



**ČVUT**

ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE

**FAKULTA  
STROJNÍ  
ČVUT V PRAZE**

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**

**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

**Akumulace tepelné energie**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**AUTOR:** Bc. Daniel Černý  
**VEDOUČÍ PRÁCE:** doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc.  
**KONZULTANT** Ing. Jiří Kuchař, Ph.D.  
**STUDIJNÍ PROGRAM:** Výrobní inženýrství (N0715A270001)  
**STUDIJNÍ OBOR:** Bez specializace (N071TVIN)  
**Praha 2023**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Černý** Jméno: **Daniel** Osobní číslo: **476940**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**  
Studijní program: **Výrobní inženýrství**  
Specializace: **Bez specializace**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Akumulace tepelné energie**

Název diplomové práce anglicky:

**Accumulation of thermal energy**

Pokyny pro vypracování:

1. Rozbor sledované problematiky
2. Návrh a realizace zkušebního zařízení
3. Vyhodnocení a diskuze získaných výsledků

Seznam doporučené literatury:

Časopis Energetika a Technický týdeník  
Odborné články

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc. ústav strojírenské technologie FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

**Ing. Jiří Kuchař, Ph.D. ústav strojírenské technologie FS**

Datum zadání diplomové práce: **26.04.2023** Termín odevzdání diplomové práce: **18.08.2023**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2023**

\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc.  
podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně, s využitím informací, které byly poskytnuty vedoucím práce, a podkladů, uvedených v seznamu použité literatury.

V Praze, 18.8.2023

---

Bc. Daniel Černý

## Poděkování

Tímto bych rád poděkoval doc. Ing. Viktoru Kreibichovi, CSc. a Ing. Jiřímu Kuchařovi Ph.D. za vedení diplomové práce, za poskytnutí cenných podnětů, rad, a materiálů.

Dále bych rád poděkoval firmě Watt plus s.r.o., která se zabývá problematikou pískových úložišť tepelné energie za odborné konzultace.

V neposlední řadě bych chtěl vyjádřit poděkování a vděk rodině a blízkým za podporu v průběhu celého studia.

## Anotace

<b>Název diplomové práce:</b>	Akumulace tepelné energie
<b>Autor práce:</b>	Bc. Daniel Černý
<b>Vedoucí práce:</b>	doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc.
<b>Konzultant :</b>	Ing. Jiří Kuchař, Ph.D.
<b>Akademický rok:</b>	2022/2023
<b>Vysoká škola:</b>	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
<b>Ústav:</b>	12133 – Ústav strojírenské technologie
<b>Vedoucí ústavu:</b>	doc. Ing. Ladislav KOLAŘÍK, Ph.D., IWE
<b>Rozsah práce:</b>	81 stránek
	8 tabulek
	44 obrázků

## Annotation

<b>Title of the theses:</b>	Accumulation of thermal energy
<b>Author:</b>	Bc. Daniel Černý
<b>Supervisor:</b>	doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc.
<b>Consultant:</b>	Ing. Jiří Kuchař, Ph.D.
<b>Academic year:</b>	2022/2023
<b>University:</b>	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
<b>Department:</b>	12133 – Department of Manufacturing Technology
<b>Head of department:</b>	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
<b>Extent of thesis:</b>	81 pages
	8 tables
	44 pictures

## Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena na problematiku akumulace odpadové či přebytečné energie ve formě tepla. V teoretické části jsou rozebrány metody akumulace tepelné energie a pro dané metody představeny vhodné materiály. Cílem praktické části bylo navrhnout a sestavit funkční měřicí zařízení pro hodnocení vlastností akumulčních médií.

## Klíčová slova

Energie, akumulace, teplo, tepelná kapacita, skupenské teplo přeměny, termochemická akumulace

## Abstract

The thesis is focused on the issue of accumulation and storage of waste heat energy or surplus energy in the form of heat. In the theoretical part the principles of known thermal energy storage methods are presented together with suitable materials. The aim of the experimental part of the thesis was to design and manufacture a working device for measurement of characteristics of accumulation media.

## Keywords

Energy, accumulation, heat, specific heat, latent heat, thermochemical energy storage.

# Obsah

1	ÚVOD .....	10
2	TEPLO.....	11
2.1	SDÍLENÍ TEPLA.....	12
2.1.1	SDÍLENÍ TEPLA VEDENÍM (KONDUKČÍ) .....	12
2.1.2	SDÍLENÍ TEPLA PROUDĚNÍM (KONVEKČÍ).....	14
2.1.3	SDÍLENÍ TEPLA ZÁŘENÍM (RADIACÍ) .....	14
2.2	TEPELNÉ VÝMĚNÍKY.....	14
3	AKUMULACE TEPELNÉ ENERGIE .....	17
3.1	METODY AKUMULACE TEPELNÉ ENERGIE .....	18
3.2	AKUMULACE POMOCÍ TEPELNÉ KAPACITY (SENSIBLE HEAT STORAGE SYSTEM) 18	
3.2.1	MATERIÁLY VHODNÉ PRO AKUMULACI POMOCÍ TEPELNÉ KAPACITY ....	19
3.3	AKUMULACE POMOCÍ SKUPENSKÉHO (LATENTNÍHO) TEPLA .....	24
3.3.1	MATERIÁLY VHODNÉ PRO AKUMULACI POMOCÍ LATENTNÍHO TEPLA....	26
3.3.2	ORGANICKÉ MATERIÁLY VHODNÉ PRO AKUMULACI POMOCÍ LATENTNÍHO TEPLA	26
3.3.3	ANORGANICKÉ MATERIÁLY VHODNÉ PRO AKUMULACI POMOCÍ LATENTNÍHO TEPLA.....	30
3.4	AKUMULACE TERMOCHEMICKÁ.....	33
3.4.1	TERMOCHEMICKÁ AKUMULACE POMOCÍ SORPČNÍCH PROCESŮ .....	33
3.4.2	MATERIÁLY VHODNÉ PRO AKUMULACI POMOCÍ SORPČNÍCH PROCESŮ 34	
3.4.3	TERMOCHEMICKÁ AKUMULACE POMOCÍ CHEMICKÉ REAKCE.....	36
3.4.4	MATERIÁLY VHODNÉ PRO AKUMULACI POMOCÍ CHEMICKÉ REAKCE.....	38
4	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	42



4.1	NÁVRH AKUMULÁTOROVÉHO MĚŘÍČÍHO ZAŘÍZENÍ .....	42
4.1.1	NÁVRH KONSTRUKCE AKUMULÁTOROVÉHO MĚŘÍČÍHO ZAŘÍZENÍ.....	42
4.1.2	NÁVRH TEPELNÉHO ZDROJE.....	48
4.1.3	NÁVRH SYSTÉMU MĚŘENÍ TEPLoty.....	49
4.2	REALIZACE AKUMULÁTOROVÉHO MĚŘÍČÍHO ZAŘÍZENÍ .....	53
4.2.1	KONSTRUKCE AKUMULÁTOROVÉHO MĚŘÍČÍHO ZAŘÍZENÍ .....	53
4.2.2	SYSTÉM MĚŘENÍ TEPLoty .....	61
4.3	MĚŘENÍ POMOCÍ AKUMULÁTOROVÉHO MĚŘÍČÍHO ZAŘÍZENÍ .....	64
4.3.1	VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ A DISKUZE.....	66
5	ZÁVĚR .....	71
	Seznam použité literatury a zdrojů .....	72
	Seznam obrázků .....	77
	Seznam tabulek .....	80
	Seznam příloh.....	81

# 1 ÚVOD

Klimatické změny jsou potenciální hrozbou pro společnost. V poslední dekádě je proto kladen důraz na ekologii a snahu o zmírnění dopadu klimatických změn. Tento trend lze pozorovat ve většině států západní společnosti a jeho hlavním projevem je snaha o opuštění od užívání fosilních paliv a získávání energií z obnovitelných zdrojů.

Největší důraz je obecně kladen na fosilní paliva (jejich náhradu) a obnovitelné zdroje, zatímco jiné způsoby pozitivního ovlivnění klimatu jsou přehlíženy. Použití energie z obnovitelných zdrojů je však nesnadné a při implementaci takových zařízení do energetické sítě je nutné splňovat parametry provozovatele sítě.

Jednou z opomíjených možností je zpětné získávání odpadové tepelné energie, které je uvolňováno do okolního prostředí při průmyslových (i neprůmyslových) procesech neuvěřitelné množství.

Odpadová tepelná energie je ovšem ve formě, která je nesnadno využitelná. Až v polovině případů je k dispozici pod teplotou 100 °C, a je uvolňována do okolí daného zařízení. Aby bylo možné tuto energii využít, je třeba ji nejdříve zachytit, a poté ji uchovat (akumulovat ve formě tepla), přeměnit na energii elektrickou, či zachycenou tepelnou energii ihned využít. [1]

Při využití odpadové tepelné energie i energie z obnovitelných zdrojů nastávají značné komplikace (rozpor v požadované formě energie, parametrech). V řadě případů je snazší energii akumulovat a až následně ji přeměnit dle požadavků. Běžně známé jsou lithium-iontové akumulátory, které jsou obvykle užívány pro uchování elektrické energie, ale jejich cena je pro využití ve velkých objemech příliš vysoká. [1]

Ekonomicky únosnější variantou je akumulace ve formě tepelné energie do levných materiálů s vhodnými termomechanickými vlastnostmi. Cílem teoretické části práce je představení možných metod akumulace odpadové nebo přebytečné tepelné energie. Cílem praktické části práce byl návrh a konstrukce měřicího zařízení, určeného k výzkumu termofyzikálních vlastností materiálů s potenciálem využití jako akumulační médium.

## 2 TEPLO

Teplo jako fyzikální veličina popisuje výměnu vnitřní energie mezi dvěma tělesy různé teploty během vyrovnávání jejich teplot. Často je označováno jako sdělené teplo, jelikož je vázáno na přenos skrze hranici termodynamické soustavy. Teplo lze vyjádřit dle empirické kalorimetrické rovnice následovně:

$$Q = C(T_2 - T_1) = mc(T_2 - T_1) = mc\Delta T = mc\Delta t$$

Kde:

- $Q$  je teplo [J]
- $C$  je tepelná kapacita [ $\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$ ]
- $T_2$  je teplota po tepelné výměně [K]
- $T_1$  je teplota před tepelnou výměnou [K]
- $m$  je hmotnost [kg]
- $c$  je měrná tepelná kapacita [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]
- $\Delta T$  je rozdíl teplot (konečná-počáteční) [K]
- $\Delta t$  je rozdíl teplot (konečná-počáteční) [ $^{\circ}\text{C}$ ]

Vztah výše je však platný pouze pokud není tepelná kapacita závislá na teplotě, a proto je vhodnější zápis kalorimetrické rovnice v diferenciálním tvaru:

$$\delta Q = CdT = mcdT = mcdt$$

Tepelné kapacity skutečných látek a materiálů jsou empirické veličiny, obvykle určované kalorimetrickými zkouškami. U látek v pevném skupenství je závislost kapacity na teplotě menší a jejich kapacity bývají pokládány za konstantní. V případě látek v kapalně fázi má závislost na teplotě již větší význam a kapacity jsou uváděny v tabulkách, diagramech, nebo mohou být vyjádřeny empirickými vztahy. U plynů jsou hodnoty tepelných kapacit závislé nejen na teplotě, ale také na tlaku plynu a bývají zaznamenávány podobně jako u kapalin.

## 2.1 SDÍLENÍ TEPLA

Problematika sdílení tepla probíhá při vyrovnávání rozdílů teplot mezi tělesy, resp. prvky termodynamického systému. V souladu s druhým termodynamickým zákonem teplo vždy odevzdává prvek s vyšší teplotou prvku s teplotou nižší. [2]

### 2.1.1 SDÍLENÍ TEPLA VEDENÍM (KONDUKČÍ)

Probíhá postupným šířením mechanické energie pomocí mikroskopického pohybu částic (atomů, molekul) materiálu. Tento způsob šíření tepla je charakteristický pro látky v pevném skupenství. V malé míře dochází ke kondukcí i v kapalných a plynných látkách, ale její vliv bývá mnohonásobně překonán makroskopickým pohybem částic (prouděním). [2, 3]

Sdílení tepla vedením je řízeno Fourierovým zákonem. Ten vyjadřuje empirický vztah mezi hustotou tepelného toku vedením a teplotním gradientem:

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -\lambda \text{grad } T$$

Kde:

$q$  je plošná hustota tepelného toku [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]

$\lambda$  je tepelná vodivost [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]

$T$  je teplota [K]

$n$  je délka normály [m]. [2]

Tepelná vodivost je materiálová charakteristika, která popisuje schopnost vedení tepla látek. Čím vyšší hodnoty dosahuje, tím lepší je schopnost daného materiálu šířit teplo vedením, což umožňuje vyšší tepelný tok v materiálu. Tepelná vodivost je obvykle považována za skalární veličinu. Její hodnotu ovlivňuje především teplota, v případě plynů také tlak. V závislosti na velikosti tepelné vodivosti je možné rozdělit materiály na dobré vodiče tepla a špatné vodiče tepla. Kovy jsou dobrými vodiči tepla, např. hliník má velmi vysokou hodnotu tepelné vodivosti. Porovnání hodnot tepelné vodivosti vybraných materiálů při teplotě 20 °C viz. Tabulka 1. [2, 3]

Tabulka 1 Porovnání tepelné vodivosti materiálů při teplotě 20 °C [2,3]

Látka	$\lambda$ [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
Beton	0,9 – 1,5
Bronz cínový	41,87
Bronz hliníkový	82,57
Dřevo	0,13 - 0,24
Guma tvrdá	0,159
Hliník	229,11
Elektrolytická měď	394,72
Ocel uhlíková (0,1 % C)	57,92
Ocel nízkolegovaná (0,8 % Cr, 0,2 % C)	41,7
Olovo	34,77
Pěnový polystyren	0,043
Polyvinylchlorid (PVC)	0,12 – 0,16
Sklo křemenné	0,768
Stříbro	418,2
Šamot	0,4 – 1,1
Teflon	0,25
Uhlík (diamant)	650
Uhlík (grafit)	5,0
Zinek	112,63
Zlato	310,52
Železo	73,26

### 2.1.2 SDÍLENÍ TEPLA PROUDĚNÍM (KONVEKCE)

Teplu je sdíleno makroskopickým pohybem tekuté látky (kapaliny, plyny), při kterém se teplejší částice dostávají do zón s nižší teplotou a naopak. Do procesu sdílení tepla prouděním vždy v malé míře vstupuje i přenos tepla vedením. Existují dva základní případy konvekčního sdílení tepla:

1. Vynucená konvekce probíhá v případech, kdy je proudění tekutiny vyvoláno uměle např. čerpáním, ofukováním, pohybem tělesa v tekutině atd.
2. Volná (přirozená) konvekce probíhá v případech, kdy je proudění tekutiny vyvoláno přirozeně, pouze teplotním rozdílem. Částice s vyšší teplotou (tedy s nižší hustotou) vlivem vztlaku stoupají do poloh s vyšší potenciální energií. [2, 3]

### 2.1.3 SDÍLENÍ TEPLA ZÁŘENÍM (RADIACÍ)

Ke sdílení tepla dochází tzv. teplotním zářením. U hmotných těles zahřátých na určitou termodynamickou teplotu  $T$  [K] dochází k přeměně části jejich vnitřní energie na vyzařované elektromagnetické vlnění. Toto vlnění je při dopadu na jiný objekt se schopností jeho absorpce pohlceno a dále přeměněno na vnitřní energii přijímajícího tělesa [3].

