



# Akumulace tepelné energie v PCM

## Diplomová práce

*Studijní program:* N2301 – Strojní inženýrství  
*Studijní obor:* 2302T010 – Konstrukce strojů a zařízení  
*Autor práce:* **Bc. Luboš Krause**  
*Vedoucí práce:* doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC  
Faculty of Mechanical Engineering ■

# Accumulation of thermal energy by PCM

## Master thesis

*Study programme:* N2301 – Mechanical Engineering  
*Study branch:* 2302T010 – Machine and Equipment Systems  
*Author:* **Bc. Luboš Krause**  
*Supervisor:* doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Luboš Krause**  
Osobní číslo: **S14000328**  
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Konstrukce strojů a zařízení**  
Název tématu: **Akumulace tepelné energie v PCM**  
Zadávací katedra: **Katedra energetických zařízení**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Proveďte rešerši využívání PCM (phase change materials) pro akumulaci tepelné energie ve vodních zásobnících.
2. Popište experimentální zařízení.
3. Navrhněte způsob měření a vyhodnocování, sestavte analytický model problému.
4. Proveďte experimenty pro různá pouzdra s PCM. Zaznamenávejte průběhy teplot a průtoky při ohřevu a následném chlazení PCM.
5. Proveďte numerickou simulaci případu (alespoň proudění vody).
6. Vypočítaná a naměřená data zpracujte a vyhodnoťte.
7. Formulujte závěry.
8. Uveďte použité zdroje (alespoň 15).



Rozsah grafických prací: 10  
Rozsah pracovní zprávy: 50 stran  
Forma zpracování diplomové práce: tištěná  
Seznam odborné literatury:

[1] CHYSKÝ, J., HEMZAL, K. a kol., 1993. *Větrání a klimatizace, Technický průvodce (31)*. SNTL Praha.

[2] VÍTEK, M., 2008. *Užití materiálů se změnou fáze k akumulaci tepelné energie, Diplomová práce*. Technická univerzita v Liberci.

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.  
Katedra energetických zařízení  
Konzultant diplomové práce: Ing. Michael Fenkl, Ph.D.  
Katedra energetických zařízení

Datum zadání diplomové práce: 18. listopadu 2015  
Termín odevzdání diplomové práce: 18. února 2017

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
děkan



  
doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Liberci dne 18. listopadu 2015

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tom- to případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 6.1.2017

Podpis:



## **Abstrakt**

Práce se zabývá využíváním Phase Change Materials (PCM) k akumulaci tepelné energie. V úvodní části práce je vysvětleno, proč je výhodné teplo akumulovat a jaké způsoby akumulace existují. V teoretické části jsou uvedeny požadavky na PCM a základní rozdělení těchto materiálů, také je zde rozebíráno zapouzdření akumulčního materiálu a popsán proces změny skupenství pro jednosložkové a vícesložkové soustavy. Dále je rozebírána konstrukce tepelných zásobníků, zvláště pak latentních tepelných zásobníků, kde je uvedeno několik konkrétních technických řešení. V praktické části práce je popsán experiment, provedený s PCM pouzdry, kterým byl zjištěn průběh akumulčního výkonu pouzder. Dalším bodem praktické části je numerická simulace experimentu, jejíž výsledky jsou porovnány s laboratorním měřením.

## **Abstract**

The thesis deals with the using Phase Change Materials (PCM) for heat storage. The Introduction part explains, why is a heat storage advantageous and what methods exist. The theoretical part lists requirements for PCM and basic division of these materials, there is also discussed encapsulation of accumulative material and described a phase change process of one component and multi – component systems. Next is discussed the construction of heat accumulators, especially latent heat accumulators, where are stated a few specific technical solutions. The practical part of thesis describes an experiment of PCM capsules, by which was found out the behavior of heat storage performance. Next point of practical part is the numerical simulation of experiment, which results are compared with the laboratory measurement.

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu práce panu doc. Ing. Václavu Dvořákovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky k vypracování této práce.

# Obsah

1. Úvod .....	10
2. Rozdělení akumulace tepla dle využívaného fyzikálně chemického principu .....	11
2.1. Akumulace citelného tepla .....	11
2.2. Akumulace latentního tepla.....	11
2.3. Akumulace tepla sorpcí vodní páry .....	13
2.4. Akumulace tepla pomocí chemických reakcí .....	13
3. PCM .....	13
3.1. Požadavky na PCM materiály .....	13
3.1.1. Teplotně-fyzikální vlastnosti .....	13
3.1.2. Kinetické vlastnosti .....	14
3.1.3. Chemické vlastnosti .....	15
3.1.4. Ekonomické vlastnosti.....	15
3.2. Základní rozdělení PCMs.....	15
3.2.1. Organické PCM .....	16
3.2.1.1. Parafínové sloučeniny .....	16
3.2.1.2. Bezparafínové sloučeniny.....	16
3.2.1.3. Mastné kyseliny .....	17
3.2.1.4. Cukerné alkoholy.....	17
3.2.1.5. Polyethylenglykoly (PEG) .....	18
3.2.2. Anorganické PCM.....	18
3.2.2.1. Hydráty solí.....	18
3.2.2.2. Kovy.....	19
3.2.3. Eutektické PCM.....	19
3.3. Změna skupenství PCM.....	21
3.3.1. Změna skupenství čisté látky.....	21
3.3.2. Změna skupenství směsi .....	22
3.4. Zapouzdření PCM .....	23
4. Tepelné zásobníky.....	24
4.1. Konstrukce vodních zásobníků .....	24
4.2. Latentní zásobníky .....	26
4.2.1. Nabíjení zásobníku.....	27
4.2.2. Vybíjení zásobníku .....	27
4.2.3. Vývoj latentních zásobníků tepla v letech 1990 až 2002.....	27
4.2.4. Porovnání vodního tepelného zásobníku a PCM sezonního zásobníku s trihydrátem octanu sodného.....	30



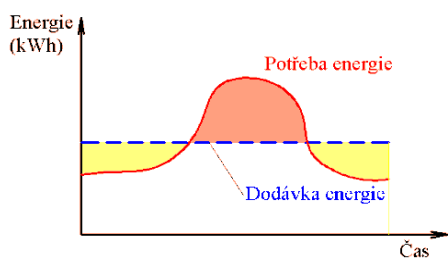
4.2.4.1.	Konstrukce sezonního zásobníku s trihydrátem octanu sodného .....	32
4.2.5.	Akumulační nádrž LATENTO 500XXL .....	33
4.2.6.	Mobilní systém uchovávání tepelné energie.....	34
4.2.7.	Akumulace tepla v solárních elektrárnách .....	36
4.2.8.	Technologie SaltX.....	37
4.2.9.	Zásobník Solvis Max .....	37
4.2.10.	Zásobníky využívající zapouzdřené PCM .....	38
4.2.11.	Akumulace odpadního tepla automobilu.....	38
4.2.12.	Akumulace chladu.....	39
4.2.12.1.	Chladicí systém společnosti pcmproducts.....	40
5.	Experiment – měření tepelné akumulace PCM pouzder.....	41
5.1.	Schéma experimentálního zařízení.....	42
5.2.	Popis měření.....	44
5.3.	Vyhodnocování naměřených dat.....	45
5.4.	Výpočet akumulačního výkonu PCM pouzder.....	54
5.4.1.	PCM54/D70 Ball.....	55
5.4.2.	PCM48/D70 Ball.....	57
5.4.3.	PCM 70/D70 Ball.....	59
5.4.4.	PCM50/D70 Ball.....	61
5.5.	Nejistota měření.....	62
6.	Numerická simulace nabíjení tepelného zásobníku.....	64
6.1.	Tvorba modelu .....	64
6.1.1.	Určení velikosti akumulačního objemu.....	65
6.2.	Tvorba výpočtové sítě.....	66
6.2.1.	Kvalita sítě .....	66
6.3.	Nastavení numerické simulace.....	67
6.3.1.	nastavení typu úlohy.....	67
6.3.2.	Použité výpočtové modely .....	67
6.3.3.	Definice materiálů.....	67
6.3.4.	Okrajové podmínky.....	69
6.4.	Výsledky .....	72
7.	Porovnání numerické simulace experimentu a výsledků získané z měření.....	75
8.	Závěr.....	77
9.	Literatura .....	79
10.	Přílohy.....	81

# 1. Úvod

V posledních letech se zvyšuje snaha o nižší spotřebu energie a klade se důraz na snižování energetické náročnosti budov. Ve většině domácností převyšuje spotřeba energie na vytápění a ohřev vody (v ČR) nebo v letním období na jejich ochlazování nad energií využívanou pro spotřebiče, viz graf 4 [1]. Abychom snížili podíl energie pro vytápění/chlazení a tím i energetickou náročnost budov, snižujeme jejich tepelné ztráty. Dalším ze způsobů, jak snižovat energetickou náročnost budov je akumulace tepla/chladu v době jeho přebytku na dobu jeho nedostatku. Efektivním hospodařením s teplem lze výrazně zkrátit topnou sezónu (dlouhodobá akumulace) a eliminovat teplotní výkyvy mezi dnem a nocí (krátkodobá akumulace).

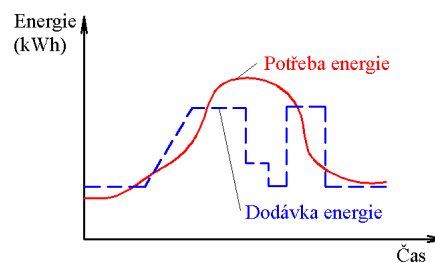
## Další důvody pro akumulaci energie:

a) zdroj energie nedokáže pokrýt odběrové špičky



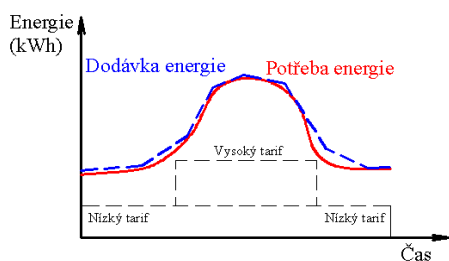
Graf 2

b) nepravidelná dodávka energie



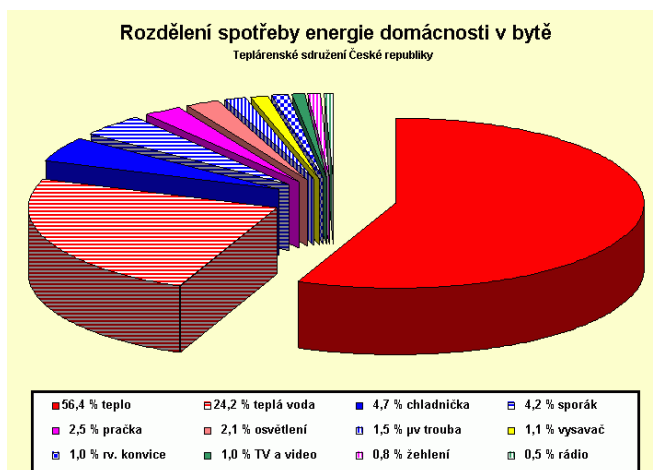
Graf 1

c) rozdíl v ceně energie pro různá období



Graf 3

d) zvyšování účinnosti provozu zdroje



Graf 4

Pro akumulaci tepla se využívají dva základní způsoby.: akumulace do stavebních konstrukcí a akumulace v tepelných zásobnících (do akumulčních prvků). Teplo ukládané do stavebních konstrukcí se uvolňuje samovolně při poklesu teploty okolí pod teplotu konstrukce, k uložení většího množství tepla by bylo zapotřebí velmi masivní konstrukce, zatím co teplo v zásobníku je možné za určitých podmínek skladovat dlouhodobě a využívat ho v případě nutnosti.

## 2. Rozdělení akumulace tepla dle využívaného fyzikálně chemického principu

### 2.1. Akumulace citelného tepla

Médium, určené k akumulaci, je ohříváno, aniž by změnilo svoje skupenství. Množství dodané energie je dáno vztahem

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} m \cdot c \cdot dT = m \cdot c \cdot \Delta T, \quad (1)$$

akumulované teplo je přímo úměrné hmotnosti ohřívajícího média  $m$ , velikosti měrné tepelné kapacity  $c$  a rozdílu počáteční a koncové teploty  $\Delta T$ . Je žádoucí, aby měrná tepelná kapacita média byla co možná největší. Nejčastěji využívanými látkami k akumulaci citelného tepla je voda, jejíž měrná tepelná kapacita je zhruba 4,2 [kJ/(kg K)], ale používají se i další materiály, viz tabulka 1. Výhodou tohoto jednoduchého způsobu akumulace je nízká cena pracovní látky. Nevýhodou je, že se při odběru tepla snižuje teplota média. Při akumulaci většího množství tepla, musí mít zásobníky velký objem nebo teplota akumulčního média vysoká, pak rostou požadavky na tepelnou izolaci zásobníku. Tímto způsobem je dosahováno hustoty akumulace (100÷300) [MJ/m<sup>3</sup>]. [2]

Vybrané materiály používané pro akumulaci citelného tepla

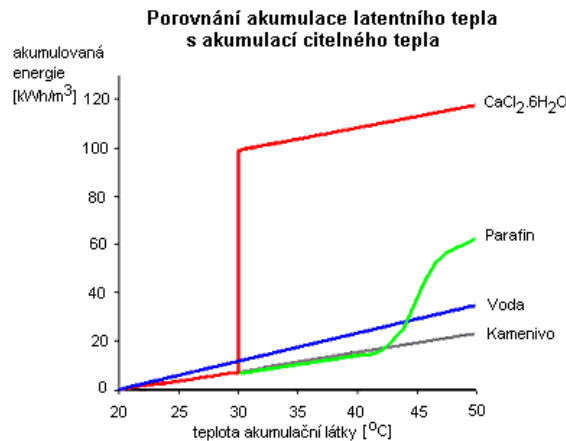
Materiál	Teplota použitelnosti [°C]	Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	Tepelná kapacita [J/(kg K)]
Kámen	20	2560	879
Cihla	20	1600	840
Beton	20	1900-2300	880
Voda	0-100	1000	4190
Motorový olej	do 160	888	1880
Etanol	do 78	790	2400
Isotunaol	do 100	808	3000

Tabulka 1

### 2.2. Akumulace latentního tepla

K akumulaci energie je možné využít jakékoliv fázové změny, v praxi se ale využívá zejména fázové změny tání/tuhnutí nebo změny krystalické mřížky. Materiály, využívající k akumulaci tepla fázovou změnu, označujeme, jako Phase Change materials (PCM). PCM se v zásobníku tepla ohřívá stejně jako při akumulaci citelného tepla, s tím rozdílem, že PCM během ohřevu změni fázi, jedná se tedy o akumulaci jak latentního, tak citelného tepla. Latentní teplo je množství tepelné energie potřebné ke změně skupenství dané látky. Při změně fáze je dodáváno teplo, ale teplota látky se nemění (chemicky čisté látky) nebo se mění v určitém

intervalu teplot (směsi, amorfní látky), toto teplo nazýváme latentní. Výhodou latentních zásobníků je, že mohou uchovávat poměrně velké množství



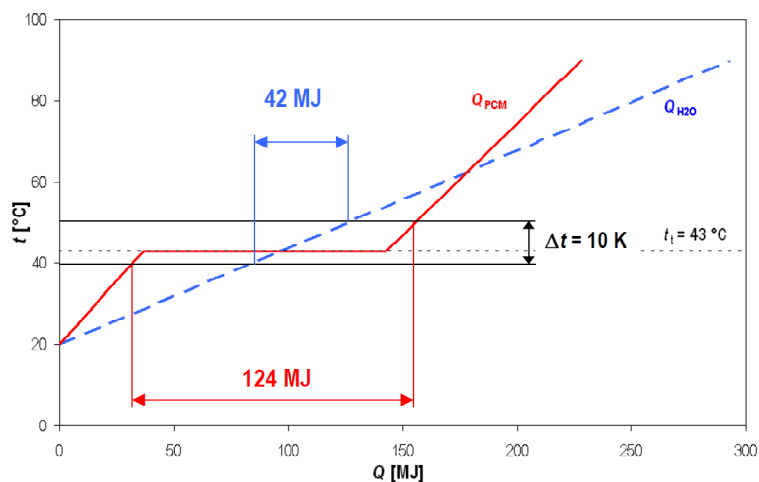
Graf 5 [2]

tepla při nízké teplotě např.  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , parafín viz obr. 6. Tímto způsobem je dosahováno hustoty akumulace ( $100 \div 500$ )  $[\text{MJ}/\text{m}^3]$ . [2]

Celkové množství tepla uloženého v PCM, můžeme vypočítat dle vztahu

$$Q = \int_{T_1}^{T_{sk}} m \cdot c_p \cdot dT + m \cdot l + \int_{T_{sk}}^{T_2} m \cdot c_p \cdot dT = m \cdot c_{sp} \cdot (T_{sk} - T_1) + l \cdot m + m \cdot c_{lp} \cdot (T_2 - T_{sk}), \quad (2)$$

kde  $m$  je hmotnost PCM,  $c_{sp}$  měrná tepelná kapacita tuhé fáze PCM,  $c_{lp}$  měrná tepelná kapacita kapalně fáze PCM,  $l$  měrné skupenské teplo PCM,  $T_{sk}$  značí teplotu tání,  $T_1$  počáteční teplotu PCM a  $T_2$  konečnou teplotu PCM.



Graf 6

V grafu 6 [3] je znázorněn ohřev cca 1 tuny vody a PCM, na svislou osu je vynášena teplota a na vodorovnou osu množství akumulovaného tepla v akumulací látce. Řekněme, že minimální využitelná teplota média v zásobníku je  $40$   $[\text{°C}]$ . PCM má oproti vodě, v pevném i kapalném skupenství, nižší měrnou tepelnou kapacitu, neboli při stejné teplotě a hmotnosti obou látek, bude při ohřevu ze  $40$   $[\text{°C}]$  na  $50$   $[\text{°C}]$  akumulováno ve vodě větší množství

citelného tepla. Při ohřevu překročíme teplotu tání PCM 43 [°C] a materiál začne akumulovat latentní teplo. Celkové množství tepla akumulovaného do PCM je rovno 124 [MJ] a celkové množství tepla akumulovaného do vody (citelné teplo) je pouze 42 [MJ]. Pokud jsou obě látky dále zahřívány, tak po překročení určité teploty (v grafu je to teplota kolem 62 [°C]) bude množství citelného tepla vody vyšší než celkové množství akumulovaného tepla v PCM. Z grafu tedy vyplývá, že z hlediska množství akumulované energie, je akumulace do PCM výhodnější v menším rozpětí teplot okolo teploty tání.

### **2.3. Akumulace tepla sorpcí vodní páry**

Sorpcí vzdušné vlhkosti do hygroskopického materiálu dochází k uvolňování tepla. Podle způsobu sorpce rozlišujeme akumulaci vodní páry v tuhé (adsorpce) nebo kapalné (absorpce) látce. Nevýhodou je, že abychom mohli zásobník po adsorpci vodní páry znovu použít, musíme ho nejprve vysušit a k tomu je potřeba značné množství energie a pokud nechceme akumulovat teplo, tak musíme adsorpční materiál izolovat od vlhkosti. Hustota akumulace tepla se pohybuje v rozmezí mezi (500÷1000) [MJ/m<sup>3</sup>]. [2]

### **2.4. Akumulace tepla pomocí chemických reakcí**

Tento způsob využívá vratné chemické reakce, při kterých se uvolňuje teplo. Hustota akumulace (1000÷3000) [MJ/m<sup>3</sup>]. [2]

## **3. PCM**

PCM (Phase Change Materials) jsou materiály, které využívají fázových změn, pevná látka – kapalina nebo pevná látka – pevná látka, k akumulaci tepla. Existuje velké množství materiálů, z nichž bylo pouze deset až dvacet procent podrobně zkoumáno [2]. Aby bylo možné je použít k akumulaci, musí splňovat několik požadavků.

### **3.1. Požadavky na PCM materiály**

Při výběru PCM pro tepelný zásobník, je rozhodujícím parametrem teplota tání a množství akumulované energie, ale materiál musí splňovat i další důležité požadavky, které můžeme rozdělit do čtyř skupin popsaných v následujících odstavcích.:

#### **3.1.1. Teplotně-fyzikální vlastnosti**

##### Přechodové teploty, pracovní teplota

Závisí na konkrétním použití, teplota tání musí být nižší než teplota média v zásobníku při nabíjení, aby došlo k fázové změně. Teplota v zásobníku nesmí přesáhnout pracovní teplotu, nad kterou dochází k degradaci PCM.

##### Velké měrné skupenské teplo fázového přechodu

##### Vysoká tepelná kapacita v obou fázích

### Hustota akumulovaného latentního tepla

Entalpie tání vztažená na jednotku objemu by měla být co možná největší, aby se minimalizovaly rozměry a tím i cena zásobníku.

### Tepelná vodivost

Ovlivňuje rychlost, kterou se zásobník nabíjí /vybíjí. Požadujeme vysokou tepelnou vodivost v tuhé i kapalně fázi.

### Hustota

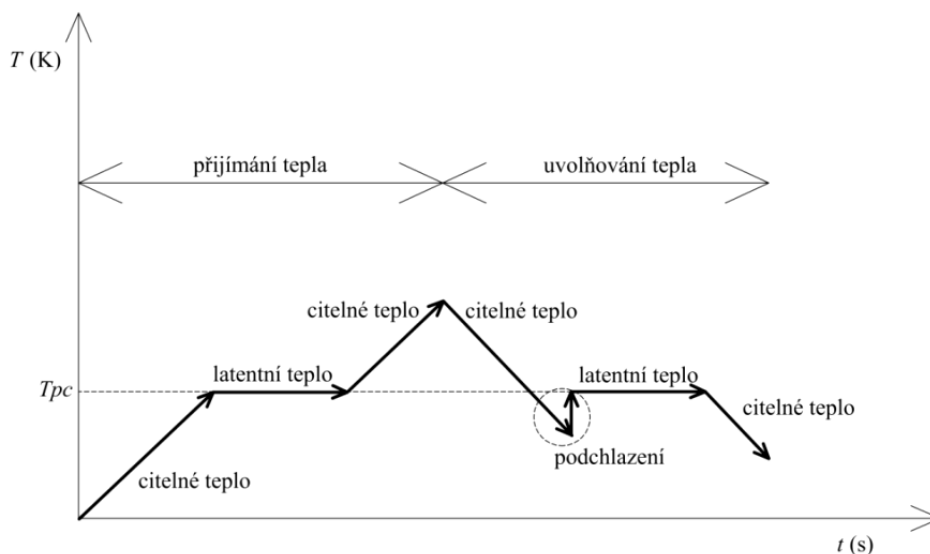
Čím větší je hustota PCM, tím menší množství materiálu potřebujeme k akumulaci daného množství tepla.

### Změna objemu, tlak tvořících se par

PCM materiál je v tepelném zásobníku většinou zapouzdřen, proto je žádoucí, aby změna objemu v rozmezí teplot použitelnosti byla co nejmenší, stejně tak tlak par při maximální teplotě. [5], [6]

## 3.1.2. Kinetické vlastnosti

### Podchlazení



Graf 7 [4]

Podchlazení je efekt, kdy je roztavená látka ochlazená pod teplotu tuhnutí, ale nedochází ke krystalizaci. V grafu 7 je zakreslen průběh ohřevu a ochlazování PCM s podchlazením. Tato vlastnost komplikuje vybíjení a je nutné s ní počítat při návrhu akumulátoru, v případě sezónních zásobníků můžeme podchlazení využít k dosažení nulových ztrát při skladování tepla.

### Rychlost krystalizace

### 3.1.3. Chemické vlastnosti

#### Absolutně vratný cyklus krystalizace a tání

Toto platí v případě tepelného zásobníku, ale pokud PCM použijeme jako ochranu proti přehřátí, pak nám postačí pouze jeden cyklus.

#### Stálost vlastností

Dlouhá životnost při stálém tepelném zatížení

#### Kompatibilita s ostatními materiály

Médium určené k akumulaci nesmí reagovat s materiálem pouzdra, v kterém je médium uloženo. Zároveň by mělo být inertní k materiálům, ze kterých je vyroben zásobník, z důvodu možného úniku média z obalu.

#### Netoxický, nezápalný nevýbušný

V případě úniku PCM z pouzdra nesmí dojít ke zničení zařízení nebo k ohrožení životů a životního prostředí. [5], [6]

### 3.1.4. Ekonomické vlastnosti

#### Dostupnost na trhu v dostatečném množství

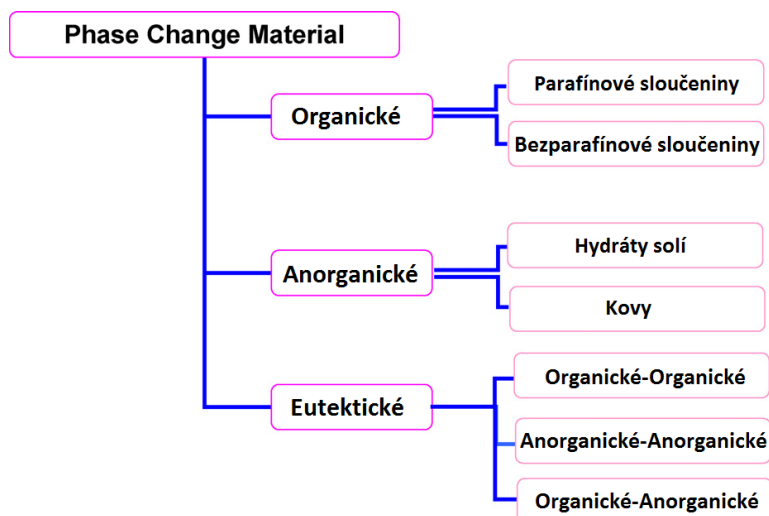
#### Cena

Vysoký poměr měrné skupenské teplo/cena a konkurenceschopnost s ostatními typy akumulace tepla je také důležitý faktorem pro volbu PCM

#### Recyklovatelnost

[5], [6]

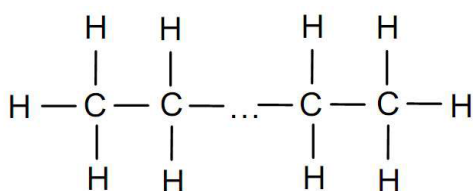
### 3.2. Základní rozdělení PCMs



### 3.2.1. Organické PCM

Skupina organických materiálů používaná pro akumulaci tepelné energie má široký rozsah teplot, ale cenově výhodné jsou látky, jejichž skupenské teplo se pohybuje okolo hodnoty 200 [kJ/(kg K)]. Cyklickým namáháním nedochází k fázové segregaci neboli ke snížení hodnoty latentního tepla během používání vlivem snížení množství látky měnící fázi. Krystalizují s minimálním nebo žádným podchlazením, obvykle nereagují s ostatními materiály, jsou chemicky stálé a recyklovatelné. Dělí se na parafínové sloučeniny a bezparafínové sloučeniny.

#### 3.2.1.1. Parafínové sloučeniny



Obr. 1 – Obecný řetězec parafínu

Parafíny (alkany) jsou nasycené uhlovodíky s lineárním uhlíkovým řetězcem. Čím je tento řetězec delší tím více tepla a vyšší teplota je třeba pro změnu skupenství. Parafíny nejsou toxické a rozpustné ve vodě, ale jedná se o hořlaviny, proto se do nich přidávají retardéry hoření. Mají nízkou tepelnou vodivost, což

prodlužuje proces změny skupenství. Zvětšení objemu po roztavení je okolo 10 [%]. Parafíny jsou chemicky stálé do teploty 500 [°C], s kovy nereagují, ale u plastů může dojít ke změkčení. V tabulce 2 je uvedeno několik příkladů parafínu a jejich vlastností. [5], [6]

Materiál	Teplota tání (°C)	Entalpie tání (kJ/kg)	Hustota (kg/m <sup>3</sup> )
C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>	6	230	760 (kapalina) -
C <sub>13</sub> H <sub>28</sub>	10	212	770 (kapalina) -
C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>	18	210, 238	760 (kapalina) -
C <sub>17</sub> H <sub>36</sub>	19	240	776 (kapalina) -
C <sub>19</sub> H <sub>40</sub>	28	200, 245	774 (kapalina) 814 (pevná látka)
C <sub>21</sub> H <sub>44</sub>	38	283	779 (kapalina) -
C <sub>23</sub> H <sub>48</sub>	66	-	775 (kapalina) -

Tabulka 2 [6]

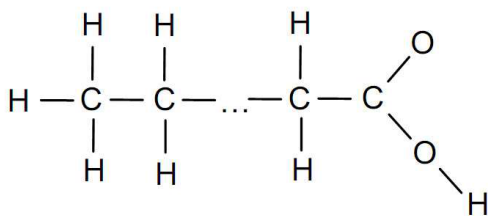
#### 3.2.1.2. Bezparafínové sloučeniny

Skupina obsahující největší množství PCM. Po změně skupenství výrazně mění svoje vlastnosti a jednotlivé bezparafínové PCM se navzájem svými vlastnostmi velmi liší, narozdíl od parafínů.



### 3.2.1.3. Mastné kyseliny

Mastné kyseliny mají špatnou tepelnou vodivost a k nastartování procesu tuhnutí potřebují



Obr. 2 - Obecný řetězec mastných kyselin

mírné podchlazení. Entalpie a teplota tání se zvětšují s délkou uhlíkového řetězce. Aby bylo dosaženo požadovaných vlastností, jsou některé kyseliny míseny. V tabulce 3 je uvedeno několik příkladů mastných kyselin a jejich vlastností. [5], [6]

Materiál	Teplota tání (°C)	Entalpie tání (kJ/kg)	Hustota (kg/m <sup>3</sup> )
$\text{C}_{11}\text{H}_{23}\text{COOH}$	16	149	901 (kapalina) 981 (pevná látka)
$\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{COOH}$	32	153	886 (kapalina) 1004 (pevná látka)
$\text{C}_{13}\text{H}_{27}\text{COOH}$	42–44	178	870 (kapalina) 1007 (pevná látka)
$\text{C}_{14}\text{H}_{29}\text{COOH}$	58	186, 204	861 (kapalina) 990 (pevná látka)
$\text{C}_{15}\text{H}_{31}\text{COOH}$	61, 64	185, 203	850 (kapalina) 989 (pevná látka)

Tabulka 3 [5]

### 3.2.1.4. Cukerné alkoholy

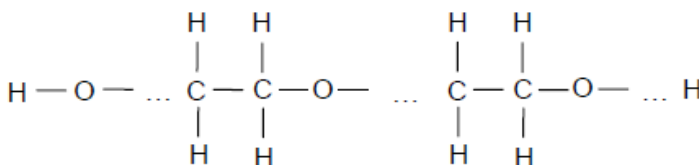
Cukerné alkoholy (alditoly) používané jako PCM mají poměrně vysokou teplotu tání od 90 [°C] do 200 [°C]. Mají vysokou hustotu akumulované energie, dochází u nich k mírnému podchlazení a jsou to bezpečné a netoxické látky, např. sorbitol se používá jako sladidlo. Jejich obecný vzorec je  $\text{HOCH}_2[\text{CH}(\text{OH})]_n\text{CH}_2\text{OH}$ . V tabulce 4 je uvedeno několik příkladů cukerných alkoholů a jejich vlastností. [5], [6]

Materiál	Teplota tání (°C)	Entalpie tání (kJ/kg)	Hustota (kg/m <sup>3</sup> )
Xylitol $\text{C}_5\text{H}_{12}(\text{OH})_5$	94	263	– 1500 (pevná látka)
D-Sorbitol $\text{C}_6\text{H}_{14}(\text{OH})_6$	97	185	– 1520 (pevná látka)
Erythritol $\text{C}_4\text{H}_8(\text{OH})_4$	120	340	1300 (kapalina) 1480 (pevná látka)
D-Mannitol $\text{C}_6\text{H}_{14}(\text{OH})_6$	167	316	– 1520 (pevná látka)
Galactitol $\text{C}_6\text{H}_{14}(\text{OH})_6$	188	351	– 1520 (pevná látka)

Tabulka 4 [5]

### 3.2.1.5. Polyethylenglykoly (PEG)

Nereaktivní a netoxické polymery, rozpustné ve vodě. Pro akumulaci latentního tepla se využívají PEG, tající při nízké teplotě. Jejich vlastnosti závisí na hmotnosti vzorce polymeru, který má tvar  $C_{2n}H_{4n+2}O_{n+1}$ . V tabulce 5 je uvedeno několik příkladů PEG a jejich vlastností. [5],



Obr. 3 – obecný řetězec PEG

[6]

Materiál	Teplota tání [°C]	Entalpie tání [kJ/kg]	Tepelná vodivost [W/(m K)]	Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]
Diethylen glycol C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub>	-10 až -7	-	-	1120 (kapalina, 20°C) -
Triethylen glycol C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O <sub>4</sub>			-	1120 (kapalina, 20°C) -
PEG400	8	100	0,19 (kapalina, 38°C) -	1125 (kapalina, 25°C) 1228 (pevná l., 3°C)
PEG600	17-22	127	0,19 (kapalina, 38°C) -	1126 (kapalina, 25°C) 1232 (pevná l., 4°C)
PEG1000	35-40	-	-	-
PEG6000	55-60,66	190	-	1085 (kapalina, 70°C) 1212 (pevná l., 25°C)

Tabulka 5 [5]

### 3.2.2. Anorganické PCM

Anorganické látky jsou použitelné v širokém rozsahu teplot. Oproti organickým látkám mají větší hustotu, vysokou hodnotu entalpie tání vztahenou na jednotku objemu, nejsou hořlavé, mají vyšší tepelnou vodivost a na trhu jsou k sehnání za nižší cenu. Dále je můžeme rozdělit na kovy a hydráty solí.

