



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

TVORBA LABORATORNÍCH ÚLOH PRO PŘEDMĚT VYBRANÉ PARTIE Z OBNOVITELNÝCH ZDROJŮ A UKLÁDÁNÍ ENERGIE

CREATION OF LABORATORY TASKS FOR SELECTED TOPICS FROM RENEWABLE ENERGY SOURCES
AND ENERGY STORAGE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Lukáš Vaněček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.

BRNO 2017



Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektrotechnická výroba a materiálové inženýrství**

Ústav elektrotechnologie

Student: Bc. Lukáš Vaněček

ID: 115305

Ročník: 2

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Tvorba laboratorních úloh pro předmět Vybrané partie z obnovitelných zdrojů a ukládání energie

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Vytvořte kompletní laboratorní úlohy včetně teoretického rozboru a detailního popisu postupu na téma ukládání tepelné energie ve formě citelného tepla i s využitím změny skupenství. Pro tvorbu laboratorní úlohy využijte zakoupených výukových pomůcek.

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 25.5.2017

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Obsahem diplomové práce je vytvořená kompletní laboratorní úloha na téma ukládání tepelné energie s využitím změny skupenství pro předmět Vybrané partie z obnovitelných zdrojů a ukládání energie.

První část práce nastiňuje teoretickou stránku problematiky ukládání energie, základní pojmy a vztahy potřebné pro absolvování laboratorního cvičení. Součástí je i vypracovaný postup dílčích úkolů pro absolvování měření v laboratoři.

Druhá část práce se věnuje naměření a vyhodnocení dat získaných dle postupu uvedeného v první části a jsou zde uvedeny i různé varianty, se kterými se v průběhu vytváření postupu uvažovalo.

V závěrečné fázi je popsáno vybavení laboratorní úlohy potřebné k absolvování cvičení a uveden vzorově vypracovaný protokol.

KLÍČOVÁ SLOVA

teplo, citelné teplo, latentní teplo, tepelná kapacita, kalorimetr, skupenství, podchlazená kapalina

ABSTRACT

This master's thesis contains a comprehensive laboratory task about saving a heat energy with a use of changing a state of matter. The thesis is written for the object Chosen passages of renewable resources and saving a heat energy.

Part one presents a theoretical part of the topic, terminology and relations needed to make this laboratory work. It also contains a created procedure of partial tasks necessary to take laboratory measurements.

The second part of the thesis is about measuring and evaluation of acquired values according to procedure described in the theoretical part of the thesis. Different variations considered during the creation of measuring procedure are also named here.

The final part of the thesis describes a laboratory equipment necessary to complete the task and an example of filled protocol is attached.

KEYWORDS

heat, sensible heat, latent heat, thermal capacity, calorimeter, state of matter, supercooled liquid

VANĚČEK, L. *Tvorba laboratorních úloh pro předmět Vybrané partie z obnovitelných zdrojů a ukládání energie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 42 s. Vedoucí semestrální práce doc. Ing. Petr Bača, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Tvorba laboratorních úloh pro předmět Vybrané partie z obnovitelných zdrojů a ukládání energie jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. ing. Petru Bačovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

Obsah

1	Úvod.....	8
2	Teoretický rozbor	9
2.1	Teplo.....	9
2.2	Tepelná kapacita	9
2.3	Skupenské teplo	10
2.4	Kalorimetrická rovnice	11
2.5	Akumulace tepelné energie	12
3	Laboratorní cvičení	17
3.1	Stanovení tepelné kapacity kalorimetru:	17
3.2	Určení tepelné energie potřebné pro ohřev vody na 75 °C:	17
3.3	Ohřev vody s octanovými polštářky na 75 °C:.....	17
3.4	Čerpání tepelné energie z octanových polštářků:	18
4	Naměřené hodnoty	19
4.1	Tepelná kapacita kalorimetru	19
4.2	Ohřev vody v kalorimetru na 75 °C:	20
4.3	Ohřev vody s octanovými polštářky na 75 °C:.....	22
4.4	Čerpání tepelné energie z octanových polštářků:	24
4.5	Kalorimetr Conatex	25
5	Laboratorní vybavení	28
6	Vzorově vypracovaný protokol.....	30
7	Závěr.....	38
	Seznam použité literatury.....	39
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	40
	Seznam obrázků	41
	Seznam tabulek	42

1 Úvod

Termín ukládání tepelné energie bývá v posledních letech, nejen v souvislosti s využíváním obnovitelných zdrojů, skloňován stále častěji. Tepelnou energii lze uskladnit v době jejího přebytku do vhodných zásobníků a následně ji odebrat v době jejího nedostatku či zvýšené potřeby. Dle zvolené akumulační látky se jedná o akumulaci citelného tepla, latentního tepla nebo akumulaci jiné podstaty, např. chemickými procesy nebo absorpcí vodní páry. Zmíněných procesů se využívá v závislosti na požadovaných teplotních podmínkách, velikosti ukládaného tepla, technologické náročnosti a v neposlední řadě i s ohledem na finanční náročnost zvoleného řešení.

2 Teoretický rozbor

2.1 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]

2.2 Tepelná kapacita

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

$$dQ = C \cdot dT$$
$$C = \frac{dQ}{dT} \quad (2.1)$$

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

$$c = \frac{C}{m}. \quad (2.2)$$

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	1650
olej transformátorový	1,890	-
voda	4,180	332,4
octan sodný - trihydrát	2,820	269

Tab. 2.1 Měrná tepelná kapacita při 20 °C a měrné skupenské teplo tání vybraných látek. [4], [5]

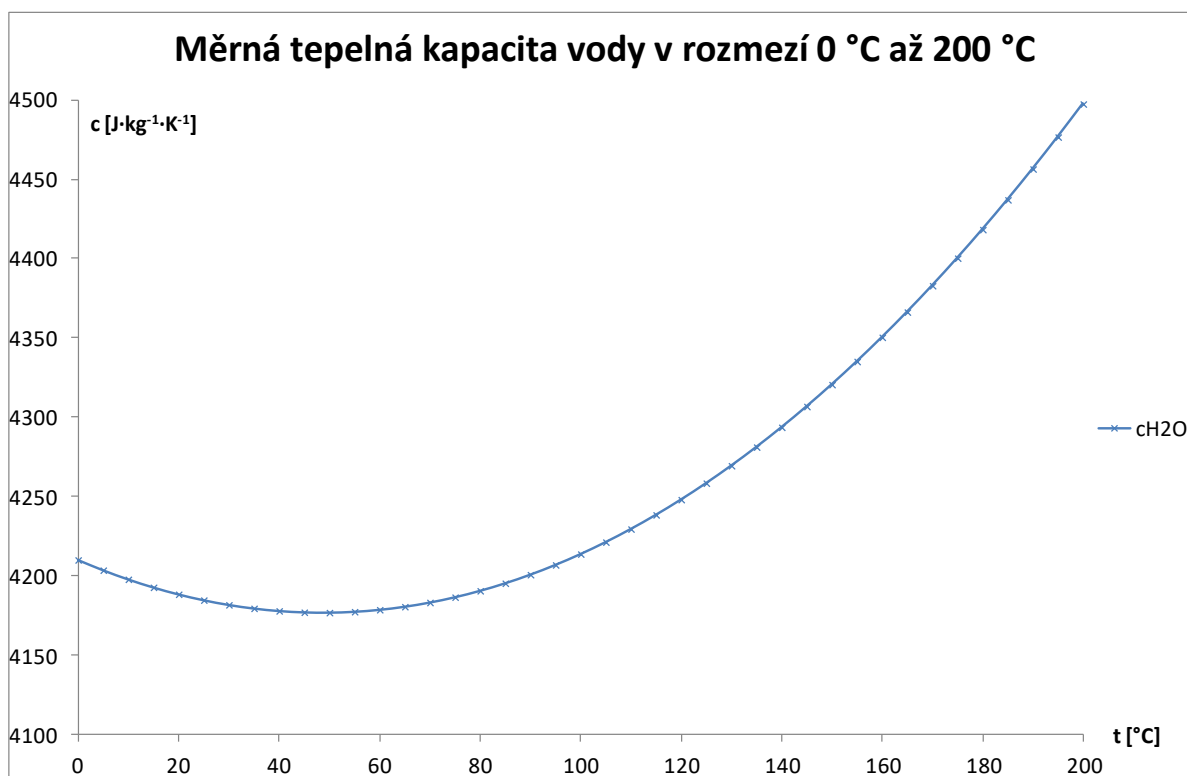
Ze vztahů (2.1) a (2.2) lze vyjádřit teplo Q potřebné k dodání nebo odebrání tělesu o hmotnosti m s definovanou měrnou tepelnou kapacitou c o požadovanou změnu teploty ΔT :

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T. \quad (2.3)$$

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 . [13]

Měrnou tepelnou kapacitu vody lze v rozmezí teplot $t = 0$ °C ÷ 200 °C popsat rovnicí: [14]

$$c_{H_2O} = 4210 - 1,363 \cdot t + 0,014 \cdot t^2 \quad (2.4)$$



Obr. 2.1 Graf závislosti měrné tepelné kapacity vody na teplotě dle rovnice (2.4).

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

$$\bar{C} = \frac{Q}{\Delta T} = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} = \frac{Q}{m \cdot (T_2 - T_1)}, \quad (2.5)$$

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.

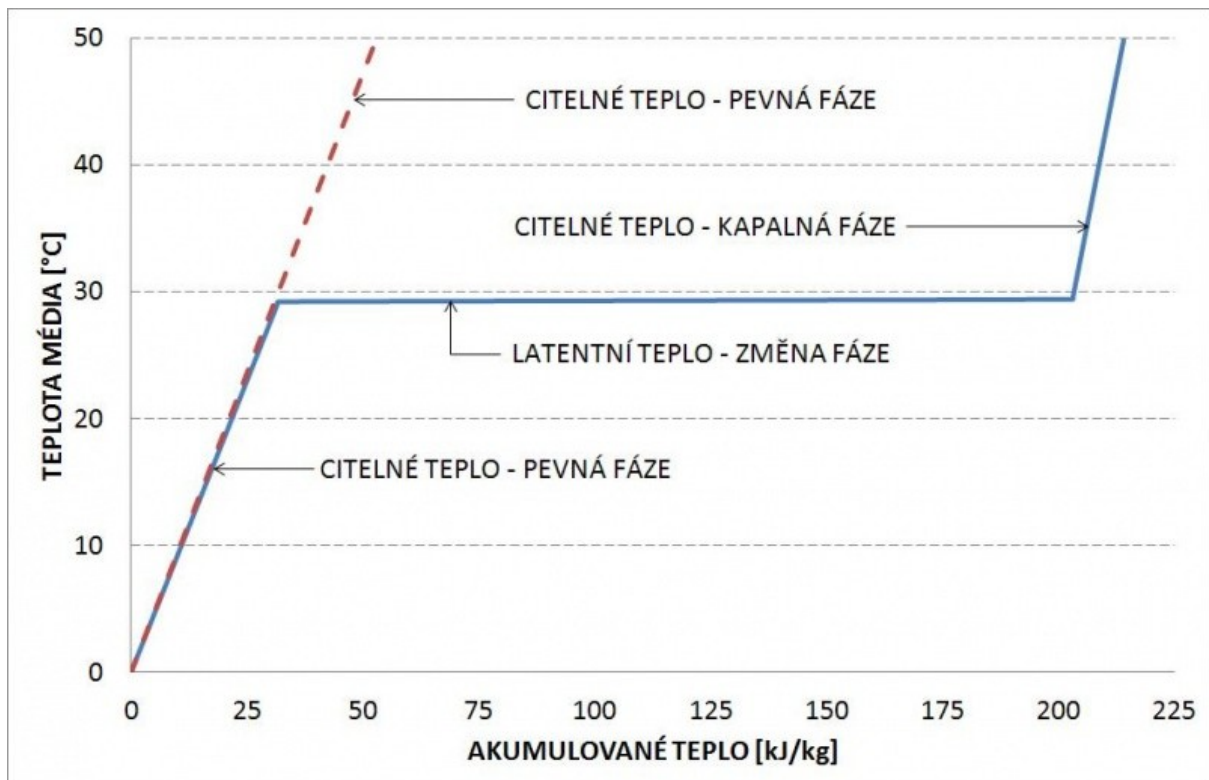
2.3 Skupenské teplo

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:

$$l = \frac{L}{m}. \quad (2.6)$$

Podle fázové změny skupenství rozlišujeme:

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



Obr. 2.2 Porovnání citelného a latentního tepla. [7]

2.4 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:

$$Q_h = Q_c + Q_k$$

$$m_h \cdot c_h \cdot (T_h - T) = m_c \cdot c_c \cdot (T - T_c) + C_k \cdot (T - T_c), \quad (2.7)$$

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:

$$Q = \lambda \cdot \frac{S}{d} \cdot \Delta T, \quad (2.8)$$

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 dotápením 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:

$$Q = E = P \cdot \tau = U \cdot I \cdot \tau = R \cdot I^2 \cdot \tau = \frac{U^2}{R} \cdot \tau \quad (2.9)$$

$$[Q] = 1J = 1W \cdot s$$

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 $1 s$. Častějším vyjádřením velikosti energie může být $1 kWh = 3,6 \cdot 10^6 J = 3,6 MJ$.