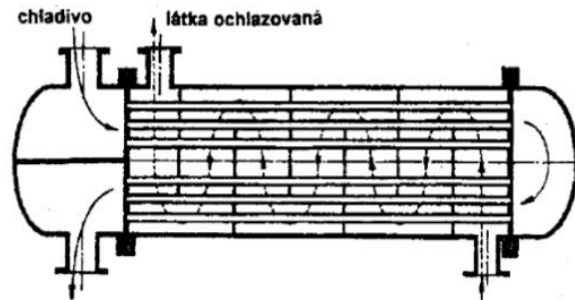
## 2.2 TEPELNÉ VÝMĚNÍKY

Tepelný výměník je zařízení, které slouží k uskutečnění přechodu tepla mezi látkami určenými pro jeho přenos (tzv. teponosné látky, převážně tekutiny). Tepelné výměníky jsou nutností pro funkci velké škály strojních zařízení a do této skupiny lze zařadit topná tělesa, chladiče, parní generátory, kondenzátory, chemické reaktory, jaderné reaktory atd. [2, 4]

Dle požadavků na funkci výměníku je určován počet teponosných médií. Pro základní aplikace jsou obvyklá dvě teponosná média. Hranice vzájemně oddělující jednotlivé teponosné látky bývá označována jako teplosměnná plocha. [2]

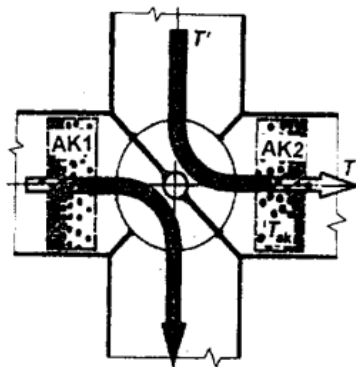
Dle způsobu kontaktu je tepelné výměníky možné dělit následovně:

1. Rekuperační výměníky. Teplonosná média jsou trvale rozdělena stěnou, která umožňuje průchod tepla, ale pro hmotu je neprostupná. Největší výhodou je trvalé oddělení teplonosných látek, které se vzájemně nemohou kontaminovat. Díky jednoduchosti a spolehlivosti jsou tyto typy výměníků využívány nejčastěji. [2, 4]



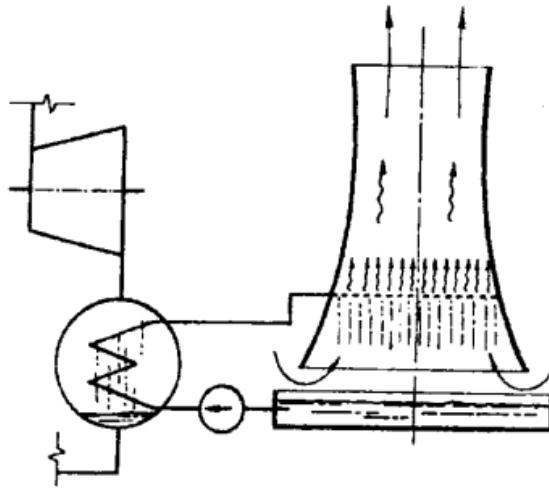
Obrázek 1 Schéma rekuperačního výměníku [2]

2. Regenerační výměníky. Přenos tepla se v tomto případě uskutečňuje přes třetí látku, obvykle označovanou jako akumulátor. Princip funkce výměníku spočívá ve dvou cyklech. V prvním cyklu dochází ke kontaktu akumulátoru s teplonosným médiem o vyšší teplotě, od kterého akumulátor přijímá teplo (je akumulováno ve formě jeho vnitřní energie). V druhém cyklu dochází ke kontaktu akumulátoru s chladnější teplonosnou látkou, které energii následně předává. Tyto cykly jsou schematicky znázorněny na obrázku 2, kde proud, procházející chladným akumulátorem AK1 odevzdává energii. Akumulátor AK2 byl v předešlém kroku pracovního cyklu nabit a odevzdává energii pracovnímu médiu. [2, 4]



Obrázek 2 Schéma regeneračního výměníku [2]

3. Směšovací výměníky. Přenos tepla je uskutečňován přímo kontaktem (směšováním) médií. Může nastávat směšování médií stejného druhu i skupenství (např. teplovzdušné vytápění), stejného druhu v různém skupenství či různých druhů a skupenství (např. chladicí věž v soustavě parní turbíny viz obrázek 35). Na příkladu chladicí věže lze snadno vysvětlit princip funkce směšovacího výměníku. Atmosférický vzduch představuje chladicí médium, které díky tahu protéká směrem vzhůru chladicí věží. Chladicí voda z kondenzátoru parní turbíny je přiváděna do chladicí věže, kde je rozvedena do velkého množství malých praménků. Tyto praménky samospádem protékají vzduchem, kterým jsou za částečného odpaření ochlazovány. [2, 4]



Obrázek 3 Schéma směšovacího výměníku na příkladu chladicí věže [2]



### 3 AKUMULACE TEPELNÉ ENERGIE

Zařízení sloužící k uchování tepelné energie jsou obecně známá jako tepelné akumulátory. Hlavní funkcí tepelných akumulátorů je skladování tepelné energie za účelem vyrovnání nesouladů mezi výrobou a spotřebou energie. Jako nesoulady mohou být chápány např. umístění nebo časový rozdíl mezi výrobou a spotřebou energie. Tepelné akumulátory v rámci své činnosti přijímají energii, která je v nich skladována, až po dobu spotřeby, kdy dojde k vyčerpání energie. [5]

Tepelné akumulátory jsou zařízení pracující v cyklech, které lze rozdělit na tyto fáze:

1. Nabíjení (Akumulátor přijímá energii)
2. Skladování energie
3. Vybíjení (Akumulátor odevzdává energii) [6]



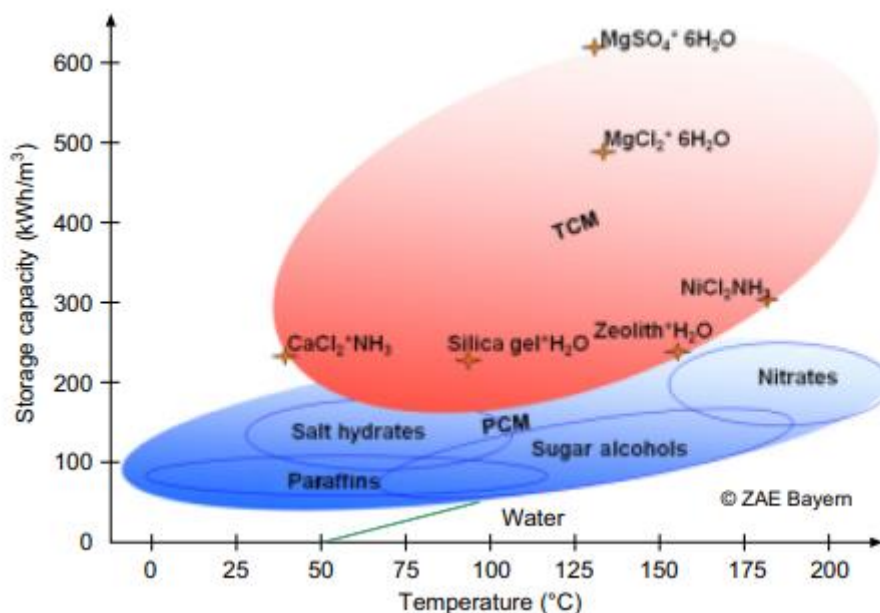
Obrázek 4 Energetický cyklus tepelného akumulátoru [5]

Mezi základní požadavky, které je nutné brát v úvahu při návrhu zařízení pro akumulaci tepelné energie patří vysoká hustota energie v úložném médiu (materiál určený pro ukládání energie) neboli úložná/skladovací kapacita, dobré vlastnosti pro uskutečnění přenosu tepla mezi úložným médiem a médiem pro přenos tepla, chemická a mechanická stálost úložného média, kompatibilita úložného média a materiálu konstrukce akumulátoru, nízké tepelné ztráty během skladování a snadné ovládání systému. [5, 6]

### 3.1 METODY AKUMULACE TEPELNÉ ENERGIE

Akumulátory tepelné energie fungují v závislosti na vybraném úložném médiu. Dle fyzikálních a chemických vlastností daného média lze tepelné akumulátory rozdělit z hlediska způsobu akumulace na tři metody:

1. Akumulace pomocí tepelné kapacity (Sensible heat storage system)
2. Akumulace pomocí skupenského, resp. latentního tepla (Latent heat storage system)
3. Akumulace pomocí termochemické reakce (Thermochemical heat storage system). [6]

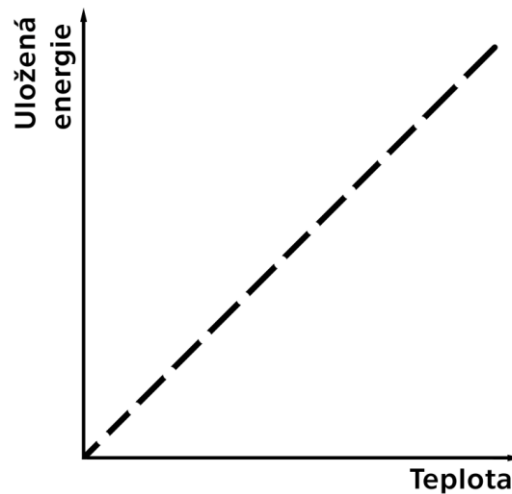


Obrázek 5 Porovnání akumulační schopnosti jednotlivých typů úložných médií: TCM- materiály pro termochemickou akumulaci, PCM - materiály pro akumulaci pomocí latentního tepla, Voda - představuje porovnání s materiály pro akumulaci pomocí tepelné kapacity [5]

### 3.2 AKUMULACE POMOCÍ TEPELNÉ KAPACITY (SENSIBLE HEAT STORAGE SYSTEM)

Nejjednodušší a zároveň nejpoužívanější metodou je akumulace pomocí tepelné kapacity (anglicky sensible heat storage). Tato metoda je založena na výměně tepelné energie mezi úložným a přenosovým médiem, přičemž dochází ke změně teploty úložného média. V materiálu úložného média během nabíjení či vybíjení nedochází k žádným fázovým přeměnám. Energie uložená v akumulátoru

je přímo úměrná teplotě a ovlivňuje ji měrná tepelná kapacita úložného média. [7, 8]



Obrázek 6 Závislost množství uložené energie na teplotě [7]

Množství energie uložené v akumulátoru je možné stanovit z fyzikálních závislostí, především dle vztahu:

$$Q = m \cdot c_p \cdot (T_f - T_p)$$

Kde:

- $Q$  je množství uložené energie (kapacita akumulátoru [J])
- $m$  je hmotnost úložného média [kg]
- $c_p$  je měrná tepelná kapacita úložného média [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]
- $T_f$  je konečná teplota po tepelné výměně [K]
- $T_p$  je počáteční teplota před tepelnou výměnou [K]. [5, 6]

### 3.2.1 MATERIÁLY VHODNÉ PRO AKUMULACI POMOCÍ TEPELNÉ KAPACITY

Základní požadavky, které je třeba při volbě materiálu úložného média zohlednit, jsou vysoká tepelná kapacita, snadná dostupnost (abundantní/...) a nízká cena. Další vlastnosti, na kterých závisí výběr materiálu, jsou hustota, měrná tepelná kapacita, tepelná vodivost, (součinitel teplotní vodivosti), chemická stabilita a kompatibilita s materiálem konstrukce [5].

## Přírodní materiály

Materiály jako písek, či horniny v drcené podobě (např. čedič, žula, rula a další) mají velký potenciál pro tepelnou akumulaci. Mezi největší přednosti přírodních materiálů patří snadná dostupnost ve velkých objemech a nízká cena. Tyto materiály jsou nehořlavé a netoxické. Při zahřívání nedochází k tepelné degradaci a dle typu jsou vhodné pro využití až do teplot kolem 550 °C. Hlavním negativem přírodních materiálů je nízká energetická hustota. [8, 9]

## Beton

Beton je vhodným materiálem především díky teplotní odolnosti. Jedná se o směs cementu, šterku a písku. Mezi jeho značné výhody patří jednoduchá dostupnost a nízká cena, jelikož se jedná o masově produkováný materiál. Je nehořlavý, vlivem tepla nedegraduje a také je netoxický. Využití betonu je možné až do teplot 400-450 °C. Podobně jako přírodní materiály nedosahuje beton jako akumulární médium velmi vysoké energetické hustoty. [5, 8]

## Litina

Hlavní předností litiny jako akumulárního média jsou výborné tepelné vlastnosti. Litina má vysokou tepelnou vodivost a schopnost odolávat vyšším teplotám než přírodní materiály či beton. Lze ji tedy využít pro vysokoteplotní aplikace až do 750 °C. Jako akumulární médium dosahuje litina vysoké energetické hustoty. Značnou nevýhodu litiny představuje její vysoká cena. [8]

## Ocel

Podobně jako litina disponuje i ocel dobrými tepelnými vlastnostmi. Odolává vysokým teplotám, díky čemuž je vhodná pro vysokoteplotní aplikace do 750 °C. Má velmi vysokou tepelnou vodivost. Z hlediska energetické hustoty je ocel vhodným akumulárním médiem. Největší nevýhodou oceli je vysoká cena. [8]

## Voda

Největší předností vody je vysoká tepelná kapacita. Voda jako kapalina může být snadno míchána, ale také může být aktivní složkou a fungovat jako přenosové i akumulární médium zároveň. Je netoxická a nehořlavá, díky čemuž pro lidi představuje nízké nebezpečí. Značnou výhodou je její nízká cena a snadná

dostupnost. Voda v kapalně podobě je vhodná pro nízkoteplotní aplikace do 100 °C. Při vyšších teplotách přechází do plynného skupenství ve formě páry, která je jako akumulční médium obvykle uchovávána pod zvýšeným tlakem. Mezi hlavní nevýhody vody pro potřeby akumulace tepelné energie patří nízká teplota přechodu do plynného skupenství, vysoký tlak vodní páry a také její korozivita. [8, 10]

## Termální oleje

Termální oleje jsou organické, obvykle bezbarvé kapaliny s nízkou viskozitou. Mohou být využívány jako přenosové i akumulční médium. Oproti vodě zůstávají při atmosférickém tlaku v kapalně fázi při vyšších teplotách až do 250 °C. V porovnání s vodou mají také nižší tlak páry. Mezi hlavní nevýhody termálních olejů patří vysoká cena, nižší tepelná kapacita ve srovnání s vodou a také jejich snadná degradace oxidací při teplotách nad 400 °C [10, 11].

## Roztavené soli

Roztavené soli jsou vhodné pro vysokoteplotní aplikace nad 400 °C, při kterých již není možné využití termálních olejů. Mohou sloužit současně jako akumulční i přenosové médium. Jako akumulční médium mají vysokou energetickou hustotu. Roztavené soli jsou teplotně stabilní, netoxické, nehořlavé, a zároveň nenákladné. Díky vysoké teplotě varu, teplotní stabilitě a nízkému tlaku páry mohou roztavené soli pracovat za vysokých teplot, což umožňuje rozšíření intervalu pracovních teplot a vysoké akumulční kapacitě. Problémem je vysoká teplota tání solí, která se pohybuje nad 200 °C. Ta může při poklesu teploty způsobovat tuhnutí média. [9, 10, 12]

Pro praktické využití jsou obvykle voleny soli a solná eutektika s teplotou tání nižší než 250 °C. Eutektické směsi dvou či tří složek obvykle napomáhají snížení teploty tání při současném zachování vysoké teploty varu. Například ternární směs dusičnanu draselného, dusičnanu sodného a dusitanu sodného (53 %  $\text{KNO}_3$ , 7 %  $\text{NaNO}_3$ , 40 %  $\text{NaNO}_2$ ) dosahuje nízké teploty tání 142 °C. V porovnání s termálními oleji mají vysokou viskozitu. Roztavené soli mají průměrnou tepelnou vodivost [9, 10].

## Tekuté kovy

Vybrané kovy a jejich slitiny jsou nositeli specifických vlastností. Například kombinaci teploty tání poblíž přirozené teploty okolí s velmi vysokou teplotou varu. Kovy takových vlastností jsou obzvláště vhodné pro využití ve funkci akumulačního média pro ukládání energie pomocí tepelné kapacity. Velký rozdíl mezi teplotou varu a teplotou tání těchto kovů umožňuje využití ve velmi širokém intervalu pracovních teplot ( $\Delta T$ ), díky kterému je možné dosáhnout větší akumulační kapacity. Tyto kovy mají vysokou tepelnou vodivost a součinitel přestupu tepla. Nejčastěji užívanými tekutými kovy jsou sodík (Na) s teplotou tání 98 °C a teplotou varu 883 °C. Dále také binární eutektikum sodíku a draslíku (22,2 % K, 77,8 % Na) s teplotou tání -12,6 °C. a teplotou varu 785 °C. [9, 10]

Tekuté kovy jsou ovšem velmi drahé a podléhají korozi. Sodík navíc doprovází riziko požáru kvůli jeho samozápalnosti na vzduchu. [10]

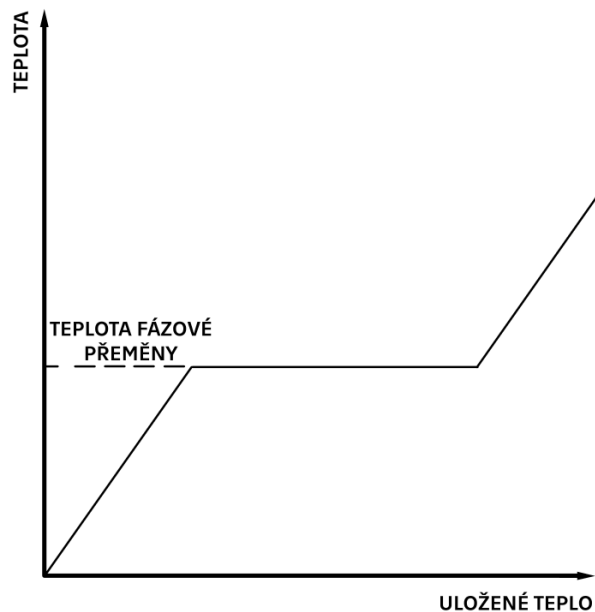
Porovnání vlastností materiálů vhodných pro akumulaci tepelné energie pomocí tepelné kapacity je v tabulce 2.