#### 3.2.2.1. Hydráty solí

Hydráty solí jsou krystalické látky skládající se z vody a soli, jejich obecný vzorec je  $AB_nH_2O$ . Proces změny skupenství z pevného na kapalné je vlastně dehydratace, ale termodynamicky se podobá tání. Hydráty solí se roztaví buďto na hydráty solí s méně molekulami vody a vodu nebo na jeho bezvodou formu a vodu. Problémem je, že pokud se hydráty solí při teplotě tání dehydratují na nižší hydráty, pak se neuvolní dostatečné množství vody k rozpuštění soli ve

vodě a klesá množství latentního tepla potřebného ke změně skupenství. Další nevýhodou je podchlazení, které může u některých hydrátů být až 80 [°C]. Hydráty solí mají dobrou hustotu akumulace energie, tepelnou vodivost (téměř dvojnásobnou oproti parafínům), chemickou stabilitu, ale jsou s některými kovy reaktivní a jsou mírně toxické. V tabulce 6 je uvedeno několik příkladů hydrátů solí a jejich vlastností. [5], [6], [2]

<b>Materiál</b>	<b>Teplota tání (°C)</b>	<b>Entalpie tání (kJ/kg)</b>	<b>Hustota (kg/m<sup>3</sup>)</b>
LiClO <sub>3</sub> ·3H <sub>2</sub> O	8	155	1530 (kapalina) 1720 (pevná látka)
KF·3H <sub>2</sub> O	18,5	231	1447 (kapalina) 1455 (pevná látka)
CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	29,30	171, 190	1562 (kapalina) 1710 (pevná látka)
LiNO <sub>3</sub> ·3H <sub>2</sub> O	30	296	– –
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·10H <sub>2</sub> O	32	254	– 1458 (pevná látka)
Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> ·12H <sub>2</sub> O	35–44	280	1442 (kapalina) 1522 (pevná látka)
Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·5H <sub>2</sub> O	48–55	187, 209	1670 (kapalina) 1750 (pevná látka)
Na(CH <sub>3</sub> COO)·3H <sub>2</sub> O	58	226, 264	1280 (kapalina) 1450 (pevná látka)
Ba(OH) <sub>2</sub> ·8H <sub>2</sub> O	78	265, 280	1937 (kapalina) 2180 (pevná látka)
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	89, 90	149, 163	1550 (kapalina) 1636 (pevná látka)

Tabulka 6 [5]

### 3.2.2.2. Kovy

Používají se čisté kovy nebo eutektické slitiny kovů s nízkou teplotou tání. Mají velice dobrou tepelnou vodivost, vysokou entalpii tání, nízkou tepelnou kapacitu, ale příliš se nepoužívají z důvodu jejich velké hustoty. [5]

### 3.2.3. Eutektické PCM

Eutektická směs je složena minimálně ze dvou složek, které jsou rozpustné v tekutém stavu a nerozpustné nebo částečně rozpustné ve stavu tuhém. Podíl mísených složek v eutektické směsi je takový, kdy má směs nejnižší možnou teplotu tání. U eutektik obvykle nedochází

k segregaci, protože obě složky krystalizují současně. Do této skupiny můžeme zařadit eutektické slitiny kovů, ale i eutektické solné roztoky. Několik příkladů je uvedeno v tabulkách 7 a 8. [5]

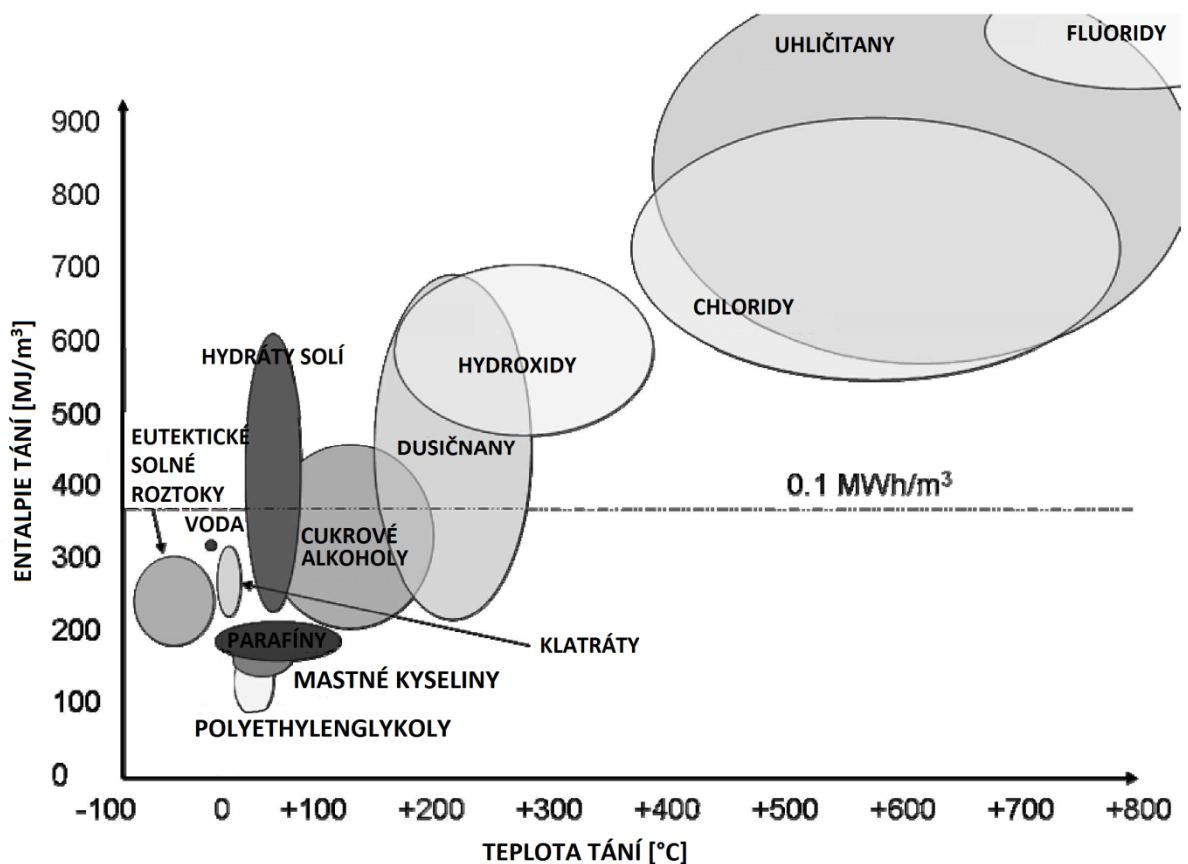
<b>Materiál</b>	<b>Teplota tání (°C)</b>	<b>Entalpie tání (kJ/kg)</b>	<b>Hustota (kg/m<sup>3</sup>)</b>
Gallium	30	80,3	5907 (kapalina) 6095 (pevná látka)
Bi-Pb-Sn-Cd-In (eutektikum)	18	90,9	– –
Bi-Cd-In (eutektikum)	61	25	– –
Bi-Pb-In (eutektikum)	70	29	– –
Bi-In (eutektikum)	72	25	– –
Bi-Pb (eutektikum)	96	–	– –

Tabulka 7 [5]

<b>Materiál</b>	<b>Teplota tání (°C)</b>	<b>Entalpie tání (kJ/kg)</b>	<b>Hustota (kg/m<sup>3</sup>)</b>
Al(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> (30,5 % hm.)/H <sub>2</sub> O	–30,6	131	1283 (kapalina) 1251 (pevná látka)
NaCl (22,4 % hm.)/H <sub>2</sub> O	–21,2	222	1165 (kapalina) 1108 (pevná látka)
KCl (19,5 % hm.)/ H <sub>2</sub> O	–10,7	283	1126 (kapalina) 1105 (pevná látka)
H <sub>2</sub> O	0	333	998 (kapalina) 917 (pevná látka)

Tabulka 8 [5]

Materiálů, které je možné použít k akumulaci latentního tepla je celá řada a výše uvedené rozdělení představuje pouze jejich část. PCM materiály můžeme také rozdělit podle dvou nejdůležitějších parametrů, teploty tání a entalpie tání, viz obr. 4.



Obr. 4 [7]

Nejdéle známou látkou sloužící k akumulaci chladu je voda. Chlazení ledem se používá již přes 2000 let. Pro teploty pod 0 [°C] se používají eutektické směsi solí. Oblast teplot 0 [°C] do zhruba 130 [°C] pokrývají hydráty solí, parafíny, mastné kyseliny a cukrové alkoholy. Klatráty jsou krystalické struktury, v jejichž krystalické mřížce jsou uzavřeny molekuly jiné látky. Teploty tání klatrátů se pohybují v oblasti od 0 [°C] do 30 [°C]. Při teplotách nad 150 [°C] se používají různé soli a jejich směsi. [7]

### 3.3. Změna skupenství PCM

Soustava skládající se z několika různých složek  $s$ , která je v termodynamické rovnováze, může obsahovat pouze jednu fázi (homogenní soustava) nebo více fází (heterogenní soustava). Při daném počtu složek a fází  $f$  je určitý počet parametrů  $v$  (počet stupňů volnosti), které můžeme měnit. Počet stupňů volnosti nám udává Gibbsovo fázové pravidlo, rovnice 3.

$$f + v = s + 2 \quad (3)$$

#### 3.3.1. Změna skupenství čisté látky

V Jednosložkových soustavách se většinou vyskytuje jedna plynná fáze, jedna kapalná fáze a několik pevných fází (různé krystalické modifikace), ale v technické praxi uvažujeme jen nejvíce zastoupenou pevnou fázi. Při změně skupenství často i se změnou krystalové struktury se mění skokově objem soustavy, její hustota, vnitřní energie a spotřebovává se nebo uvolňuje

latentní teplo (teplo fázové přeměny). Proces změny skupenství je, s výjimkou amorfních látek, izotermický. [12]

Stav jednosložkové soustavy je jednoznačně určen dvěma parametry, většinou tlakem a teplotou. Podle Gibbsova fázového pravidla mohou pro 1 složkový systém nastat tři případy.

### 1) Bivariantní soustava

$$f = 1, s = 1 \rightarrow v = 2$$

Soustava obsahuje jednu fázi a má dva stupně volnosti. Tlak a teplota se mohou v určitém rozsahu měnit, aniž by docházelo ke změně fáze.

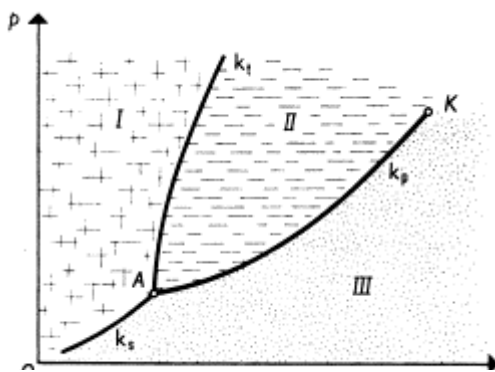
### 2) Monovariantní soustava

$f = 2, s = 1 \rightarrow v = 1$ . Soustava obsahuje dvě fáze a má jeden stupeň volnosti. Nyní se může měnit pouze tlak nebo teplota.

### 3) Invariantní soustava

$f = 3, s = 1 \rightarrow v = 0$ . Soustava obsahující tři fáze nemá žádný stupeň volnosti a její stav je jednoznačně určen trojným bodem.

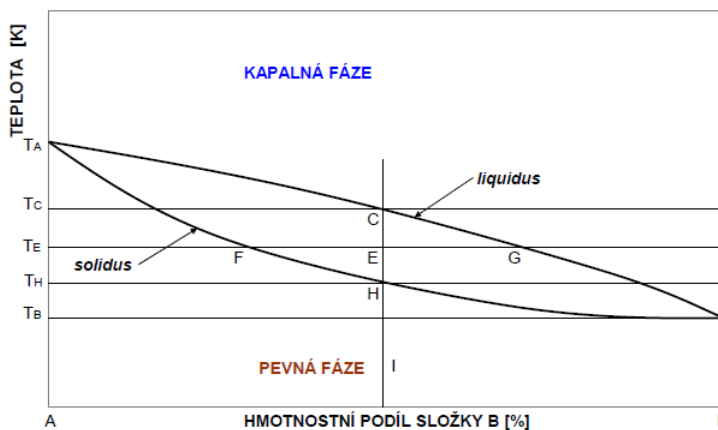
Stav jednosložkového systému lze dobře zobrazit fázovým diagramem, obr. 5.



Obr. 5

Oblast p-T diagramu je rozdělena na tři oblasti, skupenství pevné (I), kapalně (II) a plynné (III). Bod K je kritický bod, nad teplotou kritického bodu již nelze látku zkapalnit zvýšením tlaku. Stav na křivkách přísluší koexistenci dvou fází. V trojném bodě (A) existují zároveň všechny tři skupenství. Mezi oblastmi I a II se nachází křivka tání  $k_t$ , mezi oblastmi II a III nasycených par  $k_p$  a mezi oblastmi I a III sublimační křivka  $k_s$ . [12]

### 3.3.2. Změna skupenství směsi



Obr. 6 [8]

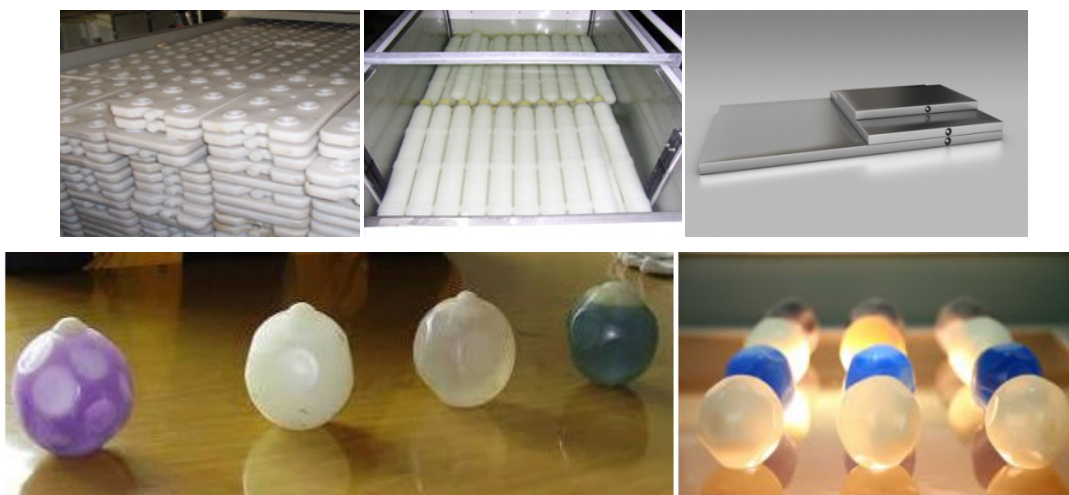
Chování vícesložkové soustavy můžeme znázornit v trojrozměrném diagramu, kde jsou teplota, tlak a složení směsi proměnnými. Složení směsi ovlivňuje teplotu tání a její nejnižší hodnoty dosáhneme při eutektickém složení. Změna skupenství, za podmínky konstantního tlaku, neprobíhá izotermicky, ale musíme teplotu směsi zvyšovat. V praxi se používají

plošné diagramy, kdy je jedna z veličin konstantní (tlak nebo teplota). Příklad plošného izobarického diagramu je na obrázku 6. Na svislé ose je vynášena teplota a na vodorovné ose zastoupení složky B ve směsi. Mezi čarami liquidus a solidus se nachází oblast koexistence pevné a kapalné fáze. Svislice I udává složení směsi, pokud směs ohříváme, tak v bodě H začíná a v bodě C končí proces tání směsi.  $T_H$  označuje teplotu tání a  $T_C$  teplotu tuhnutí. [12]

### 3.4. Zapouzdření PCM

Většinou se PCM používá v zapouzdřené podobě, ale existují i aplikace, kdy je přímo tepelný zásobník vyplněn PCM a teplo je přiváděno/odváděno pomocí tepelného výměníku. Obal zabraňuje úniku PCM do okolního prostředí, PCM by pak mohl reagovat s materiály použitými v akumulční soustavě nebo znečišťovat životní prostředí. Při kontaktu PCM s jinými látkami může docházet ke změně jeho chemického složení. Pouzdra se vyrábějí z materiálů, které jsou k PCM chemicky netečné a mají dobrou tepelnou vodivost, většinou to jsou kovy nebo plasty. Rozlišujeme mikro a makro zapouzdření.

Makro-zapouzdření je takové, kdy je větší množství PCM zapouzdřeno v nějakém obalu. Objem pouzdra se pohybuje od několika mililitrů do několika litrů. Obal usnadňuje manipulaci a snižuje změnu objemu po fázové změně. Tvar pouzdra má vliv nejen na množství PCM, které se vejde do zásobníku, ale také ovlivňuje proudění teplotněsensitive látky v zásobníku a tím i přenos tepla. Vhodným tvarem můžeme zvětšovat teplosměnnou plochu s PCM.

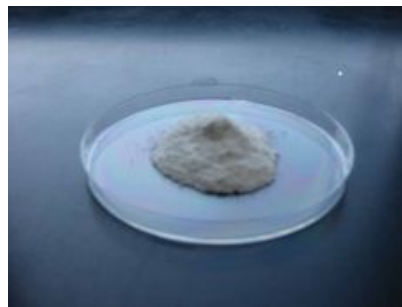


Obr. 7 – Příklad makro-zapouzdřeného PCM

V případě mikro-zapouzdření je velikost pouzder od 1 mikrometru do stovek mikrometrů. PCM je zapouzdřeno do polymerní kapsle tvaru koule. V současné době se k mikro-zapouzdření používají pouze organické PCM a výsledný produkt má podobu prášku nebo tekuté disperze (kaly), z kterého se pak tvoří kompozity s jinými materiály, obr. 8, 9. PCM kaly se používají jako teplotněsensitive a zároveň akumulční látka v topných systémech. Výhodou mikro-zapouzdřeného PCM je větší teplosměnná plocha v porovnání se stejným objemem PCM s makro-zapouzdřením, větší cyklická stabilita a jednoduché vytvoření kompozitu. Nevýhodou je větší pravděpodobnost podchlazení. Prášek se používá např. ve stavebnictví, jako přídatná látka do betonu, aby se zvýšila tepelná kapacita zdí nebo v textilním průmyslu. [5], [8]



Obr. 8 – PCM kaly



Obr. 9 – Mikro-zapouzdřené PCM

## 4. Tepelné zásobníky

Tepelný zásobník je nádrž s akumulační látkou, do které se akumuluje tepelná energie od různých zdrojů tepla a tím se zvyšuje tepelná účinnost otopné soustavy. Tepelné zásobníky jsou také důležitou součástí solárních systémů, kde je možné zvýšit solární zisk o patnáct až dvacet procent [2]. Akumulované teplo se využívá k přípravě teplé užitkové vody nebo pro vytápění objektu. Zásobníky můžeme rozdělit na krátkodobé (denní) nebo dlouhodobé (sezónní).

### Krátkodobé tepelné zásobníky

Slouží k uložení tepelné energie maximálně na několik dnů, proces nabíjení a vybíjení se neustále opakuje. Jejich objem se pohybuje od několika  $m^3$  do několika desítek  $m^3$ .

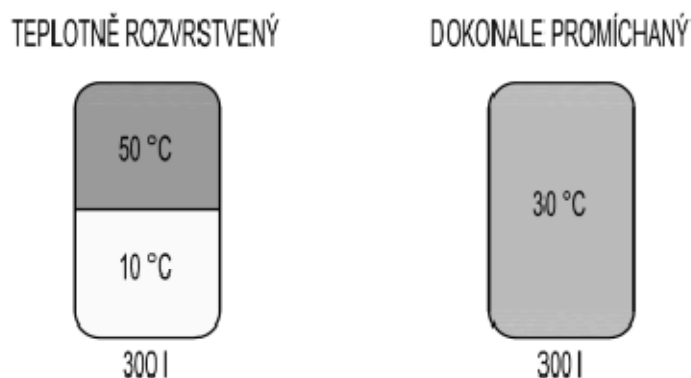
### Dlouhodobé tepelné zásobníky

Teplo se akumuluje v průběhu celého roku a následně se využívá k vytápění budov. Velikost zásobníku je kompromisem mezi cenou a technickým řešením, platí, že s rostoucím objemem roste i cena zásobníku, ale klesají měrné tepelné ztráty. Dlouhodobé tepelné zásobníky v současnosti využívají k akumulaci pouze citelné teplo a provozují se např. ve spojení se solárními kolektory. Pokud je energie akumulována jako citelné teplo, pak dodáváním tepla stále stoupá teplota akumulačního média a tím se zvětšují tepelné ztráty vedením. Jako vhodné řešení tohoto problému se jeví PCM zásobníky. [2]

### 4.1. Konstrukce vodních zásobníků

Pro zásobníky, které slouží pro přípravu teplé vody, je výhodné pokud jsou konstruovány tak, aby v nich docházelo k teplotnímu rozvrstvení vody (stratifikaci). Voda se vlivem gravitace rozvrství v nádobě na základě rozdílných hustot, teplá voda stoupá do vyšších vrstev a studená naopak. Pro odběr je tak připravena voda o vyšší teplotě než v případě, kdy by se voda v zásobníku promíchávala, viz obr. 10.





Obr. 10 [2]

Do obou zásobníků na obrázku 10 bylo dodáno stejné množství tepla. Voda v dokonale promíchaném zásobníku má v případě na obrázku teplotu pouze 30°C, což je pro použití v domácnosti málo a voda by musela být dohřívána jiným zdrojem tepla. Oproti tomu zásobník se stratifikací disponuje menším množstvím vody o teplotě 50°C, ale není zde třeba dalšího ohřevu vody. Zásobník s dobrou stratifikací zvyšuje účinnost solárních kolektorů. Promíchaný zásobník je vhodný pro systémy s velkými průtoky média, kdy okruh se solárními kolektory není oddělen od zásobníku tepelným výměníkem (stejně médium).

Teplotní rozvrstvení vody v zásobníku ovlivňuje několik faktorů:

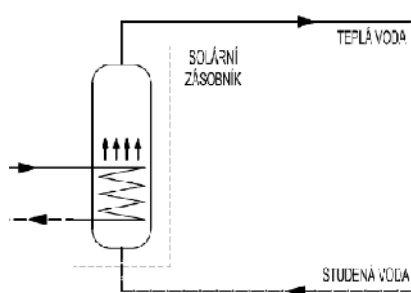
- Štíhlost zásobníku – poměr délka/průměr
- Přívod a odběr vody

Provedení přívodu studené vody, přívodu tepla a odběru teplé vody má největší vliv na stratifikaci. Nejběžnějším zásobníkem je s nepřímým nabíjením a přímým vybíjením obr. 11, voda v zásobníku je ohřívána přes tepelný výměník. Topný okruh je oddělen a může být naplněn nemrznoucí směsí, což je výhodné např. u solárních systémů, protože pak mohou pracovat i při teplotách pod 0°C.

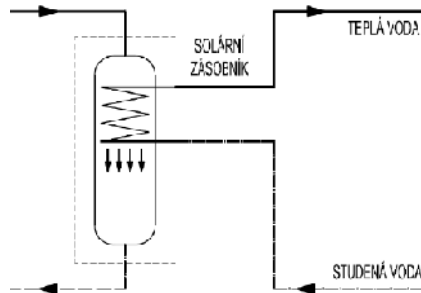
Zásobník s přímým nabíjením a nepřímým vybíjením obr. 12 se používá pro kombinované soustavy (příprava teplé vody, vytápění). Nevýhodou je, že při vybíjení dochází v oblasti výměníku k ochlazení vody, která klesá ke dnu a promíchává tak objem zásobníku.

Zásobník s nepřímým nabíjením i vybíjením je na obrázku 13. Nabíjení i vybíjení probíhá pomocí tepelných výměníků. U tohoto způsobu je teplotní vrstvení nejméně účinné.

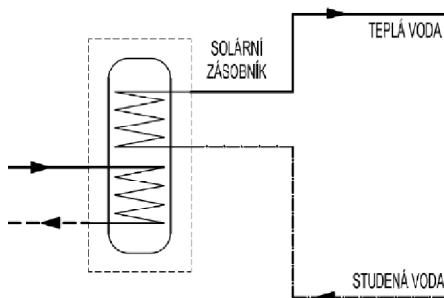
Zásobník s přímým nabíjením i vybíjením obr. 14, musí být opatřen stratifikačními vestavbami. Zásobník je určen pro malé průtoky vstupní a výstupní vody, aby nedocházelo k promíchávání objemu.



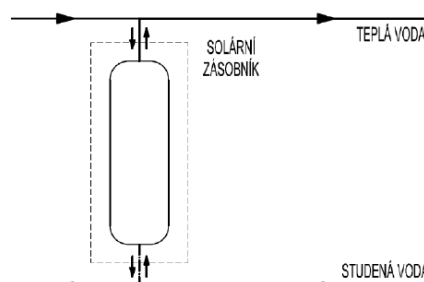
Obr. 11 [2]



Obr. 12 [2]



Obr. 13 [2]



Obr. 14 [2]

- Vertikální vedení tepla stěnami zásobníku
- Vedení akumulací látkou

Aby nedocházelo při ohřevu vody k promíchání vrstev, je do zásobníku přidána stratifikační trubková vestavba, kterou teplá voda stoupá do vrstvy o stejné teplotě. Při konstruování zásobníku je dalším důležitým aspektem dostatečná izolace. Zásobník by měl mít co možná nejmenší ztráty při nízkých nákladech na jeho zhotovení. Izolace musí mít malou tepelnou vodivost, která se s okolními podmínkami (vlhkost, teplota, proudění vzduchu) nemění. Nádobu zásobníku je zhotovena většinou z nerezové oceli, železobetonu nebo plastu. Druh použitého materiálu závisí hlavně na velikosti zásobníku a zástavbovém prostoru. Pokud samotná nádoba zásobníku není vodotěsná, pak se jako hydroizolace používají nerezové plechy nebo v případě nízkoteplotních zásobníků hydroizolační fólie. [2]

#### 4.2. Latentní zásobníky

Latentní zásobníky mají větší hustotu akumulované energie oproti stejně velkým kalorickým zásobníkům, protože využívají k akumulaci i skupenské teplo procesu tání-tuhnutí. PCM musí mít pro danou aplikaci vhodnou teplotu tání, což není problém, protože dnes již je možné vytvořit PCM podle požadavků zákazníka. Konstrukce latentních zásobníků, je v podstatě stejná s konstrukcí vodních zásobníků. Zásobníkem je tepelně izolovaná nádrž, která je naplněna PCM nebo teplotonosným médiem, které obtéká makro – zapouzdřené PCM.

#### 4.2.1. Nabíjení zásobníku

Nabíjení je proces, kdy je teplo akumulováno v zásobníku. Nejdříve se musí zásobník nahřát na teplotu tání PCM, dodáváme citelné teplo. Po dosažení teploty tání začíná PCM měnit skupenství, dodáváme skupenské teplo. Po proběhnutí fázové změny se PCM podchladí nebo se udržuje teplota nad teplotou tuhnutí na teplotě nabití zásobníku, podle typu zásobníku. Pro nabití denního zásobníku spotřebujeme energii

$$Q_{\text{nabíjení}} = m_{\text{PCM}} \cdot c_{\text{solidus}} \cdot (t_{\text{tání}} - t_{\text{okolí}}) + m_{\text{PCM}} \cdot l_{\text{tání}} + m_{\text{PCM}} \cdot c_{\text{liquidus}} \cdot (t_{\text{nabití}} - t_{\text{tání}}), \quad (4)$$

za předpokladu, že se teplota během fázové přeměny nemění.

Pokud chceme uchovávat teplo dlouhodobě, je výhodné roztavené PCM podchladit. Aby bylo možné PCM podchladit, nesmí se v roztavené látce nacházet žádné krystaly látky, které by při chladnutí nastartovaly fázovou přeměnu. Po ochlazení PCM je množství akumulovaného tepla v sezonním zásobníku rovno

$$Q_{\text{aku.}} = m_{\text{PCM}} \cdot c_{\text{solidus}} \cdot (t_{\text{tání}} - t_{\text{okolí}}) + m_{\text{PCM}} \cdot l_{\text{tání}} + m_{\text{PCM}} \cdot c_{\text{liquidus}} \cdot (t_{\text{okolí}} - t_{\text{tání}}). \quad (5)$$

#### 4.2.2. Vybíjení zásobníku

V případě denního zásobníku můžeme okamžitě odebírat teplo. Překročením teploty tuhnutí se zastaví pokles teploty (jednosložkové PCM), po odebrání veškerého latentního tepla bude PCM opět v tuhém skupenství a může následovat proces nabíjení. Vybíjecí proces dlouhodobého zásobníku, kde je PCM podchladené, musí nejdříve spustit vnější impuls. Nejspolehlivějším způsobem, jak spustit nukleaci je vložení krystalu použitého PCM do kapalné fáze. Poté dojde ke krystalizaci veškerého PCM a uvolnění skupenského tepla. Nejdříve dojde k solidifikaci, přičemž se začne uvolňovat latentní teplo. Část tohoto tepla se využije pro ohřátí PCM z teploty okolí na teplotu tuhnutí. Nemůžeme ale využít všechno uskladněné teplo, protože při ochlazení PCM jsme omezeni minimální pracovní teplotou zásobníku, což je nejnižší teplota, do které je možné zásobník vybíjet. Využitelné teplo při vybíjení je pak rovno

$$Q_{\text{využ.}} = Q_{\text{aku.}} + m_{\text{PCM}} \cdot c_{\text{solidus}} \cdot (t_{\text{okolí}} - t_{\text{pracovní}}). \quad (6)$$

#### 4.2.3. Vývoj latentních zásobníků tepla v letech 1990 až 2002

V těchto letech došlo k rozvoji techniky v oblasti využívání solární energie. Z důvodu nerovnoměrnosti získávání tepelné energie ze slunečního záření, odběru tepla pro domácnost a ve snaze co nejvíce zvýšit účinnost systému, byl do solární soustavy zařazen latentní zásobník tepla. Se zvyšující se teplotou teplotnosného média se snižuje účinnost solární soustavy, tento problém dobře navrhnutý latentní zásobník eliminuje. Při akumulaci tepla roste teplota PCM v zásobníku, tím pádem i teplota teplotnosného média v potrubí, mírně nad teplotu tání. Využíváním stratifikace, PCM s nízkou teplotou tání a vhodným umístěním výměníků tepla zaručuje, že do solárních kolektorů bude proudit co možná nejchladnější teplotnosné médium, a tím zamezíme poklesu účinnosti solárních kolektorů.

Na výstavě v Německu byly v tomto období představeny 3 typy latentních zásobníků. Prvním typem je LWS 750 Modul firmy Alfred Schneider, obr. 15. PCM náplní zásobníku je octan sodný, který taje při 58 [°C].