2.5 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 odebrání tepelné energie. Nejvyužívanější látkou pro akumulaci citelného tepla je voda, její jednoznačnou výhodou je největší měrná tepelná kapacita ($c_{20} = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) 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 $55 \div 65 \text{ }^\circ\text{C}$), 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 např.:

parafíny (alkany $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ 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 ($\text{NaCH}_3\text{CO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$; $l_t = 269 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; $t_{\text{tání}} = 58 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_{\text{tuhnutí}} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$). [5], [6], [12]

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, 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 akumulacích 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 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 $t_t = 58\text{ }^\circ\text{C}$. [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:

$$\begin{aligned} q_{n1} &= c_{o,p} \cdot (T_t - T_p) + l_t + c_{o,k} \cdot (T_k - T_t) = \\ &= 2,82\text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot ((58 + 273,15) - (25 + 273,15))\text{K} + 265\text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} + \\ &+ 3,05\text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot ((65 + 273,15) - (58 + 273,15))\text{K} = 379,41\text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \end{aligned} \quad (2.10)$$

Druhá fáze nabíjení zásobníku spočívá v podchlazení kapalně trihydrátu octanu sodného na teplotu okolí (návrhových $25\text{ }^\circ\text{C}$), tomu odpovídá odebrané množství tepla q_{n2} o velikosti:

$$\begin{aligned} q_{n2} &= c_{o,k} \cdot (T_p - T_k) = 3,05\text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot ((25 + 273,15) - (65 + 273,15))\text{K} = \\ &= -122\text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \end{aligned} \quad (2.11)$$

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

$$q_u = q_{n1} + q_{n2} = 379,41\text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 122\text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} = 257,41\text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}. \quad (2.12)$$

Toto množství tepla je již trvale uloženo a nedochází k jeho poklesu, neboť teplota akumulacní látky a teplota okolí je shodná. Odvedené teplo potřebné k podchlazení lze také využít. Princip ukládání energie do octanu sodného je zobrazen na Obr. 2.3.

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

$$\begin{aligned} q_{H_2,0} &= c_{20} \cdot (T_k - T_p) = 4,18kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1} \cdot ((65 + 273,15) - (25 + 273,15))K = \\ &= 167,2kJ \cdot kg^{-1} \end{aligned} \quad (2.13)$$

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 vybití 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 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ na teplotu $58 \text{ }^\circ\text{C}$ odpovídající skupenské změně:

$$\begin{aligned} q_{u,t} &= c_{o,p} \cdot (T_t - T_p) = 2,82kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1} \cdot ((58 + 273,15) - (25 + 273,15))K = \\ &= 93,06kJ \cdot kg^{-1} \end{aligned} \quad (2.14)$$

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

$$q_{u,c} = q_u - q_{u,t} = 257,41kJ \cdot kg^{-1} - 93,06kJ \cdot kg^{-1} = 164,35kJ \cdot kg^{-1} \quad (2.15)$$

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

$$\begin{aligned} q_t &= c_{o,p} \cdot (T_t - T_n) = 2,82kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1} \cdot ((58 + 273,15) - (35 + 273,15))K = \\ &= 64,86kJ \cdot kg^{-1} \end{aligned} \quad (2.16)$$

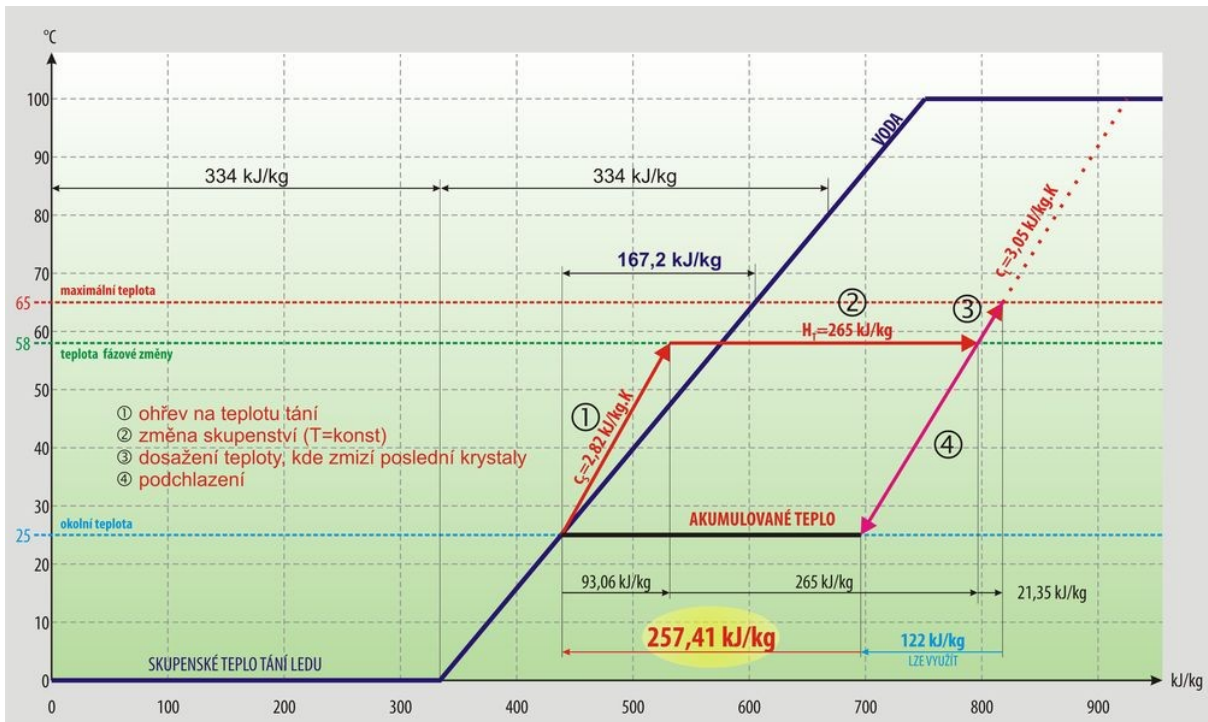
Princip čerpání energie z octanu sodného je patrný z Obr. 2.4.

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 $58 \text{ }^\circ\text{C}$, musíme dosáhnout teploty $65 \text{ }^\circ\text{C}$ pro úplné rozpuštění krystalů, tomu odpovídá dodané teplo o velikosti:

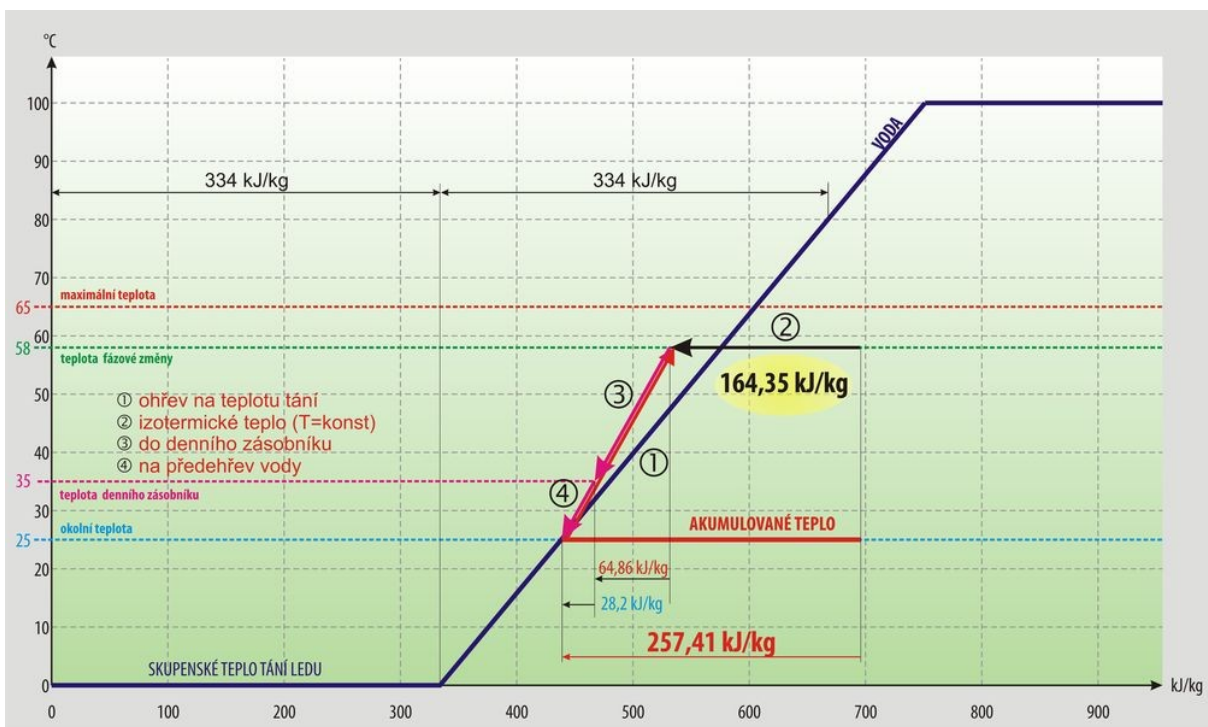
$$\begin{aligned} q_{tání} &= l_t + c_{o,k} \cdot (T_k - T_t) = \\ &= 265kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1} + 3,05kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1} \cdot ((65 + 273,15) - (58 + 273,15))K = \\ &= 286,35kJ \cdot kg^{-1} \end{aligned} \quad (2.17)$$

Pro vyvolání krystalizace látky je nutno dosáhnout teploty nejvýše $58 \text{ }^\circ\text{C}$, tj. musíme odebrat teplo potřebné pro dosažení $65 \text{ }^\circ\text{C}$. Při tuhnutí je pak uvolněno teplo o velikosti nejvýše $265 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, tj. při nepodchlazení kapalného trihydrátu octanu sodného.