Tabulka 2 Porovnání důležitých vlastností akumulčních materiálů pro metodu tepelné kapacity [10, 13]

<b>Materiál</b>	<b>Součinitel tepelné vodivosti</b> [W/m·K]	<b>Měrná tepelná kapacita</b> [J/kg·K]	<b>Hustota</b> [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>Přírodní materiály</b>	1,2-5,7	600-1230	2200-3000
<b>Beton</b>	0,9-5	916-1130	2240-2770
<b>Litina</b>	29-37	560-837	7200-7900
<b>Ocel</b>	40	600	7800
<b>Voda</b>	0,6	4184	988
<b>Termální oleje</b>	0,1	1500-2500	800-1000
<b>Roztavené soli</b> (53 % KNO <sub>3</sub> , 7 % NaNO <sub>3</sub> , 40 % NaNO <sub>2</sub> )	0,6	1561	1640
<b>Tekuté kovy</b> Sodík (Na)	64,9	1300	1042
<b>Eutektikum</b> (22,2 % K, 77,8 % Na)	26,3	890	780

### 3.3 AKUMULACE POMOCÍ SKUPENSKÉHO (LATENTNÍHO) TEPLA

Tato metoda akumulace tepelné energie je založena na fázových přeměnách v materiálu úložného média. Při nabíjení či vybíjení dochází ke změně skupenství úložného média, či fázové přeměně, která probíhá ve velmi úzkém teplotním intervalu. Při zahřívání média dochází k přechodu z tuhé fáze do kapalné, který je obvykle provázen objemovými změnami (obvykle do 10 %), přičemž nedochází k velkým změnám tlaku. Při dalším zahřívání média po fázovém přechodu probíhá akumulace pomocí tepelné kapacity. [5, 7, 14]



Obrázek 7 Závislost uložené energie na teplotě pro latentní akumulaci tepla [7]

Tepelná energie uložená do skupenské přeměny média lze vyjádřit dle vztahu:

$$\Delta Q = \Delta H = m \cdot \Delta h$$

Kde:

- $\Delta Q$  je energie uložená ve změně skupenství [J]
- $\Delta H$  je rozdíl entalpie mezi pevnou a kapalnou fází [J]
- $m$  je hmotnost úložného média [kg]
- $\Delta h$  je měrná entalpie skupenské přeměny [ $\text{J kg}^{-1}$ ]. [5, 7]



Celkovou tepelnou kapacitu úložného média založeného na principu akumulace pomocí latentního tepla lze popsat vztahem:

$$Q = m \cdot c_p \cdot (T_k - T_p) + m \cdot L + m \cdot c_p \cdot (T_f - T_k)$$

Kde:

- $Q$  je množství uložené energie (kapacita akumulátoru) [J]
- $m$  je hmotnost úložného média [kg]
- $c_p$  je měrná tepelná kapacita úložného média [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]
- $T_p$  je počáteční teplota před tepelnou výměnou [K]
- $T_k$  je teplota, při které probíhá skupenská přeměna [K]
- $T_f$  je konečná teplota po tepelné výměně [K]
- $L$  je měrná entalpie skupenské přeměny [ $\text{J kg}^{-1}$ ]. [6, 7]

Při přechodu mezi pevnou a kapalnou fází dochází ke změnám v molekulové struktuře materiálu. Při ochlazení média pod teplotu fázové přeměny dochází k nukleaci, která je ovlivněna mírou ochlazení (rychlostí?), chemickým složením úložného materiálu, ale také přítomností nečistot v okamžiku ochlazení pod teplotu fázové přeměny. [5, 6]

Kromě materiálů, které prochází přeměnou kapalina – pevná látka, jsou užívány také materiály procházející fázovou přeměnou v pevném skupenství. Úložná média tohoto typu mají schopnost akumulace velkého množství energie v poměrně malém objemu, tedy akumulují energii ve vysoké hustotě. [5, 6, 7]

Obecně platí, že pomocí metody latentního tepla lze energii akumulovat efektivněji než při akumulaci pomocí tepelné kapacity. Tato skutečnost je způsobena mechanismem akumulace metody latentního tepla, při které dochází k transformaci chemických vazeb ve struktuře úložného média [10, 14, 15].

### 3.3.1 MATERIÁLY VHODNÉ PRO AKUMULACI POMOCÍ LATENTNÍHO TEPLA

Materiály, u kterých je možné akumulovat teplo do latentního tepla určité fázové přeměny jsou schopny dosahovat větší energetické hustoty než materiály pro akumulaci pomocí tepelné kapacity. Pro akumulaci pomocí latentního tepla je stěžejní fázový přechod akumulčního média. Nejčastěji se vyskytujícím je přechod z fáze pevné do kapalné, ale jsou využívány také materiály s fázovým přechodem odehrávajícím se v pevném skupenství. Největší latentní teplo mají přeměny mezi kapalným a plynným skupenstvím, ale použití materiálů tohoto typu zabraňují výrazné objemové změny. Dle jejich původu je možné tyto materiály dělit na organické a anorganické. [5, 10, 14]

### 3.3.2 ORGANICKÉ MATERIÁLY VHODNÉ PRO AKUMULACI POMOCÍ LATENTNÍHO TEPLA

Existuje široká škála organických materiálů vhodných pro akumulaci tepelné energie pomocí latentního tepla. Nejdůležitějším faktorem je teplota fázové přeměny, která je v případě organických materiálů obvykle vhodná pro nízkoteplotní aplikace. Velkou výhodou je také jejich dostupnost. [10]

#### Parafín

Parafín je běžně užívaným akumulčním médiem, jedná se o alifatický uhlovodík, který lze charakterizovat jako  $(\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{(n-2)}-\text{CH}_3)$  (n představuje množství uhlíkových atomů v jeho hlavním řetězci. Konkrétně jsou parafíny pro tepelnou akumulaci obvykle používány od n-pentadekanu po n-triakontan. [7, 10]

Čistý parafín je ovšem poměrně nákladný, a proto je v praktických aplikacích pro tepelnou akumulaci nahrazován levnějším parafínovým voskem. Parafínový vosk je vedlejším produktem rafinace ropy a jedná se o směs parafínů s různým množstvím uhlíkových atomů v řetězci. Oproti čistému parafínu dochází k fázové přeměně v širším teplotním intervalu. [7, 10]

Mezi výhody využití parafínů patří jejich nízká reaktivita, bezpečnost a nízká cena v poměru s energetickou hustotou. Tyto materiály jsou v uzavřeném prostředí velmi stabilní a mají dlouhou dobu životnosti. [7, 16]

Parafíny jsou ovšem hořlavé (mají nízkou zápalnou teplotu) a dochází u nich k velkým objemovým změnám (okolo 10 %). Mezi další nevýhody je možné zařadit poměrně nízkou entalpii fázové přeměny, nízkou tepelnou vodivost a nepřesně definovanou teplotu fázového přechodu. [10, 16]

## Mastné kyseliny

Mastné kyseliny mají v alifatickém uhlovodíkovém řetězci karboxylovou funkční skupinu (COOH). Jejich obecný tvar je možné vyjádřit chemickým vzorcem R-COOH, ve kterém R představuje alkylovou skupinu. Mastné kyseliny jsou obsaženy v přírodních olejích, a lze je extrahovat z některých zemědělských plodin. Mastné kyseliny mají oproti technickým parafínům stálý bod tání, který se zvyšuje s rostoucím počtem uhlíkových atomů v hlavním řetězci. [7, 10, 16]

Mezi výhody využití mastných kyselin jako akumulačního média patří nízká cena a možnost jejich extrakce z obnovitelných zdrojů. Mastné kyseliny jsou chemicky stabilní, a při jejich použití nedochází k segregaci fází. Hlavními nevýhodami mastných kyselin jsou nízká hustota, zápach, hořlavost a nízká teplotní vodivost. Při fázových přeměnách mastných kyselin také dochází k poměrně vysokým objemovým změnám (okolo 10 %). [10, 16]

## Estery

V rámci akumulace tepelné energie jsou pro použití uvažovány převážně estery z mastných kyselin. Jsou vyráběny procesem esterifikace z mastných kyselin s karboxylovou skupinou a alkoholů za přítomnosti dalších katalyzátorů. Esterifikací je možné pozměnit tepelné a fyzikální charakteristiky mastných kyselin dle potřeby. Důležitou vlastností, která lze tímto způsobem ovlivnit je teplota fázové přeměny, která je obvykle esterifikací snižována. [7, 10]

Estery jsou chemicky stabilní a nedochází u nich k segregaci fází. Nejsou chemicky korozivní vůči kovům. Teplota fázové přeměny je v případě esterů stabilní a vhodná pro nízkoteplotní aplikace pohybující se okolo tělesné teploty člověka. Hlavní nevýhodou esterů je vysoká cena kvůli složitějšímu výrobnímu procesu. Estery mají také nízkou hustotu, poměrně nízkou hodnotu součinitele tepelné vodivosti a podobně jako mastné kyseliny nepříjemně zapáchají. [6, 7]

## Alkoholy

Mezi materiály považované za vhodné pro akumulaci tepelné energie pomocí latentního tepla mají cukerné alkoholy nejvyšší teploty fázového přechodu a také latentní teplo. Teplota fázové přeměny se u alkoholů pohybuje v rozmezí 90-250 °C, což je ideální rozmezí teplot pro rekuperaci odpadového tepla. Velkou výhodou alkoholů je nízká cena a poměrně vysoká hustota uložené energie. Cukerné alkoholy jsou netoxické látky, které oproti jiným organickým materiálům nevyvolávají nepříjemný zápach. [5, 7, 10]

Alkoholy jsou látky, u kterých dochází k polymorfní přeměně. V závislosti podmínkách tepelné přeměny mohou krystalizovat v různých krystalických mřížkách. Polymorfie činí užití alkoholů jako akumulačního média náročným, jelikož různé formy mají odlišné fyzikální a tepelné vlastnosti (teplota tání, součinitel tepelné vodivosti atd.). Dalším problémem je náchylnost k oxidaci, při které dochází k degradaci alkoholů, a tím ke snižování kapacity média a narušení stability teploty fázové přeměny [10, 13].

Vlastnosti organických materiálů pro akumulaci pomocí latentního tepla je k dispozici v tabulce 3.

Tabulka 3 Porovnání důležitých vlastností organických akumulčních materiálů pro metodu latentního tepla [7, 10, 13]

<b>Materiál</b>	<b>Součinitel tepelné vodivosti</b> [W/m·K]	<b>Latentní teplo</b> [J/kg]	<b>Hustota</b> [kg/m <sup>3</sup> ]	<b>Teplota fázové přeměny</b> [°C]
<b>Parafíny</b>	0,148 (kapalný)	244000	776 (kapalný)	28,4
<b>Oktadekan</b>	0,358 (pevný)		814 (pevný)	
<b>Hexadekan</b>	0,21 (pevný)	236000	773 (kapalný)	20
<b>Mastné kyseliny</b>	0,149 (kapalná)	148600	901 (kapalná)	16
<b>Kyselina kaprylová</b>			981 (pevná)	
<b>Kyselina palmitová</b>	0,162 (kapalná)	185400	850 (kapalná) 989 (pevná)	64
<b>Estery</b>		200000	850 (kapalný)	23
<b>Butyl stearát</b>				
<b>Methyl stearát</b>		160700	848	39
<b>Alkoholy</b>		280000	1520	93
<b>Xylitol</b>				
<b>meso-Erythritol</b>		344000	1450	117

### 3.3.3 ANORGANICKÉ MATERIÁLY VHODNÉ PRO AKUMULACI POMOCÍ LATENTNÍHO TEPLA

Anorganické materiály jsou díky teplotě fázové přeměny vhodné pro vysokoteplotní využití. V intervalu pracovních teplot anorganických materiálů by již docházelo k tepelnému rozkladu organických materiálů. [6, 7]

#### Soli

Díky vysokým teplotám tání jsou soli vhodné pro vysokoteplotní aplikace. V předchozí kapitole byly soli (v tekuté fázi) zmíněny jako jedno z možných médií pro akumulaci pomocí tepelné kapacity. Volbou vhodné soli a návrhem intervalu pracovních teplot je v případě využití solí možné docílit značného nárůstu akumulační kapacity. Například v případě využití dusičnanu draselného ( $\text{KNO}_3$ ) s teplotou tání  $335\text{ }^\circ\text{C}$  v intervalu  $300\text{--}500\text{ }^\circ\text{C}$  poskytuje značně větší akumulační kapacitu ( $935\text{ MJ/m}^3$ ) než využití dusičnanu lithného s teplotou tání  $250\text{ }^\circ\text{C}$  na stejném intervalu teplot ( $440\text{ MJ/m}^3$ ). [7, 10]

K praktickému využití jsou uvažovány soli s teplotou tání vyšší než  $250\text{ }^\circ\text{C}$ . Soli mají poměrně nízkou tepelnou vodivost, proto je běžná snaha ji zlepšovat vývojem např. solných eutektik. [10, 17]

#### Solná eutektika

Soli mají pevně určené tepelně fyzikální vlastnosti. Tyto vlastnosti je možné ovlivňovat tvorbou solného eutektika. Tímto způsobem lze dosáhnout nižší teploty tání média a snížení problematiky nežádoucího tuhnutí. Soli jsou velmi rozsáhlou skupinou materiálů, jejichž různou kombinací mohou vznikat eutektika. Některé z jejich vlastností (eutektické složení, hustota) je možné s přijatelnou přesností předvídat. Další důležité vlastnosti jako latentní teplo a tepelnou vodivost s dostatečnou přesností není možné předvídat. [10, 17, 18]

#### Hydratované soli

Hydratované soli jsou jediným z anorganických materiálů vhodných pro akumulaci pomocí latentního tepla s nízkou teplotou tání pohybující se kolem přirozené teploty okolí. Například chlorid vápenatý hexahydrát má teplotu tání  $28\text{ }^\circ\text{C}$

30 °C. Konkrétně chlorid vápenatý je nejpoužívanější hydratovanou solí i díky vysoké hodnotě latentního tepla. [13, 18]

Hlavním problémem použití hydratovaných solí je ikongruentní tání, při kterém dochází k nerovnoměrnému tání v intervalu teplot, při kterém dochází ke vzniku taveniny a nové pevné látky odlišného chemického složení od látky výchozí. Příkladem může být tavení hexahydrátu chloridu železitého ((FeCl<sub>3</sub>)<sub>6</sub>H<sub>2</sub>O), které se odehrává v intervalu 37-39 °C. Během ohřívání dochází k uvolňování molekul vody ve formě vodní páry a vzniká chlorid železitý (FeCl<sub>3</sub>+6H<sub>2</sub>O). Pokud je po vyloučení všech molekul vody vzniklá dehydratovaná sůl v této vyloučené vodě, je tání kongruentní a sůl je použitelná jako akumulární médium. V případě, že nově vzniklé dehydratované soli nejsou rozpustné ve zbylé vyloučené vodě, je tavení inkongruentní a materiál není vhodným akumulárním médiem. Cyklickým tepelným zatěžováním postupně dochází k odměšování nerozpustných hydratovaných solí, jehož důsledkem je snižování latentního tepla. [7, 10]

## Kovy a slitiny

Kovy a jejich slitiny mají velmi dobré tepelné vlastnosti důležité pro akumulární média. Mají z materiálů vhodných pro akumulaci metodou latentního tepla nejvyšší hustotu akumulované energie, ale také největší objemovou hustotu. Mezi akumulárními médii pro metodu latentního tepla mají vysoký potenciál, ale je třeba věnovat pozornost problematikám doprovázejícím tavení kovů a jejich slitin. Po cyklickém tepelném zatěžování může dojít ke změnám mikrostruktury precipitací, odměšováním či oxidací. Následkem těchto procesů mohou být změny vlastností, například latentního tepla či teploty fázové přeměny. Kvůli oxidaci je pro jejich použití nutná inertní ochranná atmosféra. Kovy a slitiny mají jako akumulární média velké množství kladných vlastností, a pro jejich komplikovaný provoz je nutná dokonalá znalost metalurgie. [10, 19]

Porovnání vlastností anorganických materiálů vhodných pro metodu latentního tepla je v tabulce 4.

Tabulka 4 Porovnání důležitých vlastností anorganických akumulčních materiálů pro metodu latentního tepla [7, 10, 13]

Materiál	Součinitel tepelné vodivosti [W/m·K]	Latentní teplo [J/kg]	Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	Teplota fázové přeměny [°C]
<b>Soli</b>				
LiF		1000000	1810 (kapalný) 2640 (pevný)	850
ZnCl <sub>2</sub>	0,5	75000	2907 (pevný)	280
KNO <sub>3</sub>	0,5	266000	2109 (pevný)	335
<b>Hydratované soli</b>				
MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	0,570 (kapalný) 0,694 (pevný)	168600	1450 (kapalný) 1569 (pevný)	117
CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	0,54 (kapalný) 1,088 (pevný)	190800	1562 (kapalný) 1802 (pevný)	29
<b>Solná eutektika</b>				
MgCl <sub>2</sub> /NaCl (52/48)	0,95 (kapalný)	430000	2230 (pevný)	450
CaCl <sub>2</sub> /MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O (50/50)		95000		25
<b>Kovy</b>				
Měď (Cu)	401	208000	8020 (kapalná) 8960 (pevná)	1084
Zinek (Zn)	116	113000	7140 (pevný)	419
Hliník (Al)	204	397000	2375 (kapalný) 2707 (pevný)	660
<b>Slitiny</b>				
Zn/Mg (53,7/46,3)		185000	4600 (pevná)	340
Al/Mg/Zn (60/34/6)		329100	2380 (pevná)	450,3
SI/Mg (56/44)		757000	1900 (pevná)	946



### 3.4 AKUMULACE TERMOCHEMICKÁ

Metoda termochemické akumulace spočívá ve skladování energie ve formě produktů určité chemické reakce s vysokou energetickou spotřebou. Produkty takové reakce musí být vhodné pro skladování. energii, která je v nich akumulovaná musí být možné získat i zpětně [5].