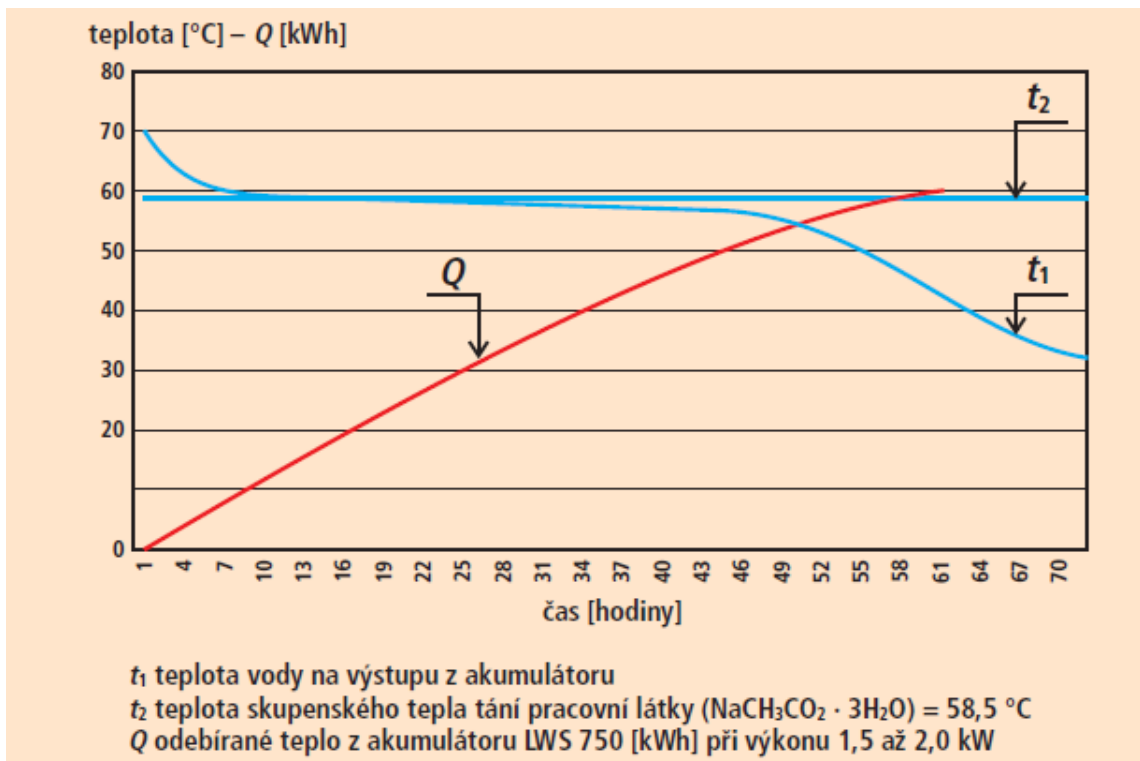


Typ 1: LWS 750 modul



Obr. 15

Vnější plášť zásobníku má tvar hranolu a je vyroben z nerezového plechu. PCM je uzavřeno ve speciálních měděných kontejnerech, které využívají 95 [%] objemu nádoby k akumulaci latentního tepla. Rozměry podstavy zásobníku jsou i se 100 [mm] tlustou tepelnou izolací 850x850 [mm] a jeho výška je 1590 [mm]. Objem vody ve výměníku tepla v zásobníku je pouze 3 [l], na velikost expanzní nádrže nebude mít připojení zásobníku do otopné soustavy negativní vliv. Ze zkušeností, při testování v Německu, je na jeden zásobník LWS 750 potřeba 7÷8 [m<sup>2</sup>] solárních kolektorů. Při akumulaci tepla z kotle je třeba min. výkon 5 [kW]. Množství akumulovaného tepla je 104 [kWh]. Časový průběh odběru tepla ze zásobníku LWS 750 je vykreslen v grafu 8. [9], [14]



Graf 8 – Časový průběh odběru tepla ze zásobníku LWS 750 [9]



500XXL.



Typ 2: Wärme – Akku

Druhým typem latentního zásobníku je LATENTO WÄRME – AKKU firmy IVT, obr. 17. Rozmístění výměníků umožňuje stratifikaci vody v nádrži. Zásobník má kvalitní tepelnou izolaci, teplotu v zásobníku lze bez odběru udržet na teplotě 90 [°C] i několik hodin a i po 8 až 10 dnech je teplota uvnitř zásobníku zhruba 70 [°C] [9]. Tento zásobník je předchůdcem níže popsaného zásobníku LATENTO

Obr. 16 – Typ 3: HWS 2002

Obr. 17

Zásobník typu 3 je výrobkem firmy H. Zimmermann GmbH, jedná

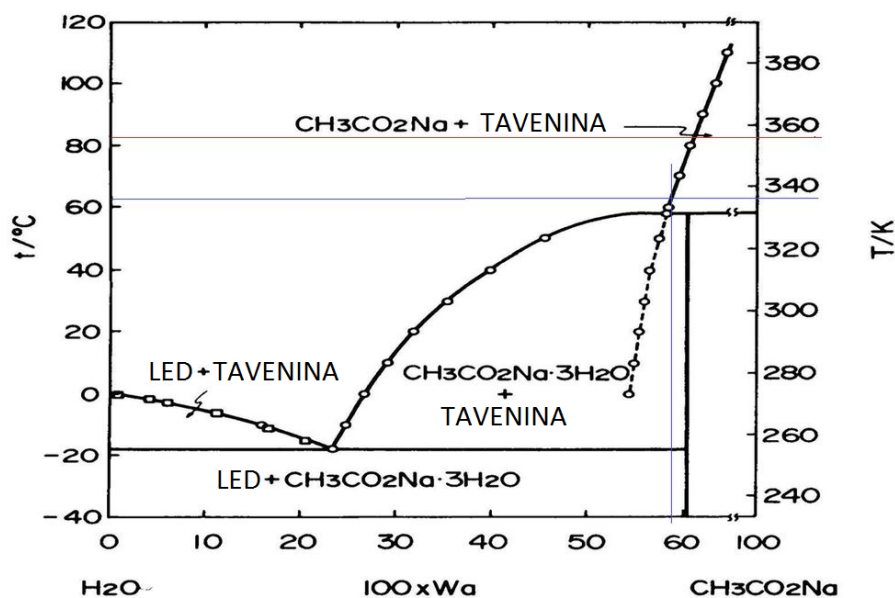
se o zásobník Oeko-zet HWS 2002. Zásobník o rozměrech bez izolace 2000x1500x2400 [mm], jehož plášť je vyroben z hliníkového plechu, je naplněn voskovým granulátem, který taje v rozmezí teplot 52÷58 [°C] [9]. Zásobník je opatřený kvalitní izolací, díky které má minimální tepelné ztráty. Sériový deskový výměník tepla uvnitř zásobníku je napojen na solární topný okruh. [9]

Číslo typu	1	2	3
Obchodní označení	Modul LWS 750	Wärme-akku Latento	Oeko-zet HWS 2002
Výrobce (výrobní skupina)	A. Schneider	IVT	H. Zimmermann
Město ústředního závodu	Lahr	Rohr	Magdeburg
Celkově akumulované teplo: citelné a latentní [kW]	122	36	
Při ohřátí pracovní látky [°C]	ze 40 na 100	z 20 na 90	
Příklad „vybíjení“ zásobníku výkonem [W]	1760	1500	
Náběhová otopná voda / zpětná otopná voda [°C]	52 / 47	50 / 45	
Hydraulická tlaková ztráta ve výměníku tepla [kPa]	93		
Při průtoku otopné vody [litr · h <sup>-1</sup> ]	300	250	
Stavební rozměry			
šířka (bez tepelné izolace) [mm]	750	780	2000
hloubka (bez tepelné izolace) [mm]	750	780	1500
výška (včetně připojovacích nátrubků) [mm]	1590	1700	2400
Hmotnost			
dopravní (bez náplně) [kg]	150	95	
provozní (včetně pracovní látky a vody) [kg]	1165		
Pracovní látka (obecný chemický vzorec)	NaCH <sub>3</sub> CO <sub>2</sub> · 3H <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> <sup>1)</sup>	C <sub>2</sub> H <sub>2n+2</sub> <sup>2)</sup>
Ztráty tepla při kvalitní tepelné izolaci vnějšího opláštění	[W · K <sup>-1</sup> ] resp. [K · h <sup>-1</sup> ]	1,4 0,1	1,4 0,1

Tabulka 9 – Shrnutí parametrů popsaných zásobníků [9]

#### 4.2.4. Porovnání vodního tepelného zásobníku a PCM sezonního zásobníku s trihydrátem octanu sodného

Při akumulaci tepla do vodního zásobníku stále roste teplota vody. Omezení teplot je obvykle od 20 [°C] do 100 [°C], teplotní rozsah pro akumulaci je tedy 80 [°C] a skladovatelná kapacita 1 [kg] vody je  $Q_{vody} = m \cdot c_{vody} \cdot \Delta T = 1 \cdot 4186,8 \cdot 80 = 334944$  [J] neboli 93,04 [Wh]. Teplota vody v plně nabitém vodním zásobníku je 100 [°C], což klade velké nároky na izolaci a dlouhodobě není možné tuto teplotu v zásobníku udržet. Pro dlouhodobou akumulaci s podchlazením byl zkoumán trihydrát octanu sodného  $\text{NaCH}_3\text{CO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ , jehož teplota tání je asi 58 [°C] a skupenské teplo tání v čistém stavu 269 [kJ/kg] (74,7 [Wh]). Stejně jako voda je nehořlavý, není jedovatý, ale jeho cena je vyšší. Výhodou je náchylnost na podchlazení, není problém ho podchládit na teplotu 25 [°C], pak jsou ztráty nulové a můžeme teplo dlouhodobě skladovat. Trihydrát octanu sodného obsahuje 60,3 [%] octanu sodného a 39,7 [%] vody, při tomto složení dojde k úplnému rozpuštění tuhé fáze při teplotě 84 [°C], viz graf 9. Změníme-li složení směsi přidáním 0,44 [%] vody, tak k úplnému rozpuštění tuhé fáze dojde již při teplotě 65 [°C].



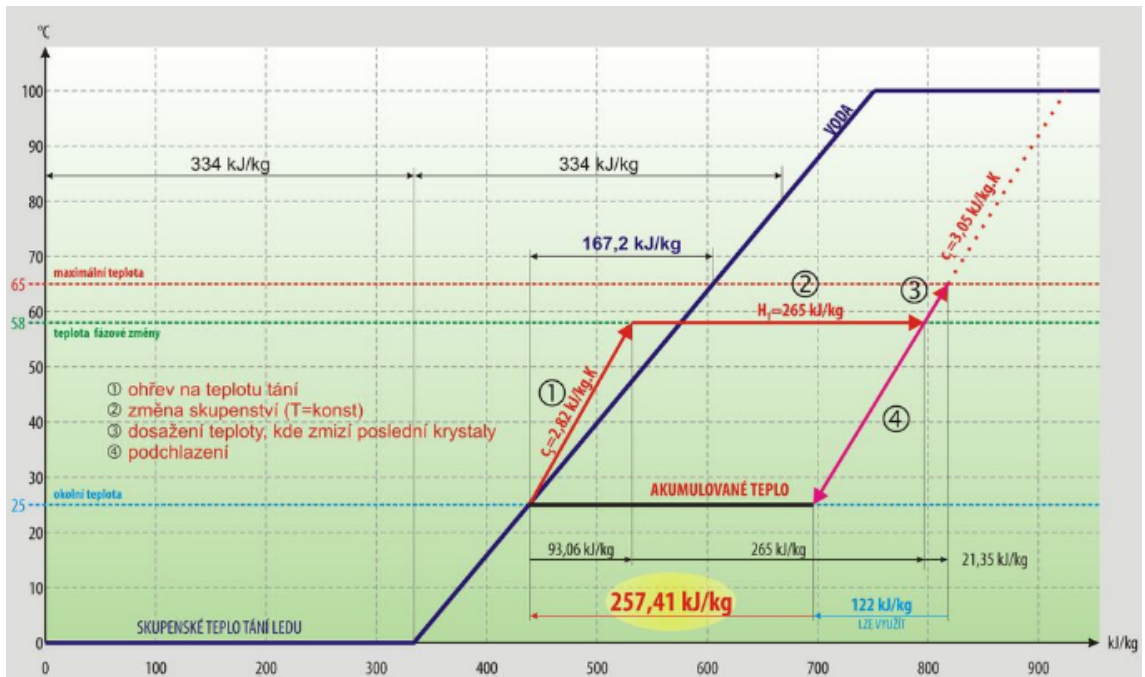
Graf 9 – Fázový diagram  $\text{CH}_3\text{CO}_2\text{Na} - \text{H}_2\text{O}$  [10]

Při nabíjení PCM zásobníku musíme nejprve dodat teplo potřebné k ohřevu látky na teplotu tání 58 [°C], následně dodat skupenské teplo a zároveň teplo potřebné k ohřátí taveniny na teplotu 65 [°C]. Aby byla zajištěna správná funkce zásobníku, je třeba do tepelně-akumulační látky přidat aditiva, která zaručí, že nedojde k oddělení pevné a kapalné fáze a ke změně vlastností látky. Po přidání aditiv a vody klesne skupenské teplo tání. Měrná tepelná kapacita tuhé fáze bude  $c_{p,A,solidus} = 2,82$  [kJ/(kg K)], kapalné fáze  $c_{p,A,liquidus} = 2,05$  [kJ/(kg K)], měrné latentní teplo  $l_{PCM,A} = 265$  [kJ/kg] a teplo potřebné k nabití 1 [kg] tepelně-akumulačního média v zásobníku je

$$Q_{nabijeni} = m \cdot c_{p,A,solidus} \cdot (t_{tani} - t_{okolí}) + m \cdot l_{A,PCM} + m \cdot c_{p,A,liquidus} \cdot (t_{kapalina} - t_{tani}) =$$

$$= 1 \cdot 2,82 \cdot (58 - 25) + 1 \cdot 265 + 1 \cdot 2,05 \cdot (65 - 58) = 379,41 \text{ [kJ/kg]},$$

což odpovídá 105,39 [Wh/kg]. Proces nabíjení PCM zásobníku je znázorněn v grafu 10.



Graf 10 – nabíjení PCM sezonního zásobníku [10]

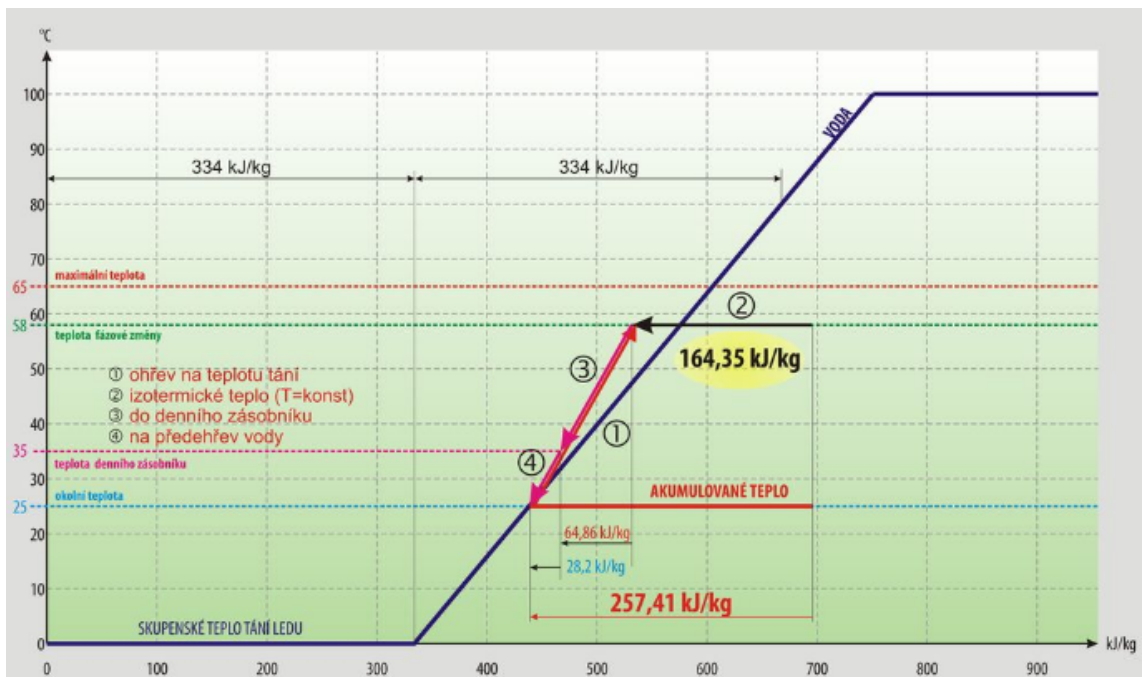
Množství akumulovaného tepla je po podchlazení

$$Q_{aku.} = Q_{nabíjení} - m \cdot c_{p,A,liquidus} \cdot (t_{kapalina} - t_{okolí}) = 379,41 - 1 \cdot 3,05 \cdot (65 - 25) = 257,41 [\text{kJ/kg}]$$

a využitelného tepla při min. použitelné teplotě 35°C

$$Q_{využ.} = Q_{aku.} + m_{PCM} \cdot c_{solidus} \cdot (t_{okolí} - t_{prac.}) = 257,41 + 1 \cdot 2,82 \cdot (25 - 35) = 229,21 [\text{kJ/kg}].$$

Zbytkové teplo může být při vybíjení nebo podchlazování využito pro předehřev vody.



Graf 11 – vybíjení PCM sezonního zásobníku [10]

Proces vybíjení, viz graf 11, podchlazeného média je spolehlivý pro malé objemy, při objemech nad 250 [kg] akumulační látky může být nestabilní. Pro dlouhodobou akumulaci proto využíváme spíše několik menších zásobníků do 200 [kg] akumulační látky.

Dalším problémem je, že nukleaci může spustit vibrace od oběhového čerpadla, nečistota nebo koroze. Platí, že čím je médium náchylnější na podchlazení, tím je náročnější spustit nukleaci. [10]

#### 4.2.4.1. Konstrukce sezonního zásobníku s trihydrátem octanu sodného

Zásobník je nerezová nádoba o průměru 350 [mm], délce 1700 [mm] a s tepelným výměníkem zhotoveným z nerezových trubek s hliníkovými žebry uvnitř, která je vyplněna PCM. Zásobník se plní roztaveným PCM, aby se látka dostala mezi žebra tepelného výměníku. Objem výměníku je cca 4,5 [l], pro PCM tedy zbývá  $V = \frac{\pi d^2}{4} \cdot L = \frac{\pi \cdot 3,5^2}{4} \cdot 17 - 4,5 \doteq 159$  [l]. Při hustotě  $\text{NaCH}_3\text{CO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  v kapalném stavu 1,28 [kg/l] je celková hmotnost náplně 203,5kg. Množství tepla, které může zásobník pojmout je  $Q = m_{\text{náplň}} \cdot Q_{\text{aku.}} = 203,5 \cdot 257,41 = 52,383$  [kJ] (14,55 [kWh]).

##### Izolace

Podchlazené médium na teplotu okolí nevykazuje žádné tepelné ztráty, ale pro minimalizaci tep. ztrát, při nabíjení a vybíjení zásobníku, je nádoba opatřena PU izolací o tloušťce 5 [cm].

##### Výměník

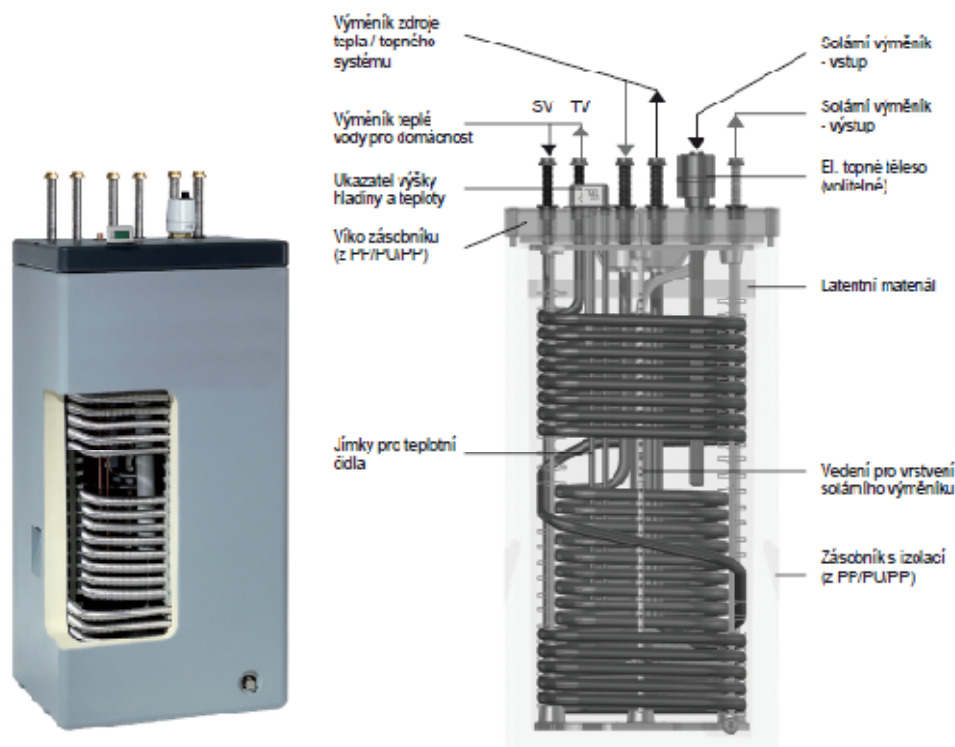


Obr. 18 – tepelný výměník sezonního zásobníku

Výměník je tvořen 5 U-trubkami zapojenými paralelně, čímž se docílí rovnoměrnějšího rozložení teploty a snížení hydraulických odporů. Příčně vedená žebra odstupňovaná po 40 [mm] jsou děrovaná, aby umožňovala rozpínání a smršťování PCM. Velké množství žebor zajišťuje pro PCM, s nízkou tepelnou vodivostí, dostatečný přenos tepla. [10]

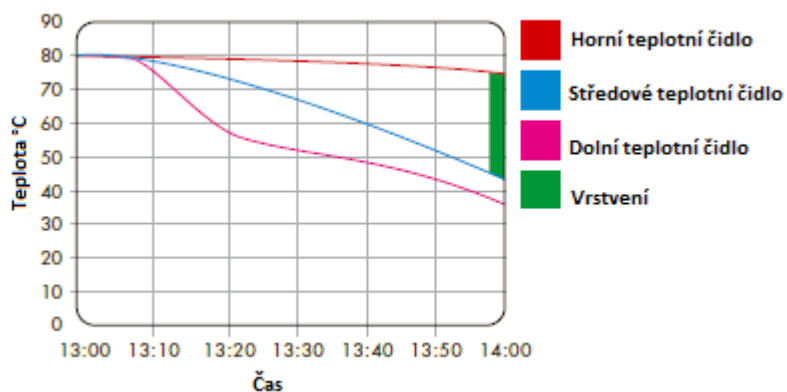


#### 4.2.5. Akumulační nádrž LATENTO 500XXL

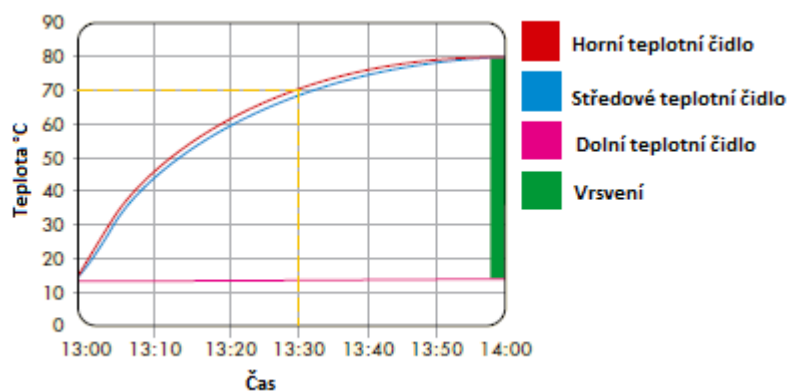


Obr. 19 – LATENTO 500XXL

Beztlaký denní PCM zásobník pro rodinné domy, využívající vrstvené ukládání tepelné energie, určený k akumulaci solární energie. Zásobník může pojmout až 20 [kWh] solární energie. V případě nedostatku solární energie, může být teplo dodáváno i jinými zdroji. Objem nádrže bez výměníku je 500 [l], je zaplněna vodou, která slouží jako akumulátor energie a jako teplotně odolné médium, a 20 [kg] voskové zdravotně nezávadné náplně. Teplo je do zásobníku dodáváno pomocí měděného výměníku z vlnovitých trubek se zařízením pro stratifikaci a odebíráno nerezovým výměníkem tepla z vlnitých trubek, voda v zásobníku tedy nepřijde do kontaktu s otopnou ani s teplou vodou pro domácnost, proto nedochází k hromadění vápence a kotlového kalu a k množení bakterií legionely. Ohřáté médium ze solárního okruhu je také přiváděno do výměníku ve spodní části nádrže, kde je voda chladnější. Tím je dosaženo dostatečného zchlazení média a zajištěno vysoké efektivity provozu i v zimním období, kdy jsou solární zisky malé, do doby než je celý zásobník vyhřátý na 85 [°C]. Tepelné výměníky pracují na principu průtokového ohříváče (voda je ohřívána, pouze pokud je odebírána), proto při odběru teplé vody pro domácnost nedochází ke vzniku turbulencí v akumulační vodě a nemůže dojít k promíchání teplotních vrstev. Během změny skupenství vosku, jehož teplota tání je cca 65 [°C], se teplota v zásobníku nemění a zásobník naakumuluje 1,1 [kWh] energie. Vosková náplň také zabraňuje odpařování vody ze zásobníku. Pokud má být v zásobníku dostatek energie pro ohřev vody pro čtyři osoby, nesmí teplota v zásobníku klesnout pod 75 [°C].



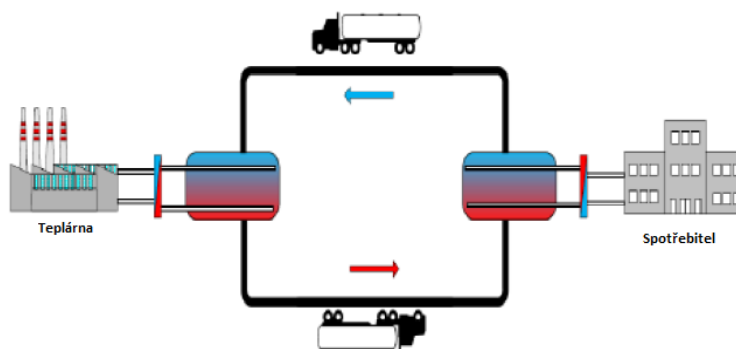
Graf 12 - Teplotní vrstvení v zásobníku během vybíjení [11]



Graf 13 - Teplotní vrstvení v zásobníku během nabíjení [11]

Zásobník je opatřen kvalitní PUR izolací k minimalizaci tepelných ztrát a přenosu tepla během stratifikace. Při plně nabitém zásobníku (85 [°C]) jsou tepelné ztráty zásobníku pouze 63 [W]. [11]

#### 4.2.6. Mobilní systém uchovávání tepelné energie

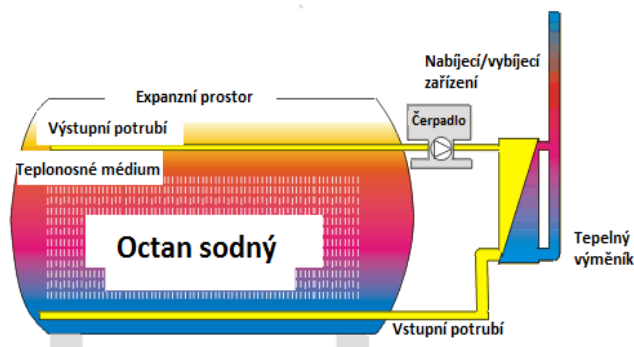


Obr. 20 - TES

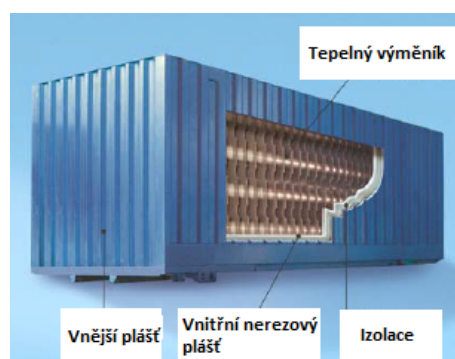
Neboli M-TES system (The mobilized thermal energy storage system) je technologie dodávky tepla, která vznikla s cílem snížit emise CO<sub>2</sub> budov využívající jako zdroj tepla spalování fosilních paliv. Systém se skládá z tepelného zásobníku, tepelného výměníku a čerpadla pro nabíjení a vybíjení zásobníku. Dodávka tepla je realizovaná tak, že se tepelný zásobník

v teplárně nabije, následně je převezen ke spotřebiteli, kde se připojí přes tepelný výměník na topný okruh budovy. Pak je teplo ze zásobníku dle potřeby uvolňováno.

Existují dva typy tepelných zásobníků pro M-TES systém s odlišným mechanismem přenosu tepla. V prvním případě je PCM v přímém kontaktu s teplotním médiem, při tomto provedení nesmí být PCM rozpustný v teplotním médiu, kterým je většinou voda nebo olej. Dále by měl být velký rozdíl v hustotě PCM a média, aby bylo zaručeno jejich oddělení. Zásobník, vyroben německou společností TransHeat, je vyroben ze sklolaminátu a je z 95% zaplněn PCM, zbývající prostor je z části zaplněn syntetickým olejem, který slouží k přenosu tepla. Nezaplněný prostor je určen k expanzi PCM a oleje při ohřevu. Při teplotě okolí 10 [°C] jsou tepelné ztráty plně nabitého zásobníku s celulóзовou izolací 160 [W]. Zásobník může dle požadavků na PCM a množství akumulované tepelné energie vážit od 28 [t] do 38 [t] a disponovat kapacitou 2,5 až 3,8 [MWh]. V nádrži byl zkoumán trihydrát octanu sodného a oktahydrát hydroxidu barnatého, který je ale vysoce toxický, proto jako akumulční látka nepoužitelná. Teplota tání octanu sodného je 58,5 [°C], pokud je zásobník ochlazen z 63,5 [°C] na 48,5 [°C] je množství využití tepelné energie zhruba 98 [kWh/m<sup>3</sup>] z toho 75 [kWh/m<sup>3</sup>] je podíl latentního tepla. Druhým typem je nepřímý kontakt PCM a teplotního média, přenos tepla je zajištěn tepelným výměníkem ponořeným v PCM. Zásobník tohoto typu byl vyvinut společně firmami Alfred Schneider a LaTherm. Zásobník je vestavěn do dopravního kontejneru, toto řešení se jeví jako stabilnější a spolehlivější. Jako PCM používá také trihydrát octanu sodného, kterého se do zásobníku vejde 22 [t]. Celkové množství využitelné energie, které zásobník pojme je 2,5 [MWh] (při teplotě nabitého zásobníku 100°C a vybitého 30 [°C]), tato hodnota je závislá na rozsahu pracovních teplot dané aplikace. Octan sodný je levnější než parafín, který se k akumulaci tepla také používá, a je schopný akumulovat více tepelné energie. [13], [15]



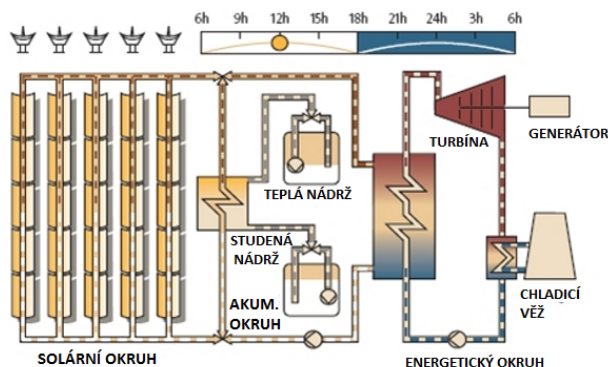
Obr. 21 – Zásobník s přímým kontaktem teplotního média a PCM [13]



Obr. 22 – Zásobník s nepřímým kontaktem teplotního média a PCM [13]

#### 4.2.7. Akumulace tepla v solárních elektrárnách

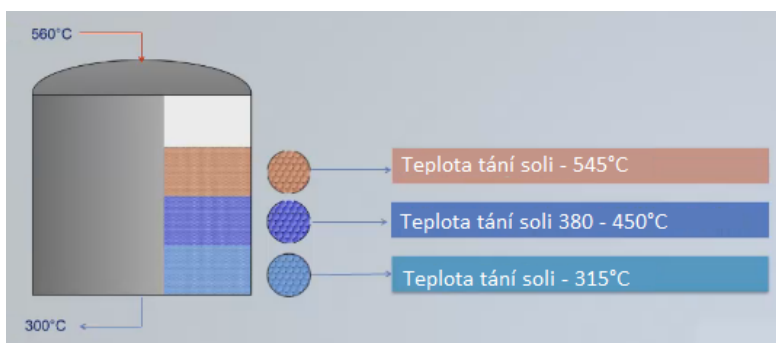
Aby se co možná nejvíce zvýšila doba provozuschopnosti solární elektrárny, je přes den, kdy je



Obr. 23 – Solární elektrárna Andasol 1

dostatek solární energie, akumulováno teplo do tepelného zásobníku. Například solární elektrárna Andasol 1 má pro tyto účely zásobník složený ze dvou nádrží, ve kterých je roztavená směs solí (60%  $\text{NaNO}_3$ , 40%  $\text{KNO}_3$ ). Tavenina ve „studené“ nádrži má teplotu 290 [°C] a v „teplé“ nádrži 390 [°C]. Tavenina nesmí ztuhnout, využívá se pouze citelné teplo. Při procesu nabíjení zásobníku je tavenina ze studené nádrže, čerpána přes tepelný výměník solárního okruhu, kde se ohřeje na 390 [°C], do teplé nádrže. Při procesu nabíjení je elektrárna v provozu, akumuluje se přebytečná solární energie. V ideálních podmínkách akumulovaná energie pokryje spotřebu energie pro provoz elektrárny přes noc. Množství akumulací látky je 28 500 [t] a kapacita zásobníku 375 [MWh] = 1,35 [TJ]. Protože je měrná tepelná kapacita směsi malá a akumulované množství energie velké, je k akumulaci dostatečného množství energie potřeba velký objem akumulací látky a tím i větší rozměry akumulací nádrží, z těchto důvodů je toto technické řešení dosti nákladné. [16]

Společnost Terrafore Technologies přišla s inovativním řešením akumulace tepla v solárních elektrárnách, využívající akumulaci do PCM. Návrh byl proveden pro stejně řešenou solární elektrárnu jako



Obr. 24 – PCM zásobník solární elektrárny

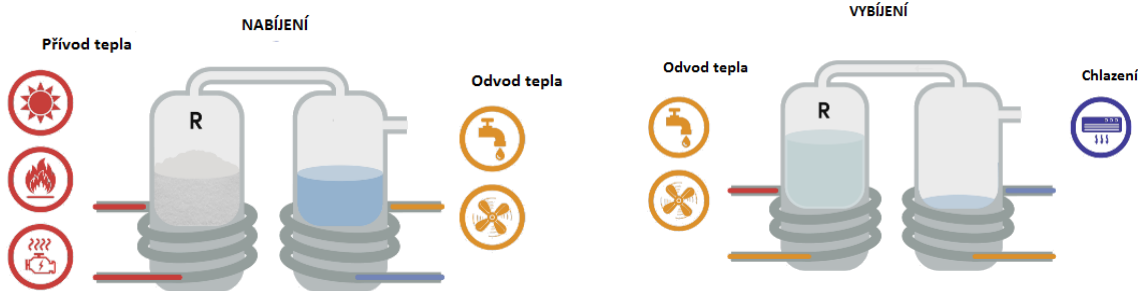
solární elektrárnu jako Andasol 1, s tím rozdílem, že teplota v teplé nádrži byla 560 [°C] a ve studené 300 [°C].

