

**Předmět:** BPC-OZU

**Úloha č. 3** Akumulace tepelné energie se změnou skupenství I.

### **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? Popište.

Co ovlivňuje tepelné ztráty zásobníků pro ukládání tepelné energie?

Které látky jsou vhodné pro dlouhodobou akumulaci tepelné energie a proč?

### **Zadání úlohy:**

Stanovte tepelnou kapacitu kalorimetru  $C_k$ .

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

Zjistěte tepelné ztráty kalorimetru a vyhodnoťte vhodnost tohoto zařízení pro dlouhodobé ukládání tepelné energie.

## 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 pomyslným). [8]

Teplo, které termodynamická soustava přijme z okolí, považujeme za kladné a teplo vyzářené termodynamickou soustavou do okolí za záporné. [2]

### Tepelná kapacita

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

$$dQ = C \cdot dT$$

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

Tepelnou kapacitu  $C$  tělesa vztaženou na jednotku hmotnosti vyjadřuje měrná tepelná kapacita látky  $c$ . 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  $c_v$ .

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

Tab. 1 Měrná tepelná kapacita při 20 °C a měrné skupenské teplo tání vybraných látek.

látka	$c_{20} [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}]$	$l_t [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$
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
octan sodný - trihydrát	2,820	269

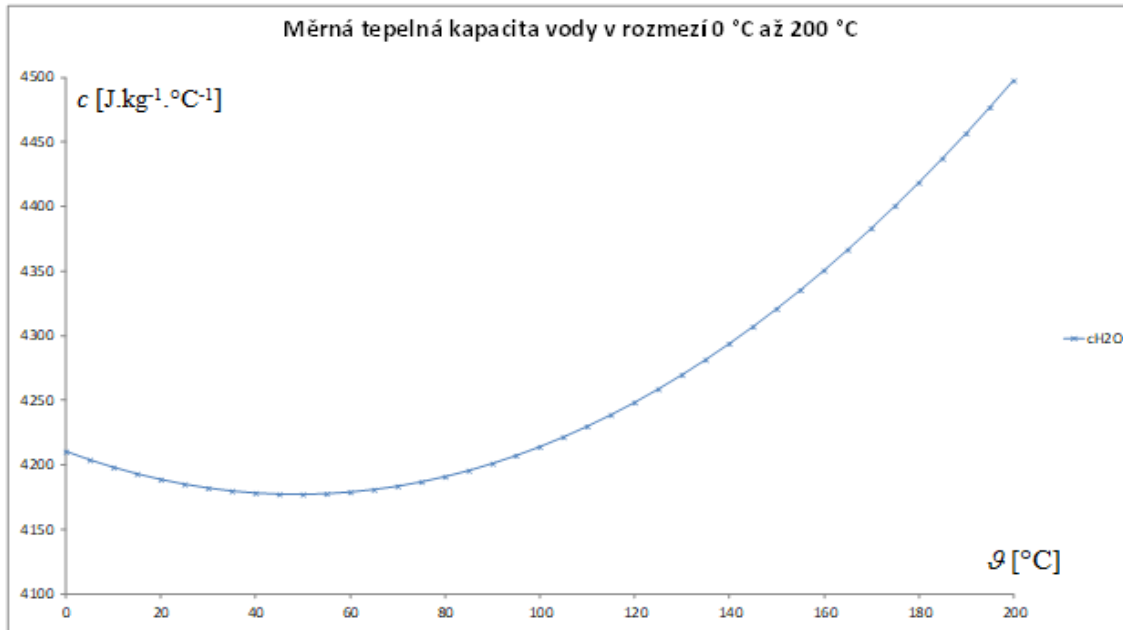
Ze vztahů (1) a (2) lze vyjádřit teplo  $Q$  potřebné k dodání nebo odebrání tělesu o hmotnosti  $m$

s definovanou měrnou tepelnou kapacitou  $c$  o požadovanou změnu teploty  $\Delta T$ :

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

Měrnou tepelnou kapacitu vody lze v rozmezí teplot  $\vartheta = 0\text{ }^{\circ}\text{C} \div 200\text{ }^{\circ}\text{C}$  popsat rovnicí: [12]

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



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  $\Delta T$ :