Existují dva základní typy akumulátorů využívající termochemické metody:

- Termochemická akumulace pomocí sorpčních procesů
- Termochemická akumulace pomocí chemické reakce. [5]

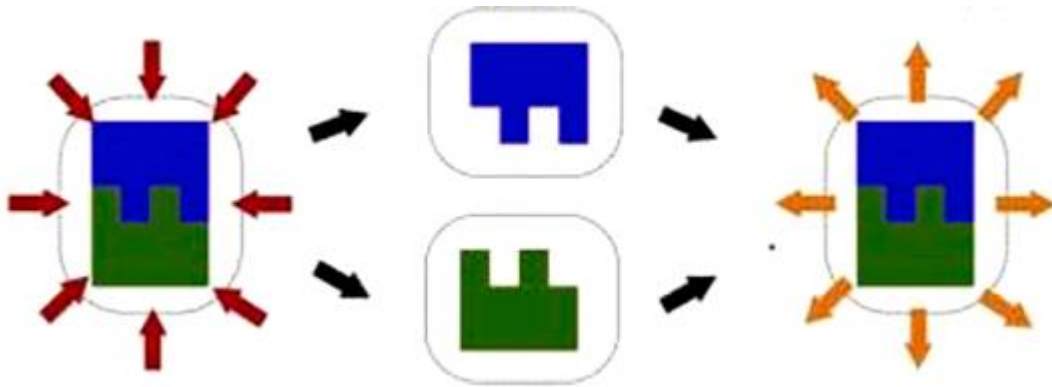
#### 3.4.1 TERMOCHEMICKÁ AKUMULACE POMOCÍ SORPČNÍCH PROCESŮ

Sorpční procesy se odehrávají na fázovém rozhraní sorbentu a sorbátu. V tomto případě je energie ukládána do fyzikálních a chemických vazeb vznikajících při nabíjení akumulátoru. Mezi hlavní sorpční procesy umožňující tento typ akumulace tepelné energie patří absorpce a adsorpce. [5, 10, 20]

Absorpce je proces penetrace atomů absorbátu do povrchu absorbentu způsobující změnu struktury. Absorbát je zadržován ve struktuře absorbentu a dochází ke vzniku roztoku na molekulární úrovni. Absorbenty mohou být pevné látky či kapaliny, absorbáty jsou obvykle kapaliny nebo plyny. [5, 20]

Proces zvaný adsorpce probíhá na fázovém rozhraní. Dochází ke vzniku tenké vrstvy adsorbátu na povrchu adsorbentu, aniž by došlo k narušení jeho struktury. V závislosti na mechanismus adsorpce lze rozlišit fyzikální adsorpci a chemickou adsorpci. Fyzikální adsorpce je projevem Van der Waalsových přitažlivých sil mezi adsorbentem a adsorbátem. Chemická adsorpce je založena na vzniku chemických vazeb mezi adsorbentem a přiléhající tekutou fází adsorbátu. [5, 20, 21]

Nabíjení akumulátorů využívajících sorpce je endotermický proces. Akumulátoru je dodáváno teplo, pomocí kterého je materiál rozkládán na sorbent a sorbát. Takto rozložené materiály je možné odděleně skladovat při pokojové teplotě. Ve fázi vybíjení jsou rozložené produkty smíchány a znovu dochází ke vzniku původního materiálu, který je doprovázen uvolňováním energie (jedná se o exotermickou reakci). Proces nabíjení, skladování a vybíjení sorpčních akumulátorů je znázorněn na obrázku 8. [20, 21]



Obrázek 8 Fáze nabíjení, skladování a vybíjení sorpčního akumulátoru [21]

Mezi základní požadavky na materiály vhodné pro akumulaci energie pomocí sorpčních procesů patří reakční teplo, afinita mezi sorbentem a sorbátem, vysoká tepelná vodivost, stabilita materiálu, nízká korozní agresivita a nízká toxicita. [21]

### 3.4.2 MATERIÁLY VHODNÉ PRO AKUMULACI POMOCÍ SORPČNÍCH PROCESŮ

Mezi vhodné materiály pro akumulaci metodou fyzikální adsorpce lze zařadit aktivní uhlí, silikagel či zeolity. Tyto materiály mohou sloužit jako akumuláčnické média hlavně díky velké specifické ploše povrchu. [22, 23]

#### Aktivní uhlí

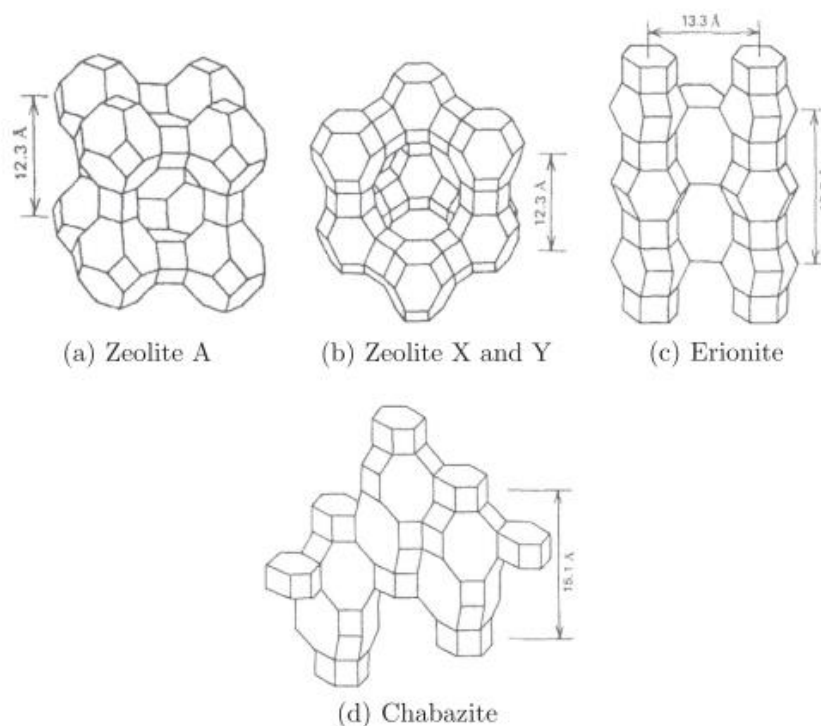
Aktivní uhlí je materiál s vysokou porozitou, která je obvykle důsledkem kombinace mikropórů (<2 nm), mesopórů (2-50 nm) a makropórů (>75 μm). Má vyšší tepelnou vodivost než silikagel a zeolity. Aktivní uhlí má nízkou schopnost adsorpce vodních par kvůli hydrofobickým vlastnostem. Tento fakt je důvodem, proč je aktivní uhlí užíváno společně se sorbáty jako je metanol či amoniak. Možností, jak navýšit sorpční kapacitu je použití vláken z aktivního uhlí, které mají oproti běžnému aktivnímu uhlí až trojnásobnou specifickou plochu povrchu (až 1380 m<sup>2</sup>/g). [10, 20]

## Silikagel

Názvem silikagel je označována porézní forma oxidu křemičitého ( $\text{SiO}_2$ ). Výroba silikagelu probíhá syntézou křemičitanu sodného. Velikost póru lze ovlivnit přísnou kontrolou hodnoty pH při výrobě. Má poměrně vysokou specifickou plochu povrchu ( $600\text{-}800\text{ m}^2/\text{g}$ ) a vysokou adsorpční kapacitu. Ovšem nízké diferenciální teplo sorpce limituje využití silikagelu jako akumulárního média. [23]

## Zeolity

Zeolity lze charakterizovat jako porézní krystalické materiály, které jsou složeny z atomů křemíku (Si), hliníku (Al) a kyslíku (O). Na každý atom křemíku a hliníku jsou v tetrahedrálním uspořádání navázány čtyři kyslíkové atomy ( $\text{SiO}_4$  nebo  $\text{AlO}_4$ ). Každý z atomů kyslíku je sdílen mezi okolními tetrahedrony, čímž jsou křemíkové a hliníkové atomy propojeny viz obrázek 9. [20, 22]



Obrázek 9 struktura zeolitů [20]

Díky této konfiguraci jsou úhly mezi jednotlivými atomy přesně definovány, díky čemuž mají zeolity rovnoměrnou distribuci velikosti pórů. Afinita k vodě závisí na poměru křemíku ku hliníku (Si/Al). Zeolity bohaté na hliník vykazují vysokou afinitu k vodě. Každý atom hliníku do struktury materiálu vnáší záporný náboj, na který jsou polární molekuly jako voda citlivé a materiál vykazuje hydrofilní chování.

K přechodu mezi hydrofilním a hydrofobním chováním dochází mezi hodnotami poměru křemíku ku hliníku (Si/Al) 8-10. [20, 22, 24]

## Zeotypy

Jako zeotypy jsou označovány aluminofosfáty a od nich derivované metalofosfáty. Mají krystalickou strukturu podobnou zeolitům, podle kterých byl odvozen název zeotypy. Od zeolitů se odlišují elektricky neutrální strukturou. Vykazují dobrou adsorpční kapacitu a pohybují se na pomezí hydrofilního a hydrofobního chování. Například silikoaluminofosfát s komerčním označením SAPO 34 dosahuje vysokých hodnot hustoty akumulované energie (500 J/g) již při poměrně nízké nabíjecí teplotě 90 °C [24].

## Kompozitní sorbenty

Tyto materiály jsou založeny na částicích soli uložených v otevřené pórovité struktuře matrice. Matricí může být silikagel nebo například vermikulit. Cílem této metody je omezení negativních jevů doprovázejících soli jako je korozní agresivita či sklon k aglomeraci. Nežádoucí jevy jsou potlačeny díky použití solných krystalů menší velikosti a jejich uložení uvnitř částic matrice. Vlastnosti kompozitních adsorbentů je možné přizpůsobit konkrétním potřebám díky možnosti výběru kombinace matrice a v ní uložené soli. [20, 23]

Vliv matrice na adsorpční schopnosti udává hlavně její pórovitost. Mezopórovité struktury (velikost pórů 2-50 nm) mají největší potenciál díky dobrému kompromisu mezi průměrem vnitřním objemem jejich pórů. Matrice, u kterých převažují mikropóry (póry menší než 2 nm), často představují problém při ukládání solných částic a obecně jich pojmu menší množství. Makropórovité materiály (s póry většími než 75 μm) pojmu velké množství soli, což může adsorpční jevy zpomalit z důvodu nadměrné velikosti solných krystalů [23, 25].

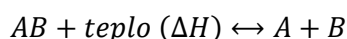
Velký potenciál pro využití má kompozitní sorbent na bázi vermikulitu a chloridu lithného. Tento typ sorbentu dosahuje hustoty akumulované energie až 2000 J/g. [24]

### 3.4.3 TERMOCHEMICKÁ AKUMULACE POMOCÍ CHEMICKÉ REAKCE

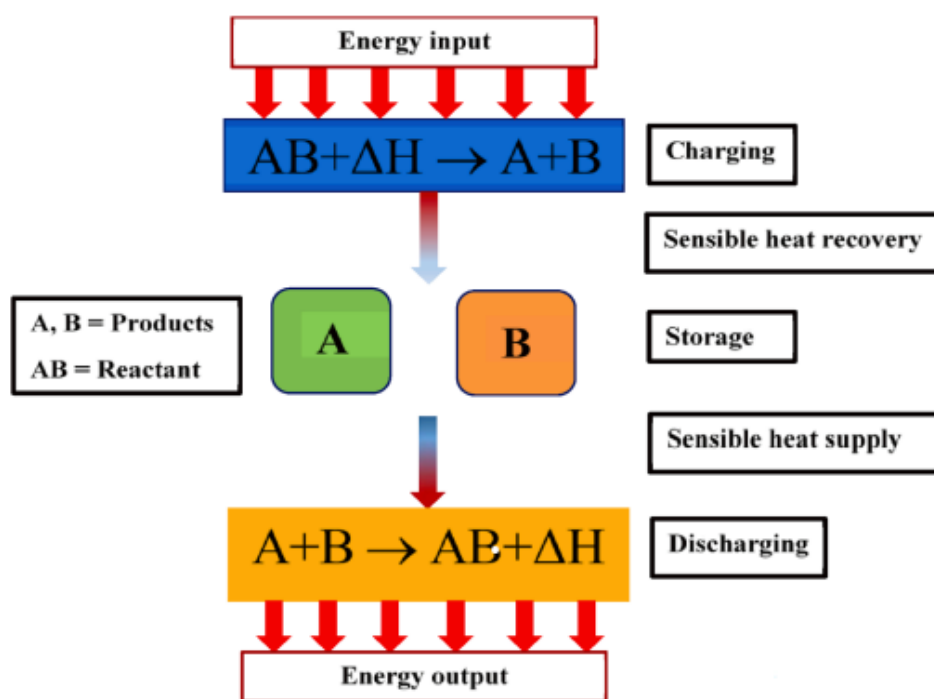
Akumulace energie pomocí chemické reakce je proces, při kterém je energie ukládána pomocí vratné chemické reakce. [5]

Nabíjení akumulátoru je prováděno endotermickou chemickou reakcí, při které dochází k disociaci akumulačního média na složky A a B. Nabíjení lze rozdělit do tří kroků. V prvním kroku dochází k předehřívání média na teplotu disociace. V druhém kroku probíhá za stálého přívodu tepla reakce, (disociace na složky A a B) při které je energie v akumulátoru navýšena o hodnotu reakčního tepla (entalpie reakce). Ve třetím kroku dochází k ochlazení na teplotu skladování a separátnímu uskladnění produktů disociace. Během skladování nedochází ke změnám v chemickém potenciálu reakčních produktů. V okamžiku vybíjení dochází k uvolnění uskladněné energie exotermickou reakcí při smíchání produktů disociace. [10, 21]

Vratnou chemickou reakci potřebnou pro funkci akumulátorů tohoto typu lze obecně popsat vztahem:



Fáze nabíjení, skladování a vybíjení akumulátorů využívajících chemické reakce jsou znázorněny na obrázku 10. [5, 21]



Obrázek 10 Princip akumulace pomocí chemické reakce Modře – fáze nabíjení, při které je za přístupu tepla reaktant rozkládán. Čtverec A a B jsou produkty chemické reakce ve fázi skladování. Oražový obdélník představuje fázi vybíjení, kdy je při rekombinaci produktů A a B uvolňováno teplo. [21]

### 3.4.4 MATERIÁLY VHODNÉ PRO AKUMULACI POMOCÍ CHEMICKÉ REAKCE

Chemické reakce využívané k akumulaci tepelné energie je možné rozdělit dle fázového stavu reaktantů do tří kategorií (pevná látka-plyn, kapalina-plyn, plyn-plyn). Aktuálně jsou hlavními oblastmi výzkumu kategorie pevná látka-plyn a plyn-plyn. Do kategorie pevná látka-plyn patří uhličitany, hydridy kovů, hydroxidy a kovové oxidy. Do kategorie plyn-plyn se řadí syntéza a rozklad amoniaku a reformace metanu. [10, 26]

#### Uhličitany

Uhličitany mají velký potenciál pro akumulaci tepelné energie. Hlavními přednostmi uhličitánů jsou vysoké pracovní teploty (obvykle přes 800 °C), nízké pracovní tlaky a vysoká hustota akumulované energie. Také jsou netoxické a nízko korozně agresivní. K ukládání energie dochází pomocí endotermického procesu kalcinace, při kterém je uhličitán kovu ( $MCO_3$ ) rozložen na oxid uhličitý ( $CO_2$ ) a oxid daného kovu (MO). Kalcinace obvykle probíhá při teplotách 600-700 °C. Vybíjení akumulované energie probíhá exotermickým procesem karbonizace, při kterém dochází k reakci oxidu uhličitého a oxidu kovu za vzniku výchozího uhličitánu. Při karbonizaci teplota dosahuje vysokých teplot (běžně okolo 900 °C). [26, 27]

Největší potenciál pro vysokoteplotní aplikace má uhličitán vápenatý ( $CaCO_3$ ). Má vysokou hustotu akumulované energie (až 3029 J/g). Kalcinace začíná při teplotě 973 °C a při exotermické karbonizaci může teplota reakce dosáhnout až 1270 °C. [26, 27]

#### Hydroxidy

K akumulaci tepelné energie je možné použít také hydratace a dehydratace oxidů kovů. Hydratace je exotermická reakce oxidu kovu (MO) s vodou ( $H_2O$ ), jejímž výstupním produktem je hydroxid daného kovu ( $M(OH)_2$ ) a energie ve formě tepla. Dehydratace je endotermická reakce, při které za působení tepla dochází k rozkladu hydroxidu kovu ( $M(OH)_2$ ) na oxid kovu (MO) a vodu ( $H_2O$ ). Běžné levné, snadno dostupné a netoxické. [10, 26]

Nejrozsáhlejší výzkumy byly provedeny na hydroxidu vápenatém ( $Ca(OH)_2$ ) a hydroxidu hořečnatém ( $Mg(OH)_2$ ), díky jejich vysoké hustotě uložené energie. Systémy založené na hydroxidu vápenatém mají větší potenciál pro praktické

využití. Mají větší energetickou hustotu a hydroxid vápenatý je levnější. U hydroxidu hořečnatého navíc dochází s rostoucí teplotou ke snížení reaktivity. [10]

## Hydridy kovů

Hydridy kovů mají vysokou hustotu uložené energie (až 2814 J/g) a široký interval pracovních teplot. Jsou to sloučeniny, které vznikají exotermickou reakcí mezi atomem kovu (M) a atomem vodíku (H), jejímž produktem je hydrid kovu (MH) a energie ve formě tepla. Rozklad hydridu kovu probíhá zpětnou reakcí za přísunu tepla. [10, 26, 27]

Největší energetické hustoty (3857 J/g) dosahuje hydrid vápenatý ( $\text{CaH}_2$ ). Je vhodný pro vysokoteplotní aplikace a teploty jeho reakce se pohybují v intervalu 1100-1400 °C. [27]

## Oxidy kovů (redukční reakce)

Akumulace tepelné energie pomocí oxidů kovů probíhá pomocí oxidačních a redukčních reakcí. Při redukci dochází při dodávání tepla k uvolnění kyslíkových atomů z oxidu ( fáze nabíjení). Oxidace probíhá sloučením kyslíkových atomů s kovem či oxidem a jejím výstupem je oxid vyššího řádu a energie ve formě tepla. Materiály tohoto typu mají široký rozsah pracovních teplot (350-1100 °C). [26]

## Syntéza a rozklad amoniaku

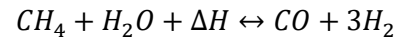
Zpětná reakce rozkladu amoniaku je vhodná k využití na akumulaci tepelné energie. Amoniak ( $\text{NH}_3$ ) je za přísunu tepla možné disociovat na plynný vodík ( $\text{H}_2$ ) a dusík ( $\text{N}_2$ ). Zpětná reakce se nazývá syntéza a jejím výstupem je krom amoniaku energie ve formě tepla. Rozklad amoniaku probíhá v rozmezí teplot 700-800 °C při zvýšeném tlaku 10-30 MPa. Rychlost syntézy amoniaku se s rostoucí teplotou zvyšuje. Syntézu a disociaci amoniaku lze snadno kontrolovat, jelikož jsou to procesy známé již přes 100 let. Všechny reaktanty lze ukládat v jedné nádrži při teplotě prostředí, dokud nejsou použity při zpětné reakci. [27]