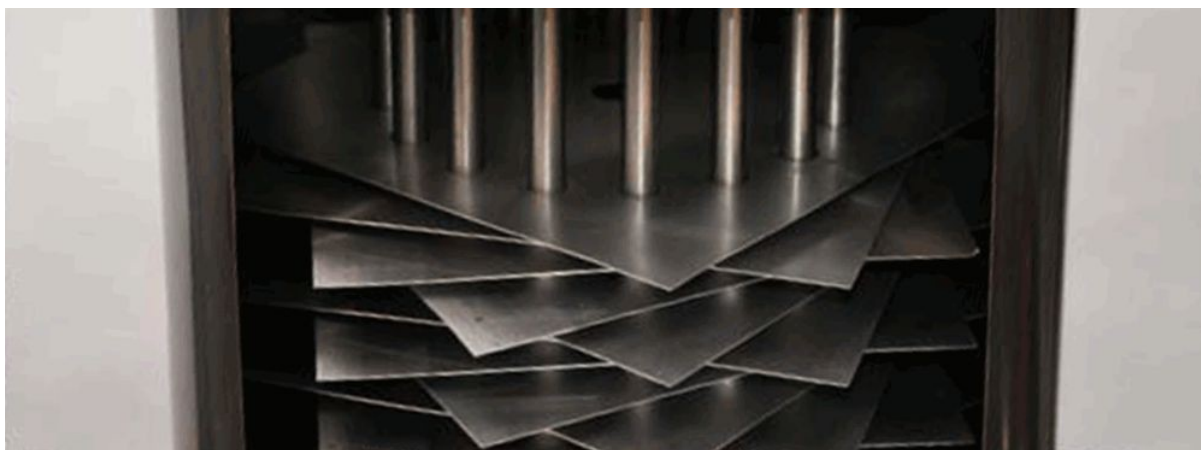
Experimentálně je prokázáno, že výše zmíněný proces ukládání tepelné energie, při změně fáze, probíhá lépe u menších výměníků, přičemž u výměníků o hmotnosti tepelně-akumulační látky nad 250 kg může být tento proces již nestabilní. Opakovatelnost tohoto procesu v dlouhodobém horizontu již není spolehlivá.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



Obr. 2.3 Princip ukládání tepelné energie do trihydrátu octanu sodného v porovnání s vodou. [5]



Obr. 2.4 Princip čerpání tepelné energie z trihydrátu octanu sodného. [5]



Obr. 2.5 Vnitřní uspořádání výměníku tepla využívajícího ukládání tepelné energie do trihydrátu octanu sodného. [5]

3 Laboratorní cvičení

3.1 Stanovení tepelné kapacity kalorimetru:

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

- Pro potřeby měření volte hmotnost vody m_c a m_h přibližně shodnou, celkově v rozmezí $0,7 \div 1,0$ kg.
- Naplňte kalorimetr chladnější vodou o hmotnosti m_c , ponechte ustálat 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 poté 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 (2.7).
- Výslednou hodnotu tepelné kapacity kalorimetru C_k konzultujte s vyučujícím.

3.2 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 dle bodu 3.1).
- 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 (2.7) a (2.9).
- 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, vysvětlete čím je to způsobeno. Vycházejte z rovnice přestupu tepla (2.8).
- Stanovte poměr mezi teoreticky stanoveným množstvím tepla a skutečným množstvím tepla potřebným k ohřevu vody na 75 °C a zdůvodněte rozdílnost hodnot.

3.3 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 bodě 3.2 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} .

- c) Kalorimetr připojte ke zdroji, napěťový výstup nastavte na maximum, proudový výstup na minimum. Zapněte zdroj a na proudovém výstupu nastavte shodný proud jako v bodě 3.2 tohoto postupu.
- d) Při ohřevu vody s octanovými polštářky je nutné neustálé míchání z důvodu rovnoměrného prohřívání systému! Teplotu a čas odečítejte obdobně jako v bodě 3.2 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. 2.3 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.

3.4 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 (2.15) a (2.16). 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.

4 Naměřené hodnoty

Veškerá měření probíhala s kalorimetrem zakoupeným u firmy Helago.

4.1 Tepelná kapacita kalorimetru

Tepelná kapacita kalorimetru byla stanovena na základě několika měření. Byly naměřeny tyto hodnoty:

číslo měření	m_c [kg]	t_c [°C]	m_h [kg]	t_h [°C]	t [°C]	C_k [J·K ⁻¹]
1	0,453	21	0,411	81	48	206,213
2	0,545	18	0,248	83	37	231,660
3	0,609	32	0,277	76	45	215,431
4	0,495	23	0,580	78	51	268,714
5	0,440	23	0,356	79	47	144,907
6	0,479	22	0,410	81	48	172,988
7	0,421	24	0,380	69	44	225,720

Tab. 4.1 Naměřené hodnoty pro stanovení tepelné kapacity kalorimetru.

Příklad výpočtu dle rovnice (2.7):

$$\begin{aligned}
 C_k &= \frac{m_h \cdot c_h \cdot (T_h - T)}{(T - T_c)} - m_c \cdot c_c = \\
 &= \frac{0,411 \text{ kg} \cdot 4180 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot ((81 + 273,15) \text{ K} - (48 + 273,15) \text{ K})}{((48 + 273,15) \text{ K} - (21 + 273,15) \text{ K})} - \\
 &- 0,453 \text{ kg} \cdot 4180 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} = \\
 &= 206,213 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}
 \end{aligned}$$

Střední hodnota tepelné kapacity kalorimetru:

$$\begin{aligned}
 \overline{C_k} &= \frac{\sum C_k}{n} = \frac{206,213 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} + 231,660 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} + 215,431 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} + 268,714 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}}{7} + \\
 &+ \frac{144,907 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} + 172,988 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} + 225,720 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}}{7} = 209,376 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}
 \end{aligned}$$

Střední hodnota tepelné kapacity kalorimetru vychází na základě 7 měření 209,376 J·K⁻¹. Pro další měření je velmi důležité přesně odečíst hodnoty jednotlivých teplot. Jak si ukážeme na příkladu měření číslo 1, tak kdybychom odečetli hodnotu teploty po ustálení $t = 47$ °C, tepelná kapacita kalorimetru by vyšla:

$$\begin{aligned}
 C_k &= \frac{m_h \cdot c_h \cdot (T_h - T)}{(T - T_c)} - m_c \cdot c_c = \\
 &= \frac{0,411 \text{ kg} \cdot 4180 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot ((81 + 273,15) \text{ K} - (47 + 273,15) \text{ K})}{((47 + 273,15) \text{ K} - (21 + 273,15) \text{ K})} - \\
 &- 0,453 \text{ kg} \cdot 4180 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} = \\
 &= 353,049 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}
 \end{aligned}$$

Obdobně při teplotě $t = 49\text{ °C}$ vychází tepelná kapacita kalorimetru $C_k = 69,866\text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$. Pro další měření by tento rozdíl již značně vstupoval do výpočtů a zkresloval teoreticky stanovené hodnoty tepla potřebného pro ohřev. Tyto poznatky platí i pro teploty t_c a t_h .

4.2 Ohřev vody v kalorimetru na 75 °C:

Při vytváření postupu pro laboratorní cvičení byla provedena 2 měření s cílem optimalizovat návod z hlediska časové náročnosti a také s ohledem na minimální objem, resp. hmotnost vody v kalorimetru při další úloze s octanovými polštářky.

Při realizovaném měření ohřevu vody na teplotu 75 °C byl, se vzorkováním po 2 °C odečítán čas potřebný pro dosažení cílové teploty.

$t_{\text{H}_2\text{O}}\text{ [°C]}$	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48
$\tau_1\text{ [min:s]}$	0:00	1:20	2:40	3:55	5:10	6:25	7:40	9:00	10:20	11:40	13:00	14:15	15:35
$\tau_2\text{ [min:s]}$	0:00	1:15	2:25	3:45	5:00	6:15	7:30	8:45	10:00	11:15	12:35	13:50	15:05
$t_{\text{H}_2\text{O}}\text{ [°C]}$	50	52	54	56	58	60	62	64	66	68	70	72	75
$\tau_1\text{ [min:s]}$	17:00	18:15	19:40	21:05	22:30	23:50	25:15	26:40	28:05	29:35	31:00	32:25	34:40
$\tau_2\text{ [min:s]}$	16:25	17:45	19:10	20:25	21:50	23:15	24:40	26:00	27:25	28:50	30:15	31:40	33:50

Tab. 4.2 Průběh teploty vody v kalorimetru v čase.

První měření probíhalo s hmotností vody $m_1 = 0,610\text{ kg}$, při teplotě $t_{1,0} = 24\text{ °C}$ byl zahájen odečet teploty a času v průběhu ohřívání. Parametry zdroje při ohřevu činily $U_1 = 15,9\text{ V}$ a $I_1 = 4,48\text{ A}$.

Teoretická doba ohřevu vody $\tau_{ov,1}$ na $t_{1,k} = 75\text{ °C}$ dle vztahů (2.7) a (2.9) činí:

$$\begin{aligned}
 Q_{t,1} &= m_1 \cdot c \cdot (T_{1,K} - T_{1,0}) + \overline{C}_k \cdot (T_{1,K} - T_{1,0}) = \\
 &= 0,610\text{ kg} \cdot 4180\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot ((75 + 273,15)\text{ K} - (24 - 273,15)\text{ K}) + \\
 &+ 209,376\text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot ((75 + 273,15)\text{ K} - (24 - 273,15)\text{ K}) = 140717,976\text{ J}
 \end{aligned}$$

$$P_1 = U_1 \cdot I_1 = 15,9\text{ V} \cdot 4,48\text{ A} = 71,232\text{ W}$$

$$Q_{t,1} = P_1 \cdot \tau_{ov,1}$$

$$\tau_{ov,1} = \frac{Q_{t,1}}{P_1} = \frac{140717,976\text{ J}}{71,232\text{ W}} = 1976\text{ s} = 32\text{ min } 56\text{ s}$$

Druhé měření probíhalo s hmotností vody $m_2 = 0,580\text{ kg}$, při teplotě $t_{2,0} = 24\text{ °C}$ byl zahájen odečet teploty a času v průběhu ohřívání. Parametry zdroje při ohřevu činily $U_2 = 15,8\text{ V}$ a $I_2 = 4,43\text{ A}$.

Teoretická doba ohřevu vody $\tau_{ov,2}$ na $t_{2,k} = 75\text{ °C}$ dle vztahů (2.7) a (2.9) činí:

$$\begin{aligned}
 Q_{t,2} &= m_2 \cdot c \cdot (T_{2,K} - T_{2,0}) + \overline{C}_k \cdot (T_{2,K} - T_{2,0}) = \\
 &= 0,580\text{ kg} \cdot 4180\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot ((75 + 273,15)\text{ K} - (24 - 273,15)\text{ K}) + \\
 &+ 209,376\text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot ((75 + 273,15)\text{ K} - (24 - 273,15)\text{ K}) = 134322,576\text{ J}
 \end{aligned}$$

$$P_2 = U_2 \cdot I_2 = 15,8\text{ V} \cdot 4,43\text{ A} = 69,994\text{ W}$$

$$Q_{t,2} = P_2 \cdot \tau_{ov,2}$$

$$\tau_{ov,2} = \frac{Q_{t,2}}{P_2} = \frac{134322,576\text{ J}}{69,994\text{ W}} = 1919\text{ s} = 31\text{ min } 59\text{ s}$$

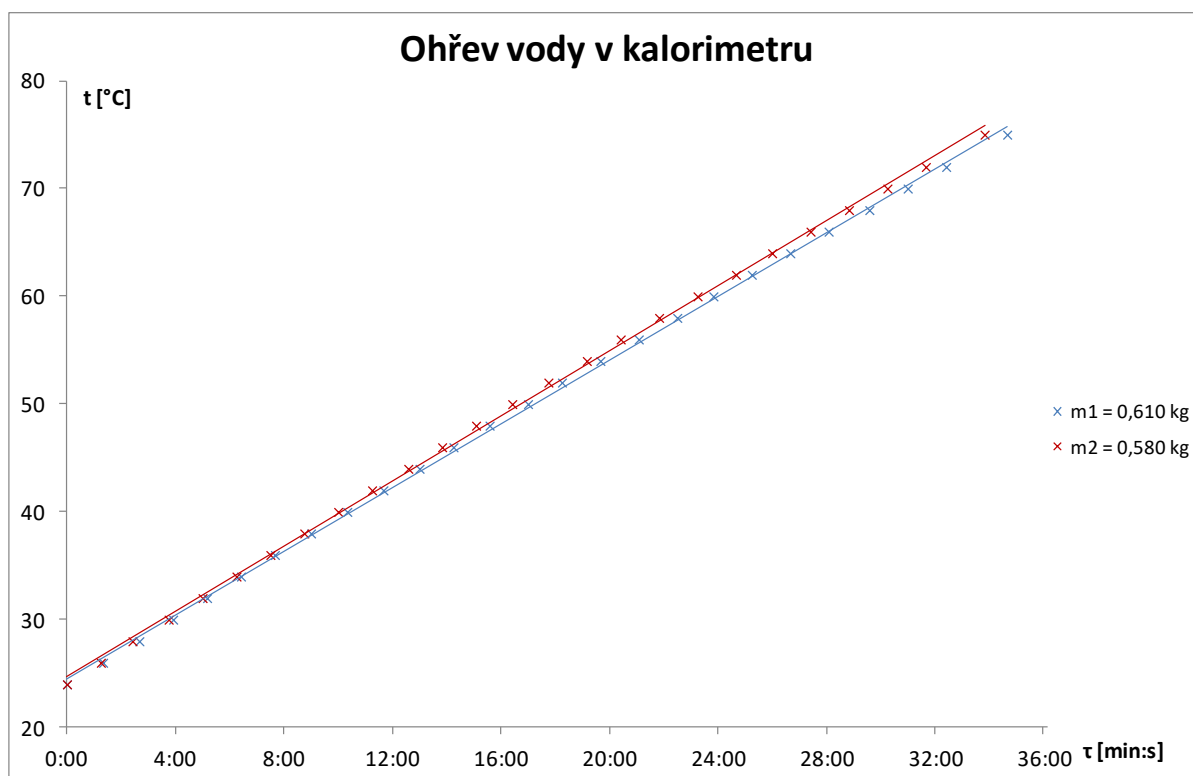
Ohřev vody v kalorimetru probíhal v obou případech z výchozí teploty $t_0 = 24\text{ °C}$ na koncových $t_k = 75\text{ °C}$. Hmotnost ohřívané vody se jen nepatrně lišila a při výkonu topné spirály $P_1 = 71,232\text{ W}$ činila doba ohřevu 34 minut 40 sekund, ve druhém případě s výkonem topné spirály $P_2 = 69,994\text{ W}$ 33 minut 50 sekund.