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

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

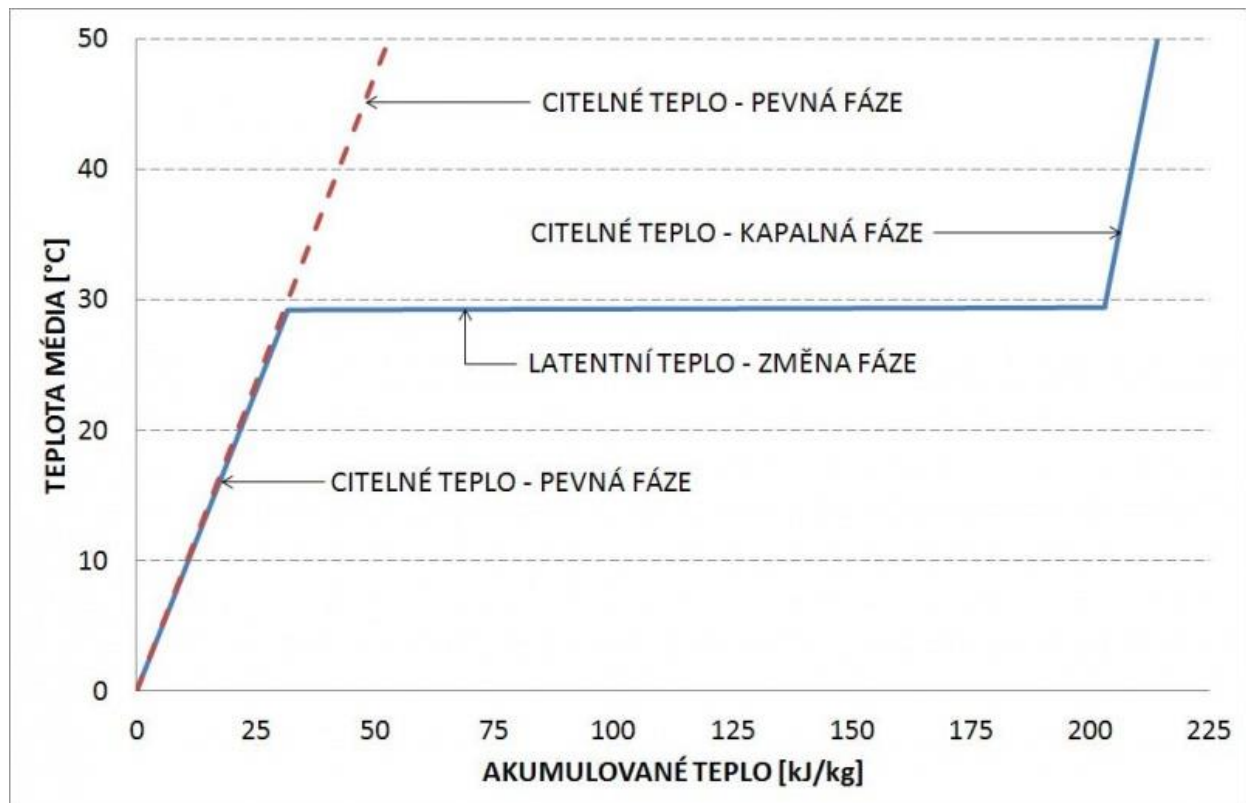
Skupenské, neboli latentní teplo  $L$  označuje teplo potřebné ke změně skupenství tělesa nebo látky o hmotnosti  $m$ . Měrné skupenské teplo  $l$  je skupenské teplo  $L$  vztažené k jednotce hmotnosti:

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

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

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. 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:

$$Q_1 = Q_2 + Q_k$$

$$m_1 \cdot c_1 \cdot (T_1 - T) = m_2 \cdot c_2 \cdot (T - T_2) + C_k \cdot (T - T_2) \quad (7)$$

kde  $Q_1$  je teplo předané chladnější látce a kalorimetru,  $Q_2$  teplo přijaté ohřívanou látkou a  $Q_k$  teplo potřebné k ohřátí kalorimetru. Teplota  $T_1$  je počáteční teplota teplejší látky,  $T_2$  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 rovinou stěnou je vyjádřen vztahem:

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

kde  $\lambda$  vyjadřuje součinitel tepelné vodivosti,  $S$  povrch stěny,  $d$  tloušťku stěny a  $\Delta T$  rozdíl teplot mezi vnitřním a venkovním prostorem.