## Reformace metanu

Jedním z možných způsobů akumulace energie je rozklad a reformace metanu. Užitím katalyzátorů jako je nikl (Ni), kobalt (Co) či rhodium (Rh) je možné

navýšit množství energie akumulované či uvolněné při reakci. Reformaci metanu je možné provádět použitím vodní páry nebo oxidu uhličitého.[29]

Reformace metanu pomocí vodní páry probíhá dle rovnice:



Reformace metanu pomocí oxidu uhličitého probíhá dle rovnice:



Původně byla reformace metanu zkoumána za účely dopravy energie z atomových elektráren na dlouhé vzdálenosti. Aktuální výzkumy v této oblasti se soustředí na její využití pro akumulaci tepelné energie. [26, 29]



Tabulka 5 Porovnání materiálů pro akumulaci pomocí chemické reakce [10, 13, 26]

Reakce	Pracovní teplota [°C]	$E_g$ [kJ/kg]	$E_v$ [MJ/m <sup>3</sup> ]
Uhličitany			
$\text{CaCO}_{3(s)} + \Delta H \leftrightarrow \text{CaO}_{(s)} + \text{CO}_{2(g)}$	973-1273	3029	3260
$\text{SrCO}_{3(s)} + \Delta H \leftrightarrow \text{SrO}_{(s)} + \text{CO}_{2(g)}$	900-1200	300-1000	1200-1500
Hydroxidy			
$\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2 + \Delta H$	400-600	~2000	1640
Hydridy kovů			
$\text{Mg} + \text{H}_2 \leftrightarrow \text{MgH}_2 + \Delta H$	300-480	2160	3995
$\text{NaH} + \text{Mg} + \text{H}_{2(g)} \leftrightarrow \text{NaMgH}_3 + \Delta H$	475-575	1721	~1700
$\text{Ca} + \text{H}_2 \leftrightarrow \text{CaH}_2 + \Delta H$	1100-1400	3857	7374
Oxidy kovů			
$2\text{Co}_3\text{O}_4 + \Delta H \leftrightarrow 6\text{CoO} + \text{O}_2$	~900	844	720
$2\text{BaO}_2 + \Delta H \leftrightarrow 2\text{BaO} + \text{O}_2$	~740	527,18	3015
$6\text{Mn}_2\text{O}_3 + \Delta H \leftrightarrow 4\text{Mn}_3\text{O}_4 + \text{O}_2$	~1000	204	225
Syntéza a rozklad amoniaku			
$2\text{NH}_3(g) + \Delta H \leftrightarrow \text{N}_2(g) + 3\text{H}_2(g)$	400-700	3924	0,675
Reformace metanu			
$\text{CH}_4(g) + \text{H}_2\text{O}(g) + \Delta H \leftrightarrow 3\text{H}_2(g) + \text{CO}(g)$	1000-1500		28,1
$\text{CH}_4(g) + \text{CO}_2(g) + \Delta H \leftrightarrow 2\text{H}_2(g) + 2\text{CO}(g)$	1000-1500		27,7

## **4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST**

Hlavní náplní experimentální části práce byl návrh a realizace akumulátorového měřicího zařízení pro hodnocení chování akumulčního média během pracovního cyklu. Měřicí zařízení bylo navrženo se zaměřením na metodu akumulace pomocí tepelné kapacity pro aplikace při nízkých teplotách kolem 100 °C.

### **4.1 NÁVRH AKUMULÁTOROVÉHO MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ**

Návrh měřicího zařízení byl rozdělen do tří částí. První část návrhu byla zaměřena na konstrukční prvky zařízení. Ve druhé části byl zvolen tepelný zdroj. Třetí část byla zaměřena na návrh prvků měřicího systému.

#### **4.1.1 NÁVRH KONSTRUKCE AKUMULÁTOROVÉHO MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ**

Návrh konstrukce měřicího zařízení byl sestaven s ohledem na jednoduchost výroby jednotlivých prvků, komerční dostupnost navrhovaných polotovarů a materiálů a nízké pořizovací náklady.

##### **Návrh nádoby pro akumulční médium**

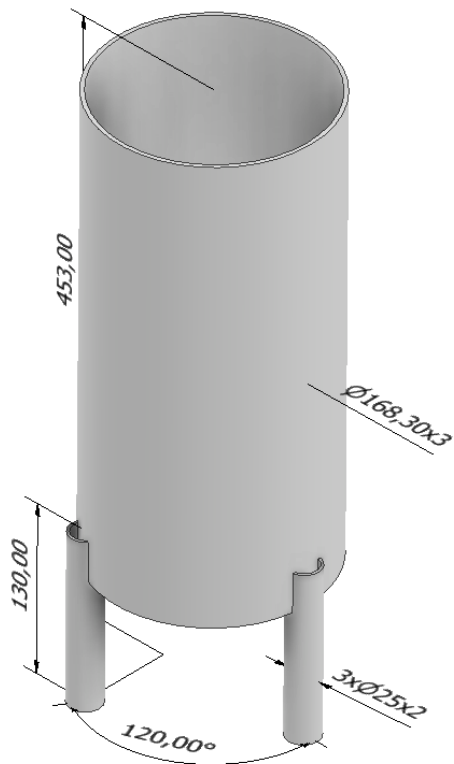
Nejprve bylo nutné navrhnout nádobu vhodnou pro uložení a ohřev akumulčního média. Hlavní podmínkou při výběru materiálu byla odolnost cyklickému tepelnému namáhání při zvýšených teplotách alespoň 200 °C. Navržená nádoba by také měla splňovat požadavek na odolnost korozi ve vlhkém prostředí, kvůli možné vlhkosti akumulčního média.

Při volbě tvaru nádoby pro akumulční médium byla uvažována jednoduchost výroby, ale také rovnoměrnost průběhu šíření tepla v závislosti na jejím příčném řezu. Požadovaný objem akumulčního média v nádobě byl uvažován 5 litrů.

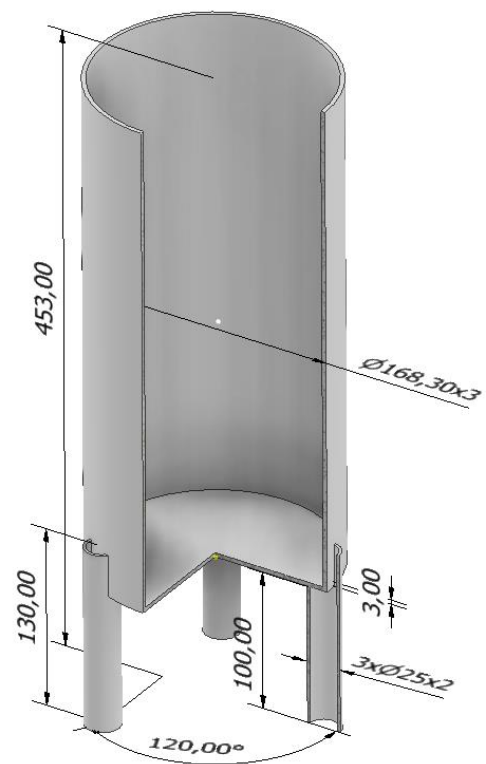
Vzhledem k materiálovým a technologickým požadavkům byla polotovarem zvolena svařovaná trubka kruhového průřezu z korozivzdorné oceli EN 10217-7-1.4301: 168,3 x 3,0. Ekvivalentem této jakosti je ČSN 17 240. Jedná se o austenitickou chrom-niklovou ocel s velmi dobrou svařitelností, použitelná je v intervalu teplot -50–400 °C. Požadovanému objemu nádoby 5 l odpovídá délka trubky 350 mm, a to i s rezervou na uzávěr [30].

Ke zvolené trubce bylo dále navrženo dno z plechu téže materiálové jakosti (1.4301) o tloušťce 3 mm. Za účelem omezení šíření tepla vedením při přímém kontaktu dna nádoby s podložkou. Z toho důvodu byly v návrhu uvažovány tři podpěry, pomocí kterých bylo dno zvednuto od podložky na vzdálenost 100 mm. Polotovarem pro tyto podpěry byla zvolena svařovaná trubka z korozivzdorné oceli EN 10217-7-1.4301: 25 x 2,0.

Při návrhu akumulční nádoby bylo přihlíženo na jednoduchost výroby při současném splnění hlavních materiálových a technologických požadavků. Byla navržena svařovaná konstrukce složená z běžně dostupných polotovarů. Model návrhu akumulční nádoby společně s rozměry v milimetrech jsou znázorněny na obrázku 11 a 12.



Obrázek 11 Model návrhu akumulční nádoby



Obrázek 12 Model návrhu akumulční nádoby ve tří čtvrtinovém řezu

## Návrh izolace nádoby pro akumulční médium

Aby mohla nádoba sloužit v rámci měřicího zařízení, bylo nutné navrhnout způsob tepelné izolace, který by minimalizoval tepelné ztráty do okolního prostředí. V praxi se obvykle vyskytují dva typy tepelné izolace. Prvním typem je izolace obkladem s nízkou tepelnou vodivostí (např. skelná vata, minerální vata, polystyren, keramika, dřevo atd.). Druhým typem tepelné izolace jsou reflexní izolační folie. Reflexní folie využívají schopnosti hliníku odrážet až 97 % dopadajícího vyzářeného tepla. Tyto folie jsou tvořeny tenkou hliníkovou folií upevněnou na tkanině, papíře, bublinkové folii, ale také na skelné vatě [31].

Hlavními faktory pro výběr tepelné izolace byla možnost manipulace bez ochranných pomůcek, jednoduchost jejího dělení, dostupnost a cena. Pro tepelnou izolaci navržené akumulční komory byla zvolena tepelná izolace pomocí reflexní folie, konkrétně hliníková reflexní folie upevněná na bublinkové folii. Kromě reflexního účinku hliníku mají bubliny ve folii tepelně izolační účinek, jelikož nedochází k mísení vzduchu uzavřeného v bublinách se vzduchem okolním. Konkrétně byla zvolena reflexní izolační folie Typ AB tuzemského výrobce DAPE, viditelná na obrázku 13. Tloušťka folie je pouze 4 mm, a díky vysokému tepelnému odporu ( $R=1,11 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ), jí lze nahradit konvenční tepelnou izolaci (např. skelnou vatu) o tloušťce až 50 mm. [31]

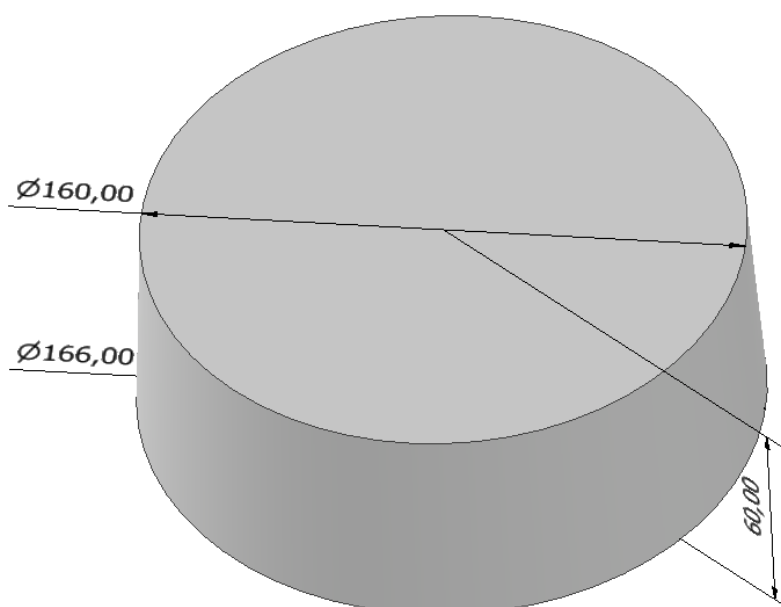


Obrázek 13 Reflexní izolační folie Typ AB.

## Návrh uzávěru nádoby pro akumulční médium

Dále bylo nutné navrhnout uzávěr akumulční nádoby. Hlavními požadavky uvažovanými při návrhu uzávěru byla jednoduchost výroby, nízké náklady a dostatečná tepelná izolace akumulčního média v nádobě od okolního prostředí. Díky jednoduché ruční zpracovatelnosti, dostupnosti, nízké ceně a nízké tepelné vodivosti ( $\lambda=0,039 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) byl materiálem pro výrobu uzávěru zvolen expandovaný polystyren ve formě desek o tloušťce 60 mm. K zajištění dostatečné těsnosti a tepelné izolace bylo navrženo obalení polystyrenového těla uzávěru výstelkou (polymerní vlna) a reflexní folií Typ AB. [31, 32]

Polystyrenové tělo uzávěru je viditelné na obrázku 14 a bylo navrženo ve tvaru komolého kuželu. Průměr větší podstavy je 166 mm a průměr menší podstavy je 160 mm. Výška komolého kuželu činí 60 mm.



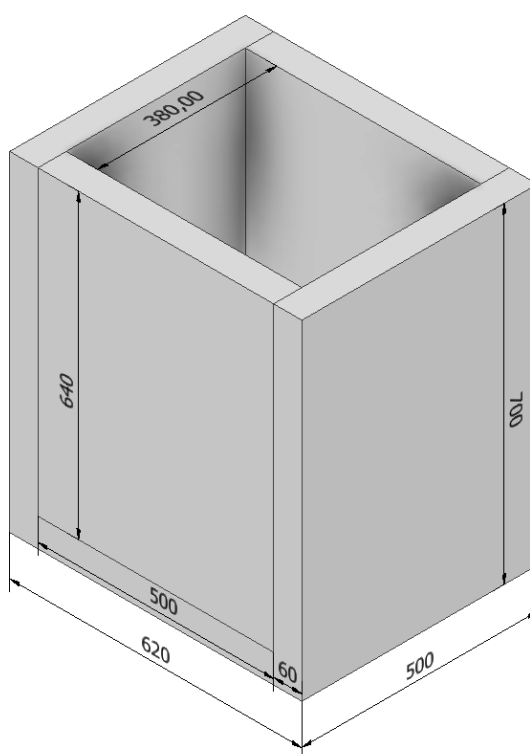
Obrázek 14 Model návrhu uzávěru akumulční nádoby (rozměry v mm).

## Návrh obložení nádoby pro akumulční médium

Obložení akumulční nádoby bylo navrženo za účelem snížení vlivu kolísání teploty okolního prostředí na průběh měření. Mezi hlavní požadavky na materiál obložení lze zařadit dobré tepelně izolační vlastnosti, snadnou zpracovatelnost, dostupnost a nízkou cenu.

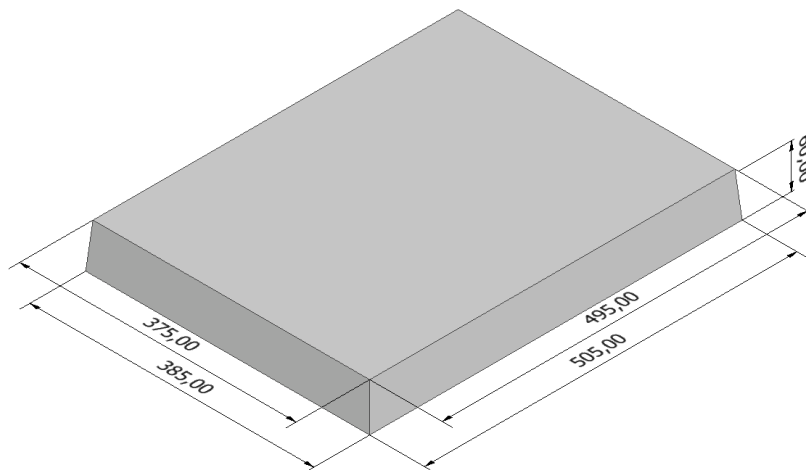
Pro konstrukci obložení byl zvolen expandovaný polystyren. Polystyren je hojně užívaným izolačním materiálem díky nízké tepelné vodivosti ( $\lambda=0,039$  W/m·K). Splňuje také požadavky na nízké pořizovací náklady, snadnou zpracovatelnost a dostupnost. Konkrétně byly zvoleny desky z extrudovaného polystyrenu Isover EPS 70F o tloušťce 60 mm. [35]

Byl vytvořen návrh lepené konstrukce obložení nádoby pro akumulční médium. Model návrhu společně s rozměry je znázorněn na obrázku 15.



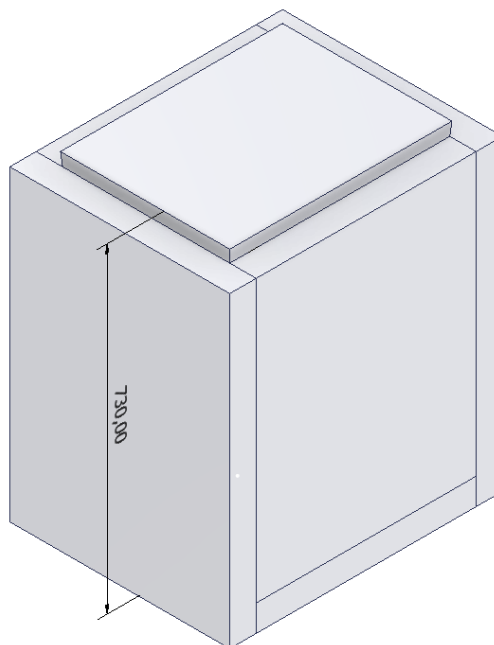
Obrázek 15 Model návrhu obložení akumulční nádoby (rozměry v mm).

K lepené konstrukci byl navržen uzávěr téhož materiálu. Kvůli dostatečnému utěsnění byl navržen uzávěr ve tvaru komolého jehlanu. Model uzávěru s rozměry je znázorněn na obrázku 16.



Obrázek 16 Model návrhu uzávěru obložení akumulční nádoby (rozměry v mm).