Tepelným zásobníkem je pouze jedna nádrž, která je naplněná koulemi o průměru cca 1 [cm] se zapouzdřeným PCM, čímž díky využívání latentního tepla vzroste

hustota akumulované energie až o 50%. V nádrži zásobníku jsou 3 druhy solí s různými teplotami tání a nízkou pořizovací cenou, viz obr. 23. Cena za 1 [kWh] akumulované energie je 17,76 dolarů. Teplonosné médium je v přímém kontaktu s PCM pouzdry, to zaručuje dobrý tepelný přenos. Akumulací látka může nyní využít i latentní teplo, protože je v zásobníku zapouzdřená a nemůže po ztuhnutí ucpat potrubí. Při nabíjení zásobníku proudí teplonosné médium, o teplotě 560 [°C], od vrchní vrstvy, s nejvyšší teplotou tání, do spodní. Při procesu vybíjení, médium o teplotě 300 [°C], proudí v opačném směru. Vzhledem k vyšší hustotě akumulované energie a jinému technickému řešení, bude zásobník pouze jeden a menších rozměrů, což se pozitivně projeví na ceně zařízení. [17]

#### 4.2.8. Technologie SaltX

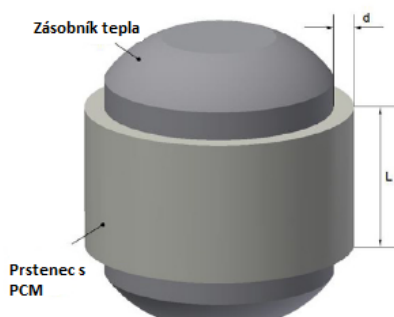
Tato technologie byla vynalezena švédskou firmou ClimateWell. Jedná se o zařízení, které využívá solární energii k chlazení např. budov a ohřevu užitkové vody. SaltX se skládá ze dvou spojených nádrží. V první nádrži, reaktoru, je ve vybitém stavu roztok soli s vodou a druhá nádrž je prázdná. Tlak v nádobách se blíží nule. Solární kolektory nebo zdroje zbytkového tepla odpaří vodu z reaktoru a vzniklé vodní páry kondenzují ve druhé nádrži, k vysušení soli je třeba minimální teploty 100 [°C]. Latentní teplo, které je z páry odebíráno ve druhé nádrži při kondenzaci, se využívá pro ohřev užitkové vody nebo se odvádí do venkovního vzduchu. Po vysušení soli a zkondenzování vody je SaltX nabitý. Proces nabíjení je znázorněn na obrázku 25. Při vybíjení (obr. 26), je přebytečné teplo ze spotřebiče nebo teplo ze vzduchu z místnosti, dodáváno do vody ve druhé nádrži. Teplo přiváděné z přehřátých místností je spotřebováno na výpar vody, tyto páry jsou adsorbovány solí, přičemž se uvolňuje teplo, které je odvedeno do venkovního vzduchu nebo se používá pro ohřev vody. Voda se odpařuje při nízké teplotě díky nízkému tlaku v nádobách, tím je zajištěno, že bude mít chladicí médium dostatečně nízkou teplotu. Zařízení ke své funkci využívá jak latentní teplo vody, tak adsorpční teplo, uvolňující se při pohlcování vlhkosti solí. [13], [18]



Obr. 25 – Nabíjení SaltX [18]

Obr. 26 – Vybíjení SaltX [18]

#### 4.2.9. Zásobník Solvis Max



Obr. 27 – Konstrukční řešení zásobníku

Společnost Solvis Max vyvíjí zásobník, který bude schopný uschovat solární energii po dobu několika týdnů. Oproti konvečním vodním zásobníkům tepla, má až třikrát větší tepelnou

tloušťka d [mm]	čas t
70	3 h 28 min
100	4 h 34 min
150	5 h 35 min
200	6 h 41 min

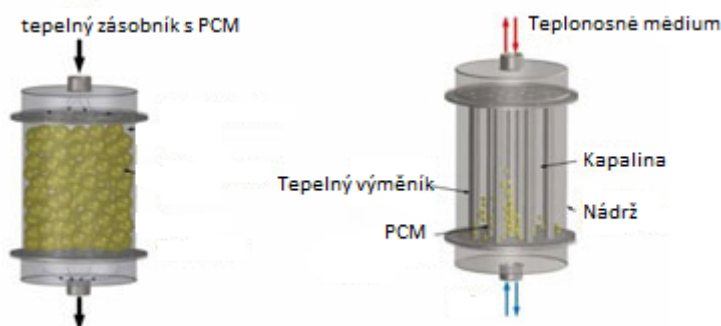
Obr. 28 – Rychlost nabíjení solárního válce v čase pro různé tloušťky prstence s PCM

kapacitu a desetkrát menší tepelné ztráty. Použitým PCM je nízkonákladové eutektikum solí, které při testování úspěšně zvládlo více než 3000 cyklů nabití/vybití. Cena PCM je méně než 500€, což je dvacetkrát méně než v případě použití parafínu. Nízké tepelné ztráty budou zajištěny vakuovou izolací s reflektorem, pro eliminaci ztrát radiací, v prostoru mezi stěnami izolace. K rychlejšímu šíření tepla budou do PCM přidány grafitové elementy a do zásobníku integrovány teplo-vodící trubky. PCM bude umístěno v hliníkovém prstenci kolem vodního

zásobníku, který bude mít podle požadované kapacity různou tloušťku. Při rozsahu pracovních teplot zásobníku od 35 [°C] do 95 [°C] bude kapacita zásobníku 140 [MJ] neboli 38,9 [kWh]. Hustota akumulované energie bude 83,3 [kWh/m<sup>3</sup>]. [19]

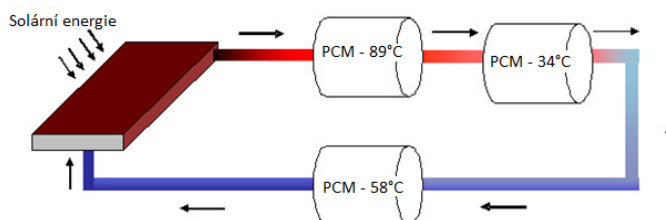
#### 4.2.10. Zásobníky využívající zapouzdřené PCM

Zásobníky dodávané společností Hangzhou Phase Change Technology, byly navrženy pro akumulaci solární energie. Konstrukce zásobníku bez izolace je ukázána na obrázku 29. V akumulační nádrži je několik podélně vedených trubek, které slouží jako tepelný výměník. Nádobu se vyskládá pouzdry, tvaru koule, s PCM a zaplnění se kapalinou, která zajišťuje přenos tepla mezi výměníkem a pouzdry.



Obr. 29 – Konstrukce zásobníků společnosti Hangzhou Phase Change Technology [20]

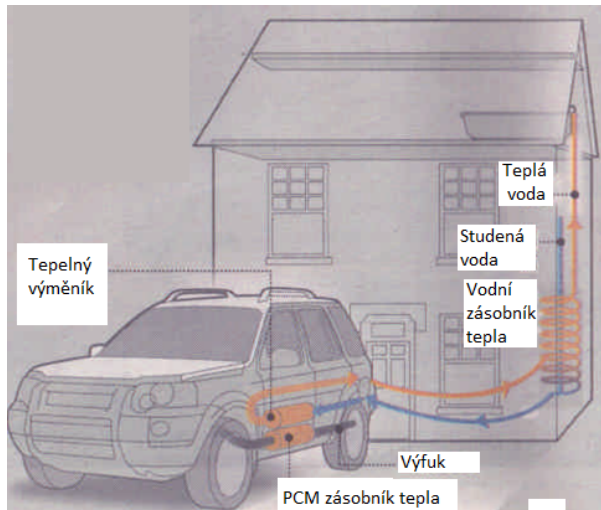
Na trhu jsou k dispozici pouzdra různých průměrů a s různými náplněmi PCM. Můžeme tak sestavit okruh několika zásobníků s různou teplotou tání PCM a zvýšit tak účinnost soustavy, viz obr. 30. [20]



Obr. 30 – Řazení zásobníků v solárním okruhu [20]

#### 4.2.11. Akumulace odpadního tepla automobilu

Teplota spalin motoru může dosahovat teploty až 500 [°C], toto odpadní teplo spalin je akumulováno do zásobníku s PCM. Teplota tání PCM je 190 [°C]. Během jízdy jsou spalinové výfukové potrubí vedeny skrz PCM a ohřívají ho. Vybíjení zásobníku je řešeno tak, že se tepelný výměník v automobilu napojuje na výměník ve vodním zásobníku na teplou vodu přímo v domě. Okruhem pak cirkuluje voda, která PCM zásobník auta vybije. Toto řešení může přinést značné úspory energie a efektivnější využívání paliva automobilu. [22]

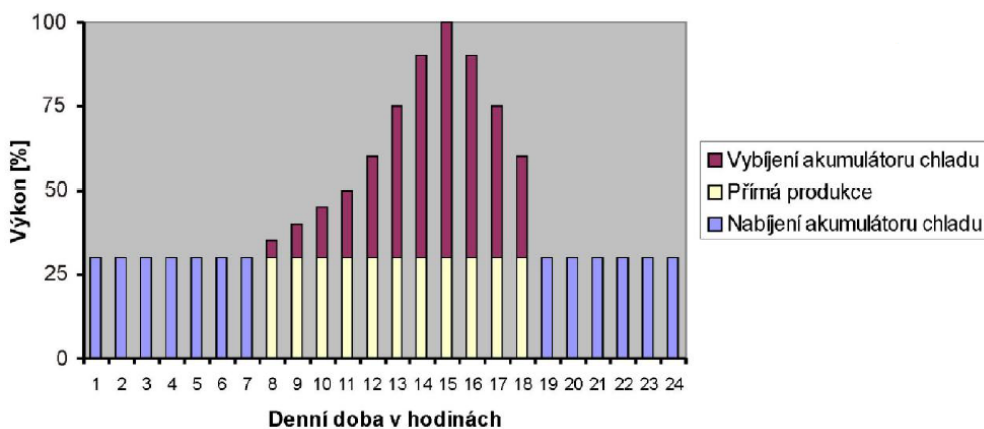


Obr. 31 – Schematické znázornění okruhu pro vybití PCM výměníku v automobilu [22]

#### 4.2.12. Akumulace chladu

K akumulaci chladu se také využívají PCM, ale jejich teplota tání je velice nízká. Chladicí systémy využívající PCM k akumulaci chladu, kladou menší nároky na výkon kompresorů a mají nižší spotřebu energie. Výměníky tepla mohou být menší o 50 - 80%, v okruhu tak může být menší množství chladiva. Na obrázku 32 je histogram denní spotřeby energie klimatizace, využívající akumulaci chladu. V době energetické špičky je využíván chlad naakumulovaný přes noc, čímž klesnou nároky na velikost rezervovaného elektrického příkonu až o 70%.

Histogram denní spotřeby chladu



Obr. 32

#### 4.2.12.1. Chladicí systém společnosti pcmproducts

Systém využívá přetlakový nebo atmosférický akumulční zásobník se zapouzdřeným PCM v plastových válcích. Zásobník je postaven na míru dle výkonnostních a prostorových požadavků, může být zkonstruován z oceli, plastu či betonu a umístěn nad nebo pod zemí. K dispozici je celá škála PCM s různými teplotami tání, jejichž pracovní rozsah teplot je od -40 [°C] do 117 [°C]. Tyto zásobníky jsou určeny nejen k akumulaci chladu, ale i tepla. Podle rozsahu pracovních teplot dané aplikace je pro zásobník volen druh PCM.

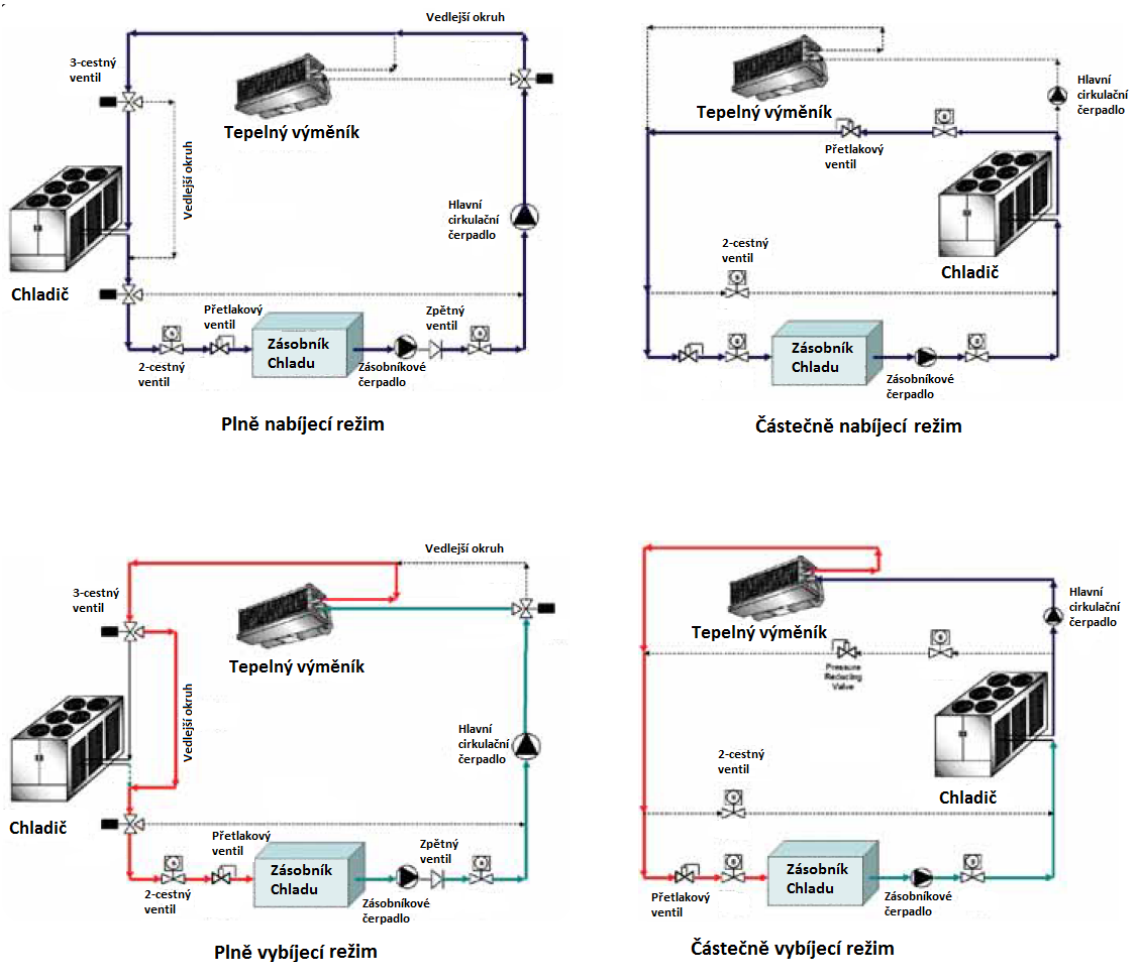


Obr. 33 – Zásobník společnosti Pcmproducts [24]

Systém může pracovat v několika režimech, podle potřeby chlazení viz obr.34 . Zásobník může být nabíjen zároveň při chlazení objektu, částečně nabíjecí režim, nebo může být pouze nabíjen zásobník, plně

nabíjecí režim. Pokud je potřeba chladit vysokým výkonem, systém pracuje buďto v plně vybíjecím režimu, nebo v částečně vybíjecím, kdy je teplo odebíráno jak chladičem, tak zásobníkem. V době, kdy je venkovní teplota nižší, tak systém pracuje v nabíjecím režimu a při teplotní špičce ve vybíjecím režimu. [24], [25]



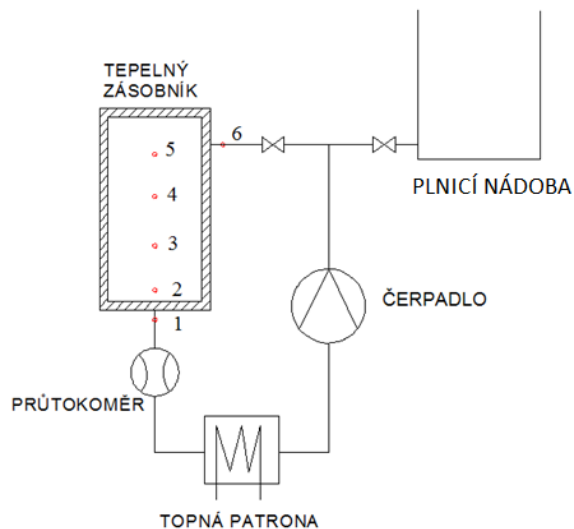


Obr. 34 – Schéma zapojení okruhu v různých režimech [24]

## 5. Experiment – měření tepelné akumulace PCM pouzder

Cílem experimentu je zjistit průběh velikosti tepelného toku do PCM v tepelném zásobníku, při jeho nabíjení. K dispozici jsou čtyři druhy PCM od firmy Himin, určené k akumulaci tepla ve vodních zásobnících, s různými teplotami tání. Pouzdra tvaru koule nejsou zcela zaplněny PCM, část jejich objemu tvoří vzduch. Všechny čtyři typy pouzder jsou rozměrově stejná, mají pouze jinou náplň PCM.

## 5.1. Schéma experimentálního zařízení



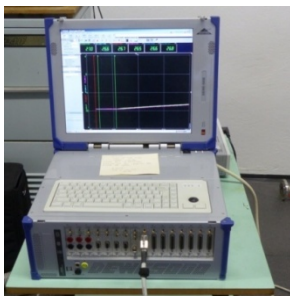
Obr. 35 – Experimentální zařízení



Obr. 36 – Sestavené experimentální zařízení v laboratoři

Pro experiment byl sestaven otevřený topný okruh, viz obr. 35 a 36. V tepelném zásobníku je umístěno 6 čidel teploty. 1. čidlo je umístěno v přívodním potrubí, 2. čidlo je v odtokovém potrubí a zbylá čtyři čidla jsou rovnoměrně rozmístěna v měřícím prostoru. Měřicí nádoba je dvouplášťová a vyrobena z PVC trubek a záslepek, meziprostor pláštěů vyplňuje PUR pěna a molitan. Topná patrona je napájena z rozvodné sítě pomocí autotransformátoru, který mění velikost el. napětí na požadovanou hodnotu. Elektrický příkon odebraný patronou je měřen wattmetrem. Cirkulaci vody zajišťuje čerpadlo a množství protékající vody zaznamenává vodoměr. Všechny komponenty okruhu propojují hadice, které jsou opatřeny izolací z pěněného polyetyleny.

## DEWE 5000, čidla



Obr. 37 – Dewe5000

K zaznamenávání teploty byl použit přístroj dewe5000 a software dewesoft 6. 6. 7. od společnosti Dewetron Praha, spol. s r.o. a termočlánky typu K. Propojení záznamového zařízení a čidel bylo zajištěno modulem PAD-TH8-P a break – out boxem pro termočlánky typu K (PAD-CB8-K-P2) s vidlicovým konektorem.

## Autotransformátor RA1F250.100



Obr. 38 - Autotransformátor RA1F250.100

Jako zdroj elektrické energie byl použit autotransformátor RA1F250.100, který je vybaven jedním regulovatelným, od napájecí sítě neodděleným zdrojem střídavého napětí v rozsahu  $< 5 \div 230$  [V] s maximálním odběrem proudu 10 [A]. Výstup je jištěn jističem. Zapnutí zdroje je indikováno podsvětleným vypínačem. Výstup zdroje je proveden panelovou zásuvkou 230 [V]. Hodnoty výstupního napětí a proudu jsou zobrazeny na analogových měřicích přístrojích. Transformátor je dostatečně dimenzován pro trvalou dodávku maximálního výkonu do zátěže. Síťový přívod je proveden oddělitelně. [28]

Parametry	
napájecí napětí:	230V / 50Hz
výstupní napětí:	$< 5 \div 230$ V
výstupní proud:	10A
třída přesnosti měřicích přístrojů:	1,5

Tabulka 10 – Parametry zdroje [28]

## Vodoměr

Parametry	
Trvalý průtok Q3	1,6 m <sup>3</sup> /hod.
Přetěžovací průtok Q4	2 m <sup>3</sup> /hod.
Přechodový průtok Q2	H 0,073 m <sup>3</sup> /hod.
Minimální průtok Q1	H 0,046 m <sup>3</sup> /hod.
Měřicí rozsah Q3/Q1	H 35
Poměr Q2/Q1	1,6
Teplotní třída MAT (°C)	T30; T90; T30/90
Největší dovolená chyba horní oblast průtoku	$\pm 3\%$ – pro vodu nad 30 °C $\pm 2\%$ – pro vodu do 30 °C
dolní oblast průtoku	$\pm 5\%$
Hmotnost	615 g

Tabulka 11 – Parametry vodoměru KADEN [29]



Obr. 39 – vodoměr KADEN [29]

## Čerpadlo

Bylo použito čerpadlo grundfos typu UPS s třemi otáčkovými stupni. Čerpadlo je možné používat v otevřených i uzavřených soustavách. Čerpadla typu UPS jsou mokroběžná, tj. čerpadlo a motor tvoří neoddělitelnou jednotku bez těsněného hřídele. Ložiska jsou mazána čerpanou kapalinou. Tato čerpadla se vyznačují tichým chodem a jsou bezúdržbová. [30]

Specifikace		Elektrické údaje	
Název výrobku:	UPS 25-40 N 180	Příkon pro otáčkový stupeň 1	25 W
<b>Parametry</b>		Příkon pro otáčkový stupeň 2	35 W
Počet režimů otáček	3	Příkon pro otáčkový stupeň 3	45 W
Max. dopravní výška	40 dm	Frekvence el. sítě	50 Hz
Teplotní třída TF	110	Motorová ochrana	Žádný
Schval. značky na typovém štítku	CE, VDE, EAC	Teplotní ochrana	Impedančně chráněno
<b>Kapalina</b>			
Čerpaná kapalina	Voda	<b>Jiné</b>	
Rozsah teploty kapaliny	2 .. 110 °C	Čistá hmotnost	2.9 kg
		Hrubá hmotnost	3.1 kg

Tabulka 12 – Souhrn vlastností čerpadla Grundfos UPS 25-40 N [30]

## Wattmetr



Digitální wattmetr Hameg HM 8115-2 je určen především k velmi přesnému, laboratornímu měření výkonů od 1mW do 8 [kW]. Wattmetr zobrazuje současně tři měřené veličiny napětí, proud a výkon. [31]

Obr. 40 – Wattmetr Hameg HM 8445-2

Výkon	
Rozsahy	8 W, 24 W, 80 W, 240 W, 800 W, 2400 W, 8000 W
Rozlišení	1 mW, 10 mW, 100 mW, 100 mW, 1 W, 1 W
Přesnost	20 Hz ÷ 1 kHz: $\pm(0.8 \% + 10 \text{ digit})$
	DC: $\pm(0.8 \% + 10 \text{ digit})$

Tabulka 13 [31]

## 5.2. Popis měření

Na kupeckých vahách bylo zváženo 33 kusů PCM pouzder, která se poté vložila do měřicí nádoby. Celý okruh byl naplněn vodou až k přepadu, což je zhruba 14 litrů, odvodušněn a tepelný zásobník byl uzavřen. Čidla teploty byla zapojena do break-boxu a připojena k dewe5000, zapisovací interval byl nastaven na 1 [s]. Po vyrovnání teploty pouzder, vody a teploty okolí bylo nejprve zapnuto čerpadlo a zaznamenávání dat. Po několika záznamech byl



Obr. 41 – Plnění zásobníku PCM pouzdry

zapojen i autotransfornátor s nastavenou hodnotou výstupního napětí 90 [V], který napájel topnou patronu. Zhruba každých 10 minut byla zapisována hodnota na průtokoměru a wattmetru pomocí poznámky do záznamu měření v softwaru. Podle průběhu teplot, který byl z naměřených teplot vykreslován, byl odhadnut okamžik roztavení veškerého PCM v pouzdrech, přičemž teplota vody, z důvodu teplotního omezení použitelnosti vodoměru, nepřesáhla 90°C. Po proběhnutí fázové změny byla topná patrona vypnuta, ale zápis teplot pokračoval do poklesu teploty minimálně o 7 [°C], poté bylo zapisování vypnuto, ohřátá voda

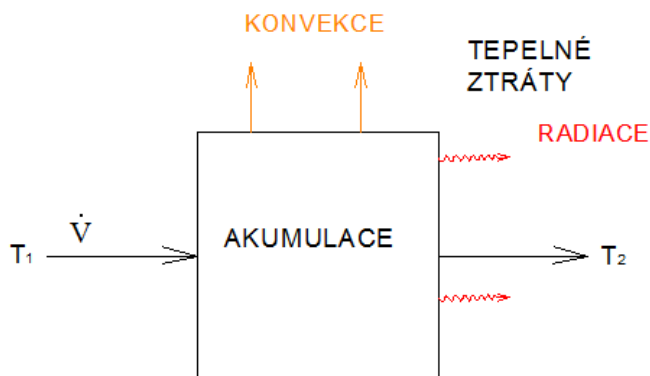
vypuštěna a experimentální zařízení zchlazeno studenou vodou, aby nedocházelo k degradaci materiálu.

### 5.3. Vyhodnocování naměřených dat

K vyhodnocování naměřených hodnot jsem přistupoval dvěma různými způsoby:

#### 1. Způsob

Kontrolním objemem je pouze tepelný zásobník a dodávaný konvektivní tok je dán rozdílem teplot vody v přívodním a odtokovém potrubí ( $T_1 - T_2$ ), hmotnostním tokem přitékající vody  $\dot{m}$  a její izobarickou měrnou tepelnou kapacitou  $c_p$ . Tepelné ztráty do okolí a akumulaci tepla zásobníku lze, vzhledem k jednoduchosti jeho tvaru, dopočítat ze znalosti konstrukce nádoby a použitých materiálů nebo je možné postupovat stejně jako při vyhodnocování druhým způsobem. Teplo odcházející do okolí můžeme rozdělit do dvou složek a to na ztráty konvekcí a radiací. Vzhledem k tomu, že zásobník má poměrně dobrou tepelnou izolaci, tak ztráty pro kontrolní objem nebudou příliš vysoké. Největší část dodávané energie se bude akumulovat ve vodě a PCM pouzdrech, ale také ve stěnách tepelného zásobníku.



Obr. 42 – Kontrolní objem (pouze zásobník)

Pro kontrolní objem platí rovnice bilance toků energie

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{(V)} \rho \cdot h \cdot dV = - \int_{(A)} \rho \left( u + \frac{p}{\rho} \right) \cdot \vec{c} \cdot d\vec{A} - \int_{(A)} \vec{q} \cdot d\vec{A}, \quad (7)$$

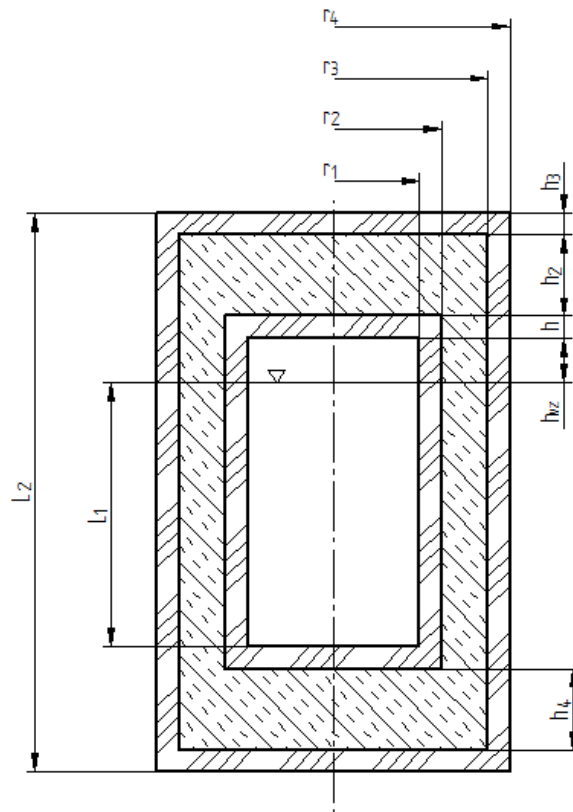
$$\text{kde člen } \frac{\partial}{\partial t} \int_{(V)} \rho \cdot h \cdot dV = \frac{1}{\Delta t} \sum_i m_i \cdot c_{pi} (T_i - T_o) \quad (8)$$

představuje akumulaci energie,

$$\int_{(A)} \rho \left( u + \frac{p}{\rho} \right) \cdot \vec{c} \cdot d\vec{A} = \dot{m} \cdot c_p (T_1 - T_2) \quad (9)$$

je konvektivní člen, představuje množství energie dodávané do systému.  $\int_{(A)} \vec{q} \cdot d\vec{A}$  je

nekonvektivní člen, který představuje tepelné ztráty systému. Konstrukce tepelného zásobníku byla pro výpočet zjednodušena dle obr. 43.



