozích teplotách a hmotnosti.
- b) Vezměte 2 octanové polštářky nabitě předchozí skupinou a prolomte kovové plíšky. Sledujte proces solidifikace v celém objemu polštářků a zvýšení teploty polštářků

Seznam použité literatury

- [1] BECHNÍK, Bronislav. Akumulace tepelné energie – fyzikální principy. In: *tzb-info.cz* [on-line]. [vid. 2003-05-14]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/1482-akumulace-tepelne-energie-fyzikalni-principy>.
- [2] HALLIDAY, David, RESNICK, Robert a WALKER, Jearl. *Fyzika. Část 2, Mechanika – Termodynamika*. Brno: VUTIUM, 2006. ISBN 80-214-1868-0.
- [3] MATUŠKA, Tomáš. Trendy v solární tepelné technice (V) – Zásobníky tepla. In: *tzb-info.cz* [on-line]. [vid. 2005-10-24]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/2799-trendy-v-solarni-tepelne-technice-v-zasobniky-tepla>.
- [4] MIKULČÁK, Jiří, KLIMEŠ, Bohdan, ŠIROKÝ, Jaromír, ŠŮLA, Václav, ZEMÁNEK, František. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky*. Praha: PROMETHEUS, 2005. ISBN 80-85849-84-4.
- [5] NOHEJL, Ervín. Sezónní akumulátor tepla s minimálními ztrátami. In: *tzb-info.cz* [on-line]. [vid. 2014-08-25]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/akumulace-tepla/11626-sezenni-akumulator-tepla-s-minimalnimi-ztratami>.
- [6] OGOUN, Milan. Vývoj zásobníku pro akumulaci latentního tepla v letech 1990 až 2002. In: *topin.cz* [on-line]. [vid. 2003-04]. Dostupné z: <http://www.topin.cz/index.php?idx=71873&page=casopis.item>.
- [7] OSTRÝ, Milan. Akumulace tepla při změnách skupenství. In: *Chempoint.cz* [on-line]. [vid. 2012-06-28]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/akumulace-tepla-pri-zmenach-skupenstvi>.
- [8] TARÁBEK, Pavol, ČERVINKOVÁ, Petra a kolektiv. *Odmaturuj z fyziky*. Brno: DIDAKTIS, 2006. ISBN 80-7358-058-6.
- [9] Pokus s octanem sodným (Chemický krápník, Horký led). *studiumchemie.cz* [on-line]. Dostupné z: <http://www.studiumchemie.cz/pokus.php?id=110>.
- [10] Měrná tepelná kapacita. *edu.techmania.cz* [on-line]. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie-struktura-latek/merna-tepelna-kapacita>.
- [11] Vybrané výpočetní vztahy pro vlastnosti vody. *tzb-info.cz* [on-line]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/41-vybrane-vypocetni-vztahy-pro-vlastnosti-vody>.