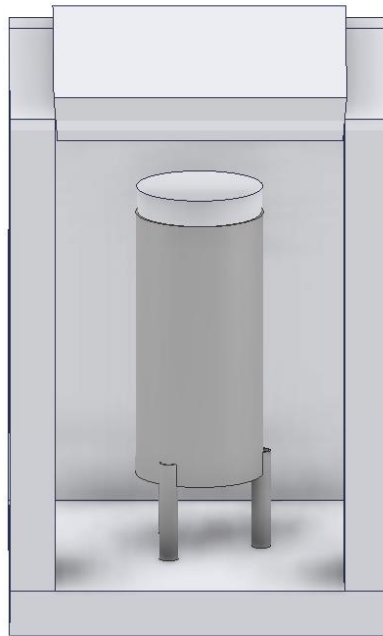
Z modelů jednotlivých prvků sestavy byl sestaven návrh konstrukce akumulátorového měřícího zařízení. Obložení z expandovaného polystyrenu má za cíl chránit akumulční nádobu před vlivy fluktuace teploty okolního prostředí. Vnější pohled na model konstrukce je viditelný na obrázku 17.



Obrázek 17 Model návrhu konstrukce akumulčního měřícího zařízení (rozměry v mm).

Obrázek 18 představuje pohled skrze boční stěnu obložení na uzavřenou akumulční nádobu. Plocha kontaktu mezi akumulční nádobou a polystyrenovým

obložením je omezena na průřez trubkových podstav. Tím je množství tepla sdíleného vedením mezi akumulací nádobou a obložením značně sníženo. K dalšímu snížení množství tepla sdíleného vedením je možné zakomponovat podložku z materiálu s dobrými tepelně izolačními vlastnostmi.



*Obrázek 18 Pohled do útrobu modelu návrhu konstrukce akumulčního měřícího zařízení.*

#### 4.1.2 NÁVRH TEPELNÉHO ZDROJE

Při návrhu tepelného zdroje pro ohřev média byl kladen důraz na bezpečnost provozu. Dalšími požadavky byly nízké pořizovací náklady a jednoduchost provozu. Z návrhu akumulční nádoby byly určeny požadavky na maximální rozměry tepelného zdroje.

Vzhledem k vzneseným požadavkům byla k ohřevu zvolena topná spirála z korozi-vzdorné oceli s příkonem 500 W. Zvolená spirála splňuje požadavky na maximální rozměry (rozměry spirály 130x40x40 mm). Jedná se o komerčně dostupný produkt, jehož bezpečnost zaručuje tepelná pojistka. Provoz tepelného zdroje je jednoduchý. K ohřevu dochází v okamžiku zapojení spirály do elektrické sítě, odpojením spirály ze sítě je ohřev zastaven. Na obrázku 19 je fotografie topné spirály zvolené pro ohřev.





*Obrázek 19 Fotografie zvolené topné spirály.*

### 4.1.3 NÁVRH SYSTÉMU MĚŘENÍ TEPLoty

Úkolem systému měření teploty je získat teplotní data a následně je přečíst a zapsat v požadovaném formátu. Hlavním požadavkem na měřicí systém je možnost měření teploty alespoň ve třech různých bodech. Dalším důležitým faktorem je pořizovací cena měřicího systému a možnost změny množství měřených bodů.

Existují komerčně dostupné vícekanálové teploměry s funkcí záznamu teplot. Jejich výhodou je snadné použití bez nutnosti složité přípravy. Tyto teploměry jsou ovšem nákladné a jejich pořizovací ceny se pohybují v řádech desítek tisíc Kč.

Další možností měření teploty je použití termočlánků. Ty pracují na principu termoelektrického jevu. Kdy dochází k buzení elektrického napětí, které je zapříčiněno tepelným gradientem. Důsledkem tohoto jevu je přeměna tepelné energie na energii elektrickou. Výstupem termočlánku jsou hodnoty napětí, které je nutné dále převést na požadovaná teplotní data. Měření teploty pomocí termočlánků je uživatelsky náročnější, ale pořizovací náklady vlastního termočlánekového měřicího systému mohou být pouhým zlomkem ceny komerčně dostupných řešení.

## Termočlánek

Výběr termočlánu závisí především na měřeném intervalu teplot a požadované citlivosti. Do rozhodování vstupují ale i další kritéria jako je cena, dostupnost a chemická stálost. Nejrozšířenějším, a zároveň i nejlevnějším typem termočlánu jsou termočlánu typu K. Jedná se o chromel-alumelové termočlánu. Jejich citlivost se pohybuje okolo  $41 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$  a jsou použitelné v intervalu  $-200-1350$   $^\circ\text{C}$ .

Termočlánu typu K jsou dostupné široké veřejnosti a jejich pořizovací náklady jsou velmi nízké. Rozlišovací schopnost termočlánu tohoto typu je  $0,25$   $^\circ\text{C}$ , což dostačuje potřebám navrhovaného měřicího zařízení. Pro měřicí systém akumulátorového měřicího zařízení byl zvolen termočlánek typu K. Tento typ termočlánu disponuje dostatečnou rozlišovací schopností, má široký rozsah měřících teplot. Konkrétně byly zvoleny termočlánu typu K s přívodním vodičem o délce 500 mm. Zvolený termočlánek je zobrazen na obrázku 21.



Obrázek 20 Fotografie termočlánu typu K.

## Modul pro převod signálu

Výstupem z termočlánu jsou hodnoty napětí, které je dále potřeba převést na požadovaná teplotní data. K tomuto účelu byl zvolen převodníkový modul MAX6675 výrobce Maxim Integrated. Jeho funkcí je převod analogového signálu z termočlánu (napětí) na digitální hodnotu teploty. Modul MAX6675 je vhodný pro industriální či vzduchotechnické aplikace, ale také se nachází v řadě spotřebičů. Převodník není schopen čtení a zápisu dat, ale pouze převádí analogový na digitální

signál. Pro čtení digitálního signálu z převodníku je třeba připojení modulu na mikrokontroler či jiný řídicí prvek.

Modul MAX6675 je navržen přímo pro využití s termočlánky typu K. Komunikuje pomocí sériového periferního rozhraní (SPI). Pomocí sběrnice SPI je možné vzájemné propojení dvou i více komunikačních uzlů. Jeden z uzlů zastává roli řadiče sběrnice (master), zatímco ostatní uzly jsou v roli slave (v případě měřícího zařízení tuto roli zastávají převodníkové moduly).

Převodníkový modul MAX6675 viz obrázek 21 má celkem 7 pinů (kontaktů) s následujícími funkcemi:

- 1) Pin – (T-) je určen k připojení alumelové větve termočlánku.
- 2) Pin + (T+) je určen k připojení chromelové větve termočlánku.
- 3) Pin VCC je určen k připojení ke zdroji napětí.
- 4) Pin GND je určen pro připojení k uzemňovacímu pinu řídicího prvku.
- 5) Pin SCK (Serial clock input) je určen k připojení na generátor hodinového signálu řídicího prvku.
- 6) Pin CS (Chip select) slouží k výběru slave uzlu ke komunikaci s řídicím uzlem.
- 7) Pin SO (Slave out) je určen k výstupu digitálních dat z převodníku. [33]



Obrázek 21 Převodníkový modul MAX6675 [33].

## Řídící prvek

Termočlánek společně s modulem pro převod signálu netvoří samostatný systém schopný číst a zapisovat hodnoty. Modul s termočlánekem je nutné připojit k řídicímu prvku. Hlavním kritériem při volbě řídicího prvku byla možnost připojení alespoň tří termočláneků. Při výběru byl kladen důraz na nízké pořizovací náklady, jednoduchost užívání a programovacího jazyka.

Všechny zmíněné požadavky splňuje platforma Arduino. Jedná se o open-sourcovou platformu zaměřenou na elektroniku s uživatelsky přívětivým a jednoduchým softwarem a hardwarem. Vývojové desky arduino disponují mikrokontrolerem, který umožňuje číst vstupní data a reagovat požadovaným výstupem. Postup operací nutných ke zpracování vstupních dat na požadovaný výstup je označován jako algoritmus. Pro tuto platformu je specifický jednoduchý programovací jazyk Arduino. Zápis kódu lze provést v softwaru Arduino Software (IDE). Stejný software umožňuje také nahrání kódu na vývojovou desku pomocí USB připojení. [34]

Řídícím prvkem měřicího systému byla zvolena mikrokontrolerová vývojová deska Arduino Uno Rev3 (dále jen Arduino Uno). Ta splňuje požadavek na možnost zapojení alespoň tří termočláneků s převodníkovými moduly. Napájení desky je možné buď připojením k osobnímu počítači pomocí USB typu B či síťovým adaptérem. Připojení k počítači umožňuje nejen nahrání kódu, ale také komunikaci vývojové desky s počítačem. [34]



Obrázek 22 Vývojová deska Arduino Uno Rev3 [34]

K sestavení měřicího systému, který je jednoduchý a upravitelný je nutné zvolit vhodné spojovací prvky. Byla zvolena nejjednodušší varianta zapojení pomocí vodičů s konektory a nepájivého pole.

## 4.2 REALIZACE AKUMULÁTOROVÉHO MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ

Realizace měřicího zařízení byla rozdělena do dvou fází. První fáze byla zaměřena na sestavení konstrukce akumulátorového měřicího zařízení. Náplní druhé fáze bylo zapojení měřicího systému a vytvoření kódu pro Arduino Uno.

### 4.2.1 KONSTRUKCE AKUMULÁTOROVÉHO MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ

Konstrukce akumulátorového měřicího zařízení byla řízena vytvořeným návrhem.

Konstrukce obložení akumulční nádoby.

Polotovarem byly zvoleny desky z expandovaného polystyrenu Isover EPS 70F s rozměry 1000x500x60 mm. Desky jsou dostupné v balení po osmi kusech. Nejprve bylo desky potřeba upravit na požadované rozměry. Soupiska desek potřebných k sestavení obložení je v Tabulka 6.

*Tabulka 6 Soupiska polystyrenových desek s rozměry.*

Deska	Rozměry desky [mm]	Počet kusů
Bočnice delší	700x500x60	2
Bočnice kratší	640x500x60	2
Dno	500x500x60	1
Víko	500x380x60	1

Na desky byly pomocí pásového měřidla a fixu vyznačeny linie řezů. Podle vyznačených linií byly desky následně ručně děleny řezákem na požadované rozměry. Pro výrobu jednotlivých částí obložení bylo provedeno šest řezů. Na konstrukci obložení bylo využito pěti kusů polystyrenových desek. Fotografie přířezů použitých na obložení jsou na obrázku 23-25.



*Obrázek 23 Bočnice delší*



*Obrázek 24 Bočnice kratší.*



*Obrázek 25 Dno*



*Obrázek 26 Víko.*

Dalším krokem bylo spojení polystyrenových desek do požadovaného tvaru. Ke spojení přířezů bylo využito technologie lepení. Pro výrobu lepených spojů bylo

zvoleno montážní lepidlo Fix Flex výrobce Den Braven. Jedná se o univerzální lepidlo vhodné k lepení polystyrenu i dalších materiálů [lepidlo].

Spojování jednotlivých přířezů probíhalo dle následujícího postupu:

- 1) V prvním kroku bylo dno přilepeno k jedné z delších bočnic.
- 2) V druhém kroku byly kratší bočnice přilepeny ke dnu a delší bočnici.
- 3) V posledním kroku byla zbývající delší bočnice přilepena ke dnu a dvěma kratším bočnicím.

Fotografie obložení vyrobeného podle tohoto postupu jsou na Obrázku 27 a 28.



Obrázek 27 Pohled na uzavřené obložení.



Obrázek 28 Pohled dovnitř obložení

Po slepení konstrukce obložení bylo nutné, aby došlo k vytvrzení lepidla. V závislosti na teplotě a vlhkosti okolí, savosti podkladu a tloušťce vrstvy lepidla v lepeném spoji je výrobcem uvedena doba úplného vytvrzení spoje v intervalu 24-72 hodin. Doba vytvrzování lepených spojů byla zvolena na 72 hodin, aby bylo zaručeno jejich úplné vytvrzení. [35]

## Konstrukce akumulční nádoby

Akumulční nádoba byla dle konstrukčního návrhu vyrobena na zakázku. Při výrobě bylo využito navržených polotovarů. Při výrobě nádoby byla provedena změna návrhu dna nádoby výrobcem. Dno bylo rozděleno na čtyři kruhové výseče po 90 ° s průměrem 84 mm namísto původního návrhu, ve kterém bylo dno tvořeno pouze jedním kusem plechu. Soupiska jednotlivých dílů svařované konstrukce je uvedena v Tabulka 7

*Tabulka 7 Soupiska svařované konstrukce*

Díl	Polotovar	Rozměry	Počet
Tělo nádoby	ČSN EN 10217-7-1.4301: 168,3 x 3,0	Délka trubky 350 mm	1
Dno nádoby	ČSN EN ISO 9445-2-1.4301:3x1250x2500	Kruhová výseč v rozsahu 90 ° o poloměru 84 mm	4
Podstava	ČSN EN 10217-7-1.4301: 25 x 2,0.	Délka trubky 130 mm	3

Konstrukční změna provedená výrobcem žádným způsobem neovlivňuje funkci zařízení. Dodaná akumulční nádoba splňuje všechny požadavky. Fotografie akumulční nádoby jsou na obrázku 29-31.





Obrázek 29 Boční pohled na akumulční nádobu



Obrázek 30 Pohled shora na akumulční nádobu



Obrázek 31 Pohled dovnitř akumulční nádobu



Obrázek 32 Pohled na dno akumulční nádobu

## Izolace akumulční nádobu

K izolaci nádobu pro akumulční médium byla navržena reflexní izolační folie Typ AB od výrobce DAPE. Jedná se o hliníkovou folii upevněnou na bublinkové

folii. Hliníková folie disponuje schopností odrážet vyzářené teplo. Bublínkovou folií je zpomaleno další šíření tepla do okolí. Vzduch zachycený ve folii nemá možnost mísení se s okolním vzduchem, čímž je zpomalena výměna tepla prouděním. Tloušťka folie je 4 mm a je dostupná v roli (0,97x25 m).

Z rozměrů nádoby pro akumulační médium byly vyvozeny rozměry přístřihů potřebných k obalení vnějšího povrchu akumulační nádoby. K obalení pláště nádoby byl připraven přístřih tvaru obdélníku, pro dno nádoby byl připraven přístřih ve tvaru kruhu. Rozměry přístřihů jsou uvedeny v Tabulka 8.

*Tabulka 8 Rozměry přístřihů folie Typu AB*

Přístřih	Tvar	Charakteristické rozměry [mm]
Plášť	Obdélník	380x560
Dno	Kruh	Ø180

Z přístřihu tvaru obdélníku byl vytvořen rukáv těsně obepínající válcový plášť akumulační nádoby. Rukáv byl spojen pomocí sešívacích kleští. Poté byl rukáv natažen na plášť akumulační nádoby až do kontaktu s trubkovými podstavami. V místě kontaktu s každou podstavou byly vytvořeny dva svislé paralelní prostřihy dlouhé 50 mm. Prostřihy byly utvořeny přesně v místě kontaktu trubky podstavy s folií. Izolační folie byla poté natažena až do kontaktu podstavy se dnem prostřihu. Úzké pásy folie vzniklé paralelními prostřihy byly zastrčeny do dutin trubek podstavy. Tím byla izolace pláště akumulační nádoby zavedena do konečné pozice, ve které dosahovala folie 20 mm pod úroveň dna.

Z kruhového přístřihu bylo nejprve nutné vystřihnout po obvodu výřezy pro podstavy. Byly vytvořeny 3 výřezy kopírující polohu a rozměry trubek podstavy. Přístřih s výřezy byl poté přiložen ke dnu nádoby. Kruhový přístřih byl vyroben s rezervou na spojení s izolací pláště. Po umístění přířezu ke dnu došlo k nadzvednutí jeho obvodu izolací pláště. Folií kruhového tvaru poté bylo možné ručně přitlačit k okraji dna a rezervu určenou ke spojení zahrnout k přesahu izolace pláště a sponkovacími kleštěmi je spojit. Fotografie akumulační nádoby s tepelnou izolací jsou na obrázku 33 a 34.



Obrázek 33 Pohled na izolaci pláště akumulční nádoby



Obrázek 34 Pohled na izolaci dna akumulční nádoby

## Uzávěr akumulční nádoby

Pro výrobu uzávěru bylo využito stejných polystyrenových desek jako při výrobě obložení. Díky tomu bylo možné vyrobit uzávěr z jednoho z odřezků zbylých po výrobě obložení. Nejdříve byly fixem vyznačeny rozměry podstav komolého jehlanu na protějších plochách polystyrenové desky. Bylo provedeno oříznutí ve tvaru čtverce, ve kterém byla větší z podstav kružnicí vepsanou. Vzniklý kvádr byl postupně ručně ořezáván, dokud nebylo dosaženo požadovaného tvaru.

Do uzávěru bylo také nutné udělat otvor sloužící k průchodu topné spirály a vodičů. Byl vytvořen nejmenší možný otvor, kterým lze tepelný zdroj protáhnout, s rozměry 60x30 mm. Materiál zbylý po vyříznutí otvoru bylo možné využít k jeho utěsnění.

Kvůli lepšímu utěsnění akumulční nádoby byl uzávěr obložen výstelkou z polymerní vaty a reflexní izolační folie. Zavření nádoby uzávěrem je zobrazeno na obrázku 35.