Porovnáním teoretické a skutečné doby ohřevu zjistíme účinnost kalorimetru η :

$$\eta_{t,1} = \frac{\tau_{ov,1}}{\tau_1} = \frac{1976s}{(34 \cdot 60 + 40)s} = 0,95 = 95\%$$

$$\eta_{t,2} = \frac{\tau_{ov,2}}{\tau_2} = \frac{1919s}{(33 \cdot 60 + 50)s} = 0,973 = 97,3\%$$

Jak je patrné, tak výsledná hodnota účinnosti kalorimetru dosahuje výborných hodnot. Kalorimetr z hlediska potřeb laboratorního cvičení vykazuje nízké ztráty tepelné energie. Při přípravě laboratorního cvičení byla ponechána v prvním měřeném případě ohřátá voda o hmotnosti $m_1 = 0,610\text{ kg}$ a teplotě $t_{l,k} = 75\text{ °C}$ v kalorimetru po dobu 1 hodiny a byl sledován pokles teploty, který činil za tuto dobu cca 3 °C . Z tohoto důvodu není stanovení tepelných ztrát kalorimetru zařazeno do laboratorního postupu, neboť čas vynaložený této úloze by byl v porovnání s přínosem diskutabilní.



Obr. 4.1 Graf průběhů teploty vody v kalorimetru.

Z grafu je patrný lineární nárůst teploty v celém vyšetřovaném průběhu teplot, což by potvrdzovalo předpoklad dobré tepelné izolace kalorimetru. V případě špatné tepelné izolace kalorimetru by se doba potřebná pro ohřev vody v kalorimetru o teplotní rozdíl 2 °C prodlužovala s rostoucí teplotou, dle rovnice (2.8) by se zvyšovalo Δt a zvyšovaly by se tepelné ztráty do okolí.

4.3 Ohřev vody s octanovými polštářky na 75 °C:

Další částí laboratorní úlohy je sledování procesu ukládání tepelné energie do octanu sodného spojeným se změnou skupenství z pevného na kapalné. Pro potřeby úlohy jsou zapotřebí 2 polštářky s octanem sodným v pevném skupenství, hmotnost 2 polštářků je $m_p = 0,132$ kg. Pro porovnání s ohřevem čisté vody volíme hmotnost náplně kalorimetru stejnou jako v předchozí úloze a kalorimetr doplníme vodou. Při celkové hmotnosti 0,6 kg jsou polštářky s octanem zcela ponořeny ve vodě a doba potřebná pro ohřev je, jak bude patrné z dalších měření, přijatelná.

Měření bylo provedeno pro 3 hmotnosti systému voda/octan, 2 hodnoty odpovídají předchozímu měření dle bodu 4.2, tj. $m_1 = 0,612$ kg a $m_3 = 0,580$ kg. Další měření s celkovou hmotností $m_2 = 0,705$ kg bylo provedeno pro ověření delší časové náročnosti, přičemž ke každému měřenému času je nutno připočítat několik minut pro přípravu výchozího stavu dané úlohy.

Při realizovaném měření ohřevu vody na teplotu 75 °C byl, se vzorkováním po 2 °C odečítán čas potřebný pro dosažení cílové teploty.

$t_{\text{octan}} [^{\circ}\text{C}]$	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48
τ_1 [min:s]	0:00	1:10	2:20	3:30	4:35	5:45	6:55	8:10	9:25	10:40	12:00	13:15	14:40
τ_2 [min:s]	0:00	1:20	2:40	4:05	5:30	6:50	8:10	9:40	11:00	12:25	13:50	15:20	16:55
τ_3 [min:s]	0:00	1:05	2:10	3:15	4:25	5:35	6:45	8:00	9:10	10:25	11:40	12:55	14:15
$t_{\text{octan}} [^{\circ}\text{C}]$	50	52	54	56	58	60	62	64	66	68	70	72	75
τ_1 [min:s]	16:00	17:20	18:50	20:20	22:00	23:50	25:40	27:20	29:10	31:00	33:00	34:40	37:10
τ_2 [min:s]	18:30	20:05	21:40	23:15	25:25	27:15	29:25	31:20	33:20	35:20	37:30	39:25	41:20
τ_3 [min:s]	15:40	17:00	18:30	20:00	21:30	23:20	25:10	27:00	28:50	30:45	32:30	34:10	36:35

Tab. 4.3 Průběh teploty octanových polštářků a vody v kalorimetru v čase.

První měření probíhalo s hmotností octanových polštářků $m_p = 0,132$ kg a vody $m_{1,v} = 0,480$ kg, při teplotě $t_{1,0} = 24$ °C byl zahájen odečet teploty a času v průběhu ohřívání. Parametry zdroje při ohřevu činily $U_1 = 15,9$ V a $I_1 = 4,48$ A.

Teplo potřebné pro ohřev octanových polštářků, vody a kalorimetru na teplotu $t_{1,k} = 75$ °C stanovíme dle rovnice (2.7) a (2.10):

$$\begin{aligned}
 Q_{1o,1} &= m_p \cdot [c_{o,p} \cdot (T_t - T_{1,0}) + l_t + c_{o,k} \cdot (T_{1,k} - T_t)] + m_{1,v} \cdot c \cdot (T_{1,k} - T_{1,0}) + C_k \cdot (T_{1,k} - T_{1,0}) = \\
 &= 0,132 \text{ kg} \cdot \left\{ 2820 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot [(58 + 273,15) \text{ K} - (24 + 273,15)] + 265000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \right\} + \\
 &+ 0,480 \text{ kg} \cdot 4180 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot [(75 + 273,15) \text{ K} - (24 + 273,15) \text{ K}] + \\
 &+ 209,376 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot [(75 + 273,15) \text{ K} - (24 + 273,15) \text{ K}] = 167484,936 \text{ J}
 \end{aligned}$$

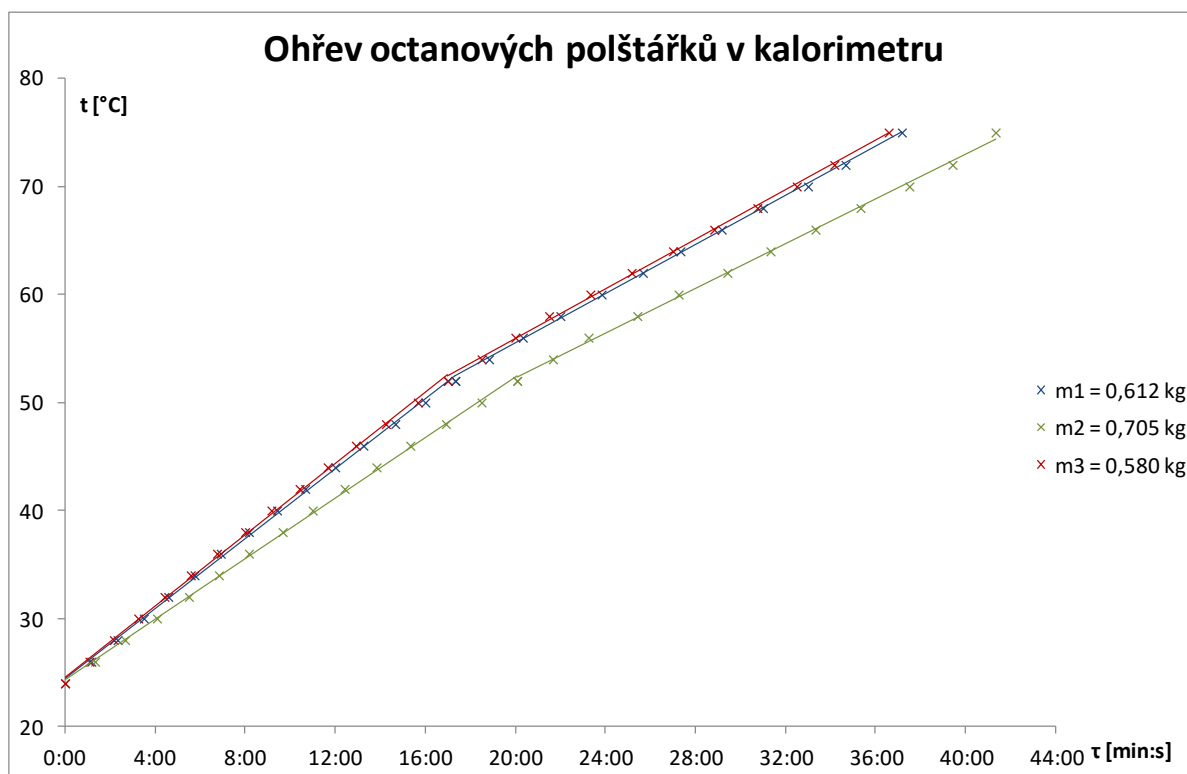
Teoretická doba ohřevu pro první měření je dle rovnice (2.9):

$$P_1 = U_1 \cdot I_1 = 15,9 \text{ V} \cdot 4,48 \text{ A} = 71,232 \text{ W}$$

$$Q_{p,1} = P_1 \cdot \tau_{p,1}$$

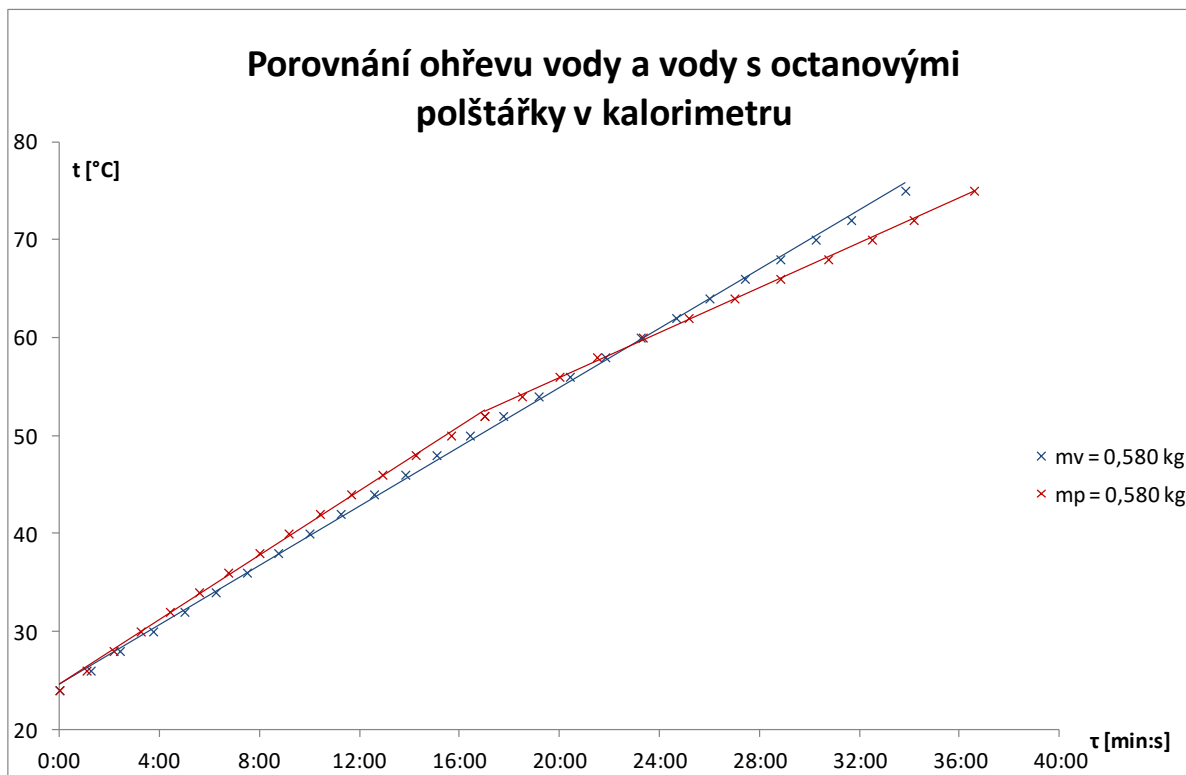
$$\tau_{p,1} = \frac{Q_{p,1}}{P_1} = \frac{167484,936 \text{ J}}{71,232 \text{ W}} = 2351 \text{ s} = 39 \text{ min } 11 \text{ s}$$