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 přitápěním 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  $t$ . Uvolněné teplo je označováno jako Jouleovo. Velikost Jouleova tepla lze zapsat:

$$Q = E = P \cdot t = U \cdot I \cdot t = R \cdot I^2 \cdot t = \frac{U^2}{R} \cdot t \quad (9)$$

$$[Q] = 1 \text{ J} = 1 \text{ W} \cdot \text{s}$$

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  $1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J} = 3,6 \text{ MJ}$ .

### 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).

Akumulace citelného tepla je nejjednodušším způsobem akumulace tepla. Využívá principu ohřevu látky za dodávání tepelné energie nebo jejího ochlazování při odebrání tepelné energie. Nejvyužívanější látkou pro akumulaci citelného tepla je voda, její jednoznačnou výhodou je největší měrná tepelná kapacita ( $c_{20} = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ) 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  $55 \div 60 \text{ }^\circ\text{C}$ ), 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 například následující látky viz Tabulka 2 níže.

Tab. 2: Látky pro ukládání tepelné energie a jejich termodynamické parametry.

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

K ukládání tepelné energie lze využívat i podchlazování kapalin. Jedná se o jev, kdy převedeme pevnou látku do kapalně fáze ohřevem na teplotu tání s následným ochlazením této kapaliny. Při dosažení teploty tuhnutí však nedochází ke krystalizaci této látky, která 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“. Tento jev se uplatňuje v tzv. hřejivých polštářcích. Uvnitř těchto 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 akumulačních 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  $\vartheta_k = 65 \text{ }^\circ\text{C}$ . Přidáním vody a dalších aditiv, pro zamezení oddělení pevné a kapalně 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  $\vartheta_t = 58 \text{ }^\circ\text{C}$ . [5]

Pro ohřev 1 kg octanu z teploty  $\vartheta_p = 25\text{ °C}$  na  $\vartheta_k = 65\text{ °C}$  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  $25\text{ °C}$ ), 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.

Při stejném teplotním rozdílu by množství tepla akumulovaného do vody  $Q_{H_2O}$  činilo:

$$\begin{aligned} Q_{H_2O} &= c_{20} \cdot (T_k - T_p) = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot ((65 + 273,15) - (25 + 273,15)) \text{ K} = \\ &= 167,2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \end{aligned} \quad (13)$$

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 médiem 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  $257,41 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Část tepla  $Q_{u,t}$  se spotřebuje na ohřev octanu v pevném skupenství o teplotě  $25\text{ °C}$  na teplotu  $58\text{ °C}$  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  $58\text{ °C}$ :

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

Dalším odběrem tepla již dochází k poklesu teploty octanu v zásobníku, při koncové teplotě  $\vartheta_n = 35\text{ °C}$  lze ze zásobníku odebrat množství tepla  $Q_t$  o velikosti:

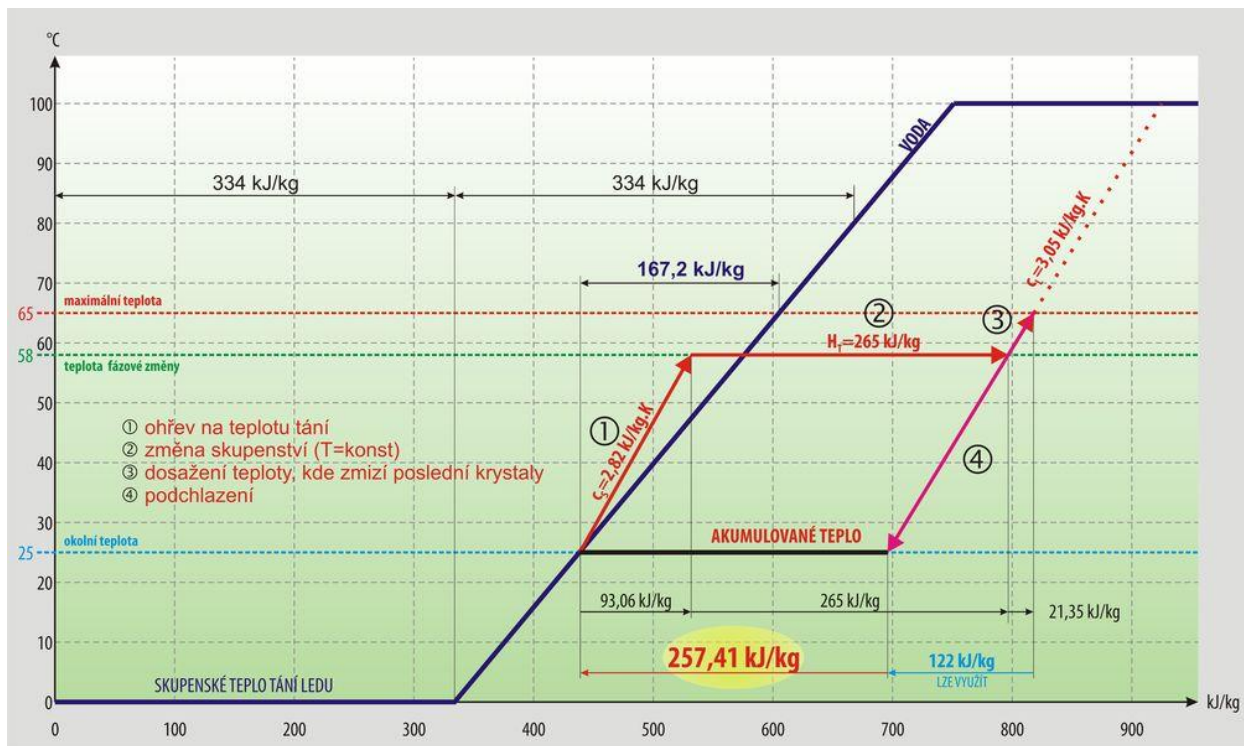
$$\begin{aligned} Q_t &= c_{o,p} \cdot (T_t - T_n) = 2,82 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot ((58 + 273,15) - (35 + 273,15)) \text{ K} = \\ &= 64,86 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \end{aligned} \quad (16)$$

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:

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

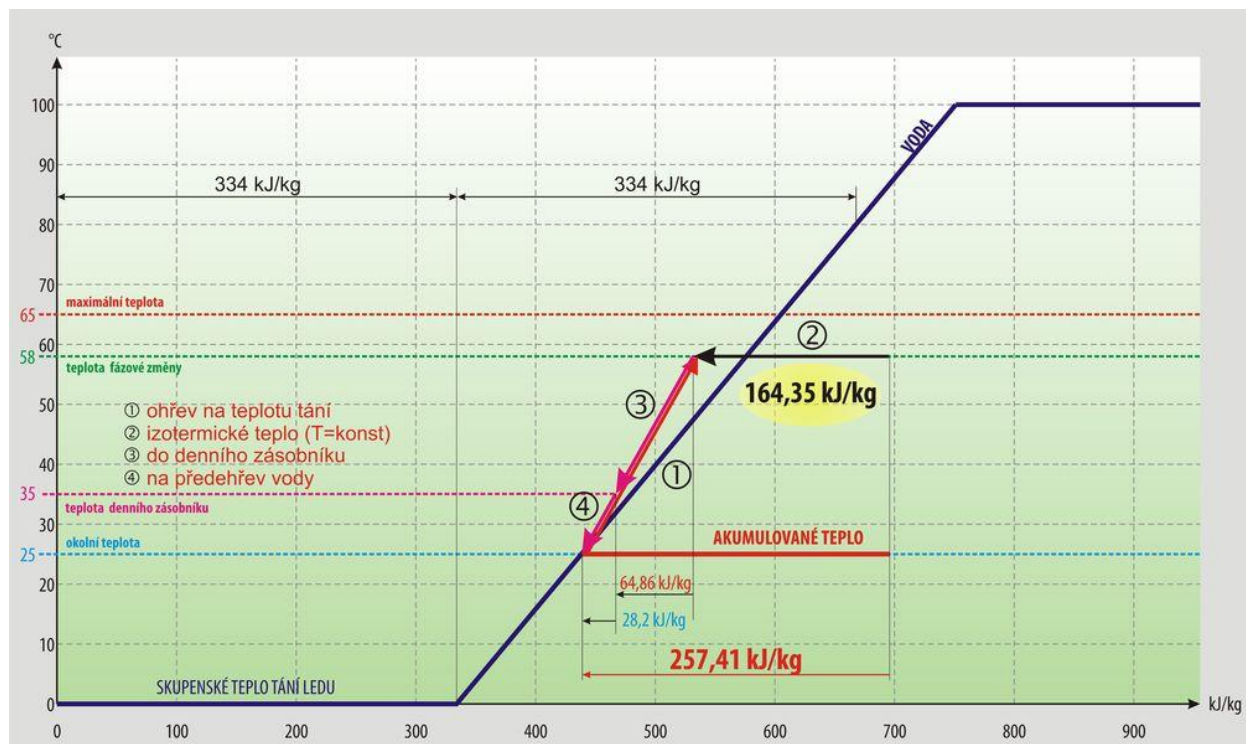
Pro vyvolání krystalizace látky je nutno dosáhnout nejvýše teploty 58 °C, tj. musíme odebrat teplo potřebné pro dosažení 65 °C. Při tuhnutí je pak uvolněno teplo o velikosti nejvýše 265 kJ·kg<sup>-1</sup>, tj. při nepodchlazení kapalného trihydrátu octanu sodného.