*Obrázek 35 Pohled na nádobu s uzávěrem*

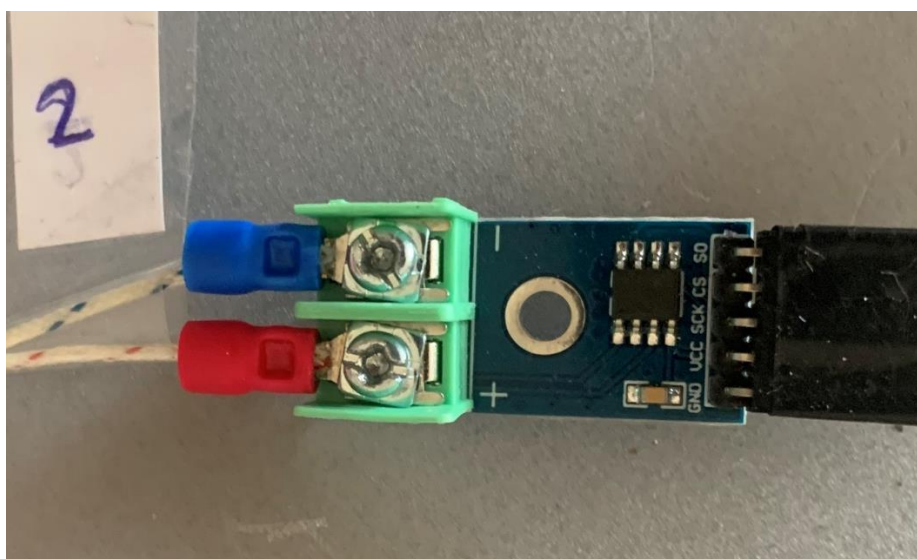
## 4.2.2 SYSTÉM MĚŘENÍ TEPLoty

K sestavení a zprovoznění systému měření teploty bylo potřeba nejprve správné zapojení jednotlivých komponent. V druhém kroku byl vytvořen kód pro Arduino Uno, který umožňuje číst a zobrazovat teplotní data.

### Zapojení systému měření teploty

Pro správné zapojení jednotlivých komponent systému měření teploty je nutné znát piny důležité pro jeho funkci, kterými Arduino Uno disponuje. Bylo zvoleno 5. Použitím převodníkových modulů MAX6675 a termočlánků typu K byla komunikace mezi Arduino Uno odkázána na rozhraní SPI.

Nejprve bylo třeba připojení termočlánků k převodníkovým modulům. Červené větve termočlánků byly připojeny na piny označené na modulu kladným znaménkem (+), modré větve byly připojeny na piny označené záporným znaménkem (-) viz. obrázek 36.



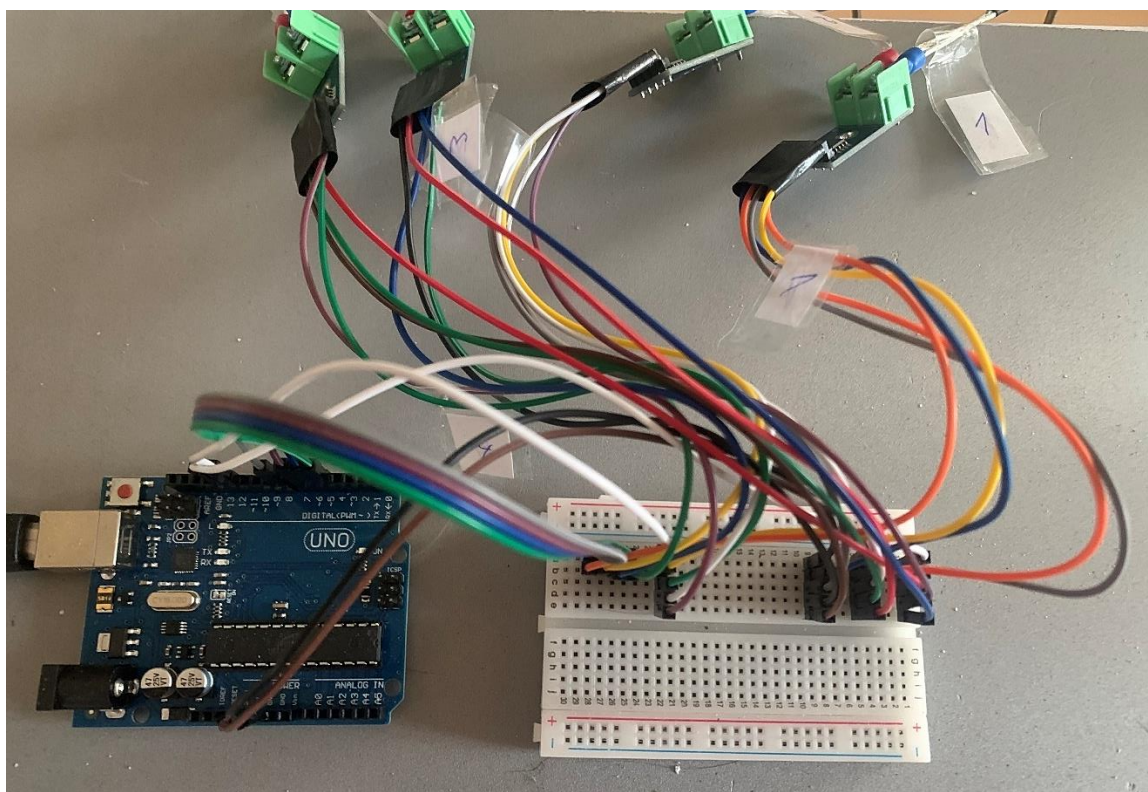
Obrázek 36 Zapojení termočlánku typu K k modulu MAX6675

Dále bylo potřeba připojení modulů MAX6675 k Arduino Uno, které bylo provedeno následovně:

- 1) Zapojení uzemňovacích pinů modulů MAX6675 (značeny GND) k uzemňovacímu pinu Arduino UNO (značen GND).
- 2) Připojení modulů MAX6675 (piny VCC) ke zdroji napětí Arduino Uno (pin značen 5V)

- 3) Připojení modulů MAX6675 (piny SCK) ke generátoru časového signálu Arduino Uno (pin 13)
- 4) Připojení modulů MAX6675 (piny SO) k Arduino Uno (pin 12) umožňující čtení dat odesílaných modulem.
- 5) Připojení modulů MAX6675 (piny CS) za účelem výběru modulu, ze kterého Arduino Uno provede čtení dat (piny 5, 6, 7, 8).

Jelikož některé z pinů Arduino UNO jsou pro moduly MAX 6675 společné (piny GND, 5V, 12 a 13) bylo pro zapojení využito nepájivého pole. Piny byly propojeny pomocí vodičů s konektory. Zapojení měřicího systému je zobrazeno na obrázku 37.



Obrázek 37 Zapojení měřicího systému

## Kód pro Arduino

V softwarovém prostředí Arduino IDE byl vytvořen kód, který umožňuje čtení teplotních dat z modulů MAX6675. Kód v prostředí softwaru Arduino IDE je na obrázku 38.

```

1  #include "max6675.h"
2  const int tcCLK = 13;
3  const int tcSO = 12;
4  int tcCS[] = {8, 7, 6, 5};
5
6  MAX6675 thermocouple[] = {
7  MAX6675(tcCLK, tcCS[0], tcSO),
8  MAX6675(tcCLK, tcCS[1], tcSO),
9  MAX6675(tcCLK, tcCS[2], tcSO),
10 MAX6675(tcCLK, tcCS[3], tcSO),
11 };
12
13 void setup() {
14
15     Serial.begin(9600);
16     delay(500);
17
18     for (int pin = 0; pin<=3; pin++){
19         digitalWrite(tcCS[pin], LOW);
20     }
21 }
22
23 void loop() {
24     int pin = 1;
25     for (int cs = 0; cs<=3; cs++){
26         digitalWrite(tcCS[cs], LOW);
27         delay(50);
28         Serial.print("T");
29         Serial.print(pin);
30         Serial.print(" ");
31         ++pin;
32         Serial.println(thermocouple[cs].readCelsius());
33         digitalWrite(tcCS[cs], HIGH);
34         delay(500);
35     }
36 }
37 }

```

Obrázek 38 Kód pro čtení teplotních dat

V první části kódu je zapojena knihovna funkcí pro komunikaci s modulem MAX6675 a definováno propojení pinů modulu MAX6675 ke konkrétním pinům Arduino Uno.

V části kódu začínající na řádce 13 je iniciována sériová komunikace a nastavena hodnota rychlosti přenosu. CS piny na všech modulech MAX6675 jsou po jednom postupně nastaveny na hodnotu LOW. Hodnota LOW na CS pinu modulu MAX6675 znamená, že daný pin je v danou dobu vybrán ke čtení.

Poslední část kódu začíná na řádce 23 a jedná se o smyčku, ve které je nejprve nastaven CS pin modulu MAX6675 na hodnotu LOW, čímž je indikováno, že je vybrán ke čtení. Následně dochází k výpisu označení termočlásku vybraného ke čtení (T1-T4) společně s naměřenou hodnotou teploty ve °C. Po výpisu je CS pin modulu MAX6675 nastaven na hodnotu HIGH, čímž je indikováno, že již není vybrán ke čtení. V závěru smyčky je nastavena prodleva 500 ms. Po prodlevě začíná smyčka znovu, na dalším z termočlásků.

## Záznam dat

Arduino Uno nedisponuje schopností přímého zápisu dat do paměti připojeného počítače, ale umožňuje pouze výpis aktuálně naměřených dat na sériovém monitoru. Nejjednodušším způsobem, jak tato data zaznamenat je užití softwaru pro čtení a záznam dat zobrazených na sériovém monitoru.

Byl zvolen software CoolTerm, který umožňuje záznam dat do textového souboru. Jedná se o jednoduchou aplikaci, která je dostupná ke stažení zdarma. [36]

## 4.3 MĚŘENÍ POMOCÍ AKUMULÁTOROVÉHO MĚŘÍCÍHO ZAŘÍZENÍ

Po dokončení realizace akumulátorového měřícího zařízení bylo provedeno zkušební měření. Akumulačním médiem byl zvolen křemičitý písek ( $\text{SiO}_2$ ) jemné frakce 0-0,4 mm. Hlavními důvody pro volbu tohoto materiálu byla nízká cena a snadná dostupnost.

Před započítím měření byl písek sušen 2 dny na přímém slunečním světle. Z důvodu zamezení opětovného navlhnutí písku byl na noc ukryt před vlivy vnějšího prostředí.

Akumulační nádoba byla nejprve naplněna pískem do výšky 150 mm. Po dosažení této výšky byla do nádoby zavedena topná spirála. Tři měřící termočlásky byly zavedeny do stejné úrovně jako topná spirála. Jeden z termočlásků (t1) byl umístěn ve středu akumulární komory do přímého kontaktu s topnou spirálou. Druhý termočlásek (t2) byl umístěn ve vzdálenosti 40 mm od středu akumulární nádoby. Třetí z měřících termočlásků (t3) byl zaveden do přímého kontaktu se stěnou nádoby, ve vzdálenosti od středu 80 mm. Umístění termočlásků je viditelné na obrázku 39.





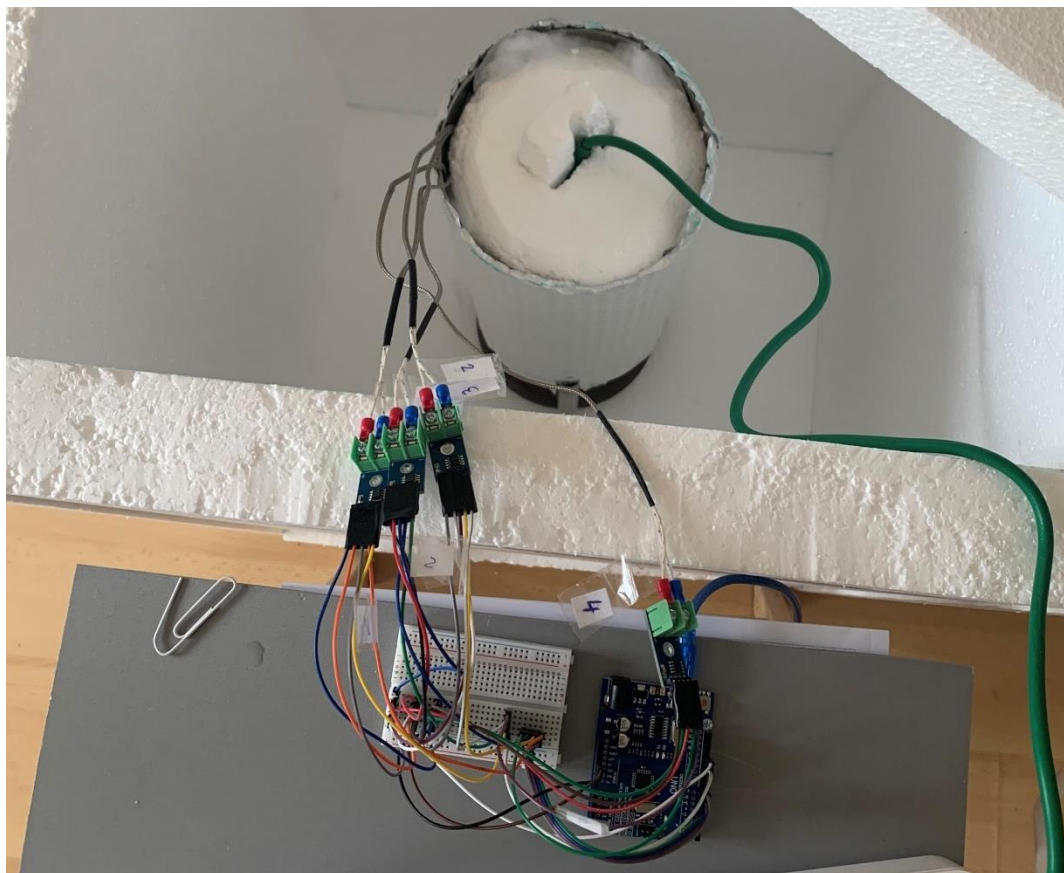
*Obrázek 39 Pohled do akumulární nádoby ve fázi přípravy měření*

Po zavedení měřících termočlánků a topné spirály byl zbytek nádoby dosypán pískem do výšky 300 mm. Na hladinu pískového lože byl do kontaktu se stěnou nádoby zaveden referenční termočlánek ( $t_4$ ). Po dosažení požadované teploty na referenčním termočlátku je fáze nabíjení považována za dokončenou a začíná fáze vybíjení.

Při plnění nádoby byl písek průběžně vážen. K naplnění nádoby pískem do výšky 300 mm bylo potřeba 6,2 litrů písku o celkové hmotnosti 7,97 kg. Písek nebyl v nádobě udusán. Sypná hmotnost písku v nádobě činila  $1285 \text{ kg/m}^3$ .

Použitá topná spirála není vybavena termostatem a bylo nutné ji řídit ručně skrze prodlužovací přívodní kabel s vypínačem. Teplota topné spirály byla při nabíjení neustále kontrolována pomocí termočlánku ( $t_1$ ). Limitní teplota povrchu topné spirály, při které byla spirála odpojena od sítě, byla zvolena na  $350 \text{ }^\circ\text{C}$ . Po poklesu teploty na povrchu spirály na  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  byla znovu zapojena do sítě. Opětovným zapojením topné spirály do sítě začal nový cyklus ohřevu. Topné cykly jsou opakovány, dokud není dosaženo požadované teploty na referenčním termočlátku  $t_4$ .

Po naplnění byla uzavřena akumulací nádoba a následně i obložení. Fotografie kompletního měřicího zařízení je na obrázku 40.



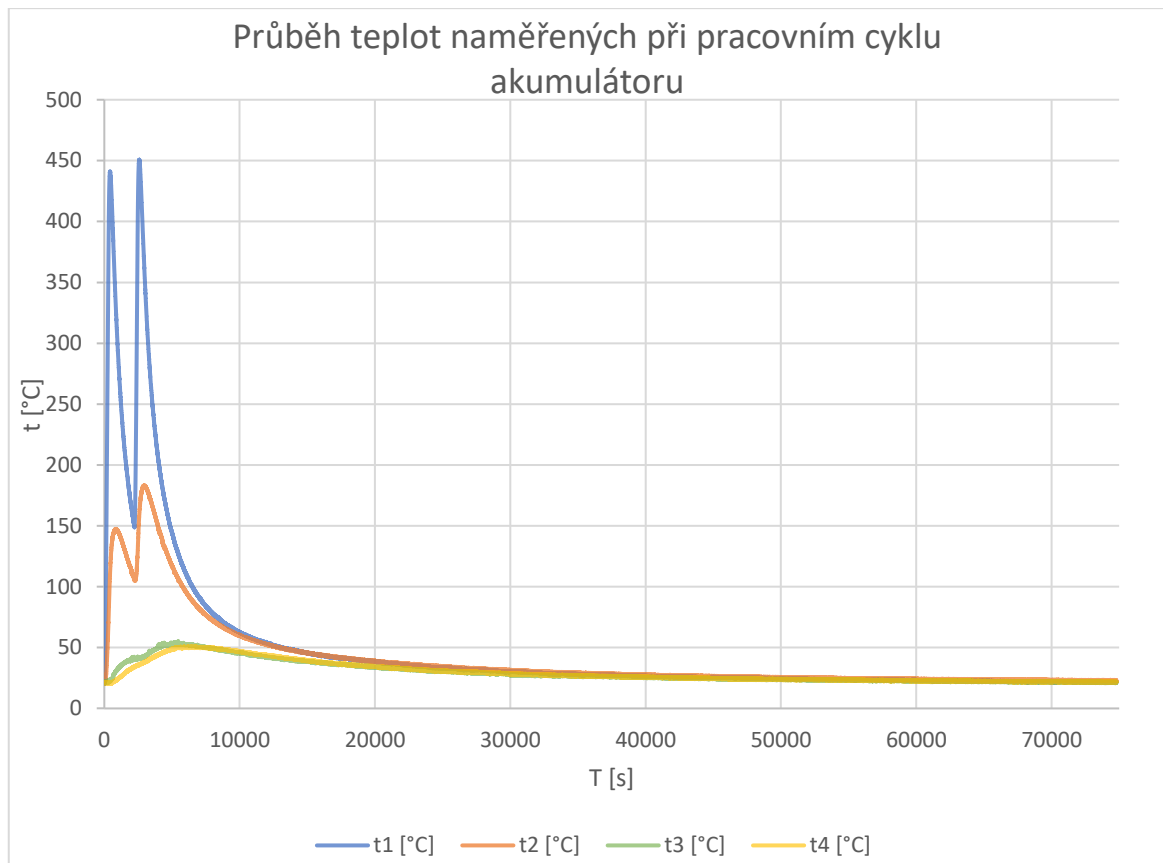
Obrázek 40 Zkompletované měřicí zařízení

#### 4.3.1 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ A DISKUZE

Při zkušebním měření akumulací média bylo pomocí každého termočláčku naměřeno přes 35000 hodnot teploty. V průběhu každých dvou sekund byla naměřena teplota na každém z termočlávků t1-t4. Data uložená v textovém souboru bylo potřeba importovat do programu MS Excel, ve kterém bylo třídění a zpracování dat provedeno.