Obr. 43 – zjednodušený náčrt zásobníku

Za předpokladu, že je ohřev dostatečně pomalý na to, aby bylo možné pokládat přenos tepla za stacionární, a při uvažování jednorozměrného vedení tepla můžeme psát, že

$$\int_{(A)} \vec{q} \cdot d\vec{A} = Q_{konvekce} + Q_{radiace}, \quad (10)$$

kde tepelné ztráty konvekcí jsou dány součtem tepelného toku unikajícího přes válcovou stěnu, podstavu a víko měřicí nádoby. Pro přestup tepla válcovou stěnou můžeme psát, že

$$\dot{Q} = \frac{2\pi(T_i - T_e)L}{\left[ \frac{1}{\alpha_1 r_1} + \left( \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \cdot \ln \frac{r_{i+1}}{r_i} \right) + \frac{1}{\alpha_2 r_n} \right]}, \quad (11)$$

kde  $(T_i - T_e)$  je rozdíl vnitřní a vnější teploty,  $L$  délka válcové plochy,  $\alpha_1$  koeficient přenosu tepla vnitřní stěny,  $\lambda_i$  koeficient tepelné vodivosti,  $r_i$  nejmenší poloměr stěny,  $\alpha_2$  koeficient přenosu tepla vnější stěny. Tepelné ztráty rovinnou stěnou jsou dány vztahem

$$\dot{Q} = \frac{(T_i - T_e) \cdot A}{\left[ \frac{1}{\alpha_1} + \left( \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_i} \right) + \frac{1}{\alpha_2} \right]}, \quad (12)$$

kde  $A$  je plocha teplosměnné rovinné stěny,  $d$  tloušťka části stěny, která má tepelnou vodivost  $\lambda$ . Po sestavení rovnic pro případ tepelného zásobníku dle vzorců 9, 10 a následném dosazení do rovnice 8, dostaneme

$$\begin{aligned} Q_{konvekce} = & \frac{2\pi(T_i - T_e) \cdot L_1}{\left( \frac{1}{\alpha_1 \cdot r_1} + \frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{1}{\lambda_3} \ln \frac{r_4}{r_3} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot r_4} \right)} + \\ & \frac{(T_i - T_e) \cdot S_1}{\left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{h_{vz}}{\lambda_{vzduch}} + \frac{h_1}{\lambda_1} + \frac{h_2}{\lambda_2} + \frac{h_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_2} \right)} + \frac{(T_i - T_e) \cdot S_1}{\left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{h_{v1}}{\lambda_1} + \frac{h_2}{\lambda_2} + \frac{h_3}{\lambda_3} + \frac{h_{poc}}{\lambda_d} \right)} \end{aligned} \quad (14)$$

Tepelné ztráty radiací tepla vyjadřuje Lambertův a Stefan-Boltzmannův zákon

$$Q_{12} = \varepsilon_{12} \cdot \sigma_0 (T_s^4 - T_e^4) \cdot H. \quad (15)$$

$\varepsilon_{12}$  značí emisivitu vzájemného sálání, vypočítá se pomocí rovnice 16

$$\varepsilon_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}, \quad (16)$$

$\sigma_0$  Stefan-Boltzmannovu konstantu ( $\sigma_0 = 5,6697 \cdot 10^{-8} [\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}]$ ),  $T_s$  teplotu sálajícího povrchu,  $T_e$  teplotu okolí. Člen  $H$  je celkový povrch ozáření. Uvažují, že je zásobník ozařován od

okolí po celém povrchu, tedy  $H = A$ . Podle obr. 43 lze usuzovat, že na povrchu válcové plochy a víka bude, kvůli odlišné tloušťce a složení stěny, různá teplota. Zásobník je v laboratoři postaven na dřevěné židli, která přispívá k lepší tepelné izolaci podstavy zásobníku, tudíž zde bude také odlišná teplota. Tepelné ztráty sáláním jsou, při zjednodušení, že na těchto plochách je konstantní teplota, rovny součtu tepelných toků vyzářených válcovou plochou, víkem a podstavou zásobníku, viz rovnice 16.

$$Q_{radiace} = S_v \cdot \varepsilon_{PVC,okolí} \cdot \sigma_0 (T_{sv}^4 - T_e^4) + S_p \cdot \varepsilon_{PVC,okolí} \cdot \sigma_0 (T_{sp1}^4 - T_e^4) + S_p \cdot \varepsilon_{dřev,okolí} \cdot \sigma_0 (T_{sp2}^4 - T_e^4) \quad (16)$$

Po dosažení do rovnice bilance toků energie (rovnice 7) dostaneme výraz

$$\begin{aligned} \frac{1}{\Delta t} \sum_i m_i \cdot c_p (T_i - T_o) = \dot{m} \cdot c_p (T_1 - T_2) - \frac{2\pi(T_i - T_e) \cdot L_1}{\left( \frac{1}{\alpha_1 \cdot r_1} + \frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{1}{\lambda_3} \ln \frac{r_4}{r_3} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot r_4} \right)} - \\ \frac{(T_i - T_e) \cdot S_1}{\left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{h_{vz}}{\lambda_{vzduch}} + \frac{h_1}{\lambda_1} + \frac{h_2}{\lambda_2} + \frac{h_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_2} \right)} - \frac{(T_i - T_e) \cdot S_1}{\left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{h_{v1}}{\lambda_1} + \frac{h_2}{\lambda_2} + \frac{h_3}{\lambda_3} + \frac{h_{podložka}}{\lambda_{dřevo}} + \frac{1}{\alpha_2} \right)} - \\ - S_v \cdot \varepsilon_{PVC,okolí} \cdot \sigma_0 (T_{sv}^4 - T_e^4) - S_p \cdot \varepsilon_{PVC,okolí} \cdot \sigma_0 (T_{sp1}^4 - T_e^4) - S_p \cdot \varepsilon_{dřev,okolí} \cdot \sigma_0 (T_{sp2}^4 - T_e^4), \end{aligned}$$

pravou stranu rovnice zjednodušíme, zavedením součinitele prostupu tepla  $U$ , na tvar

$$\begin{aligned} \frac{1}{\Delta t} \sum_i m_i \cdot c_p (T_i - T_o) = \dot{m} \cdot c_p (T_1 - T_2) - 2\pi(T_i - T_e) \cdot L_1 \cdot U - (T_i - T_e) \cdot S_1 \cdot U_2 - (T_i - T_e) \cdot S_1 \\ \cdot U_3 - S_v \cdot \varepsilon_{PVC,okolí} \cdot \sigma_0 (T_{sv}^4 - T_e^4) - S_p \cdot \varepsilon_{PVC,okolí} \cdot \sigma_0 (T_{sp1}^4 - T_e^4) - S_p \cdot \varepsilon_{dřev,okolí} \cdot \sigma_0 (T_{sp2}^4 - T_e^4) \quad (17) \end{aligned}$$

kde teploty na stěnách zásobníku jsou dány vztahy 18 – válcová plocha, 19 – víko, 20 – podstava

$$T_{sv} = T_0 - \frac{\dot{q}}{2\pi \cdot U_s} = T_0 - \frac{2\pi(T_0 - T_e) \cdot U}{2\pi \cdot \frac{1}{\left( \frac{1}{\alpha_1 \cdot r_1} + \frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{1}{\lambda_3} \ln \frac{r_4}{r_3} \right)}} = T_0 - \frac{(T_0 - T_e) \cdot U}{U_s} \quad (18)$$

$$T_{sp1} = T_0 - \frac{\dot{q}}{2\pi \cdot U_{s2}} = T_0 - \frac{(T_0 - T_e) \cdot U_2}{2\pi \cdot \frac{1}{\left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{h_{vz}}{\lambda_{vzduch}} + \frac{h_1}{\lambda_1} + \frac{h_2}{\lambda_2} + \frac{h_3}{\lambda_3} \right)}} = T_0 - \frac{(T_0 - T_e) \cdot U_2}{U_{s2}} \quad (19)$$

$$T_{sp2} = T_0 - \frac{(T_i - T_e) \cdot U_3}{\left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{h_{v1}}{\lambda_1} + \frac{h_2}{\lambda_2} + \frac{h_3}{\lambda_3} + \frac{h_{podložka}}{\lambda_{dřevo}} \right)} = T_0 - \frac{(T_0 - T_e) \cdot U_3}{U_{s3}} \quad (20)$$



a uvažované teplosměnné plochy, rovnice 21 – plocha víka vnitřního válce, 22 – plocha válcové plochy zásobníku, 23 plocha víka/podstavy zásobníku

$$S_1 = \pi \cdot r_1^2, \quad (21)$$

$$S_v = L_1 \cdot \pi \cdot 2 \cdot r_4, \quad (22)$$

$$S_p = \pi \cdot r_4^2. \quad (23)$$

Součinitelé prostupu tepla  $U_s, U_{s2}, U_{s3}$  v rovnicích 18, 19, 20 zahrnují vodivost stěny z vnitřního prostředí zásobníku k vnějšímu povrchu stěny, kde chceme spočítat teplotu. Pro kontrolu správnosti rovnice 17, uvažuji, že je nádoba zaplněna pouze vodou bez PCM. Pro zjednodušení bylo počítáno s konstantní teplotou v celém objemu zásobníku. Součet  $\sum_i m_i \cdot c_p$  nahradíme součinitelem akumulace

$$C = m_{PVC} \cdot c_{PVC} + m_{PUR} \cdot c_{PUR} + m_{voda} \cdot c_{voda}(T). \quad (24)$$

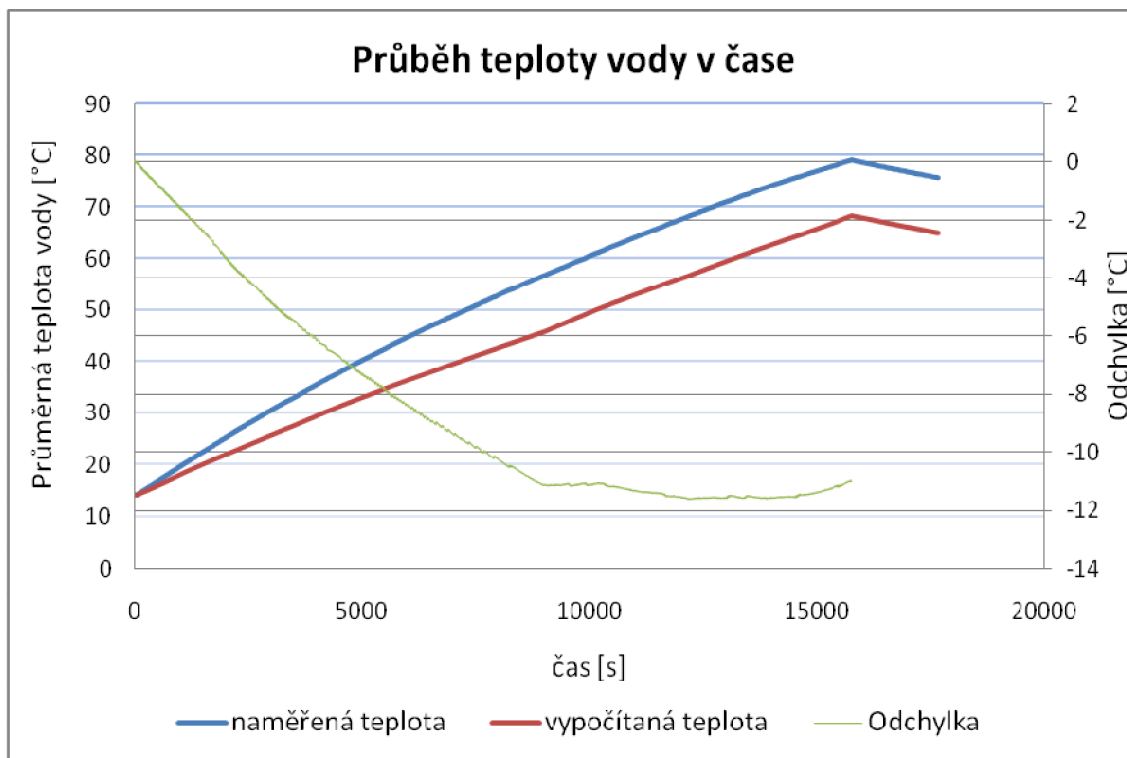
Z rovnic 16, 17, 24 byl vyjádřen vztah pro výpočet teploty vody v zásobníku

$$T_i = \frac{\frac{1}{\Delta t} \cdot C \cdot T_0 + \dot{m} \cdot c_p (T_1 - T_2) + T_e (2\pi \cdot U \cdot L_1 + U_2 \cdot S_2 + U_3 \cdot S_1) - Q_{radiace}}{\left( \frac{C}{\Delta t} + 2\pi \cdot U \cdot L_1 + U_2 \cdot S_2 + U_3 \cdot S_1 \right)}. \quad (25)$$

V tabulkovém procesoru Microsoft Excel 2007 byl proveden výpočet teploty, dle rovnice 25, od počáteční teploty, v časovém rozsahu měření při kalibraci. Tyto hodnoty byly vyneseny do grafu v závislosti na čase a porovnány s naměřenými průměrnými teplotami vody při kalibraci. Vypočítané teploty byly nižší než naměřené, proto byla použita upravená rovnice, používaná k vyhodnocení druhým způsobem s tím, že se koeficienty ztrat rovny nule. Akumulace tepla byla uvažována jen do vody a člen zdroje tepla nahradíme konvektivním členem. Rovnice pak vypadala takto

$$T_i = \frac{-0 \cdot (T_0^4 - T_e^4) + \dot{m} \cdot c_p (T_1 - T_2) + C \cdot T_0 + 0 \cdot T_e}{0 + C}. \quad (26)$$

Přesto, že ztráty byly nulové, tak vypočítané hodnoty teplot byly menší, než teploty naměřené, viz graf 14.

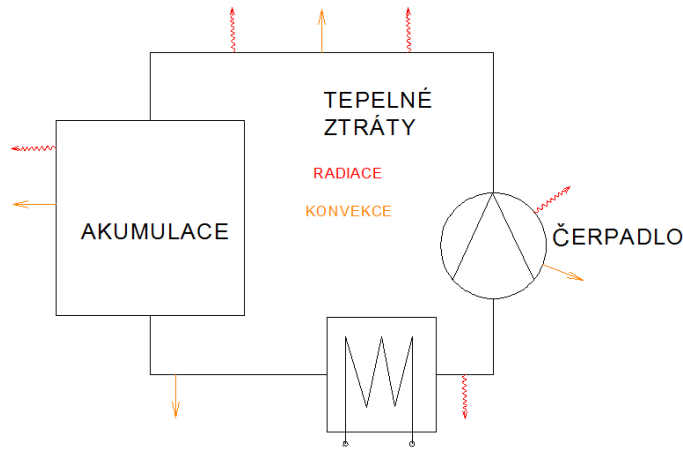


Graf 14

Chyba je způsobena nedostatečně přesným měřením vstupní a výstupní teploty, která se navíc s rostoucí teplotou zvětšuje, a dále chybou měření průtoku vody. Tyto chyby se nejvíce projeví v konvektivním členu rovnice 22, ve kterém nejsme schopni dostatečně přesně určit množství tepla vstupujícího do kontrolního objemu. Nejistota měření teploty daná normou pro termočlánky typu K je  $\pm 0,4\%$  z měřené hodnoty, např. pro teplotu  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  je chyba měření  $\pm 0,32\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Při výpočtu konvektivního členu se rozdíl teplot vstupující a vystupující vody z měřicí nádoby pohybuje pouze kolem hodnoty  $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Rozdíl teplot např. při teplotách  $T_1 = 80,4^{\circ}\text{C}$ ,  $T_2 = 80^{\circ}\text{C}$  je zatížen nejistotou  $\delta_{\Delta T} = \sqrt{\delta_{T_1}^2 + \delta_{T_2}^2} = 0,45^{\circ}\text{C}$ . Rozdíl mezi průběhy teplot je kvůli nepřesnému měření tak velký, že nemá smysl tímto způsobem vyhodnocovat naměřená data. Tento přístup k vyhodnocování je pro daný experiment nepoužitelný.

## 2. Způsob

Kontrolní objem tvoří celé experimentální zařízení. Akumulaci energie lze odhadnout přibližným výpočtem, ale tepelné ztráty, vzhledem ke tvarové a materiálové rozmanitosti zařízení, určíme experimentálně. Tepelné ztráty v tomto případě budou podstatně větší, protože tepelná izolace ostatních součástí není tak dokonalá jako u tepelného zásobníku. V rovnici bilance toků energie se bude vyskytovat zdroj energie, což je tepelný výkon dodávaný topnou patronou. Konvektivní člen rovnice bude nulový.



Obr. 44 – Kontrolní objem (experimentální zařízení)

Pro zvolený kontrolní objem platí rovnice bilance energie ve tvaru

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{(V)} \rho \cdot h \cdot dV = - \int_{(A)} \vec{q} \cdot d\vec{A} - \dot{P}, \quad (27)$$

kde figuruje člen akumulace, nekonvektivní člen (ztráty) a zdroj energie  $\dot{P}$ . Pro ztráty opět platí rovnice 10, do které mohou dosadit rovnici 13, se zavedením průměrného koeficientu prostupu tepla  $U_{prum.}$ , a rovnici 14 – Lambertův a Stefan-Boltzmannův zákon. Dostáváme vztah pro tepelné ztráty experimentálního zařízení

$$- \int_{(A)} \vec{q} \cdot d\vec{A} = -A \cdot U_{prum.} (T_i - T_e) - \varepsilon_{12} \cdot A \cdot \sigma_0 (T_s^4 - T_e^4). \quad (28)$$

Tepelný výkon zdroje pro kontrolní objem je dán součtem výkonu topné patrony a části příkonu čerpadla, který se při provozu přemění na teplo, tedy

$$\dot{P} = \dot{P}_p + \dot{P}_c. \quad (29)$$

Následným dosazením rovnic 8, 28, 29 do rovnice bilance toků energie 24, dostáváme vztah

$\frac{1}{\Delta t} \sum_i m_i \cdot c_p (T_i - T_o) = -A \cdot k (T_i - T_e) - \varepsilon_{12} \cdot A \cdot \sigma_0 (T_s^4 - T_e^4) + \dot{P}_p + \dot{P}_c$ , nahrazením součinů před závorkami koeficienty ztrát  $A \cdot u = K$ ,  $\varepsilon_{12} \cdot \sigma_0 \cdot A = E$ , koeficientem pro akumulaci  $\sum_i m_i \cdot c_p = C$  a dosazením za časový krok  $\Delta t = 1[s]$  upravíme rovnici na tvar

$$C \cdot (T_i - T_o) = -K (T_i - T_e) - E (T_s^4 - T_e^4) + \dot{P}_p + \dot{P}_c. \quad (30)$$

### Kalibrace

Abychom mohli zjistit velikost tepelných ztrát, musíme určit velikost koeficientů ztrát a koeficientu akumulace, proto byla provedena kalibrace experimentálního zařízení. Celý okruh a tepelný zásobník byl naplněn pouze vodou a měření proběhlo stejným způsobem jako měření s PCM pouzdry. Známe tedy průběh teploty vody v čase, teplotu okolí a velikost tepelného výkonu dodávaného do systému. Z naměřených teplot na čidlech 0,1,2,3 byla vypočítána střední hodnota teploty vody  $T_i$ . Při ohřívání vody v zařízení dochází k pístovému efektu, kdy u vstupu a výstupu vody v tepelném zásobníku vznikají oblasti se značně rozdílnou teplotou, proto byla z naměřených hodnot počítána průměrná teplota vody tak, že teploty na

čidlech, která byla umístěna u výstupu a vstupu do nádoby, byly brány s váhou 0,5, hodnoty se tak zpřesnily. Dále byla vykreslena závislost těchto průměrných hodnot teploty na čase. Z rovnice 30 byl vyjádřen vztah pro výpočet průměrné teploty vody

$$T_i = \frac{-E(T_0^4 - T_e^4) + \dot{P}_p + \dot{P}_\varepsilon + C \cdot T_0 + K \cdot T_e}{K + C} \quad (31)$$

Protože má experimentální zařízení složitý tvar a nejde snadno spočítat teplota sálavého povrchu, byla pro výpočet radičních ztrát brána průměrná teplota vody (vždy z předchozího kroku výpočtu). Koeficient radiace  $E$  v rovnici 31, zahrnuje i přepočtení teploty  $T_0$  na průměrnou teplotu sálavého povrchu a již neplatí, že  $E = \varepsilon_{12} \cdot \sigma_0 \cdot A$ .

#### Odhad koeficientu pro akumulaci energie C

součást	m [kg]	$c_p$ [J/(kg*K)]	i
čerpadlo	3	545	1
průtokoměr	0,845	384	2
kohouty	0,652	384	3
hadice	0,5	900	4
patrona	15	450	5

Tabulka 14

Pro jednotlivé části okruhu byly odhadnuty měrné tepelné kapacity a pro topnou patronu a hadice i hmotnosti. Součinitel akumulace byl následně počítán dle rovnice.

$$C = \sum_i m_i \cdot c_{pi} = \sum_1^5 m_i c_{pi}$$

Odhadnutá hodnota koeficientu  $C$  je nepřesná, proto byl koeficient, pro kontrolu vypočítán i jiným způsobem. Za předpokladu, že při malém rozdílu teploty okolí a teploty vody v okruhu jsou tepelné ztráty nulové, můžeme napsat rovnici bilance energie ve tvaru  $(T_i - T_o)_{\Delta t} \cdot C = \dot{P}_p + \dot{P}_\varepsilon$ , z které vyplývá

$$C = \frac{\sum_{t_1}^{t_2} (\dot{P}_p + \dot{P}_\varepsilon)}{(T_{ik} - T_o)_{\Delta t}} \quad (32)$$

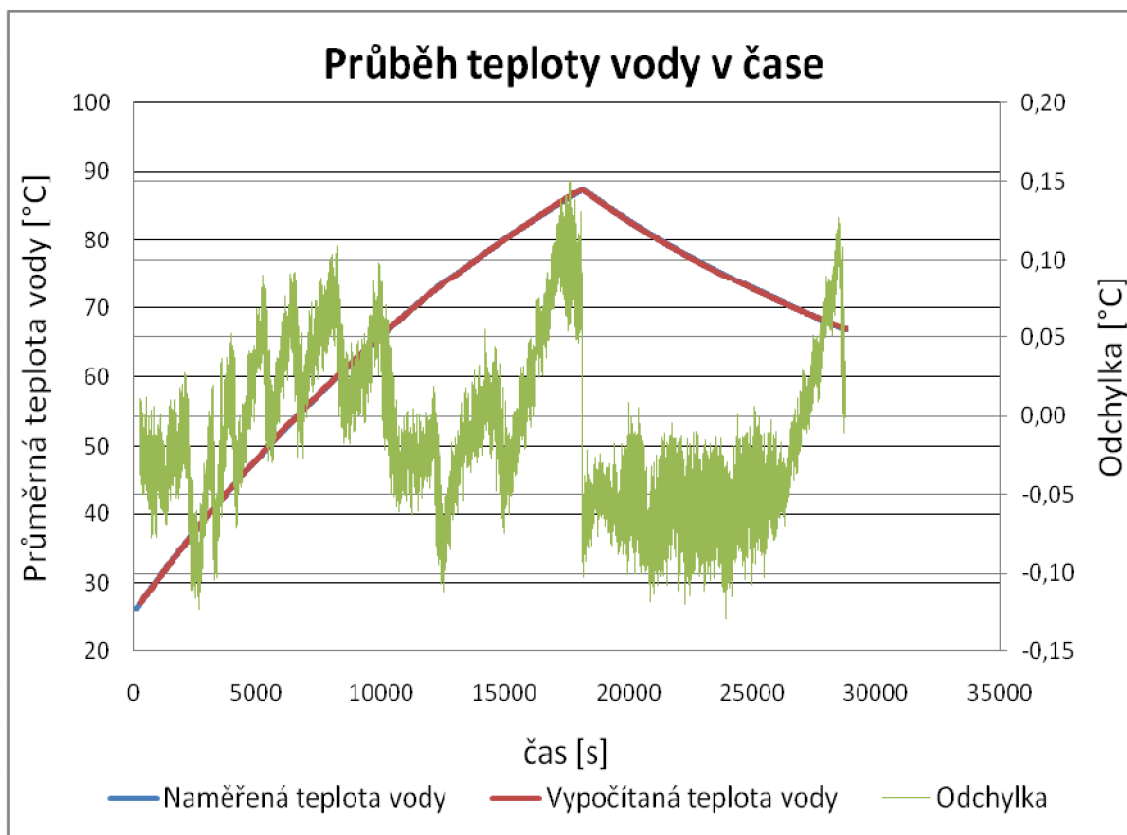
#### Tepelný výkon čerpadla

Veškerá energie dodaná čerpadlu se v experimentálním zařízení přemění na teplo. Výrobce uvádí příkon 25 [W] pro první stupeň provozu. Tepelný výkon čerpadla je tedy  $\dot{P}_\varepsilon = 25$  [W].

Tepelný výkon dodávaný topnou patronou do okruhu je měřen wattmetrem od firmy Hameg HM8115-2. Maximální nastavený výkon je dodáván s určitou prodlevou po zapnutí zdroje, proto byly průměrné teploty vody počítány od času měření 176 [s].

Koeficienty ztrát a koeficient akumulace byly voleny tak, aby se vypočítané průměrné teploty vody, po vynesení do grafu teplota - čas, překrývaly s naměřenými. Závislost vypočítaných průměrných teplot na čase se překrývá s průběhem naměřených teplot s maximální odchylkou 0,153 [°C], ale jen do doby než byla vypnuta topná patrona a voda ochlazována. Pro ochlazování kontrolního objemu musíme zjistit nové koeficienty, protože se

zmenší tepelné ztráty okruhu. Největší tepelné ztráty experimentálního zařízení jsou na vedení vody do tepelného zásobníku, protože voda v patroně a na výstupu z patrony má vyšší teplotu než kdekoli jinde v okruhu. Po vypnutí ohřevu se ztráty zmenší, protože voda již není ohřívána a není zde tak velký teplotní spád mezi vodou a okolním prostředím. Koeficienty opět volím tak, aby se křivky v grafu teplota – čas, překrývaly.



Graf 15 – Kalibrace

#### Koeficienty při ohřevu

$$E = 17 \times 10^{-8} \text{ [W/}^\circ\text{C}^4], K = 3,12 \text{ [W/K]},$$

$$C = 12200 + m_{\text{voda}} \cdot c_{p,\text{voda}}(T) = 70783 \text{ [J/K]}.$$

Pro výpočet průměrných teplot vody jsou použity hodnoty měrné tepelné kapacity vody v závislosti na teplotě z předchozího výpočtového kroku. Hodnoty jsou převzaty z tabulek a dopočítávány lineární interpolací.

#### Koeficienty při ochlazování

$$E = 85 \times 10^{-8} \text{ [W/}^\circ\text{C}^4] = 39,1459369 \text{ [W/K}^4], K = 2,66 \text{ [W/K]}$$

#### 5.4. Výpočet akumulčního výkonu PCM pouzder

Při měření je v experimentálním zařízení množství vody menší o objem vložených PCM pouzder než při kalibraci, proto byla hodnota součinitele pro akumulaci přepočítána dle vzorce

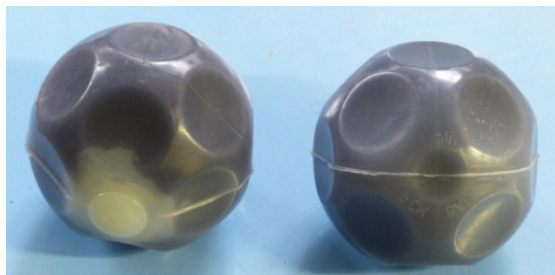
$$C_{nové} = C - \Delta m_{vody} \cdot c_{p,voda} \cdot \quad (33)$$

V rovnici bilance toků energie, pro náš kontrolní objem, přibyl člen akumulace energie do PCM pouzder, který chceme spočítat.

$$\begin{aligned} \sum_i m_i \cdot c_p (T_i - T_o) &= -A \cdot u (T_i - T_e) - \varepsilon \cdot A \cdot \sigma_0 (T_s^4 - T_e^4) + \dot{P}_P + \dot{P}_\varepsilon \\ (C_{nové} + m_{PCM} \cdot c_{PCM}) \cdot (T_i - T_o) &= -K(T_i - T_e) - E(T_0^4 - T_e^4) + \dot{P}_P + \dot{P}_\varepsilon \\ m_{PCM} \cdot c_{PCM} (T_{i,k} - T_{0k}) \Big|_{\Delta t} &= \sum_{t_1}^{t_2} \left[ (\dot{P}_P + \dot{P}_\varepsilon) - K(T_i - T_e) - E(T_0^4 - T_e^4) \right] - C_{nové} \cdot (T_{i,k} - T_{0k}) \Big|_{\Delta t} \\ \dot{Q}_{PCM} &= \frac{\sum_{t_1}^{t_2} \left[ (\dot{P}_P + \dot{P}_\varepsilon) - K(T_i - T_e) - E(T_0^4 - T_e^4) \right] - C_{nové} (T_{i,k} - T_{0k}) \Big|_{\Delta t}}{\Delta t} \end{aligned} \quad (34)$$

Hodnota akumulční kapacity byla počítána za časový úsek měření 600 [s]. Celkové dodané teplo zdrojem je dáno součtem hodnot tepelného výkonu v každé sekundě daného časového intervalu, stejně tak tepelné ztráty radiací, rozdíly teplot  $(T_{i,k} - T_{0k}) \Big|_{\Delta t}$  udávají změnu teploty vody za časový úsek  $\Delta t$ . Do výpočtu nebyla započítána ovlivněná data při rozehrívání nebo dochlazování topné patrony a data zapisovaná při výdrži, kdy byl výkon dodávaný patronou výrazně jiný než při kalibraci zařízení.

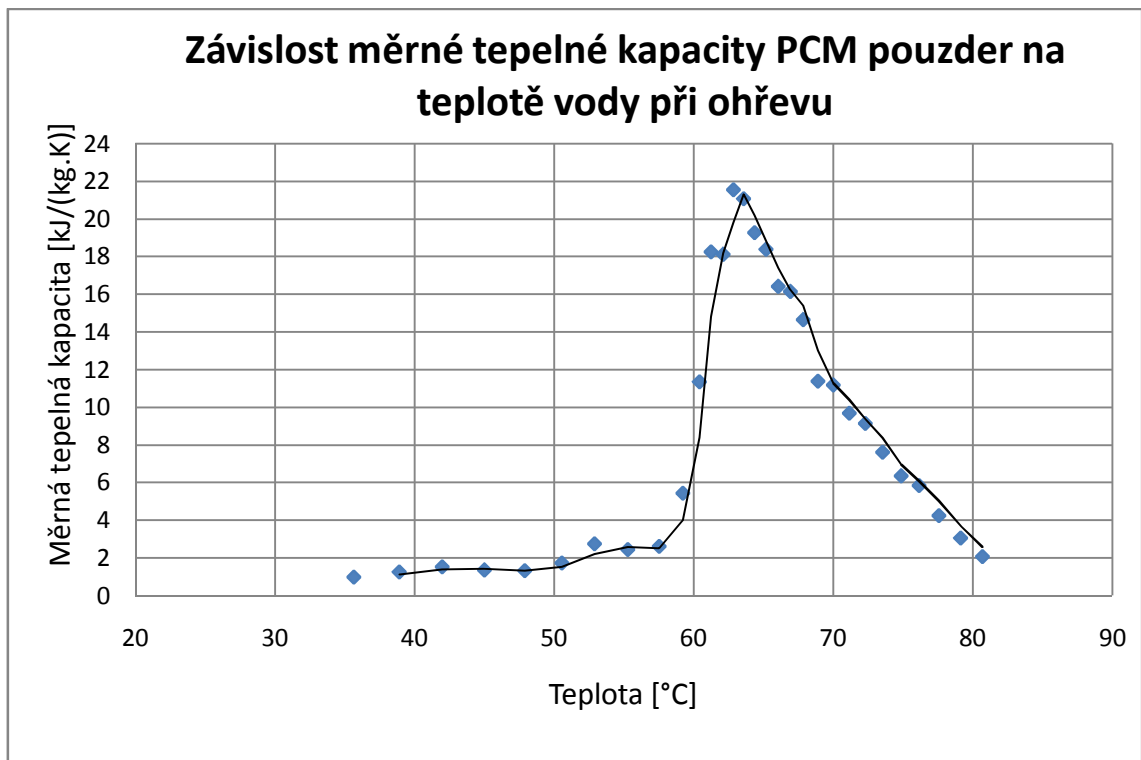
### 5.4.1. PCM54/D70 Ball



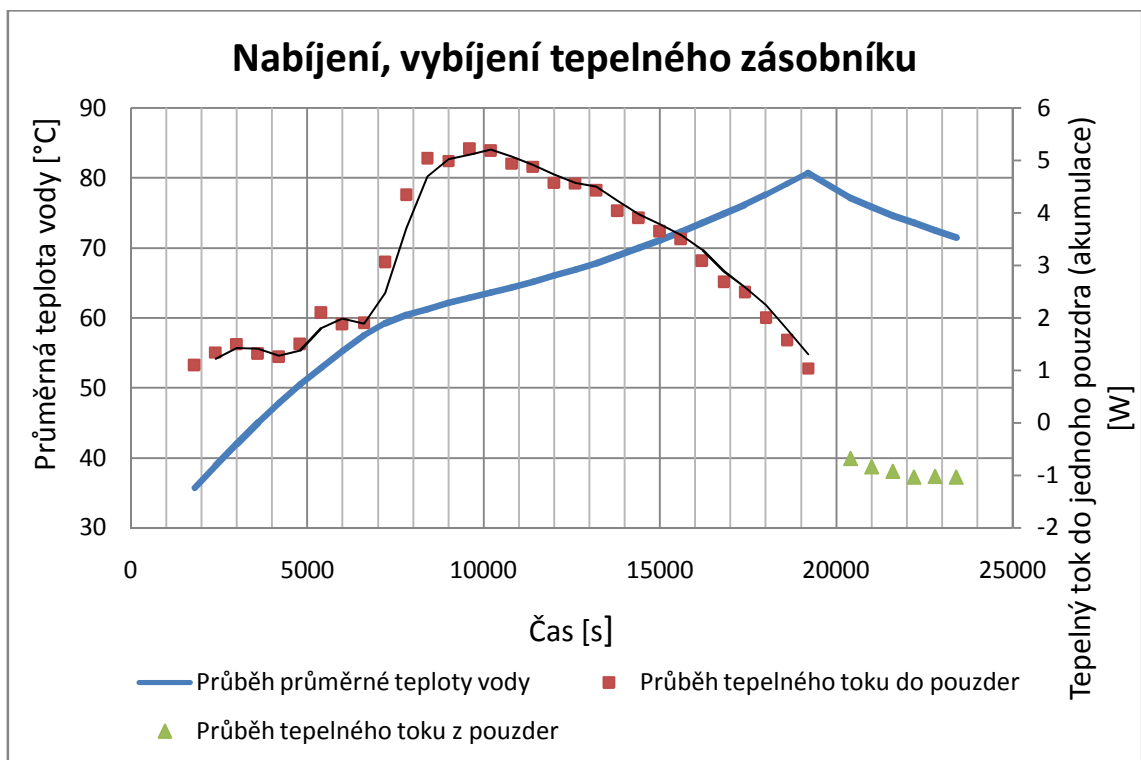
Obr. 45 – PCM 54

parametry PCM		
Označení	PCM54/D70 Ball	-
Průměr	65	[mm]
Objem	130	[ml/ks]
Materiál obalu	polypropylen	-
Teplota tání	56	[°C]
Teplota tuhnutí	54	[°C]
Latentní teplo	320	[kJ/l]
Pracovní teplota	<85	[°C]
Teplota varu	>115	[°C]
Hustota	1,42	[g/cm <sup>3</sup> ]
Měrná tepelná kapacita	2,5	[kJ/(kg K)]
Tepelná vodivost (tuhé skupenství)	1	[W/(m K)]
Tepelná vodivost (kapalné skupenství)	0,6	[W/(m K)]
PH	7 ÷ 9	[1]
Hořlavost	nehořlavý	-
Toxicita	netoxický	-

Tabulka 15 – parametry PCM 54



Graf 16



Graf 17

Hodnota měrné tepelné kapacity PCM pouzder mírně stoupala do teploty tání 56 [°C], stejně tak i akumulací výkon. Při teplotě vody nad 56 [°C] měrná tepelná kapacita prudce vzrostla, maximálně k hodnotě 21,54 [kJ/(kg K)]. Akumulační výkon pouzder dosáhl hodnoty 4,87 [W]. Nárůst je způsoben spotřebou dodávaného tepla na změnu skupenství. Průběh fázové změny je viditelný i na průběhu ohřevu vody. Po překročení teploty tání začala křivka výrazně měnit sklon a stoupala pozvolněji, neboli rychlost ohřevu vody  $\frac{dT}{dt}$  se při změně skupenství PCM



v pouzdrech výrazně sníží. Postupným tavením materiálu se zmenšuje teplosměnná plocha tuhé fáze, tepelná vodivost kapalného skupenství PCM je menší než tuhého, z těchto důvodů klesá v průběhu fázové změny velikost měrné tepelné kapacity a tepelného toku až do okamžiku, kdy je veškerý materiál roztaven. Po dosažení teploty téměř 81 [°C] byl ohřev vypnut a voda v okruhu se začala ochlazovat. Proces změny skupenství veškerého PCM při průměrném dodávaném tepelném výkonu 355,25 [W] trval zhruba 3,6 [hod]. Celkové množství akumulovaného tepla v pouzdrech během ohřevu je 520,6 [Wh], což znamená 15,8 [Wh/ks]. Při ochlazování se začíná z pouzder uvolňovat teplo, tepelný tok dodávaný jedním pouzdem se ustálil na hodnotě kolem 1 [W].