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]

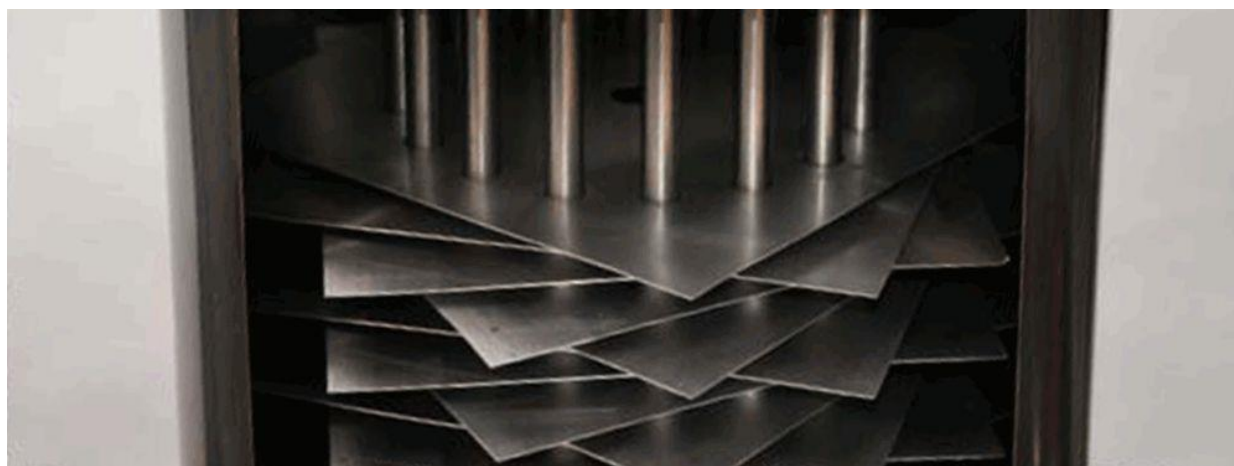


Obr. 3 Princip ukládání tepelné energie do trihydrátu octanu sodného v porovnání s vodou. [5]





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

### 1. Stanovení tepelné kapacity kalorimetru:

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

- Pro potřeby měření volte hmotnost vody  $m_1$  a  $m_2$  tak, aby výsledná hmotnost nepřesáhla 180 g.
- Naplňte kalorimetr chladnější vodou o hmotnosti  $m_2$  a teplotě  $\vartheta_2$ .
- Do kalorimetru přilijte teplejší vodu o hmotnosti  $m_1$  a teplotě  $\vartheta_1$ , 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!
- Kalorimetr uzavřete a zamíchejte.
- Odečtěte teplotu vody v kalorimetru  $\vartheta$  po ustálení.
- Na základě naměřených hodnot stanovte tepelnou kapacitu kalorimetru  $C_k$  dle vztahu (7).
- Výslednou hodnotu tepelné kapacity kalorimetru  $C_k$  konzultujte s vyučujícím.