Z uvedeného výpočtu je patrné, že teoretická doba je delší než skutečná měřená doba 37 minut 10 sekund. Možnými příčinami tohoto jevu je stanovená tepelná kapacita kalorimetru, jak již bylo zmíněno dříve. Další možností je nahřátí kalorimetru při předchozím měření ohřevu vody a tím pádem i nižší potřeba tepla pro ohřev tělesa kalorimetru. Celková hmotnost nádoby kalorimetru je 0,83 kg, vnitřní část kalorimetru je zhotovena ze skla. Tyto důvody tedy mohou přispívat k danému jevu. Abychom toto eliminovali, museli bychom jednotlivá měření provádět s delším časovým odstupem a s větší hmotností vody, resp. vody s octanovými polštářky. Časové nároky výuky toto řešení neumožňují, a proto není tento výpočet zařazen do laboratorního cvičení.



Obr. 4.2 Graf průběhů ohřevu octanových polštářků s vodou v kalorimetru.

Na grafu znázorňujícím naměřené průběhy ohřevu octanových polštářků ve vodní lázni v kalorimetru je patrná změna trendu nárůstu teploty. Toto je způsobeno změnou skupenství octanu sodného z pevného na kapalný, která by měla teoreticky probíhat při teplotě 58 °C. Jakmile začne docházet ke změně skupenství octanu sodného, změní se výrazně teplo potřebné pro dosažení daného děje. Při ohřevu pevného octanu sodného se spotřebovává teplo o velikosti $c_{o,p} = 2,82 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, pro změnu skupenství je potřeba skupenské teplo tání $l_t = 265 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ a měřená teplota by měla být konstantní. V grafu však teplota nadále roste, což je zapříčiněno vodní lázní, která zde působí jako teplotonosné médium. Topná spirála nejprve ohřívá vodu a ta následně octanové polštářky a kalorimetr. Za počátek změny skupenství bychom mohli považovat měřenou teplotu v rozmezí 54 až 56 °C, kdy se prodlužuje čas potřebný pro ohřev soustavy o 2 °C. Toto je způsobeno kontaktem topné spirály s octanovým polštářkem, kde v místě dotyku je lokální teplota vyšší než měřená a dochází tak ke změně skupenství octanu sodného, spotřeba tepla pro změnu fáze je vyšší a to se projeví na zpomalení nárůstu teploty soustavy. Po změně skupenství na kapalné je již teplo potřebné pro ohřev octanu opět dáno tepelnou kapacitou $c_{o,k} = 3,05 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a trend nárůstu teploty by se měl urychlit. Porovnáním časů uvedených v Tab. 4.3 je patrný pokles doby potřebné pro ohřev mezi 2 odečítanými hodnotami na konci měřeného teplotního intervalu oproti úseku, kdy dochází ke změně skupenství.



Obr. 4.3 Graf porovnávající průběhy ohřevu vody v octanu sodného v kalorimetru

Porovnáme-li ohřev stejné hmotnosti vody a vody s octanovými polštářky v grafické formě, můžeme sledovat rychlejší ohřev vody s octanovými polštářky v první fázi, kdy nedochází ke změně skupenství octanu sodného. Pro ohřev je potřeba tepla nižší, neboť část vody o hmotnosti $m_v = 0,132 \text{ kg}$ s měrnou tepelnou kapacitou $c = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ je nahrazena octanovými polštářky se stejnou hmotností, ovšem s měrnou tepelnou kapacitou $c_{o,p} = 2,82 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Jakmile začne docházet ke změně skupenství octanu sodného, spotřebuje se latentní teplo o velikosti $l_t = 265 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ a sníží se trend ohřevu vody s octanovými polštářky.

4.4 Čerpání tepelné energie z octanových polštářků:

Pro 2 octanové polštářky o celkové hmotnosti $m_p = 0,132 \text{ kg}$ a návrhové teplotě $t_n = 30 \text{ °C}$ je využitelná energie Q_c rovna dle rovnic (2.15) a (2.16):

$$Q_p = m_p \cdot [q_{u.c} + c_{o,p} \cdot (T_t - T_n)] =$$

$$0,132 \text{ kg} \cdot \{164350 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} + 2820 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot [(58 + 273,15) \text{ K} - (30 + 273,15) \text{ K}]\} =$$

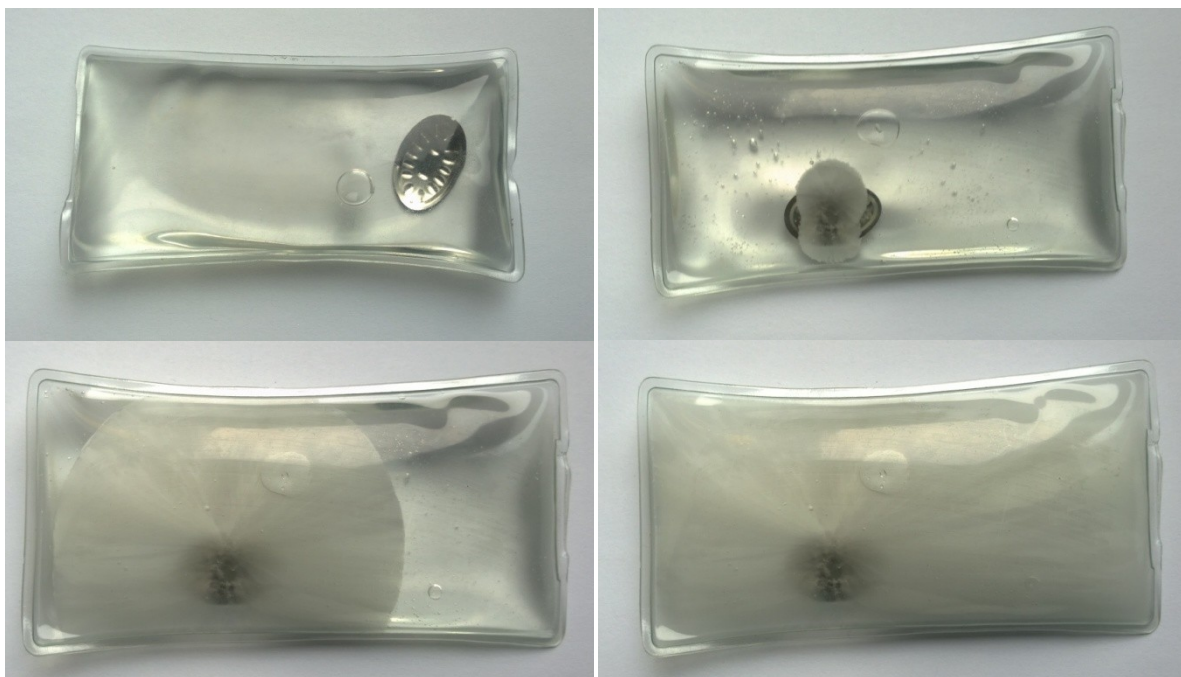
$$= 32116,92 \text{ J}$$

Tepelná energie akumulovaná do vody o stejné hmotnosti a počáteční teplotě $t_{v,0} = 58 \text{ °C}$ činí:

$$Q_v = m_v \cdot c \cdot (T_{v,0} - T_{v,k}) = 0,132 \text{ kg} \cdot 4180 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot ((58 + 273,15) \text{ K} - (30 + 273,15) \text{ K}) =$$

$$= 15449,28 \text{ J}$$

Srovnáme-li energii využitelnou z octanu sodného a energii uloženou ve vodě, tak energie uložená v octanu je více než 2 krát větší.



Obr. 4.4 Průběh solidifikace octanu sodného v nahřívacím polštářku po prolomení plíšku.

4.5 Kalorimetr Conatex

Pro potřeby laboratorního cvičení byl původně zvolen kalorimetr od firmy Conatex s typovým označením MS-J07051, odpor topné spirály $2 \div 3 \Omega$, maximální objem 200 ml. Jak bude patrné z následujících grafů a výpočtů, tak tento kalorimetr nebyl pro další použití vhodný.



Obr. 4.5 Kalorimetr Conatex MS-J07051 [9]

Při sledovaném ohřevu vody v kalorimetru Conatex o hmotnosti $m_c = 0,150 \text{ kg}$ z teploty 22 °C na teplotu 60 °C byly odečteny v průběhu času τ následující hodnoty teplot t_{ov} :

τ [min]	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28
t_{ov} [°C]	22	25	28	31	34	37	40	43	46	48	51	53	55	58	60

Tab. 4.4 Naměřené hodnoty teploty a času při ohřevu vody v kalorimetru Conatex.