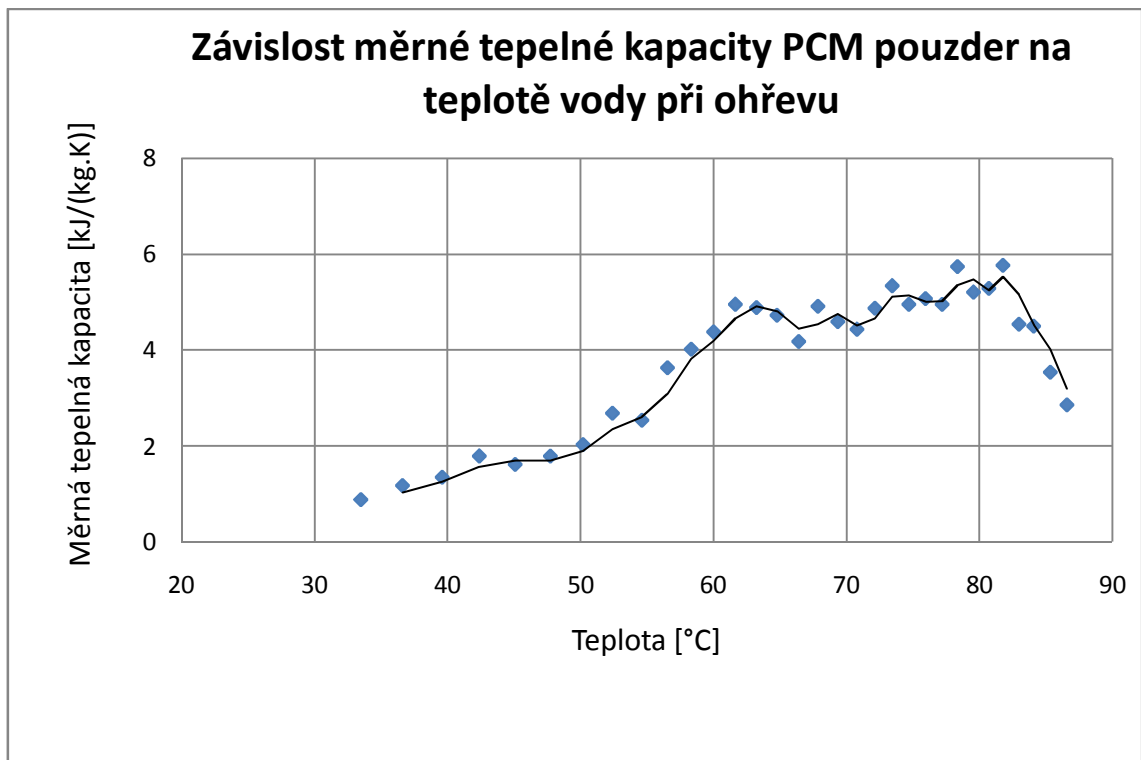
#### 5.4.2. PCM48/D70 Ball



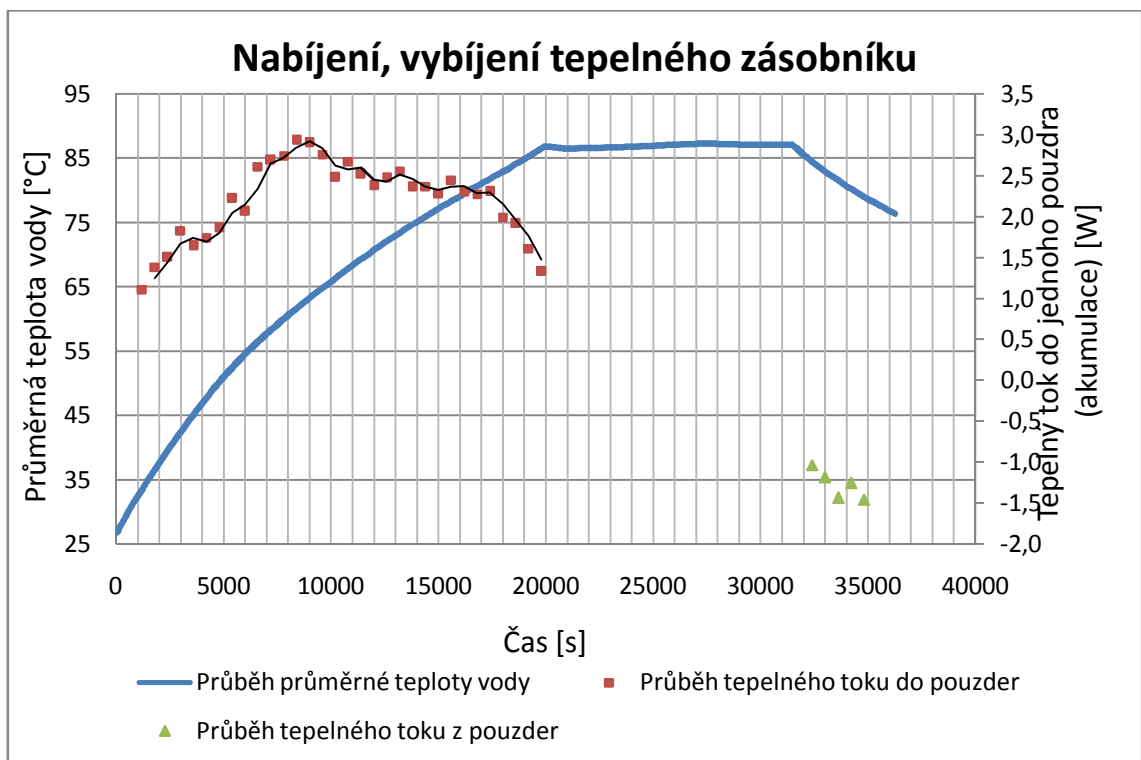
Obr. 46 – PCM 48

parametry PCM		
Označení	PCM48/D70 Ball	-
Průměr	65	[mm]
Objem	130	[ml/ks]
Materiál obalu	polypropylen	-
Teplota tání	50	[°C]
Teplota tuhnutí	48	[°C]
Latentní teplo	300	[kJ/l]
Pracovní teplota	<75	[°C]
Teplota varu	>190	[°C]
Hustota	1,4	[g/cm <sup>3</sup> ]
Měrná tepelná kapacita	2,2	[kJ/(kg K)]
Tepelná vodivost (tuhé skupenství)	1	[W/(m K)]
Tepelná vodivost (kapalné skupenství)	0,6	[W/(m K)]
PH	7 ÷ 9	[1]
Hořlavost	nehořlavý	-
Toxicita	netoxický	-

Tabulka 16 - parametry PCM 48



Graf 18



Graf 19

Do teploty 63 [°C] tepelný tok do PCM pouzder rychle roste k hodnotě 2,9 [W], dále až do cca 81 [°C] klesá mírně a po překročení této teploty začíná prudce klesat na hodnotu 1,3 [W]. Měrná tepelná kapacita do teploty tání 50 [°C] pozvolna roste, po překročení této teploty se její růst zrychlí. Při teplotě 63 [°C] dosáhne hodnoty 4,9 [kJ/(kg K)] a dále mírně roste do teploty 81 [°C], kdy dosáhne hodnoty 5,7 [kJ/(kg K)]. Rychlost fázové změny je velice pomalá, z toho důvodu, po dosažení 87 [°C], následovala výdrž a poté byla patrona vypnuta a nádoba

ochlazována do teploty 76 [°C]. Celková doba ohřevu pouzder byla 8,7 [h]. Po vyndání pouzder z horké vody bylo zjištěno, že se neroztavil celý obsah PCM v pouzdrech. Celkové množství akumulovaného tepla v pouzdrech během ohřevu je 391,1 [Wh], což znamená 11,9 [Wh/ks]. Při ochlazování začínají pouzdra uvolňovat teplo výkonem 1 [W/ks] a s časem se výkon zvětšuje. Při měření byla krátkodobě překročena pracovní teplota pouzder o zhruba 12 [°C], ale na solidifikaci PCM to nemělo vliv a po provedení opravných měření bylo zjištěno, že ani rychlost tání PCM nebyla negativně ovlivněna, spíše naopak. Předpokládám, že by dlouhodobé překračování pracovní teploty, vedlo k degradaci materiálu a snížení jeho akumulačních vlastností.

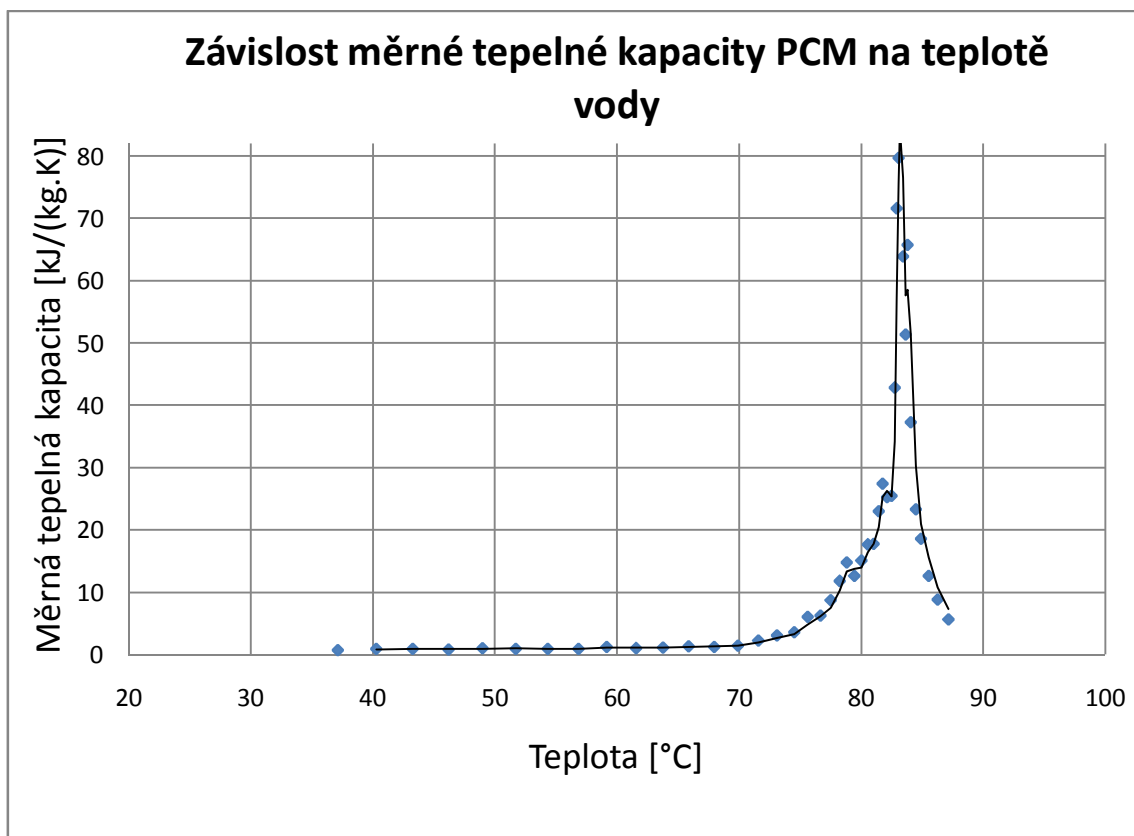
### 5.4.3. PCM 70/D70 Ball



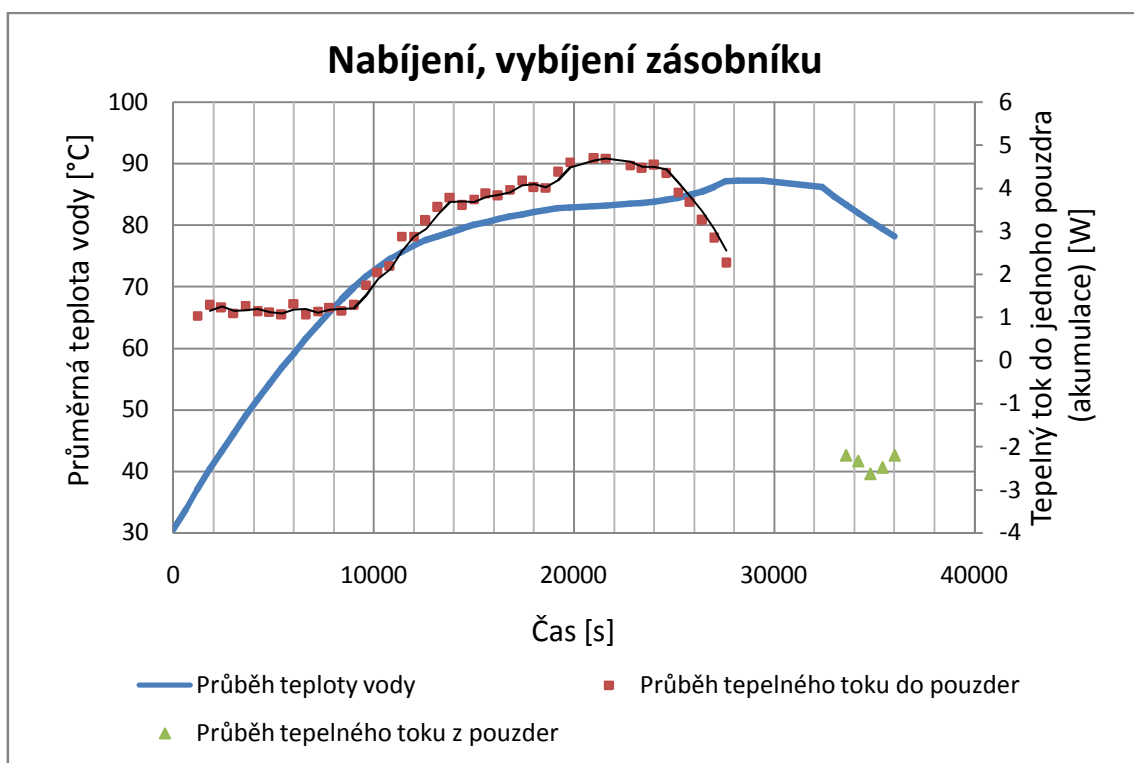
Obr. 47 – PCM 70

parametry PCM		
Označení	PCM70/D70 Ball	-
Průměr	65	[mm]
Objem	130	[ml/ks]
Materiál obalu	polypropylen	-
Teplota tání	73 ÷ 75	[°C]
Teplota tuhnutí	68 ÷ 70	[°C]
Latentní teplo	310	[kJ/l]
Pracovní teplota	<100	[°C]
Teplota varu	>150	[°C]
Hustota	1,6	[g/cm <sup>3</sup> ]
Měrná tepelná kapacita	1,6	[kJ/(kg K)]
Tepelná vodivost (tuhé skupenství)	1	[W/(m K)]
Tepelná vodivost (kapalné skupenství)	0,6	[W/(m K)]
PH	11	[1]
Hořlavost	nehořlavý	-
Toxicita	netoxický	-

Tabulka 17 - parametry PCM 70



Graf 20



Graf 21

Tento druh PCM má oproti ostatním vysokou teplotu tání a vyšší hustotu PCM. Tepelný tok se do teploty 68 [°C] téměř neměnil, jeho hodnota je pohybovala okolo 1,2 [W]. Nad touto teplotou se začal tepelný tok prudce zvyšovat a po překročení teploty cca 78 [°C] se růst zpomalil a zastavil se až na hodnotě 4,7 [W], dále mírně klesal. Po překročení teploty 84 [°C] následoval výrazný pokles až na 2,26 [W]. Měrná tepelná kapacita se také do 65[°C] téměř

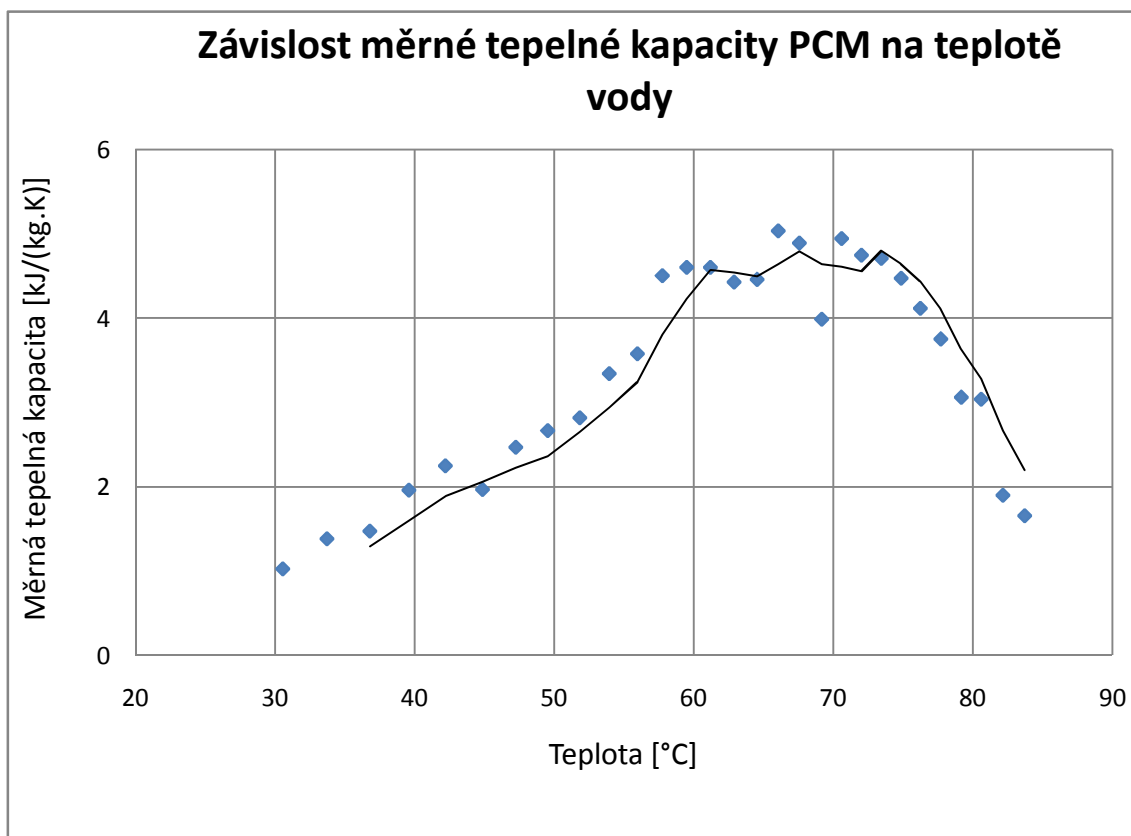
neměnila, její hodnota byla cca 1,3 [kJ/(kg K)], pak prudce vzrostla a při teplotě 83 [°C] dosáhla maxima 81,2 [kJ/(kg K)]. Okamžitě po překročení této teploty následoval pokles. Na teplotě 87,7 [°C] byl ukončen ohřev a následovala 1,16 [hod] výdrž. Celkové akumulované teplo v PCM pouzdrech při průměrném dodávaném tepelném výkonu 352,6 [W] za dobu ohřevu je 728,8 [Wh]. Množství tepla akumulované jedním pouzdrům je 22,1 [Wh]. Po vypnutí topné patrony začínají pouzdra uvolňovat teplo, při ukončení měření byl průměrný tepelný tok uvolňovaný jedním pouzdrům 2,4 [W].

#### 5.4.4. PCM50/D70 Ball

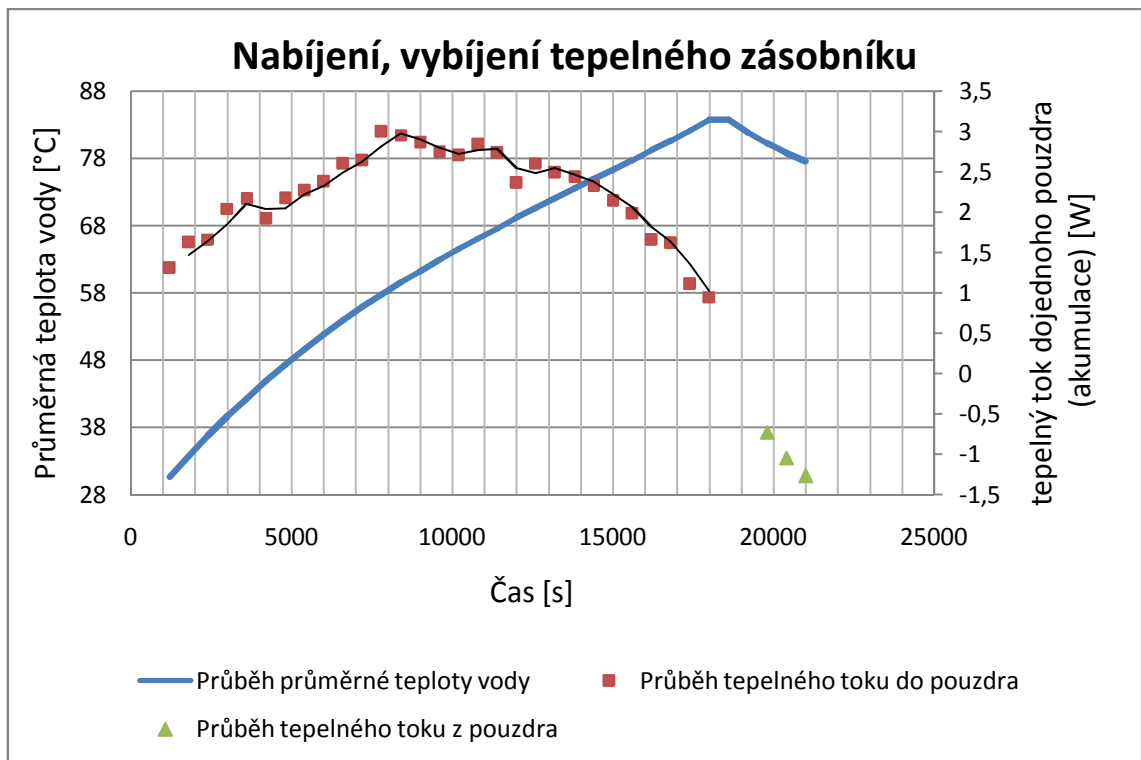


Obr. 48 – PCM 50

Pro tento typ pouzder nebyl k dispozici materiálový list, označení PCM50/D70 Ball je určeno pouze pro tuto práci.



Graf 22



Graf 23

Pozvolný růst tepelného toku je patrný již od počáteční teploty. Při teplotě cca 50 [°C] je vidět mírný nárůst výkonu akumulace a měrné tepelné kapacity, jedná se tedy o teplotu tání PCM. Hodnota tepelného toku, na které se růst zastavil je 2,9 [W]. Měrná tepelná kapacita se rychle zvyšuje, stejně jako v případě akumulačního výkonu, do teploty cca 60 [°C], dále je nárůst jen mírný. Maximální hodnoty měrné tepelné kapacity 5,03 [kJ/(kg K)] bylo dosaženo při teplotě 66 [°C]. Celkové akumulované teplo při průměrném dodávaném tepelném výkonu 356,5 [W] je 354,5 [Wh], což je 10,8 [Wh/ks]. Při chladnutí okruhu, se z pouzder začalo opět teplo uvolňovat. Výkon dodávaný pouzdrů zpět do vody se postupně zvyšoval.

### 5.5. Nejistota měření

Hledaný akumulační výkon není měřen přímo, ale vypočítáváme ho z naměřených veličin dle rovnice 36. Výkon je dělen počtem pouzder, což je 33 [ks]. Protože přímo měřené veličiny nejsou měřeny zcela přesně, musí být i hledaný akumulační výkon zatížen určitou nejistotou.

$$\dot{Q}_{PCM/1ks} = \frac{\sum_{t_1}^{t_2} [(\dot{P}_p + \dot{P}_c) - K(T_i - T_e) - E(T_0^4 - T_e^4)] - C_{nové}(T_{i,k} - T_{0k})_{\Delta t}}{\Delta t \cdot 33} \quad (35)$$

Pro účely výpočtu nejistoty si vztah přepíše do tvaru

$$\dot{Q}_{PCM/1ks} = \frac{\dot{P}_c - \dot{Z} - \dot{Y} - C_{nové}(T_{i,k} - T_{0k})_{\Delta t}}{\Delta t \cdot 33},$$

kde  $\dot{P}_c = (\dot{P}_p + \dot{P}_c)$ ,  $\dot{Z} = K(T_i - T_e)$ ,  $\dot{Y} = E(T_0^4 - T_e^4)$ .

Akumulační výkon  $\dot{Q}_{PCM/1ks}$  je funkcí celkově dodaného tepelného výkonu  $\dot{P}_c$ , celkových tepelných ztrát konvekcí  $\dot{Z}$  a radiací  $\dot{Y}$  za časový interval  $\Delta t = t_2 - t_1$ , celkové tepelné

kapacity experimentálního zařízení a přírůstku teploty vody za uvažovaný časový úsek. Nejistoty přímo měřených a volených veličin označíme  $\delta T_{ik}, \delta T_0, \delta T_{0k}, \delta \dot{P}_p, \delta T_e, \delta K, \delta E$  a nejistoty nepřímo měřených veličin  $\delta C_{nové}, \delta \dot{P}_C, \delta \dot{Z}, \delta Y$ . Nejistoty měření teploty  $\delta T_{ik}, \delta T_0, \delta T_{0k}$  jsou dány normou. Předepsaná minimální přesnost pro termočlánek typu K jsou 0,4% z měřené hodnoty [32]. Nejistota měření teploty okolí  $\delta T_e$  byla na základě velikosti nejmenšího dílku stupnice teploměru v laboratořích odhadnuta na 0,1 [°C]. Nejistota měření tepelného výkonu je dána přesností wattmetru, výrobcem udávaná přesnost pro rozsah 2400 [W] je (0,8 % + 10 digit). Nejistota změřené hodnoty, při nejmenší zobrazované hodnotě 1 [W], je  $\delta \dot{P}_p = \frac{0,8}{100} \cdot \dot{P}_p + 10 \cdot 1$ . Velikost nejistot volených konstant byly odhadnuty  $\delta K = 0,02 \left[ \frac{W}{K} \right]$ ,  $\delta E = 1 \times 10^{-8} \left[ \frac{W}{\text{°C}^4} \right]$ . Nejistota nepřímého měření se vypočítá podle obecné rovnice 37 [33]

$$\delta X = \sqrt{\left( \frac{\partial f}{\partial a} \right)^2 \cdot (\delta a)^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial b} \right)^2 \cdot (\delta b)^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial c} \right)^2 \cdot (\delta c)^2} \quad (36)$$

$\delta X$  značí nejistotu zjištěné hodnoty  $X$ , která je dána funkcí  $n$  veličin  $X = f(a, b, c, \dots)$ . Na základě tohoto vztahu byla pro zvolený vyhodnocovací časový interval určena nejistota součtu tepelných výkonů  $\delta \dot{P}_C = \sqrt{\delta \dot{P}_{P,1}^2 + \delta \dot{P}_{P,2}^2 + \dots + \delta \dot{P}_{P,t}^2}$ , nejistota součtu tepelných ztrát konvekce

$$\delta \dot{Z} = \sqrt{\left( \sqrt{(T_i - T_e)^2 \cdot \delta K^2 + K^2 \cdot \delta T_i^2 + (-K)^2 \cdot \delta T_e^2} \right)_1^2 + \dots + \left( \sqrt{(T_i - T_e)^2 \cdot \delta K^2 + K^2 \cdot \delta T_i^2 + (-K)^2 \cdot \delta T_e^2} \right)_t^2}$$

, nejistota součtu tepelných ztrát radiací

$$\delta \dot{Y} = \sqrt{\left( \sqrt{(T_0^4 - T_e^4)^2 \cdot \delta E^2 + (4ET_0^3)^2 \cdot \delta T_0^2 + (-4ET_0^3)^2 \cdot \delta T_e^2} \right)_1^2 + \dots + \left( \sqrt{(T_0^4 - T_e^4)^2 \cdot \delta E^2 + (4ET_0^3)^2 \cdot \delta T_0^2 + (-4ET_0^3)^2 \cdot \delta T_e^2} \right)_t^2}$$

a nejistota vypočítané celkové tepelné kapacity experimentálního zařízení

$$\delta C_{nové} = \sqrt{\left( \frac{\dot{P}_C}{(T_{ik} - T_0)} \right)^2 \cdot \delta \dot{P}_C^2 + \left( \frac{\dot{P}_C}{(T_{ik} - T_0)^2} \right)^2 \cdot \delta T_0^2 + \left( -\frac{\dot{P}_C}{(T_{ik} - T_0)^2} \right)^2 \cdot \delta T_{ik}^2}$$

Následně byla sestavena rovnice pro výpočet nejistoty měření akumulčního výkonu jednoho pouzdra

$$\delta \dot{Q}_{PCM/1ks} = \sqrt{\left( \frac{1}{\Delta t \cdot 33} \right)^2 \cdot \delta \dot{P}_C^2 + \left( -\frac{1}{\Delta t \cdot 33} \right)^2 \cdot \delta \dot{Y}^2 + \left( -\frac{1}{\Delta t \cdot 33} \right)^2 \cdot \delta \dot{Z}^2 + \left( -\frac{(T_{ik} - T_0)}{\Delta t \cdot 33} \right)^2 \cdot \delta C_{nové}^2 + \left( -\frac{C}{\Delta t \cdot 33} \right)^2 \cdot \delta T_{ik}^2 + \left( \frac{C}{\Delta t \cdot 33} \right)^2 \cdot \delta T_0^2} \quad (37)$$

Protože se nejistota s rostoucí teplotou zvyšuje, byla její hodnota počítána pro akumulční výkon na konci ohřevu, kdy je teplota vody nejvyšší.

$$\dot{Q}_{PCM/1ks} \Big|_{\Delta t=(18600-18000)s} = 1,54 \pm 0,12 [W]$$

Přesnost měření akumulčního výkonu je dostatečná a pro hodnoty počítané při nižší teplotě nejistota snižuje. Metodicky stejně byl vyjádřen vztah pro výpočet velikosti nejistoty měření se

měrné tepelné kapacity PCM pouzder a následně vypočítána její velikost pro hodnotu, která je zatížena největší nejistotou.

$$C_{P, PCM} \Big|_{\Delta t=(18600-18000)_s} = 3 \pm 0,232 [\text{kJ}/(\text{kg K})]$$

Na nejistotu měření má největší vliv nejistota měření teploty a velikost vyhodnocovacího časového intervalu. Pro měření měrné tepelné kapacity PCM pouzder a akumulačního výkonu je použitý experiment a způsob vyhodnocování vyhovující.