### 2. Určení tepelné energie potřebné pro ohřev vody na 60 °C:

- Do kalorimetru nalijte vlažnou vodu o hmotnosti  $m$ . Minimální hmotnost pro ponoření topné spirály činí přibližně 130 g. Optimální hmotnost 150 g.
- Kalorimetr uzavřete a změřte teplotu  $\vartheta_0$ .
- Kalorimetr připojte ke zdroji. Zapněte zdroj a na proudovém výstupu nastavte proud  $I = 3$  A (poznamenejte si napětí  $U$  zdroje).
- Odečtěte proud  $I$  a napětí  $U$  zdroje, stanovte výkon  $P$  topné spirály a teoretickou dobu ohřevu  $\tau$  potřebnou pro ohřev zvoleného množství vody z teploty  $\vartheta_0$  na teplotu 60 °C.
- Za stálého míchání odečítejte v průběhu času hodnoty teploty vody v kalorimetru až do dosažení ohřevu vody na požadovaných 60 °C.
- Po dosažení požadovaného ohřevu vypněte zdroj a nastavte proudový i napěťový výstup na minimum.
- Naměřené hodnoty vynesete do grafu a zjistíte, zda je průběh ohřevu lineární. Zdůvodněte, proč trend vzrůstu teploty s rostoucí teplotou klesá. Vycházejte z rovnice přestupu tepla (8).
- Stanovte poměr mezi teoreticky stanoveným množstvím tepla a skutečným množstvím tepla potřebným k ohřevu vody na 60 °C a vysvětlete příčiny rozdílných hodnot.

### 3. Zhodnocení tepelných ztrát kalorimetru:

- Vodu ohřátou v předchozí úloze ponechte v uzavřeném kalorimetru.
- Za občasného míchání odečítejte po dobu cca 10 min. teplotu vody v kalorimetru.
- Spočítejte, o jaké množství naakumulované tepelné energie voda v kalorimetru přijde po 10 minutách (udejte v J, Wh a procentech původně akumulované tepelné energie). Pro výpočet využijte vztahu (3).
- Vyhodnoťte vhodnost tohoto zařízení pro uchovávání tepelné energie. V případě neuspokojivých výsledků navrhněte vhodná opatření pro zamezení tepelných ztrát. Vycházejte z rovnice (8).

#### 4. Ohřev vody s parafinovými polštářky na 60 °C:

- a) Do kalorimetru nalijte vodu a vložte parafinový polštárek (polštárek vložte tak aby se nedotýkal topné spirály). Celkovou hmotnost systému voda/parafin nastavte stejnou jako v úloze 2 výše.
- b) Kalorimetr uzavřete tak, aby polštářky byly z obou stran topné spirály umístěné v ose s teploměrem (dbejte zvýšené opatrnosti pro zamezení poškození spirály). Změřte počáteční teplotu  $\vartheta_{p0}$ .
- c) Kalorimetr připojte ke zdroji, zapněte zdroj a na proudovém výstupu nastavte shodný proud jako při ohřevu vody ( $I = 3 \text{ A}$ , poznamenejte si napětí  $U$  zdroje).
- d) Za stálého míchání odečítejte v průběhu času hodnoty teploty vody v kalorimetru až do dosažení ohřevu vody s parafinovým polštářkem na požadovaných 60 °C.
- e) Naměřené hodnoty vynesete do společného grafu s průběhem teploty ohřevu vody a zjistíte, zda je průběh ohřevu lineární. Pokud průběhy lineární nejsou, objasněte příčinu daného jevu na základě rovnice přestupu tepla (8).
- f) Porovnejte mezi sebou jednotlivé průběhy a doby ohřevu a poznatky diskutujte. Zdůvodněte, proč při tání parafinu není konstantní teplota a dochází k jejímu nárůstu.

## 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-sezonni-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] CONATEX učební pomůcky. *conatex.cz* [on-line] Dostupné z: <https://www.conatex.cz/start>.
- [10] Pokus s octanem sodným (Chemický krápník, Horký led). *studiumchemie.cz* [on-line]. Dostupné z: <http://www.studiumchemie.cz/pokus.php?id=110>.
- [11] Měrná tepelná kapacita. *edu.techmania.cz* [on-line]. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie-struktura-latek/merna-tepelna-kapacita>.
- [12] 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>.