Teoretická hodnota času potřebného pro ohřev vody $t_{c,0} = 22 \text{ °C}$ na $t_{c,K} = 60 \text{ °C}$ v kalorimetru Conatex dle rovnice (2.7) a (2.9) činí při napětí zdroje $U_c = 6,4 \text{ V}$ a proudu $I_c = 3,05 \text{ A}$:

$$Q_{c,t} = m_c \cdot c \cdot (T_{c,K} - T_{c,0}) + C_k \cdot (T_{c,K} - T_{c,0}) =$$

$$= 0,150 \text{ kg} \cdot 4180 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot ((60 + 273,15) \text{ K} - (22 - 273,15) \text{ K}) +$$

$$+ 47,8 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot ((60 + 273,15) \text{ K} - (22 - 273,15) \text{ K}) = 25642,4 \text{ J}$$

$$P_c = U_c \cdot I_c = 6,4 \text{ V} \cdot 3,05 \text{ A} = 19,52 \text{ W}$$

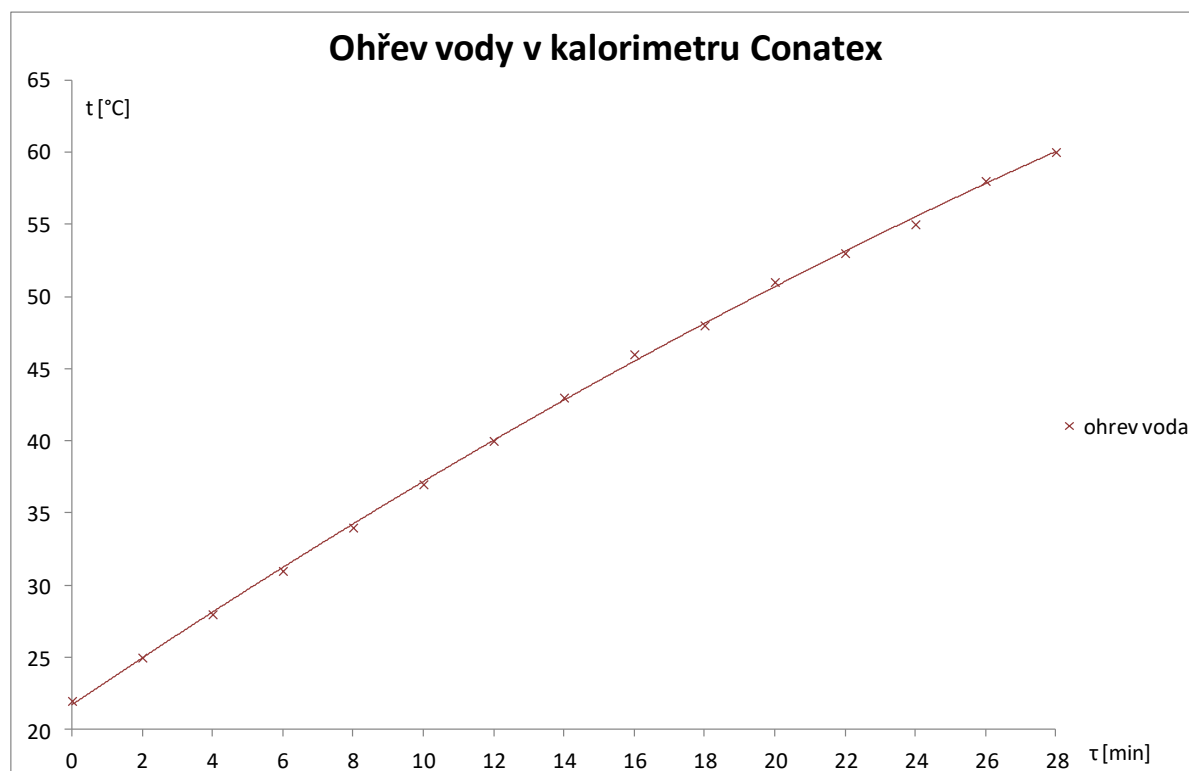
$$Q_{c,t} = P \cdot \tau_{c,t}$$

$$\tau_{c,t} = \frac{Q_{c,t}}{P_c} = \frac{25642,4 \text{ J}}{19,52 \text{ W}} = 1314 \text{ s} = 21 \text{ min } 54 \text{ s}$$

Porovnáním teoretické doby ohřevu se skutečnou dobou ohřevu vychází účinnost:

$$\eta_{c,t} = \frac{\tau_{c,t}}{\tau_{c,s}} = \frac{1314 \text{ s}}{28 \cdot 60 \text{ s}} = 0,782 = 78,2\%$$

V porovnání s teoreticky stanovenou dobou 21 minut 54 sekund je reálná doba delší, a to 28 minut. Toto je způsobeno skutečností, že kalorimetr Conatex vykazuje tepelné ztráty, zejména v oblasti neizolovaného víka. Na víku kalorimetru, ochlazeném vnějším prostředím, je v průběhu ohřevu viditelný proces kondenzace vodní páry.



Obr. 4.6 Grafické znázornění ohřevu vody v kalorimetru Conatex.

Z grafu je patrné, že s rostoucí teplotou již není teplotní přírůstek za stejné časové období stejný – klesá trend nárůstu teploty. Průběh teploty tedy není lineární. Důvodem je zvyšující se přestup tepla z kalorimetru do okolí charakterizovaný členem ΔT v rovnici (2.8), ostatní členy rovnice mají konstantní hodnotu. Teplo přiváděné do soustavy topnou spirálou má stále stejnou velikost, ale s rostoucí teplotou vody v kalorimetru roste teplo vyzařované do okolí a tím pádem klesá teplo dostupné pro ohřev vody v kalorimetru.

V další části byl sledován pokles teploty vody v kalorimetru Conatex pro zhodnocení jeho tepelných ztrát. Za časové období 10 minut poklesla teplota vody o hmotnosti $m_c = 0,150$ kg v kalorimetru z výchozí teploty $t_{ch,0} = 60$ °C o 4 °C na teplotu $t_{ch,k} = 56$ °C.

Porovnáme-li celkové množství tepelné energie akumulované do vody $Q_{c,a}$ dle rovnice (2.3) při uvažované teplotě okolí $t_{ok} = 22$ °C s tepelnými ztrátami za dobu 10 minut $Q_{c,z}$, získáme podíl tepelných ztrát $n_{c,z}$:

$$Q_{c,a} = m_c \cdot c \cdot (T_{ch,0} - T_{ok}) = 0,15 \text{ kg} \cdot 4180 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot ((60 + 273,15) \text{ K} - (22 + 273,15) \text{ K}) = \\ = 23826 \text{ J} = 23826 \text{ W} \cdot \text{s} = 6,618 \text{ W} \cdot \text{h}$$

$$Q_{c,z} = m_c \cdot c \cdot (T_{cv,0} - T_{cv,10}) = 0,15 \text{ kg} \cdot 4180 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot ((60 + 273,15) \text{ K} - (56 + 273,15) \text{ K}) = \\ = 2508 \text{ J} = 2508 \text{ W} \cdot \text{s} = 0,697 \text{ W} \cdot \text{h}$$

$$n_{c,z} = \frac{Q_{c,z}}{Q_{c,a}} = \frac{2508 \text{ J}}{23826 \text{ J}} = 0,105 = 10,5\%$$

Jak je tedy patrné z předchozích výpočtů, tepelné ztráty kalorimetru jsou značné a z toho plyne časová náročnost na provedení dílčích částí laboratorního cvičení, které nelze v době vyhrazené výuce provést. Dalším limitujícím faktorem kalorimetru Conatex jsou jeho rozměry, při objemu vnitřní nádoby 200 ml by do něj nebylo možné umístit nahřívací polštářky s octanem sodným. Nahřívací polštářky s octanem sodným dostupné na trhu mají obdélníkový tvar s délkou hran 11 x 6 cm a vyšší nebo kruhový tvar o průměru 9 cm a vyšší. Nahřívacích polštářku je využíváno z důvodu zamezení kontaminace kalorimetru samotným octanem sodným, který je uzavřen v hermetickém obalu z měkčeného PVC. Nabíjení octanu sodného probíhá ve vodní lázni. Tyto důvody vedly k zakoupení nového kalorimetru od firmy Helago, jehož použití se pro požadavky výuky osvědčilo.

5 Laboratorní vybavení

Pro potřeby laboratorního cvičení je k dispozici stabilizovaný laboratorní síťový zdroj STATRON Typ 2225.41, inv. číslo 001000216110-0000.



Obr. 5.1 Zdroj napětí PeakTech DC Power Suply 6080. [11]

Ohřev látek a měření tepelné kapacity se uskutečňuje v kalorimetru zakoupeném u fy. Helago, výrobní číslo 1000821. Napájecí napětí max. 25 V, vnitřní obsah nádoby 400 ÷ 1200 ml.



Obr. 5.2 Kalorimetr Helago. [10]

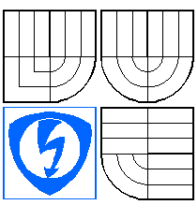
Při měření jsou dále využívány:

- 6x polštářek s octanem sodným zakoupené na e-shopu <http://www.tiskpro.cz>;
- teploměr ekologický s rozsahem $-10 \div 110$ °C se stupnicí po 1 °C;
- kuchyňská váha Silver Crest SKWS 5 A1 0 ÷ 5 kg s citlivostí 1 g výrobního čísla 077868;
- nádoba na vodu;
- rychlovarná konvice ETA.



Obr. 5.3 Polštářek s octanem sodným.

6 Vzorově vypracovaný protokol

 VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ	Předmět		Vybrané partie z obnovitelných zdrojů a ukládání energie	
	Jméno		Lukáš Vaněček	
	Ročník	2	Studijní skupina	ML1-EVM
	Spolupracoval		Měřeno dne 18. 4. 2017	
Kontroloval		Hodnocení		Dne
Číslo úlohy	Název úlohy			
x	Akumulace tepelné energie se změnou skupenství			

Cíl úlohy:

Cílem úlohy je seznámit se 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.

Teoretický rozbor:

Teplo Q vyjadřuje velikost přenesené energie mezi termodynamickou soustavou a okolím nebo dvěma termodynamickými soustavami při tepelné výměně. Za termodynamickou soustavu považujeme takovou soustavu, která je od okolí ohraničena rozhraním, ať už skutečným nebo myšleným. Za kladnou velikost tepla považujeme teplo přijaté soustavou, teplo odebrané ze soustavy je záporné.

Dochází-li při tepelné výměně ke změně teploty látky, jedná se o teplo citelné. Pokud ke změně teploty nedochází a mění se skupenský stav látky, označujeme teplo za latentní, neboli skupenské.

Pro ohřev nebo ochlazení látky je nutné dodat nebo odebrat určitou velikost tepelné energie. Velikost této energie je vyjádřena tepelnou kapacitou C , jejíž jednotkou je $J \cdot K^{-1}$. Platí:

$$C = \frac{dQ}{dT} \Rightarrow dQ = C \cdot dT .$$

Tepelná kapacita vztažená k jednotce hmotnosti je nazvána měrnou tepelnou kapacitou c :

$$c = \frac{C}{m} .$$

Měrná tepelná kapacita nemá konstantní hodnotu, ale mění svou hodnotu. S klesající teplotou se u většiny látek snižuje a při teplotě blízké 0 K má velmi malou hodnotu. Tabeľované hodnoty se vztahují k teplotě 20 °C a označují se symbolem c_{20} . Na měrnou tepelnou kapacitu plynů a par má vliv nejen teplota, ale i tlak a podmínky, za kterých k přestupu tepla dochází.

Na základě výše zmíněného lze stanovit velikost citelného tepla potřebného pro změnu definované teploty látky vztahem:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T.$$

K dosažení změny skupenství látky je nutné dodat nebo odebrat skupenské teplo L . Dle fyzikálního děje změny skupenství rozeznáváme:

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

K jednotce hmotnosti je vztaženo měrné skupenské teplo l :

$$l = \frac{L}{m}.$$

Vyšetřování tepelných pochodů látek a odpovídající velikosti tepelné energie lze vyšetřovat v zařízeních označovaných jako kalorimetry. Energetická bilance mezi tělesy umístěnými v kalorimetru je vyjádřena kalorimetrickou rovnicí:

$$Q_h = Q_c + Q_k$$
$$m_h \cdot c_h \cdot (T_h - T) = m_c \cdot c_c \cdot (T - T_c) + C_k \cdot (T - T_c)$$

Teplo Q_h je odevzdáno teplejší látkou, teplo Q_c přijme chladnější těleso 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.

Kalorimetry lze dělit do několika kategorií dle účelu použití, konstrukce, způsobu výměny tepla apod. Izotermické kalorimetry pracují při konstantní teplotě termodynamické soustavy, konstantní teplotou je charakterizována fázová přeměna látek nebo pro udržení konstantní teploty je nutné teplo do soustavy dodávat vytápěním případně odebrat ochlazením. U adiabatických kalorimetrů nedochází k tepelné výměně tepla mezi termodynamickou soustavou a okolím, veškeré teplo se spotřebuje na ohřev/ochlazení látek a kalorimetru, měřená je změna teploty.

Kalorimetry se zhotoveným elektrickým ohřevem pracují na principu přeměny elektrické energie v Jouleovo teplo ohřevem topné spirály. Velikost tepelné energie se stanoví:

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

P značí příkon spirály, τ dobu ohřevu, U napětí zdroje, I proud topnou spirálou a R odpor topné spirály. Velikost tepla lze vyjádřit v jednotce Joule, případně v jednotce Wattsekunda, přičemž platí $1J = 1 W \cdot s$.