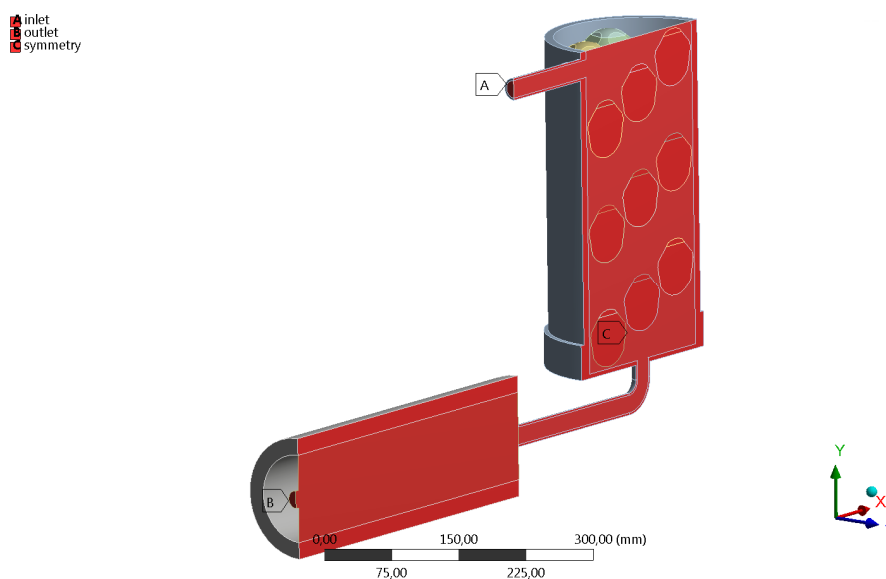
## 6. Numerická simulace nabíjení tepelného zásobníku

### 6.1. Tvorba modelu

Pro posouzení obtékání pouzder a zjištění rozložení teplot v tepelném zásobníku experimentálního zařízení, byla provedena numerická simulace pouzder PCM 54/D70 Ball pomocí programu ANSYS Fluent.

V programu ANSYS Workbench 17.2 byl vytvořen 3D model symetrické poloviny tepelného zásobníku. Okolo vnitřní nádoby, na kterou jsou napojeny trubky o světlosti 20 [mm], je izolační vrstva z PUR pěny. V té je vložena trubka, také z PUR. Izolaci nad víkem vnitřní nádoby tvoří molitanová vložka tloušťky 35 [mm] a vzduchová mezera 15 [mm]. Izolační vrstvu chrání vnější PVC plášť. Na odtokovém (níže umístěném) potrubí je vymodelován objem, představující hmotu zbývajících, nevymodelovaných částí experimentálního zařízení, do kterých je při zahřívání vody akumulováno teplo. Velikost akumulačního objemu byla dopočítána z koeficientu akumulace pro kalibraci experimentálního zařízení.

Uvnitř nádoby jsou rozmístěna PCM pouzdra, pro zjednodušení problému byla pouzdra odsazena od stěny vnitřní nádoby o 1,5 [mm] a nejsou ve vzájemném v kontaktu. Dále byly na vytvořeném objemu vytvořeny oblasti k definování okrajových podmínek, viz obr. 49. Na vtokovém potrubí plocha „inlet“, na odtokovém potrubí plocha „outlet“ a plochy v rovině symetrie jsou označeny jako „symmetry“.



Obr. 49 – Výpočtový model s vyznačenými plochami pro definici okrajových podmínek



Akumulace tepla tepelného zásobníku byla uvažována pouze do části vnitřní nádoby, která je v kontaktu s vodou, jejího obsahu a akumulačního objemu, proto byla výpočtová síť vytvořena pouze pro tyto části a zbývající byly potlačeny.

### 6.1.1. Určení velikosti akumulačního objemu

Nejprve byla určena tepelná kapacita zbytku cirkulačního okruhu

$C_H = C - c_{H_2O} \cdot m_{H_2O, \text{zásobník}} - C_n = C - c_{H_2O} \cdot m_{H_2O, \text{zásobník}} - 2 \cdot c_{PVC} \cdot V_{PVC} \cdot \rho_{PVC}$ . Při kalibraci zařízení byla zjištěna, celková tepelná kapacita  $C = 70783$  [J/K]. Odečtením tepelné kapacity vody v zásobníku a kapacity části vnitřního pláště  $C_n$  zásobníku od celkové tepelné kapacity zařízení, dostanu tepelnou kapacitu zbytku okruhu. Objem vnitřní nádoby byl zjištěn z modelu zásobníku  $V_n = 0,0013475$  m<sup>3</sup>. Měrná tepelná kapacita PVC je  $c_{PVC} = 1100$  [J/(kg K)] a hustota  $\rho_{PVC} = 1380$  [kg/m<sup>3</sup>]. Hmotnost vody v zásobníku je  $m_{H_2O, \text{zásobník}} = 10,2$  [kg] a její průměrná měrná tepelná kapacita  $c_{H_2O} = 4182$  [J/kg K]. Po dosazení hodnot do rovnice, dostáváme tepelnou kapacitu okruhu bez zásobníku  $C_H = 24035$  [J/K], protože v modelu uvažujeme pouze půlku experimentálního zařízení je náš koeficient akumulace  $C_{Hm} = 12017$  [J/K]. Dále byla určena velikost akumulačního objemu. Z měření víme, že celkový objem vody v experimentálním zařízení je 13,68 [l] v zásobníku je 10,61 [l], Objem vody, v okruhu bez zásobníku, zjistíme odečtení obou hodnot od sebe.  $V_{H_2O, H} = 13,68 - 10,61 = 3,07$  [l]. Pro náš model je tedy akumulační objem vody  $V_{H_2O, aku} = 1,535$  [l] = 0,001535 m<sup>3</sup>. Akumulační objem se skládá z objemu vody ve zbytku okruhu a objemu trubky z PVC a platí, že

$$C_H = V_{H_2O, aku} \cdot c_{H_2O} \cdot \rho_{H_2O} + V_{PVC, aku} \cdot c_{PVC} \cdot \rho_{PVC} \quad (38)$$

Z rovnice 39 vyplývá

$$V_{PVC, aku} = \frac{C_H - V_{H_2O, aku} \cdot c_{H_2O} \cdot \rho_{H_2O}}{c_{PVC} \cdot \rho_{PVC}} = \frac{12017 - 4182 \cdot 0,001535 \cdot 998,2}{1100 \cdot 1380} = 0,003695 \text{ [m}^3\text{]}$$

. Vnitřní průměr trubky akumulačního objemu  $D$  volím 100 [mm]. Musí platit, že

$$V_{PVC, aku} = \frac{\pi(d^2 - D^2)}{4} \cdot l \quad (39)$$

$$\text{a} \quad V_{H_2O, aku} = \frac{\pi D^2}{4} \cdot l \quad (40)$$

Z rovnice 41 vyplývá vztah pro délku akumulačního objemu  $l = \frac{V_{H_2O, aku} \cdot 4}{\pi \cdot D^2} = 197,8$  [mm]

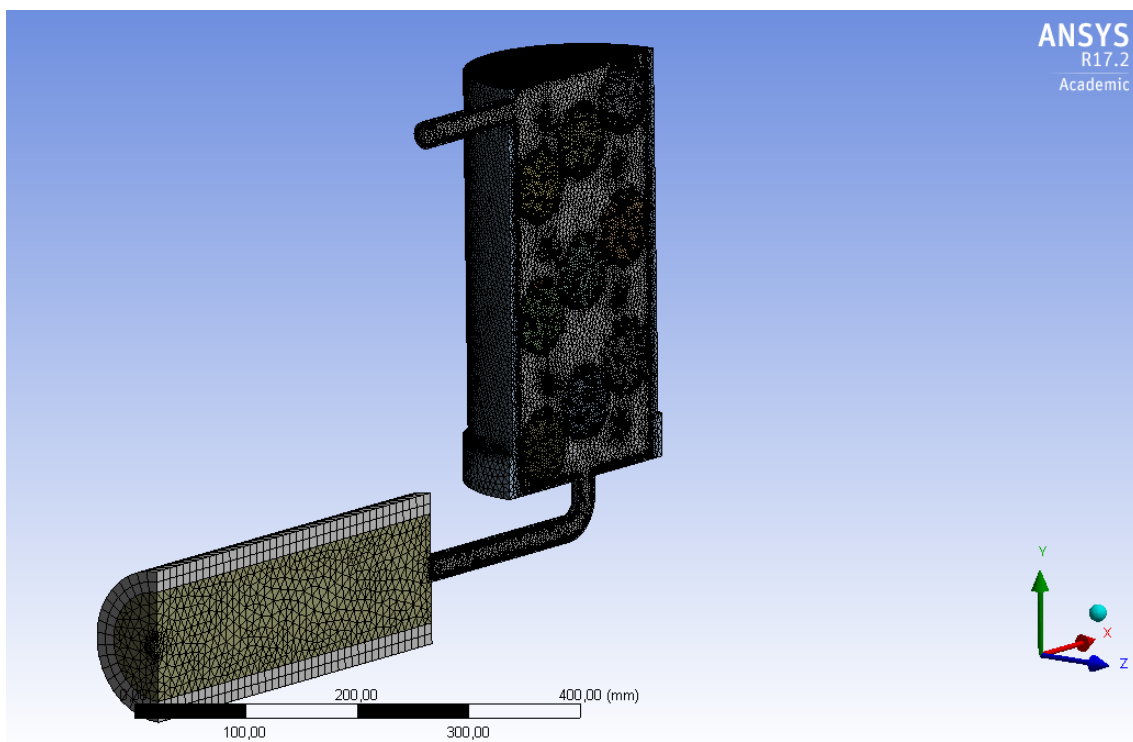
Z rovnic 40 a 41 byl vyjádřen vztah pro výpočet vnějšího průměru akumulční trubky

$$d = \sqrt{\left(\frac{V_{PVC,aku}}{V_{H_2O,aku}} + 1\right)} \cdot D^2 = 184,6[\text{mm}].$$

Akumulační objem je modelován jako polovina trubky, proto byla dvojnásobně zvětšena délka na 369,2 [mm], při zachování průměrů.

## 6.2. Tvorba výpočtové sítě

Síť byla vytvořena v programu ANSYS Meshing 17.2. V globálním nastavení sítě byla definována minimální velikost elementu 0,4 [mm], maximální velikost plochy elementu 10 [mm<sup>2</sup>]. Na plochách, které jsou obtékány vodou, byla vytvořena mezní vrstva, s výjimkou ploch akumulčního objemu, kde nás proudění vody nezajímá. Dále byla zjemněna síť objemu vody na max. velikost elementu 5 [mm] a pouzder na 3 [mm]. Na plochách pouzdra, které jsou umístěny u vtoku vody do zásobníku, bylo zadáno plošné zjemnění sítě na 2 [mm], protože zde jsou pouzdra intenzivně obtékána. Síť byla dále optimalizována, tak aby byly dodrženy doporučené hodnoty parametrů elementů sítě. Vygenerovaná síť má 2 985 680 elementů.



Obr. 50 – Diskretizovaný model výpočtového modelu

### 6.2.1. Kvalita sítě

Kvalita sítě hraje významnou roli v přesnosti a stabilitě výpočtu. Ke kontrole kvality sítě nám slouží několik parametrů. Ortogonální kvalita (orthogonal quality, tabulka 17) prvku by měla minimálně dosahovat hodnoty 0,01 a její průměrná hodnota by měla být podstatně vyšší. Pokud je parametr roven 1, pak se jedná o element tvaru dokonalé krychle. Požadavek ortogonální kvality prvků je splněn. Dalším parametrem je poměr stran (aspect ratio, tabulka 19), který vyjadřuje poměr nejdelší a nejkratší hrany elementu. Maximální doporučená

hodnota poměru stran je kolem 30. Posledním důležitým parametrem je míra zkosení (skewness, tabulka 18), ukazuje, jak moc se element liší od ideálního tvaru. Ideální jsou hodnoty blíží se nule, doporučuje se maximální hodnota 0,95. Síť splňuje všechny tyto požadavky. [34]

Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	765679
<input type="checkbox"/> Elements	2985680
<b>Mesh Metric</b>	<b>Orthogonal Quality</b>
<input type="checkbox"/> Min	7,1822e-002
<input type="checkbox"/> Max	0,99999
<input type="checkbox"/> Average	0,8553
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,10121

Tabulka 19 – Míra zkosení

Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	765679
<input type="checkbox"/> Elements	2985680
<b>Mesh Metric</b>	<b>Skewness</b>
<input type="checkbox"/> Min	2,2917e-010
<input type="checkbox"/> Max	0,93796
<input type="checkbox"/> Average	0,25377
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,15674

Tabulka 18 – Ortoagonální kvalita

Statistics	
Nodes	765679
Elements	2985680
Mesh Metric	Aspect Ratio
Min	1,1433
Max	23,723
Average	3,2547
Standard Deviation	2,4386

Tabulka 20 – Poměr stran

### 6.3. Nastavení numerické simulace

#### 6.3.1. nastavení typu úlohy

Jedná se o případ proudění nestlačitelné tekutiny, solver byl tedy nastaven na pressure-based. Rychlost bude zadávána v absolutních hodnotách. Chceme, aby program simuloval chování vymodelovaného systému za určité časové období, tedy time – transient.

#### 6.3.2. Použité výpočtové modely

Tepelný zásobník je protékán vodou, která je ohřívána vnějším zdrojem tepla. Pro výpočet budeme potřebovat energetickou rovnici. Můžeme předpokládat, že turbulence bude mít vliv na proudění tekutiny v zásobníku a na přenos tepla, proto zvolíme model turbulentní viskozity. Byl zvolen standardní Reynolds stress model.

#### 6.3.3. Definice materiálů

Pro všechny části diskretizovaného modelu byl definován příslušný materiál. Vlastnosti vody jsou již definovány v knihovně materiálů Fluentu, ostatní materiály byly definovány uživatelem, tabulka 21. Vzduch byl definován jako pevná látka.

	Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	Měrná tepelná kapacita [J/(kg K)]	Tepelná vodivost [W/(m K)]
PP	1180	1465	0,19
Vzduch	1,225	1006,43	0,0242
PVC	1380	1100	0,16

Tabulka 21 – Vlastnosti materiálů [26]

#### PCM 54

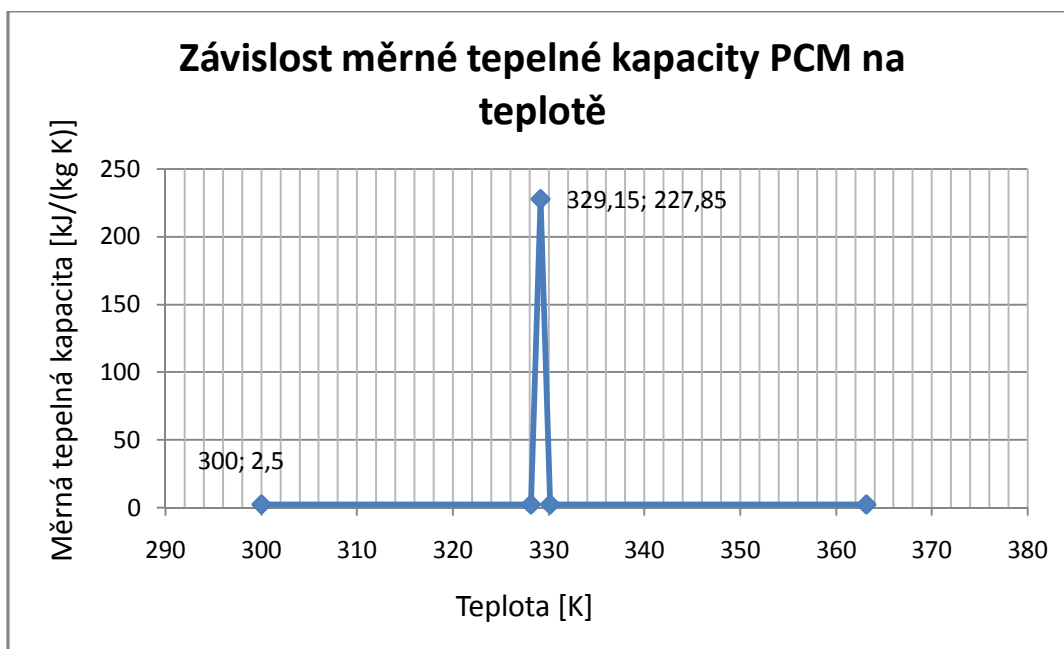
Vlastnosti materiálu byly zjištěny z materiálového listu od výrobce. Hustota materiálu je 1420 [kg/m<sup>3</sup>]. Výrobce neuvádí hodnoty měrné tepelné kapacity pro pevnou a kapalnou fázi, je k dispozici pouze jedna hodnota 2,5 [kJ/(kg K)], kterou v simulaci uvažují pro obě skupenství. Skupenské teplo tání je 320 [kJ/l], do materiálových vlastností bylo zadáno jako zvýšení měrné tepelné kapacity při teplotě tání 329,15 [K], viz graf 24. Hodnota měrné tepelné kapacity musí být taková, aby velikost plochy pod křivkou grafu, která vznikla vzrůstem měrné tepelné kapacity, se rovnala hodnotě skupenského tepla tání PCM. Mohu psát, že platí

$$l = (c_{p,tání} - c_{p,PCM54}) \cdot \frac{\Delta T}{2}, \quad (41)$$

odkud si vyjádřím neznámou měrnou tepelnou kapacitu při teplotě tání  $c_{p,tání}$ , dostanu

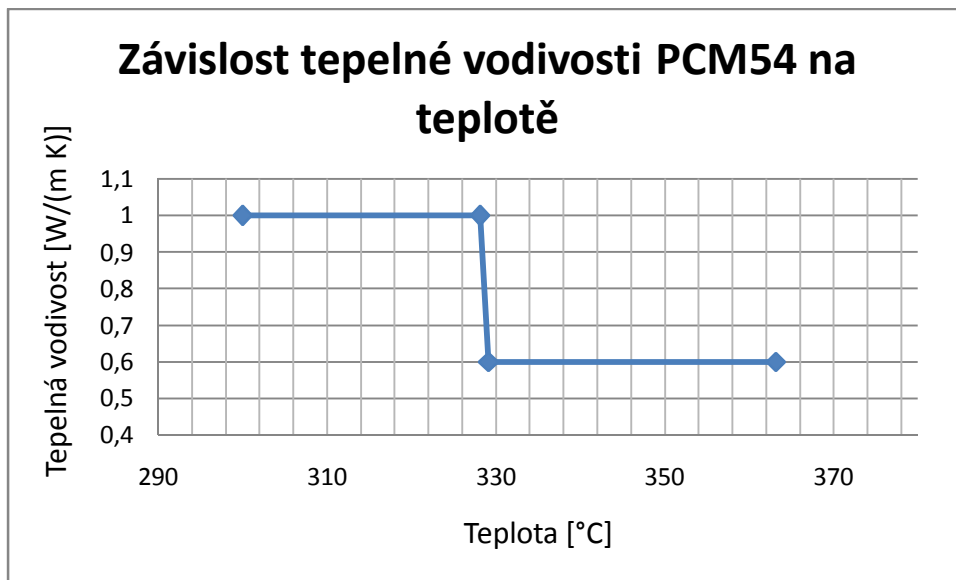
$$c_{p,tání} = c_{p,PCM54} + \frac{2l}{\Delta T}.$$

$c_{p,PCM54}$  značí měrnou tepelnou kapacitu pro pevnou a kapalnou fázi PCM 54,  $l$  je skupenské teplo tání a  $\Delta T$  je interval teplot, v kterém probíhá skupenská změna. Po dosažení materiálových hodnot a teplotního intervalu 2 [K] dostávám hodnotu 227,85 [kJ/(kg K)].



Graf 24

Tepelná vodivost se podle výrobce mění skokově se změnou skupenství. Hodnota klesne z hodnoty 1 [W/(m K)] na 0,6 [W/(m K)], do Fluentu byl zadán průběh tepelné vodivosti zobrazený v grafu 25.



Graf 25

#### 6.3.4. Okrajové podmínky

Pro určení okrajových podmínek byly nejprve vytvořeny uživatelem definované funkce pro zdroj tepla a tepelné ztráty zásobníku. Výkon zdroje tepla je dán výkonem topné patrony, zmenšeným o tepelné ztráty vzniklé na cirkulačním okruhu mimo uvažovaný kontrolní objem. Nejdříve je tedy nutné určit, jak velké jsou ztráty zásobníku a následně dopočítat ztráty zbývajících okruhu. Neboli určit koeficienty ztrát  $K$ ,  $E$  pro obě části (viz rovnice bilance toků energie), protože teplotu okolí známe a teplotu vody dopočítá Fluent.

##### Definované funkce

K určení ztrát byl použit model tepelného zásobníku i s izolací, ale s odečteným objemem pouzder. Pro model byla vytvořena výpočtová síť. V programu ANSYS Fluent byla provedena simulace případu, kdy voda v zásobníku neproudí a má konstantní definovanou teplotu. Teplota okolí odpovídá teplotě při kalibraci experimentálního zařízení v laboratoři. Výpočet byl proveden pro 2 případy s různou teplotou vody a to pro teplotu 320 [K] a 350 [K]. Zjištěné tepelné ztráty poloviny zásobníku jsou uvedeny v tabulce 22.

Teplota [K]	320	350
Tepelné ztráty konvekcí [W]	2,26	5,32
Tepelné ztráty konvekcí a radiací [W]	2,49	5,9
Tepelné ztráty radiací [W]	0,23	0,58

Tabulka 22 – Tepelné ztráty výpočtového modelu

Pro tepelné ztráty platí rovnice  $2 \cdot \dot{Q}_{konvekce} = K_n \cdot \Delta T$  a  $2 \cdot \dot{Q}_{radiace} = E_n \cdot (t_i^4 - t_e^4)$ , kde  $K_n$ ,  $E_n$  jsou koeficienty tepelných ztrát nádoby a  $\Delta T$  je rozdíl teploty vody  $T_i$  a okolí  $T_e$ . Dále mohou psát, že koeficient ztrát pro celé zařízení je dán součtem koeficientů ztrát jeho částí, tedy  $K = K_H + K_h$  a  $E = E_n + E_H$ .  $K_H$ ,  $E_H$  značí koeficienty tepelných ztrát hadic. Z uvedených rovnic, byly vyjádřeny neznámé koeficienty

$$K_n = \frac{2 \cdot \dot{Q}_{konvekce}}{\Delta T}, \quad (42)$$

$$K_H = K - \frac{2 \cdot \dot{Q}_{konvekce}}{\Delta T}, \quad (43)$$

$$E_n = \frac{2 \cdot \dot{Q}_{radiace}}{(t_i^4 - t_e^4)}, \quad (44)$$

$$E_H = E - \frac{2 \cdot \dot{Q}_{radiace}}{(t_i^4 - t_e^4)}. \quad (45)$$

Po dosažení do vzorců, byly pro každý koeficient získány dvě hodnoty, jejichž průměrná hodnota je výsledný koeficient, který byl použit k definování ztrát a výkonu zdroje diskretizovaného modelu.

$K_n$ [W/K]	$K_H$ [W/K]	$E_n$ [W/K <sup>4</sup> ]	$E_H$ [W/K <sup>4</sup> ]
0,2053	2,9147	$1 \times 10^{-8}$	$16 \times 10^{-8}$

Tabulka 23 – Přehled koeficientů ztrát

Protože jsou radiační ztráty zásobníku malé, bylo zavedeno zjednodušení  $E = E_n$ .

Uživatelské funkce byly psány v programovacím jazyce C++. Tepelné ztráty jsou na dvou částech modelu a to na vnější ploše vnitřního pláště a na hladině vody, proto byly celkové tepelné ztráty zásobníku, rozděleny na tyto dvě plochy podle jejich velikosti. Zdrojový kód funkcí vypadal takto:

```

/*****
UDF
*****/

#include "udf.h"

/* počáteční teplota */

real tep;
DEFINE_PROFILE(vykon, t, i)
{
    real x[ND_ND];
    real vykon, teplota;
    face_t f;

    ;
    begin_f_loop(f, t)
    {
        teplota = F_T(f, t);
        tep = teplota;
        vykon = (355.7 - 2.7547 * (teplota-298.75) - 17/100000000 *
                (pow((teplota-273.15),4) - pow(25.6,4))) / 2.0;

        F_PROFILE(f, t, i) = vykon;
    }
    end_f_loop(f, t)
}

DEFINE_PROFILE(ztraty, t, i)

```

```

{
    real x[ND_ND];
    real q;
    face_t f;

    begin_f_loop(f, t)
    {
        q = ( 0.094412 * (tep - 298.75) );
        F_PROFILE(f, t, i) = q ;
    }
    end_f_loop(f, t)
}
DEFINE_PROFILE(ztraty2, t, i)
{
    real x[ND_ND];
    real q2;
    face_t f;
    begin_f_loop(f, t)
    {
        q2 = ( 0.008238 * (tep - 298.75) );
        F_PROFILE(f, t, i) = q2 ;
    }
    end_f_loop(f, t)
}

```

Funkce jsou definovány jako profily, jejichž hodnoty jsou v každém časovém kroku počítány na základě teploty vody na ploše inlet. Na vnější stěny vnitřní nádoby byly definovány tepelné ztráty vloženou funkcí „ztraty“, teplo odcházející hladinou vody je definováno funkcí „ztraty2“.

#### Inlet

Pro plochu inlet byla definována recirkulační okrajová podmínka, v které byl pomocí vložené funkce zadán tepelný zdroj (funkce „vykon“) ohřevu cirkulující vody. Jako zone outlet byla zvolena plocha outlet.

#### Outlet

Zde byla také definována recirkulační okrajová podmínka, která definuje velikost hmotnostního toku vstupujícího do zásobníku  $\dot{m} = 0,1194 \left[\frac{kg}{s}\right]$ .

#### Vnější plochy akumulárního objemu

Na těchto plochách jsou zadány nulové tepelné ztráty

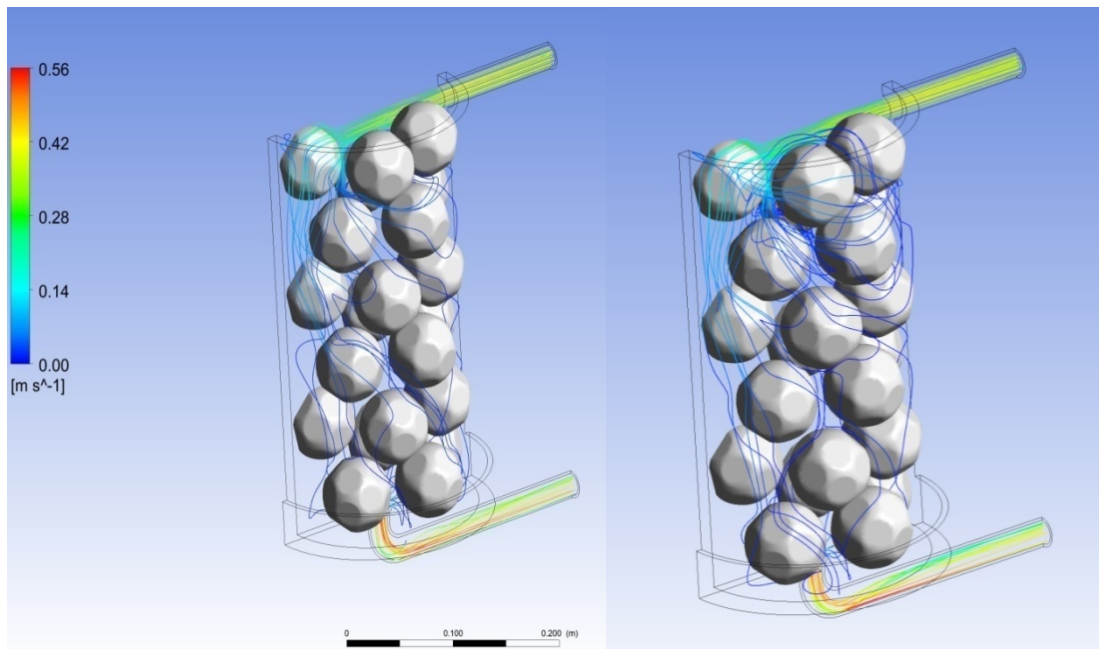
#### Teplosměnné plochy pouzder

Byla zde definována 1 mm tlustá polypropylenová izolace, představující materiál pouzdra.

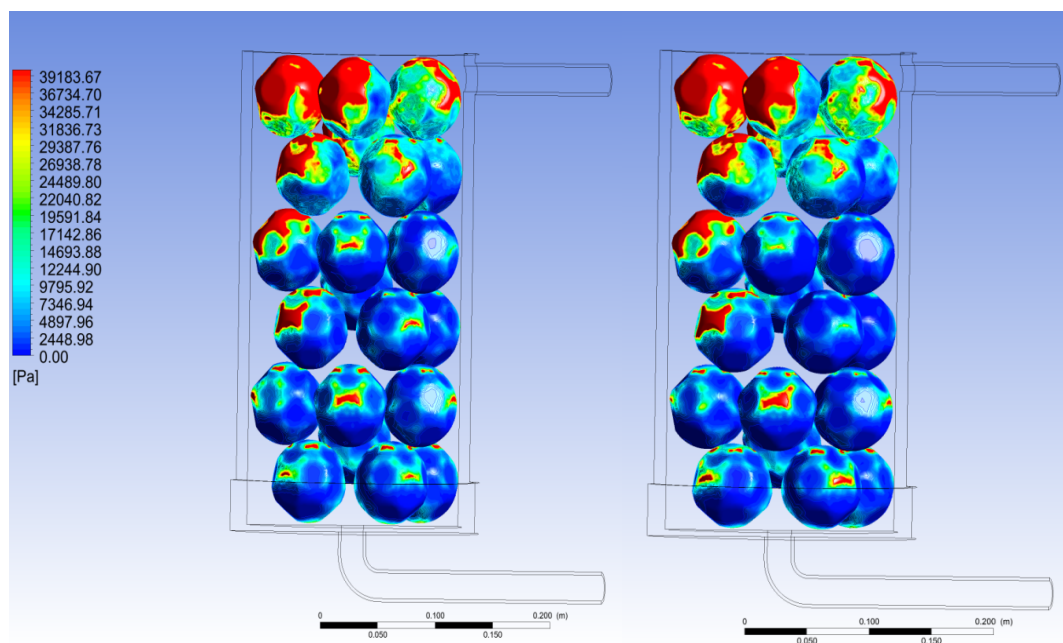
Počáteční teplota simulace je 303 [K]. Dále bylo nastaveno, aby se během výpočtu, každý časový krok, zaznamenával průběh teploty na vstupu a výstupu, průběh průměrné teploty celého objemu vody a průběh celkového tepelného toku do pouzder. Pro výpočet bylo nastaveno 2200 časových kroků o velikosti 10 [s]. Uložení dat bylo provedeno každý 6. časový krok.