Tepelnou energii lze skladovat do zásobníků. Ukládání tepelné energie provádíme v době jejího přebytku, zpětné čerpání využíváme v době jejího nedostatku či zvýšené potřeby. Existuje mnoho látek používaných k akumulaci tepelné energie, využíváme takové látky, které splňují nejlépe požadované podmínky vysoké tepelné kapacity, chemické stability a ekonomické. Akumulační látky jsou umístěny v zásobnících, u nichž klademe důraz na nízké tepelné ztráty. Akumulaci tepelné energie lze provést ve formě citelného tepla, latentního tepla nebo jiné podstaty (chemická reakce, absorpce vodní páry,...).

Nejjednodušším způsobem je akumulace tepla spojeným s ohřevem akumulační látky, tj. akumulace citelného tepla. Nejvíce využívanou tepelně-akumulační látkou je voda, která má nejvyšší měrnou tepelnou kapacitu $c_{20} = 4180 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, je dostupná a levná.

U akumulace tepelné energie spojené se změnou skupenství tepelně-akumulační látky nejčastěji využíváme změnu skupenství z pevného na kapalné a naopak při čerpání energie. Tento děj, jak již bylo zmíněno, probíhá při konstantní teplotě a dle zvolené pracovní látky zvolíme i teplotu, při níž teplo čerpáme. Dalšími požadavky jsou dobrá tepelná vodivost, malá objemová změna při změně fáze a chemická stabilita. Např. pro ohřev vody v domácnostech se požaduje teplota v rozmezí $55 \div 65 \text{ }^\circ\text{C}$. Látky nejvíce používané pro ukládání latentního tepla jsou parafíny, Glauberova sůl a trihydrát octanu sodného.

Ukládání tepelné energie do trihydrátu octanu sodného se provádí ve 2 fázích. 1. fáze spočívá v ohřevu pevného octanu sodného na teplotu $65 \text{ }^\circ\text{C}$, při teplotě $58 \text{ }^\circ\text{C}$ dochází ke změně skupenství z pevného na kapalné, uvolňuje se krystalicky vázaná voda a rozpouští octan sodný. Následně je nutné ohřát octan sodný, již zkapalněný, na teplotu nejméně $65 \text{ }^\circ\text{C}$ pro rozpuštění veškerých krystalů. Ve 2. fázi podchládíme octan sodný na požadovanou teplotu skladování, tím dosáhneme stavu, kdy nebude docházet k přestupu tepla ze zásobníku do okolí. Toto odebrané teplo lze samozřejmě využít. Octan sodný zůstává v kapalném skupenství a je v podchlazeném stavu. Jedná se tedy o dlouhodobě uloženou energii beze ztrát. Máme-li např. cílovou teplotu nastavenou na $25 \text{ }^\circ\text{C}$, jsme schopni dlouhodobě uskladnit energii o velikosti $q_u = 257,41 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Proces čerpání tepelné energie je nutné vyvolat vnější příčinou, u nahřívacích polštářků stačí prolomit plíšek umístěný v podchlazené kapalině. Dojde k vytvoření krystalizačního centra a následně k šíření krystalizačního procesu v celém objemu – procesu solidifikace. Octan se zahřeje na teplotu $58 \text{ }^\circ\text{C}$, která odpovídá fázové přeměně, zároveň se část uloženého tepla spotřebuje na ohřev octanu sodného v pevném skupenství na teplotu tání. Zbylé teplo se odebírá izotermicky, což je např. pro ohřev TUV v domácnostech výhodné. Tepelná energie odebíraná izotermicky má velikost $q_{u,c} = 164,35 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$. Při pokračování v odběru tepelné energie je velikost tepla daná měrnou tepelnou kapacitou octanu v pevném skupenství $c_{o,p} = 2,82 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, dochází k poklesu teploty octanu sodného.

Naměřené hodnoty:

Při měření tepelné kapacity kalorimetru jsme do kalorimetru nalili chladnou vodu o hmotnosti $m_c = 0,421 \text{ kg}$, teplota se ustálila na teplotě $t_c = 24 \text{ }^\circ\text{C}$. Následně jsme v rychlovarné konvici ohřáli vodu na teplotu $t_h = 69 \text{ }^\circ\text{C}$ a nalili do kalorimetru o hmotnosti $m_h = 0,380 \text{ kg}$. Po ustálení trvajícím cca 2 minuty a promíchání se teplota vody v kalorimetru ustálila na teplotě $t = 44 \text{ }^\circ\text{C}$. Z těchto hodnot lze stanovit tepelnou kapacitu kalorimetru C_k .

$$C_k = \frac{m_h \cdot c_h \cdot (T_h - T)}{(T - T_c)} - m_c \cdot c_c =$$

$$= \frac{0,380 \text{ kg} \cdot 4180 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot ((69 + 273,15) \text{ K} - (44 + 273,15) \text{ K})}{((44 + 273,15) \text{ K} - (24 + 273,15) \text{ K})} -$$

$$- 0,421 \text{ kg} \cdot 4180 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} = 225,720 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$$

Po stanovení tepelné kapacity kalorimetru jsme provedli ohřev vody o hmotnosti $m_v = 0,58 \text{ kg}$. Při teplotě 24°C jsme započali s odečítáním času po ohřevu vody o 2°C , nastavené napětí zdroje $U = 15,8 \text{ V}$ a proud topnou spirálou $I = 4,43 \text{ A}$. Velikost energie potřebné pro ohřev daného množství vody z teploty 24°C na 75°C :

$$Q_t = m_v \cdot c \cdot (T_K - T_0) + C_k \cdot (T_K - T_0) =$$

$$= 0,580 \text{ kg} \cdot 4180 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot ((75 + 273,15) \text{ K} - (24 + 273,15) \text{ K}) +$$

$$+ 225,720 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot ((75 + 273,15) \text{ K} - (24 + 273,15) \text{ K}) = 135156,12 \text{ J}$$

Příkon topné spirály činí:

$$P = U \cdot I = 15,8 \text{ V} \cdot 4,43 \text{ A} = 69,994 \text{ W}$$

Teoreticky bude trvat ohřev vody v kalorimetru:

$$Q_t = P \cdot \tau_{ov}$$

$$\tau_{ov} = \frac{Q_t}{P} = \frac{135156,12 \text{ J}}{69,994 \text{ W}} = 1931 \text{ s} = 32 \text{ min } 11 \text{ s}$$

Uskutečněný ohřev z teploty 24°C na teplotu 75°C trval ve skutečnosti 33 minut a 50 sekund, průběh ohřevu je zaznamenán v následující tabulce.

$t_{\text{H}_2\text{O}} [^\circ\text{C}]$	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48
τ [min:s]	0:00	1:15	2:25	3:45	5:00	6:15	7:30	8:45	10:00	11:15	12:35	13:50	15:05
$t_{\text{H}_2\text{O}} [^\circ\text{C}]$	50	52	54	56	58	60	62	64	66	68	70	72	75
τ [min:s]	16:25	17:45	19:10	20:25	21:50	23:15	24:40	26:00	27:25	28:50	30:15	31:40	33:50

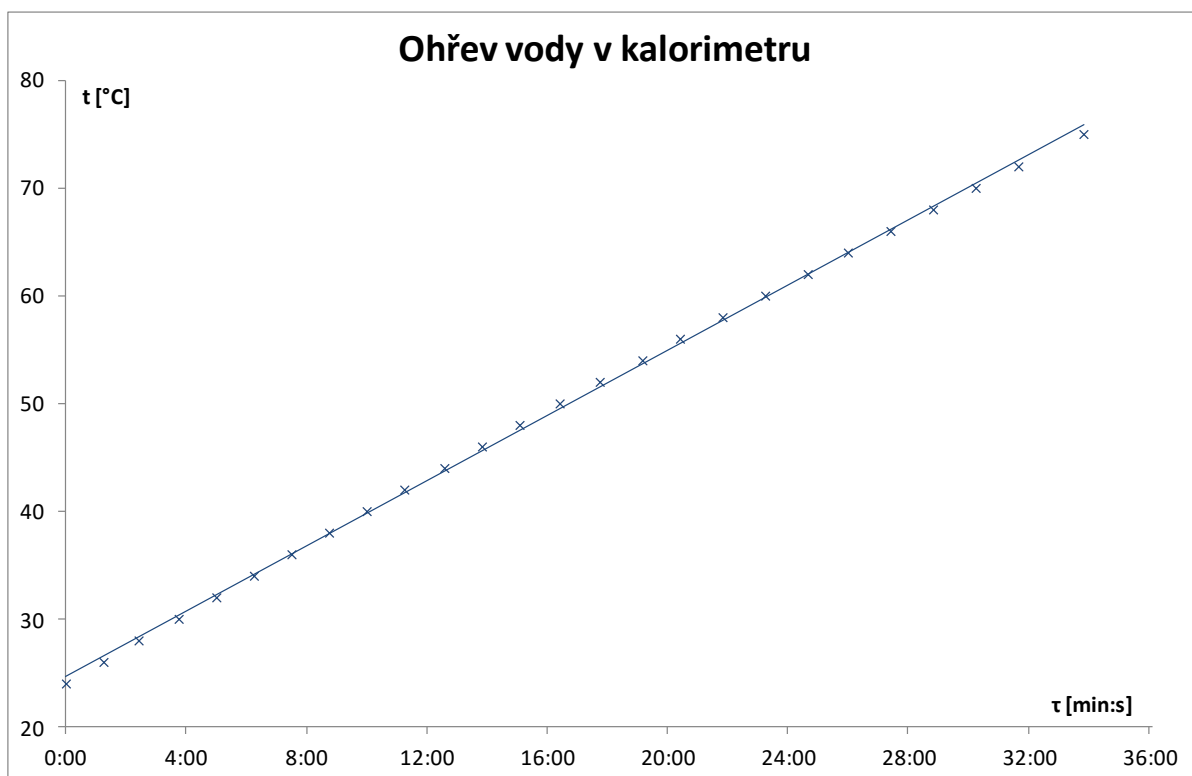
Skutečné množství přivedeného tepla je:

$$Q_s = P \cdot \tau = 69,994 \text{ W} \cdot (33 \cdot 60 + 50) \text{ s} = 142087,82 \text{ J}$$

Účinnost ohřevu:

$$\eta = \frac{Q_t}{Q_s} = \frac{135156,12 \text{ J}}{142087,82 \text{ J}} = 0,951 = 95,1\%$$

V grafu jsou vyneseny jednotlivé naměřené body ohřevu.



Jak je patrné z grafu, ohřev probíhal lineárně v celém vyšetřovaném průběhu. Kalorimetr na základě stanovené účinnosti $\eta = 95,1 \%$ a porovnáním skutečné doby ohřevu s teoretickou dobou ohřevu vykazuje velmi nízké ztráty tepelné energie.

V další části laboratorního cvičení byl uskutečněn ohřev vody s vloženými octanovými polštářky. Hmotnost 2 octanových polštářků je $m_p = 0,132 \text{ kg}$. Do kalorimetru jsme tyto polštářky vložili a kalorimetr doplnili vodou na celkovou hmotnost shodnou s předchozí úlohou, tedy $m = 0,580 \text{ kg}$. Po ustálení teploty v kalorimetru jsme započali s ohřevem soustavy, nastavené napětí zdroje $U = 15,8 \text{ V}$ a proud topnou spirálou $I = 4,43 \text{ A}$. Při teplotě 24 °C bylo zahájeno odečítání času a s nárůstem teploty o 2 °C tento čas zaznamenán do tabulky.