## 6.4. Výsledky

### Proudění vody



Obr. 51 – Hlavní proudnice toku vody



Obr. 52 – Tečné napětí na povrchu pouzder

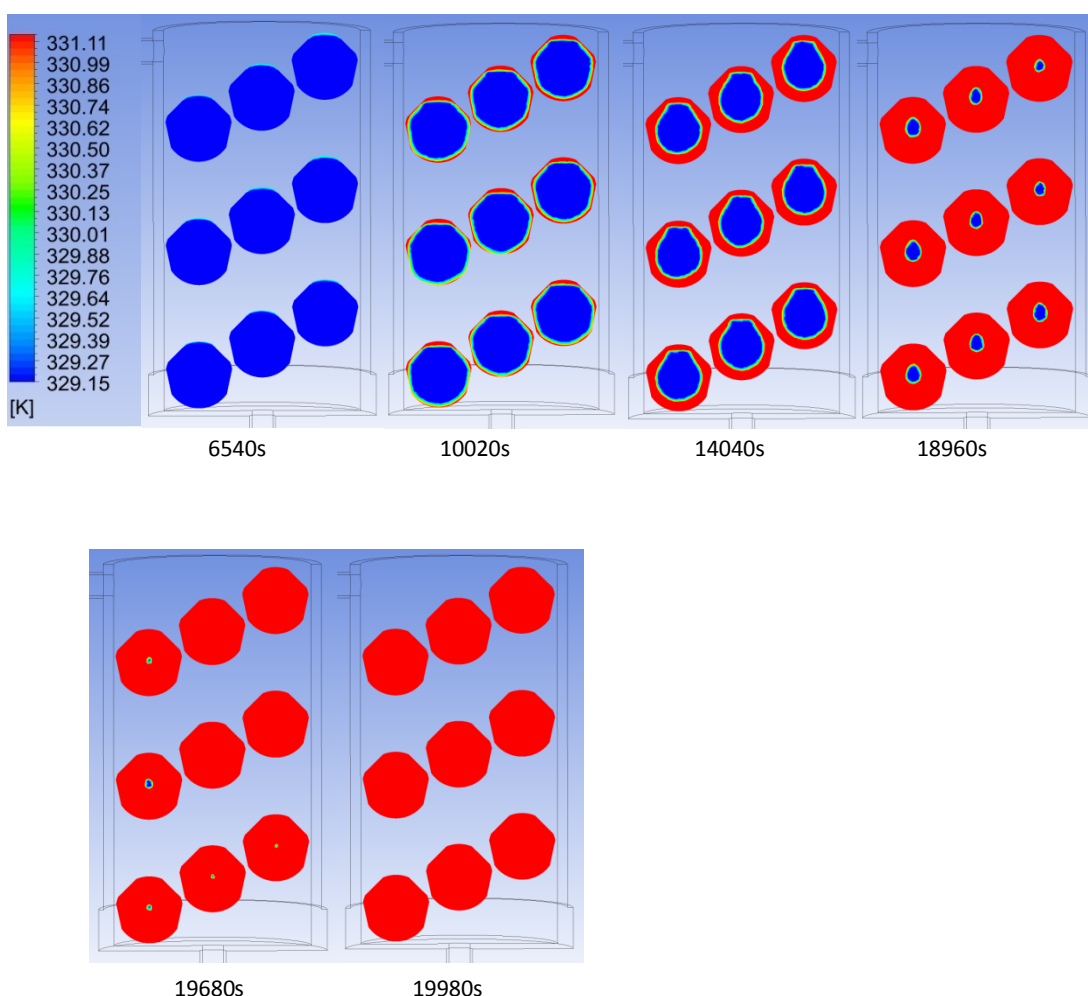
Na obr. 51 jsou zobrazeny hlavní proudnice toku vody protékající skrze PCM pouzdra. Nejvyšších rychlostí proudění, až 0,56 m/s, je dosahováno ve vtokovém a odtokovém potrubí. Proud vody vstupující do zásobníku narazí do protilehlé stěny, poté hlavní proudnice toku



sledují jeho válcovou stěnu a ve střední části zásobníku se rozptýlí mezi pouzdra a rychlost proudění se sníží. Nejintenzivněji jsou obtékány pouzdra, umístěná v proudu přitékající vody, což je také vidět na hodnotách tečného napětí (obr. 52) a velikosti tepelného toku na obtékaných stěnách pouzder. Intenzivně jsou obtékány také části pouzder, orientované blízko ke stěnám nádoby. Nejhůře obtékaná pouzdra jsou u válcové stěny ve střední části zásobníku na straně vtoku a také pouzdra na dně zásobníku. Se zvyšující se teplotou vody, se tečné napětí na stěnách pouzder mění jen nepatrně.

#### Průběh tání PCM 54

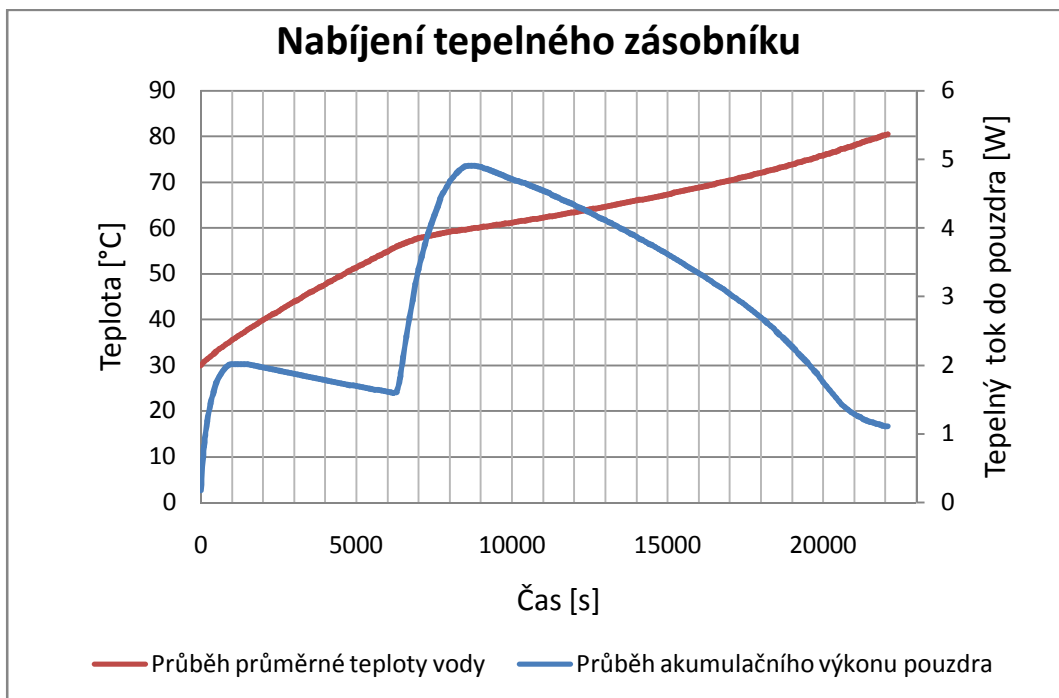
Na obr. 53 je zobrazeno rozložení teploty v řezech PCM pouzdry v rovině symetrie pro různé časy ohřevu. Zobrazované teploty jsou omezeny v rozmezí od 329,15 [K] do 331,15 [K], což je teplotní rozsah skupenské změny, definovaný pro danou simulaci.



Obr. 53

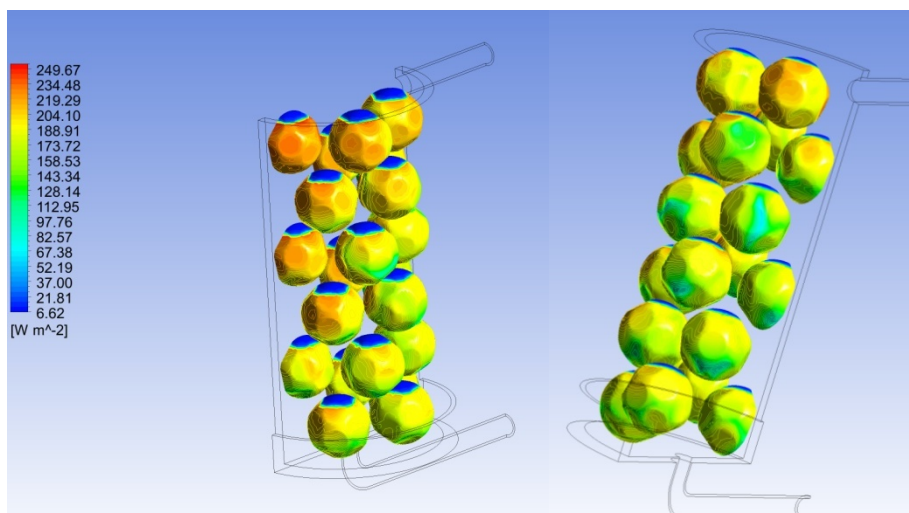
Při ohřevu se nejdříve začne přehřívat část pouzdra, která je vyplněna vzduchem. Vzduch je zde z hlediska přestupu tepla nežádoucí, je to izolant tepla, proto se PCM neohřívá stejně rychle v celém svém objemu. Z hlediska funkce, vzduch v pouzdru musí být, protože zabraňuje jeho poškození vlivem změny objemu při změně skupenství. Roztavení PCM v nejhůře obtékaných pouzdrech, trvá nejdéle. V čase 19980 [s] je veškerý PCM v kapalném skupenství. Doba trvání fázové změny je při simulaci cca 3 hodiny a 44 minut.

V grafu 26 je zakreslen průběh průměrné teploty vody a akumulační výkon jednoho pouzdra při nabíjení tepelného zásobníku. Průběhy jsou získány z numerické simulace. Prudký nárůst tepelného toku v prvních 1000 [s] simulace k hodnotě 2 [W], představuje postupné ohřátí vody v celém objemu tepelného zásobníku, neboli vznik teplotního spádu mezi pouzdry a vodou. Po ohřátí vody je dosaženo největšího teplotního spádu. Dále se začínají pouzdra prohřívat, teplotní spád mírně klesá a tím pádem se zmenšuje i tepelný tok do PCM pouzder. Po dosažení teploty skupenské změny se tepelný tok zvýší na téměř 5 [W] a poté opět pomalu klesá k hodnotě 1,1 [W].

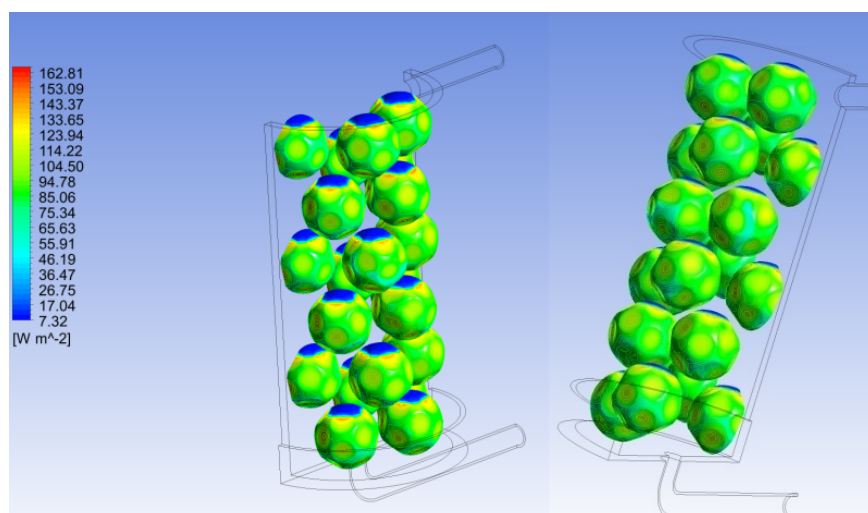


Graf 26

Hustota tepelného toku, před změnou skupenství, na povrchu PCM pouzder je zobrazena na obr. 54. V oblastech pouzder se vzduchem je tepelný tok nejmenší, ale na rozmezí vzduchu a PCM se objevují místa, kde je tok maximální. Na povrchu dobře obtékaných pouzder je samozřejmě tepelný tok větší, pokud se ale podíváme na hustotu tepelného toku po nebo během fázové změny (obr. 54, 55), tak na jednotlivých pouzdrech už rozdíl v hustotě tepelného toku není téměř vidět.

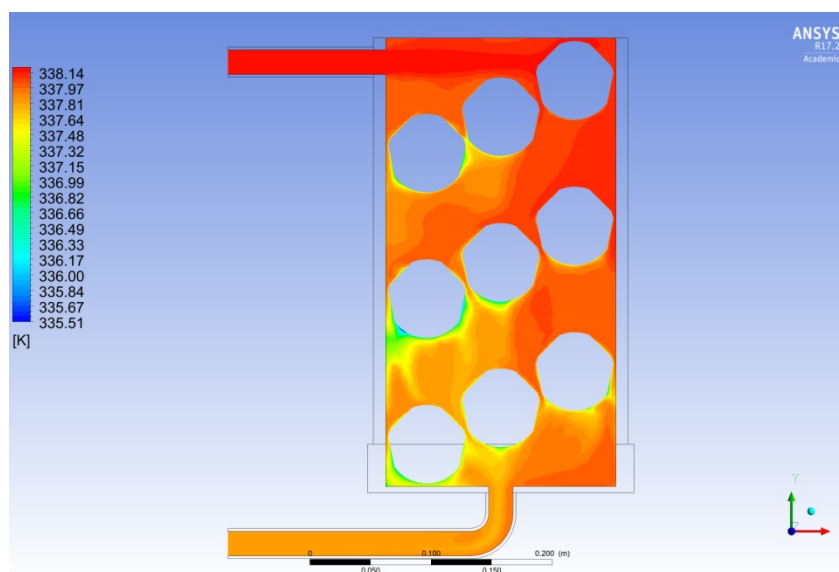


Obr. 54 – Hustota tepelného toku před fázovou změnou



Obr. 55 – Hustota tepelného toku po fázové změně

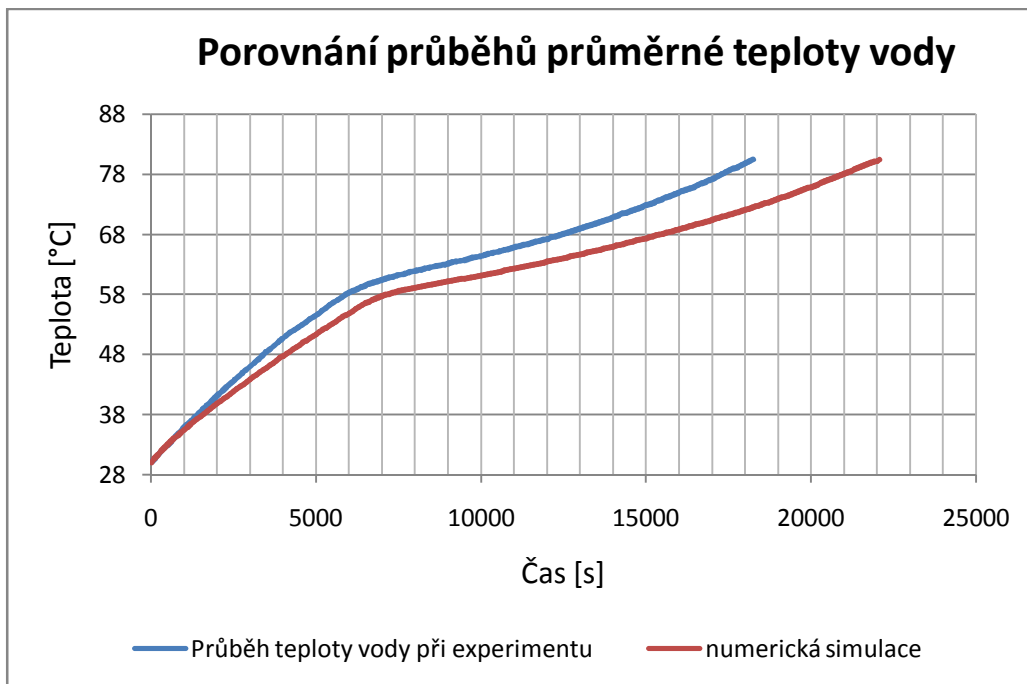
Menší akumulční výkon, níže položených pouzder v zásobníku, není způsoben pouze jejich horším obtékáním, ale také menším teplotním spádem mezi PCM a vodou. Vstupující voda odevzdává výše umístěným pouzdrům teplo a do spodní části zásobníku proudí již ochlazená voda, což můžeme vidět na obr. 56, zobrazujícím proudící teplotu vody v rovině symetrie během fázové změny.



Obr. 56 – Teplota vody v čase 13080s

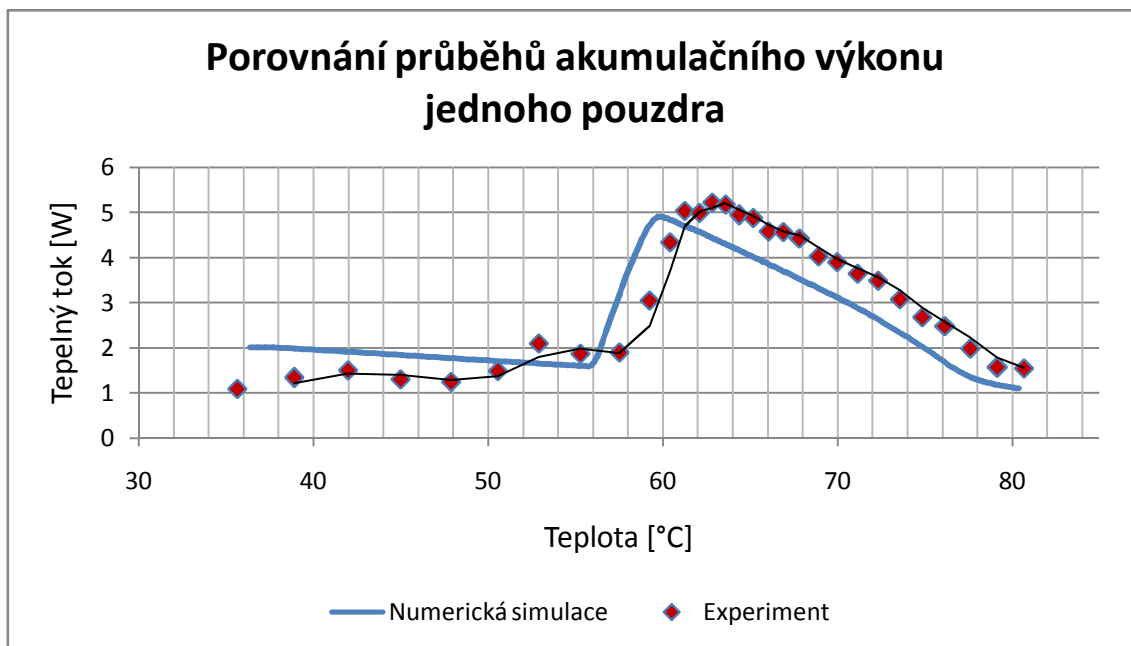
## 7. Porovnání numerické simulace experimentu a výsledků získané z měření

Pokud porovnáme průběh průměrné teploty vody při experimentu a simulaci (graf 27), můžeme vidět, že se neshodují. Ohřev při měření v laboratoři byl rychlejší. Průběhy jsou vykresleny od teploty 30 [°C] do teploty 80,4 [°C]. Simulovaný ohřev vody trval cca o 1 hodinu a 5 minut déle než při experimentu.



Graf 27

Závislosti akumulčního výkonu pouzder na teplotě, zjištěné z naměřených hodnot a ze simulace, také nejsou zcela totožné (graf 28). Výrobce předepsaná teplota tání PCM 54 je 56 [°C], tomu odpovídá i závislost akumulčního výkonu pouzder pro numerickou simulaci. Při měření však došlo ke změně skupenství až cca při 57 [°C] a změna akumulčního výkonu je pozvolnější, jak při začátku fázové změny, tak i při dosahování maximální hodnoty. Proto jsou průběhy v grafu vzájemně posunuty. Pokud bychom křivky posunuli, tak aby se překrývaly, byly by téměř totožné. Ohřev při numerické simulaci však trval déle, což znamená, že hodnoty akumulčního výkonu byly sice při simulaci i experimentu v závislosti na teplotě vody stejné, ale podle numerické simulace bylo naakumulováno více energie. V grafu můžeme také vidět, že při měření se akumulční výkon s rostoucí teplotou mírně zvyšoval. Při simulaci, ale po dosažení hodnoty zhruba 2 [W] mírně klesal.



Graf 28

Rozdíl mezi průběhy teploty je částečně způsoben nepřesným měřením, z kterého byly určeny i celkové ztráty a akumulace experimentálního zařízení pro simulaci. Další důvodem rozdílu, je výrobcem nedostatečně definovaná měrná tepelná kapacita PCM. Výrobce nejspíše uvádí průměrnou hodnotu tepelné kapacity. Z měření ale vyplývá, že měrná tepelná kapacita se mění v závislosti na teplotě vody a uváděná průměrná hodnota měrné tepelné kapacity nebo měrné latentní teplo by mělo být menší. Tepelný tok do pouzdra se dle měření zvyšuje, protože roste i měrná tepelná kapacita PCM, zatímco v simulaci je do zvoleného teplotního intervalu skupenské změny konstantní a se snižujícím se teplotním spádem mezi proudící vodou a PCM v pouzdru klesá i tepelný tok.

## 8. Závěr

V úvodní části práce je vysvětleno, proč je výhodné teplo akumulovat a jaké způsoby akumulace existují. V teoretické části jsou uvedeny požadavky na PCM a základní rozdělení těchto materiálů, také je zde rozebíráno zapouzdření akumulčního materiálu a popsán proces změny skupenství pro jednosložkové a vícesložkové soustavy. Dále je popisována konstrukce tepelných zásobníků, zvláště pak latentních tepelných zásobníků, kde je uvedeno několik konkrétních technických řešení. Při experimentu byly proměřeny čtyři druhy PCM pouzder od výrobce HIMIM. Naměřená data byla vyhodnocena pomocí druhého výše popisovaného přístupu. Pouzdra jsou vyrobeny z polyetyleny, mají tvar koule a dobře se s nimi pracuje, což je výhodné při případné výměně akumulčního náplně akumulátoru. Materiál pouzdra je poměrně měkký a houževnatý. Při měření PCM70 byla maximální teplota vody 87,7[°C] a po ukončení experimentu a vyndání vzorků z měřicí nádoby byla níže umístěná pouzdra zdeformována. Při cyklickém namáhání a velkém zatížení by mohlo dojít k výrazným deformacím pouzder, které by bránily v proudění teplotnosného média a zhoršovala by se tak výměna tepla. Všechny čtyři druhy PCM materiálů jsou nehořlavé a netoxické, takže při případném porušení pouzdra nehrozí bezprostřední nebezpečí.

Pouzdra PCM 54/D70 Ball s teplotou tání 56 [°C] mají dostatečně rychlou změnu skupenství, při které stoupl akumulční výkon jednoho pouzdra maximálně na hodnotu 4,87 [W] a měrná tepelná kapacita pouzder na 21,54 [kJ/(kg K)]. V jednom kusu, se do teploty 80,4 [°C] akumulovalo 15,8 [Wh] tepla. PCM 48/D70 Ball jsou pouzdra, která byla zahřívána nejdéle ze všech měřených druhů pouzder. Doba ohřevu byla cca 8,7 [h] a ani po této době nebyl obsah pouzder, po jejich vyjmutí ze zásobníku, roztaven. Množství tepla akumulované v jednom pouzdru do okamžiku snížení výkonu ohřevu je 11,9 [Wh]. Maximální akumulční výkon jednoho pouzdra byl pouze 2,9 [W] a maximální měrná tepelná kapacita 5,7 [kJ/(kg K)]. Pouzdra PCM70/D70 Ball mají z měřených vzorků největší teplotu tání, 73÷75 [°C]. Množství tepla akumulované v jednom pouzdru bylo 22,1 [Wh], největšího akumulčního výkonu jednoho pouzdra 4,7 [W] a maximální měrné tepelné kapacity pouzder 81,2 [kJ/(kg K)] bylo dosaženo při teplotě vody cca 83[°C]. Tato pouzdra jsou podle měření schopná uložit největší množství tepla. Vlastnosti pouzder PCM 50/D70 Ball nebyly od výrobce k dispozici. Teplota tání byla na základě měření odhadnuta na 50 [°C]. Průběh akumulčního výkonu byl během ohřevu plynulý a při změně skupenství nenastal prudký nárůst. Největší hodnota akumulčního výkonu do jednoho pouzdra byla 2,9 [W] a akumulované teplo pouzdrům 10,8 [Wh]. Maximální hodnoty měrné tepelné kapacity 5,03 [kJ/(kg K)] bylo dosaženo při teplotě 66 [°C].

Dále byla pro pouzdra PCM54/D70 Ball provedena numerická simulace ohřevu. Potřebné údaje pro definování vlastností experimentálního zařízení byly zjištěny z dat získaných při

měření pouzder a kalibraci. Tepelná kapacita PCM byla zadána podle údajů od výrobce. Na základě výsledků numerické simulace byla pouzdra zhodnocena z hlediska obtékání a výměny tepla. Pro pouzdra byla také vykreslena závislost průměrného tepelného toku do jednoho pouzdra na teplotě a srovnána s křivkou, zjištěnou z naměřených dat. Křivky jsou téměř totožné, ale vzájemně posunuty cca o 1 [°C]. Dále byly porovnány i průběhy průměrné teploty vody. Při měření trval ohřev kratší dobu než při simulaci, což je způsobeno nedostatečně přesným měřením, výrobcem nedostatečně a možná i nepřesně definovanou měrnou tepelnou kapacitou (měrná tepelná kapacita je funkcí teploty) a zjednodušeními, které byly zavedeny, jak pro vyhodnocování experimentu, tak pro realizaci numerické simulace. Přesnost výsledků měření by bylo možné zvýšit několika způsoby. Použitím přesnějších teplotních čidel, protože přesnost měření teploty má největší vliv na výsledky experimentu i simulace. Změnou velikosti dodávaného výkonu. Pro měření příkonu topné patrony musel být na wattmetru použit největší rozsah 2400 [W], přičemž se velikost měřených hodnot pohybovaly okolo 330 [W]. Relativní nejistota měření pak dosahuje velikosti až 3,8 [%]. Nejistotu měření také ovlivnilo to, že při ohřevu kolísalo napětí zdroje, přičemž okamžité výchylky výkonu nebyly zaznamenány, protože zápis výkonu byl prováděn každých cca 10 minut. Vhodnější by bylo, zapisovat hodnoty výkonu společně s teplotami, tedy každou sekundu. Výsledky numerické simulace je možné zpřesnit zadáním přesné závislosti měrné tepelné kapacity PCM na teplotě a umístěním pouzder tak, aby byla vzájemně v kontaktu a také se dotýkala stěn tepelného zásobníku.

PCM všech zkoumaných druhů pouzder mají menší měrnou tepelnou kapacitu než voda, ale tím, že při nabíjení tepelného zásobníku dojde ke změně skupenství PCM, výrazně zvýší hustotu akumulované energie vodního zásobníku.

## 9. Literatura

- [1] Teplárenské sdružení ČR. [online]. [cit. 2016-12-17]. Dostupné z <http://www.tscr.cz/?ta=74&pg=0750>
- [2] Tzb-info. [online]. [cit. 2016-12-17]. Dostupné z <http://www.tzb-info.cz/>
- [3] Matuška T., Zásobníky tepla pro solární soustavy. FS CVUT Praha. [online]. 2011. [cit. 2016-12-17].
- [4] Mehling H., Luisa F., Heat and cold storage with PCM an up to date introduction into basics and applications. Berlin: Springer, 2008. [cit. 2016-12-17]. ISBN 9783540685579.
- [5] Sharma A., Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. Kun Shan University. 2009. [cit. 2016-12-17].
- [6] Kuzník F., A review on Phase Change Materials Integrated in Building Walls. Universite de Lyon. 2012. [cit. 2016-12-17]
- [7] ZAE Bayern. [online]. [cit. 2016-12-17]. Dostupné z <http://www.zae-bayern.de/>
- [8] Ostrý M., Využití akumulace tepla při změnách skupenství v budovách. FAST VUT Brno. 2013. [online]. [cit. 2016-12-17]
- [9] Ogoun M., Vývoj zásobníku pro akumulaci latentního tepla v letech 1990 až 2002. Topenářství instalace. 3/2004.str. 54-56. [online]. [cit. 2016-12-17]. Dostupné z <http://www.topin.cz/index.php?page=casopis&last=1>
- [10] Nohejl E., Sezónní akumulátor tepla s minimálními ztrátami. Portál tzb-info. 2014. [online]. [cit. 2016-12-17]. Dostupné z <http://oze.tzb-info.cz/akumulace-tepla/11626-sezonn-akumulator-tepla-s-minimalnimi-ztratami>
- [11] IVT GmbH & Co. KG. Latento Technical Documentation. 2012. [online]. [cit. 2016-12-17]. Dostupné z <http://www.ivt-group.com>
- [12] Sazima M., Teplo. 1. vyd., Praha. Státní nakladatelství technické literatury. 1989.
- [13] Wang W., Mobilized thermal energy storage for heat recovery for distributed heating. Mälardalen university Sweden. 2010. [cit. 2016-12-17].
- [14] Ogoun M., Vývoj zásobníku pro akumulaci latentního tepla v letech 1990 až 2002. Topenářství instalace. 4/2004.str. 62. [online]. [cit. 2016-12-17]. Dostupné z <http://www.topin.cz/index.php?page=casopis&last=1>
- [15] LaTherm. Latent heat. 2014. [online]. [cit. 2016-12-17]. Dostupné z <http://www.latherm.de/>
- [16] Wikipedie otevřená encyklopedie. Andasol Solar Power Station. [online]. 2011. [cit. 2016-12-17]. Dostupné z [http://en.wikipedia.org/wiki/Andasol\\_1](http://en.wikipedia.org/wiki/Andasol_1)
- [17] Terraforetechnologies. CSP-EPCM System. [video]. [cit. 2016-12-17]. Dostupné z <http://www.terraforetechnologies.com/94-2/csp-epcm-system-all/>

- [18] Climatewell. SaltX technology. [cit. 2016-12-17]. Dostupné z <http://saltxtechnology.com/technology/how-it-works/>
- [19] Solvis/Hochschule Mannheim Latent heat storage with super insulation. [online]. 2016. [cit. 2011-05-25]. Dostupné z <http://forschung-energiespeicher.info/>
- [20] Cool air Australia. Phase Change Materials. [online]. 2014. [cit. 2016-12-17]. Dostupné z <http://coolairaustralia.com/phase-change-materials/>
- [21] Lüdenmann B. Kühlung ohne kältemaschine PCM. Imtech Deutschland GmbH & Co.KG. [online]. 2008. [cit. 2016-12-17]. Dostupné z <http://www.hamburg.de/contentblob/749746/fa0dac99ca52a582678c9e4659681628/data/vortrag-luedemann.pdf>
- [22] The Sunday times. Car exhaust heat recovery device for domestic hot water application. [cit. 2016-12-17]. Dostupné z [http://www.pcmproducts.net/Phase\\_Change\\_Material\\_Development.htm](http://www.pcmproducts.net/Phase_Change_Material_Development.htm)
- [23] Unichterm s.r.o, coolstar – B. 2009. [cit. 2016-12-17]. Dostupné z <http://www.coolstar.cz/>
- [24] Phase ChangeMaterial Products Ltd. Plus-ICE™. 32. vyd., 2011. [cit. 2016-12-17]. Dostupné z [www.pcmproducts.net](http://www.pcmproducts.net)
- [25] PCM Products Ltd. [online]. [cit. 2016-12-17]. Dostupné z [www.pcmproducts.net](http://www.pcmproducts.net)
- [26] Petříková M., Kryštůfek P., Tabulky a diagramy pro termodynamiku. TUL Liberec. 2011.
- [27] Černý, M. Zdroje nejistot a chyb při měření teploty v provozech. Automa [online]. 2003, č. 1 [cit. 27-5-2014]. Dostupné z WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/zdroje-nejistot-a-chyb-pri-mereni-teploty-vprovozech-28685.html>
- [28] Autotransformátor RA1F250.100. [online]. [cit. 2016-12-17]. Dostupné z <http://www.diametral.cz/ac-dc-zdroje/autotransformatory/jednofazove/autotransformator-ra1f250100-0230v/10a.html>
- [29] Bytové vodoměry KADEN. [online]. [cit. 2016-12-17]. Dostupné z [http://www.kadenvodomery.cz/?page\\_id=91](http://www.kadenvodomery.cz/?page_id=91)
- [30] Čerpadlo grundfos typ 25-40 N 180. [online]. [cit. 2016-12-17]. Dostupné z <http://cz.grundfos.com/>
- [31] Wattmetr Hameg HM8115-2. [online]. [cit. 2016-12-17]. Dostupné z <http://www.amt.cz/index.php?id=HM8115>
- [32] Třídy přesnosti pro termočláňkové snímače teploty. [online]. [cit. 2016-12-17]. Dostupné z <https://www.guenther.eu/d713b8f0-54e7-2c04-e4d1-179b215fcc36?Edition=cs>
- [33] Brož J., Základy fyzikálních měření. Státní pedagogické nakladatelství. Praha. 1983
- [34] Mesh quality. [online]. [cit. 2016-12-17]. Dostupné z [https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/17.0/en-us/help/flu\\_ug/flu\\_ug\\_mesh\\_quality.html](https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/17.0/en-us/help/flu_ug/flu_ug_mesh_quality.html)



## **10. Přílohy**

- (1) DVD – Soubory s naměřenými a vyhodnocenými hodnotami, numerické řešení experimentu v programu ANSYS Fluent