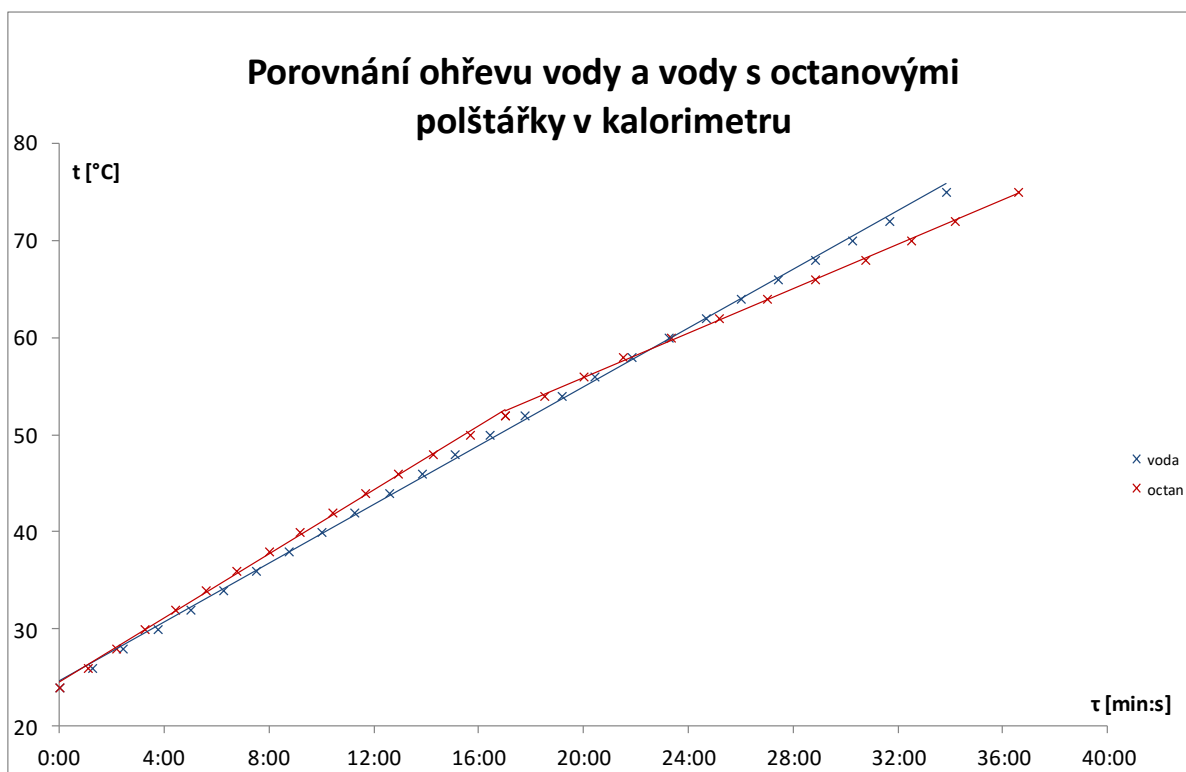
$t_{\text{octan}} \text{ [°C]}$	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48
$\tau \text{ [min:s]}$	0:00	1:05	2:10	3:15	4:25	5:35	6:45	8:00	9:10	10:25	11:40	12:55	14:15
$t_{\text{octan}} \text{ [°C]}$	50	52	54	56	58	60	62	64	66	68	70	72	75
$\tau \text{ [min:s]}$	15:40	17:00	18:30	20:00	21:30	23:20	25:10	27:00	28:50	30:45	32:30	34:10	36:35

Průběh ohřevu je znázorněn na následujícím grafu.



Celková doba potřebná pro ohřev octanových polštářků na požadovanou teplotu 75 °C trvá 36 minut a 35 sekund. Na průběhu je patrný zlom v křivce ohřevu při teplotě 54 °C až 56 °C. Toto je způsobeno přeměnou octanu sodného z pevného skupenství na kapalné, kdy se spotřebovává teplo o velikosti latentního $l_t = 265 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, v pevném skupenství je velikost tepla potřebná pro ohřev octanu o 1K rovna $c_{o,p} = 2,82 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Teoreticky by k fázové přeměně mělo dojít při konstantní teplotě 58 °C, ale jak je patrné z grafu, teplota začala růst pozvolněji již při zmíněných 54 °C až 56 °C a nebyla při přeměně konstantní. Vysvětlením může být skutečnost, že v soustavě není pouze octan sodný, ale i voda. Voda je médium, které slouží k transportu tepla od topné spirály do octanu sodného umístěného v polštářcích a do stěn kalorimetru. S rostoucí teplotou vody roste i teplo předávané do polštářků a nárůst teploty se tak zpomaluje až do doby, kdy je veškerý octan přeměněn na kapalný. Topná spirála je v určitých místech také v kontaktu s octanovými polštářky, lokálně tak může být teplota vyšší než u umístění teploměru a octan tak začne měnit skupenství dříve než při měřené teplotě 58 °C.

Porovnáme-li průběh ohřevu vody a vody s octanovými polštářky, získáme následující charakteristiku.



Na grafu je patrné, že v první fázi ohřevu je rychlejší nárůst teploty u vody s vloženými octanovými polštářky. Je to dáno tím, že část vody s měrnou tepelnou kapacitou $c = 4180 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ nahradíme octanem sodným s měrnou tepelnou kapacitou $c_{o,p} = 2,82 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. S rostoucí teplotou však dochází k fázové přeměně octanu sodného z pevného skupenství na kapalné, je potřeba latentní teplo o velikosti $l_f = 265 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a tím se prodlouží i doba potřebná pro ohřev o $2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Na závěr jsme z nabitých polštářků s octanem sodným začali čerpat teplo prolomením plíšku. V oblasti prolomeného plíšku vzniklo krystalizační centrum a pevné skupenství se následně rozšířilo do celého objemu. Polštářek se zároveň zahřál. energii, kterou můžeme z octanových polštářků čerpat činí při koncové teplotě $30 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$Q_p = m_p \cdot [q_{u.c} + c_{o,p} \cdot (T_t - T_n)] =$$

$$0,132 \text{ kg} \cdot \{164350 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1} + 2820 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1} \cdot [(58 + 273,15)\text{K} - (30 + 273,15)\text{K}]\} =$$

$$= 32116,92 \text{ J}$$

Energie uložená ve stejném množství vody:

$$Q_v = m_v \cdot c \cdot (T_{v,0} - T_{v,k}) = 0,132 \text{ kg} \cdot 4180 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1} \cdot ((58 + 273,15)\text{K} - (30 + 273,15)\text{K}) =$$

$$= 15449,28 \text{ J}$$

Vidíme, že energie v octanu sodném je větší více než dvojnásobně.

Závěr:

V této laboratorní úloze jsme mohli porovnat proces ukládání tepelné energie do dvou látek, a to do vody a do octanu sodného. První způsob je založen na principu ukládání citelného tepla, druhý způsob na ukládání latentního tepla. Velikost tepelné energie, kterou můžeme uložit do

octanu sodného je při stejné hmotnosti tepelně-akumulační látka větší, zároveň je však proces složitější vlivem změny skupenství z pevného na kapalné a naopak při čerpání energie. Jednoznačnou výhodou octanu sodného je izotermický odběr tepla. Dalšími látkami vhodnými pro ukládání tepelné energie s fázovou přeměnou jsou parafíny a Glauberova sůl. K dlouhodobému ukládání tepla jsou vhodné látky umožňující podchlazení na teplotu okolí, neboť u nich nedochází k tepelným ztrátám, které bychom museli kompenzovat dotápěním zásobníku.

Použité pomůcky:

Kalorimetr Helago, výr. číslo 1000821. $U_{max} = 25$ V, $V = 400 \div 1200$ ml;
stabilizovaný zdroj STATRON Typ 2225.41, inv. číslo 001000216110-0000;
rychlovarná konvice ETA;
polštářky s octanem sodným;
teploměr s rozsahem $-10 \div 110$ °C se stupnicí po 1 °C;
kuchyňská váha Silver Crest SKWS 5 A1, $0 \div 5$ kg \pm 1 g, výr. číslo 077868;
nádoba na vodu.

7 Závěr

Cílem této práce bylo vytvořit kompletní podkladový materiál pro výuku v laboratořích předmětu Vybrané partie z obnovitelných zdrojů a ukládání energie.

V první části práce je vypracován teoretický rozbor a návod pro samostatnou práci studentů v laboratořích. Jsou zde definovány obecné pojmy teplo, tepelná kapacita, vysvětlení citelného a latentního tepla a uvedeny možnosti ukládání tepelné energie. Časová dotace na měření v laboratoři činí 1 hodinu a 40 minut, a je počítáno s jejím plným využitím. Pro seznámení studentů s pracovištěm je vyhrazen prostor 5 minut, následně je počítáno s 10 minutami na měření tepelné kapacity kalorimetru, 40 minutami pro ohřev vody na 75 °C a 45 minutami pro úlohy nabíjení a čerpání energie z octanových polštářků úklid pracoviště. Celkový předpoklad tedy počítá se 100 minutami, což odpovídá dotaci.

V druhé části práce jsou uvedeny naměřené hodnoty získané při měření dle sestaveného návodu a jsou zde i okomentovány. Dále se zde uvádí uvažované varianty jednotlivých úloh s odůvodněním jejich úpravy pro potřeby cvičení a seznam dostupných zařízení v laboratořích.

Součástí diplomové práce je vzorově vypracovaný protokol a vložená příloha obsahující zpracovaný návod pro laboratorní cvičení předmětu „Vybrané partie z obnovitelných zdrojů a ukládání energie“.

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] Helago-CZ. *helago.cz* [on-line] Dostupné z: <https://www.helago-cz.cz/eshop-kalorimetr-s-topnou-spiralou-1-200-ml-140019.html>
- [11] STATRON. *statron.de* [on-line] Dostupné z: <http://www.statron.de/details/19>
- [12] Pokus s octanem sodným (Chemický krápník, Horký led). *studiumchemie.cz* [on-line]. Dostupné z: <http://www.studiumchemie.cz/pokus.php?id=110>.
- [13] Měrná tepelná kapacita. *edu.techmania.cz* [on-line]. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie-struktura-latek/merna-tepelna-kapacita>.
- [14] 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>.

Seznam symbolů, veličin a zkratek

Značka	Veličina	Jednotka
λ	součinitel tepelné vodivosti	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
τ	čas	s
C	tepelná kapacita	$\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$
c	měrná tepelná kapacita	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
c_{20}	měrná tepelná kapacita pro teplotu 20 °C	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
d	tloušťka	m
E	energie	J
I	proud	A
L	skupenské teplo tání	J
l	měrné skupenské teplo tání	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$
m	hmotnost	kg
n	poměr	-
P	příkon	W
Q	teplo	J
q	měrné teplo	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$
R	odpor	Ω
S	plocha	m^2
T	termodynamická teplota	K
t	teplota	°C
U	napětí	V

Seznam obrázků

Obr. 2.1 Graf závislosti měrné tepelné kapacity vody na teplotě dle rovnice (2.4).	10
Obr. 2.2 Porovnání citelného a latentního tepla. [7]	11
Obr. 2.3 Princip ukládání tepelné energie do trihydrátu octanu sodného v porovnání s vodou. [5]	15
Obr. 2.4 Princip čerpání tepelné energie z trihydrátu octanu sodného. [5].....	15
Obr. 2.5 Vnitřní uspořádání výměníku tepla využívajícího ukládání tepelné energie do trihydrátu octanu sodného. [5]	16
Obr. 4.1 Graf průběhů teploty vody v kalorimetru.	21
Obr. 4.2 Graf průběhů ohřevu octanových polštářků s vodou v kalorimetru.....	23
Obr. 4.3 Graf porovnávací průběhy ohřevu vody v octanu sodného v kalorimetru.....	24
Obr. 4.4 Průběh solidifikace octanu sodného v nahřívacím polštářku po prolomení plíšku....	25
Obr. 4.5 Kalorimetr Conatex MS-J07051 [9]	25
Obr. 4.6 Grafické znázornění ohřevu vody v kalorimetru Conatex.	26
Obr. 5.1 Zdroj napětí PeakTech DC Power Suply 6080. [11]	28
Obr. 5.2 Kalorimetr Helago. [10]	28
Obr. 5.3 Polštářek s octanem sodným.	29

Seznam tabulek

Tab. 2.1 Měrná tepelná kapacita při 20 °C a měrné skupenské teplo tání vybraných látek. [4], [5]	9
Tab. 4.1 Naměřené hodnoty pro stanovení tepelné kapacity kalorimetru.....	19
Tab. 4.2 Průběh teploty vody v kalorimetru v čase.....	20
Tab. 4.3 Průběh teploty octanových polštářků a vody v kalorimetru v čase.....	22
Tab. 4.4 Naměřené hodnoty teploty a času při ohřevu vody v kalorimetru Conatex.....	26