Teplota referenčního termočláčku (t4), při které je ukončena fáze nabíjení byla zvolena na 50 °C.

Hodnoty z jednotlivých termočlávků naměřené v průběhu pracovního cyklu byly vyneseny do závislosti teploty na čase (Obrázek 41). Přestože topná spirála byla při teplotě 350 °C vždy odpojena ze sítě, maximální teplota na jejím povrchu dosáhla 450,75 °C. Z grafu vyplývá, že k dosažení požadované teploty na referenčním termočláčku došlo již po dvou cyklech ohřevu.

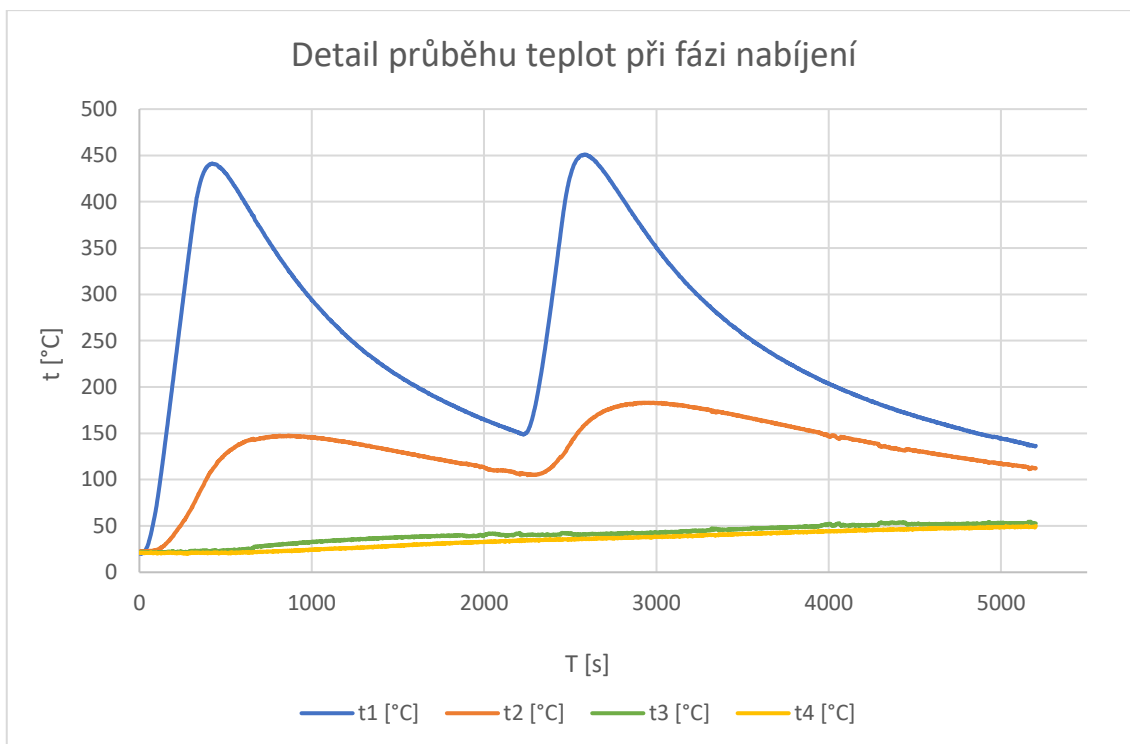


Obrázek 41 Graf závislosti teploty na čase v průběhu pracovního cyklu akumulátoru

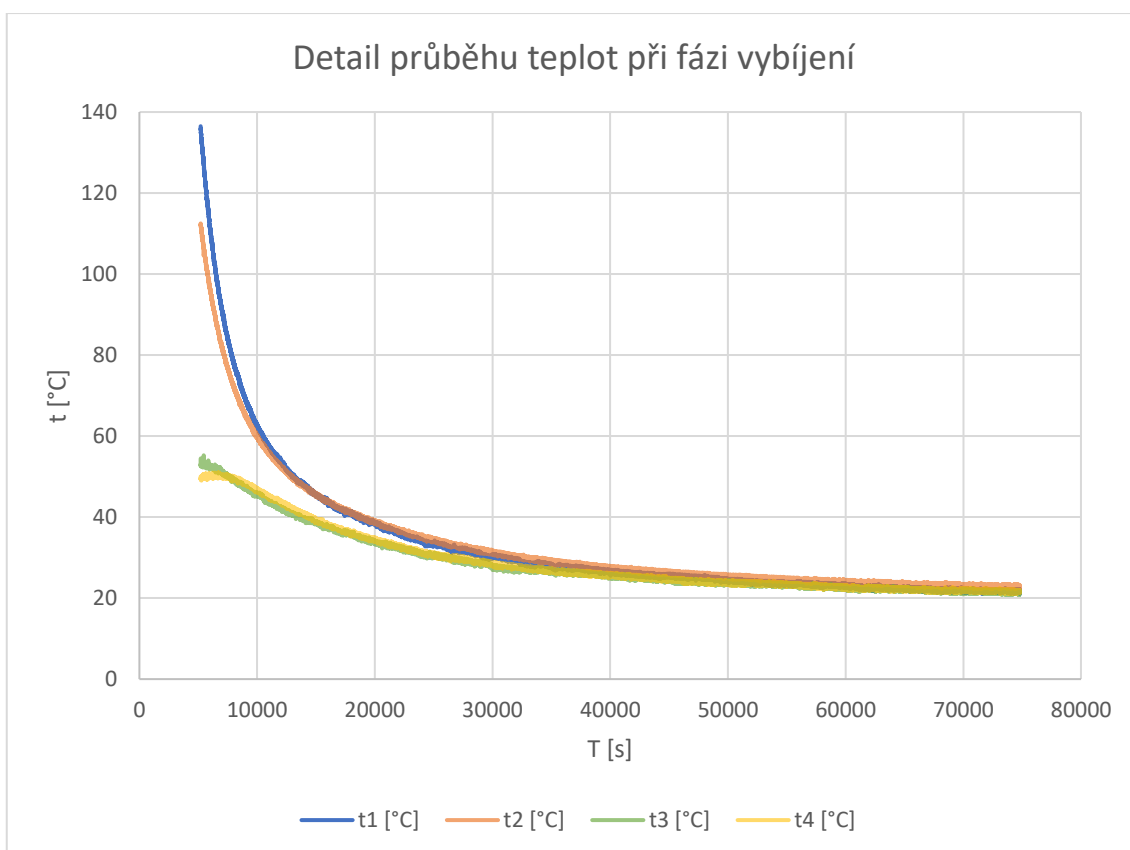
Graf závislosti teploty na čase byl rozdělen na fázi nabíjení a vybíjení (viz. Obrázek 42 a 43).

Celkový čas fáze nabíjení byl 86,7 minut. Aktivní ohřev topnou spirálou probíhal celkem přibližně 500 sekund, tedy něco kolem 8,33 minut, což je přibližně 9,5 % fáze nabíjení. Zbýlý čas fáze nabíjení docházelo pouze k vyrovnávání teplotních rozdílů. Příkon topné spirály je 500 W. Během aktivního ohřevu bylo spotřebováno přibližně 69 Wh, což je asi 249 kJ.

Fáze vybíjení probíhala 19,33 hodin, než došlo k ochlazení akumulárního média na teplotu okolí. To je přibližně 14x více než fáze nabíjení. Na všech termočláncích vydržela teplota nad 35 °C po dobu 283,3 minut od začátku fáze vybíjení. To je více než trojnásobek délky fáze nabíjení.

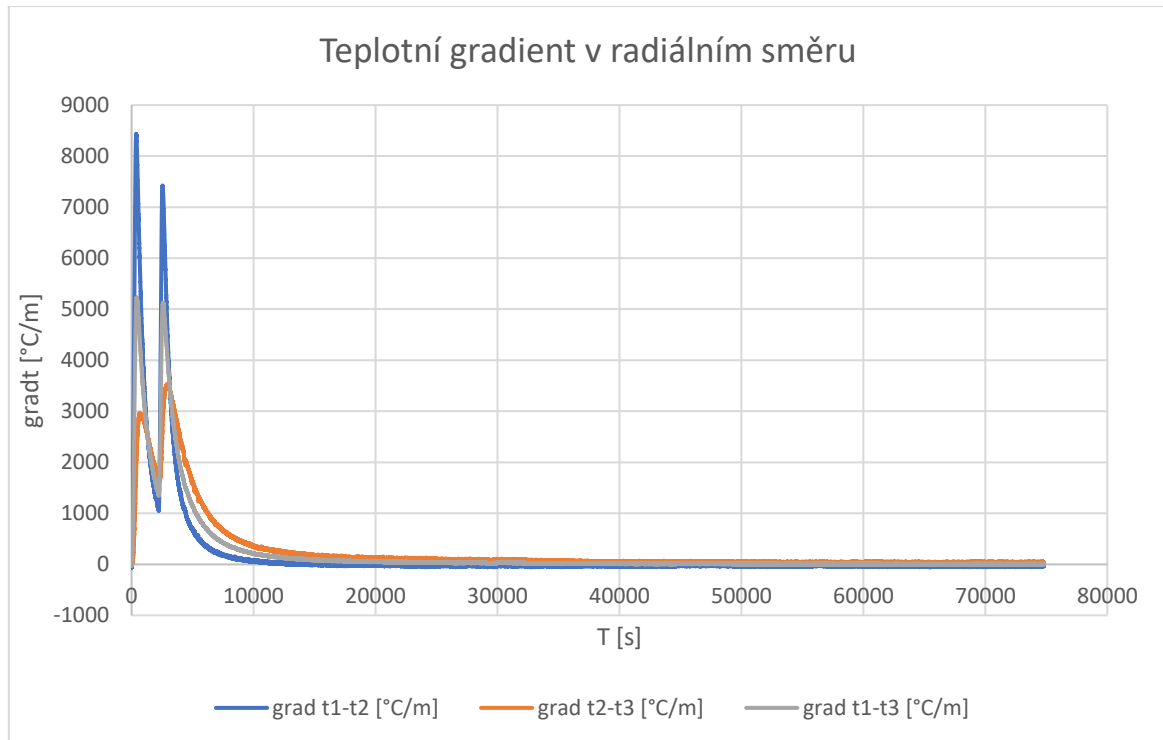


Obrázek 42 Detail na fázi nabíjení závislosti teploty na čase



Obrázek 43 Detail na fázi vybíjení závislosti teploty na čase

Z naměřených hodnot byly vypočteny hodnoty teplotního gradientu. Vypočtené hodnoty byly vyneseny do závislosti teplotního gradientu na čase. Nejvyšší hodnoty teplotního gradientu pochopitelně odpovídají časům, ve kterých bylo dosahováno maximálních teplot.



Obrázek 44 Závislost teplotního gradientu v radiálním směru na čase

Přestože byla topná spirála při dosažení teploty na termočlánek  $t_1$  350 °C okamžitě odpojena od sítě, docházelo ještě chvíli po jejím odpojení k nárůstu teploty přibližně o 100 °C až na maximální dosaženou teplotu 450 °C. Tento jev byl s největší pravděpodobností zapříčiněn nedostatečně rychlým prohříváním jádra sondy termočlánek ve vyšších teplotách.

Z toho důvodu je nutno zmínit zjištění, že tato topná spirála není nejvhodnějším tepelným zdrojem pro ohřev akumulčního média. Hlavním důvodem je velmi prudký nárůst teplot. To potvrdí i závislost teplotního gradientu v čase, který místy přesáhl 8000 °C/m.

Kvůli moc prudkému nárůstu teplot zároveň nelze simulovat případy akumulace odpadního tepla. Aby bylo možné tyto případy napodobit je třeba využít tepelného zdroje, který dokáže dlouhodobě udržovat stálou nízkou teplotu.

Funkce měřicího zařízení byla otestována měřením pracovního cyklu křemičitého písku. Z průběhu testu bylo vyvozeno, že pro větší variabilitu podmínek měření by bylo vhodné vybavení měřicího zařízení tepelným zdrojem s možností regulace.

Dalším poznatkem získaným z měření je rychlé opotřebení a snadný vznik netěsností v polystyrenovém uzávěru. Pro zlepšení životnosti a zjednodušení manipulace a přípravy měřicího zařízení byla navržena výměna uzávěru akumulací nádoby za pevnější.

## 5 ZÁVĚR

V úvodu teoretické části práce byly stručně představeny základní pojmy z termomechaniky nedílně spojené s akumulací tepelné energie, jako je teplo a jeho sdílení. Hlavním cílem teoretické části bylo představení metod akumulace tepelné energie. V teoretické části jsou dále jmenovány a popsány materiály vhodné pro jednotlivé metody akumulace. Důležité termofyzikální vlastnosti materiálů vhodných pro akumulaci byly porovnány v tabulkách v rámci stejné metody akumulace.

Hlavním cílem praktické části byla realizace měřicího zařízení pro zjišťování chování materiálů s potenciálem pro využití jako akumulační médium. Nejprve byl proveden návrh konstrukce včetně modelů jednotlivých částí měřicího zařízení (akumulační nádoba, uzávěr nádoby, obložení). Dále byly vybrány komponenty pro sestavení systému měření teploty.

Realizace měřicího zařízení byla rozdělena na dvě části. Nejprve byla z jednotlivých částí sestavena konstrukce měřicího zařízení. V druhé části byl sestaven spolehlivý systém pro měření a zápis teplotních dat.

Cílem této práce bylo napomoci průmyslu, ale i každému zájemci o energetické úspory pomocí akumulace odpadové energie a energie přebytečné ve formě tepla.

## Seznam použité literatury a zdrojů

- [1] Odpadní tepelná energie: Cesta k dekarbonizaci energetiky. *Chemmagazín*. 2023, XXXIII, 18-19.
- [2] NOŽIČKA, Jiří. *Základy termomechaniky*. 2. vydání. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2008. ISBN 978-80-01-04022-5.
- [3] ŘEHÁNEK, Jaroslav. *Tepelná akumulace budov*. Praha: ČKAIT, 2002. ISBN 80-863-6459-3.
- [4] BALAJI, C., Balaji SRINIVASAN a Sateesh GEDUPUDI. Chapter 7 - Heat exchangers. In: *Heat Transfer Engineering: Fundamentals and Techniques*. Academic Press, 2020, s. 199-231. ISBN 978-0128185032.
- [5] CABEZA, Luisa F. *Advances in Thermal Energy Storage Systems: Methods and Applications*. 2. vydání. Woodhead Publishing, 2021. ISBN 978-0-12-819888-9.
- [6] SADEGHI, Gholamabbas. Energy storage on demand: Thermal energy storage development, materials, design, and integration challenges. *Energy Storage Materials* [online]. 2022, (46), 192-222 [cit. 2023-07-31]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ensm.2022.01.017>
- [7] JOUHARA, Hussam, Alina ŽABNIEŇSKA-GÓRA, Navid KHORDEHGAH, Darem AHMAD a Tom LIPINSKI. Latent thermal energy storage technologies and applications: A review. *International Journal of Thermofluids* [online]. 2020 [cit. 2023-08-16]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijft.2020.100039>
- [8] SEYITINI, Luckywell, Basim BELGASIM a Christopher Chintua ENWEREMADU. Solid state sensible heat storage technology for industrial applications – A review. *Journal of Energy Storage* [online]. 2023, (62) [cit. 2023-08-17]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106919>
- [9] FERNANDEZ, A. I., M. MARTÍNEZ, M. SEGARRA, I. MARTORELL a L. F. CABEZA. Selection of materials with potential in sensible thermal energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells* [online]. 2010, (94), 1723-1729 [cit. 2023-08-17]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.05.035>



- [10] ALVA, Guruprasad, Yaxue LIN a Guiyin FANG. An overview of thermal energy storage systems. *Energy* [online]. 2017, (144), 341-378 [cit. 2023-08-17]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.037>
- [11] VIGNESHWARAN, K., Gurpreet Singh SODHI, Anurag GUHA, P. MUTHUKUMAR a Senthilmurugan SUBBIAH. Coupling strategy of multi-module high temperature solid sensible heat storage system for large scale application. *Applied Energy* [online]. 2020, (278) [cit. 2023-08-17]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115665>
- [12] LUGOLOLE, R., A. MAWIRE, K. A. LENTSWE, D. OKELLO a K. NYEINGA. Thermal performance comparison of three sensible heat thermal energy storage systems during charging cycles. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* [online]. 2018, (30), 37-51 [cit. 2023-08-17]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.09.002>
- [13] TAWALBEH, Muhammad, Hafsah A. KHAN, Amani AL-OTHMAN, Fares ALMOMANI a Saniha AJITH. A comprehensive review on the recent advances in materials for thermal energy storage applications. *International Journal of Thermofluids* [online]. 2023, (18) [cit. 2023-08-17]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100326>
- [14] DINÇER, Ibrahim a Marc A. ROSEN. *Thermal Energy Storage: Systems and Applications*. 3. vydání. Ontario Tech University, Canada: Wiley, 2021. ISBN 978-1-119-71315-9.
- [15] LIU, Jilei, Chaohe XU, Hao JIANG, Chunzhong LI, Lili ZHANG, Jianyi LIN a Jin WANG. Advanced Energy Storage Devices: Basic Principles, Analytical Methods, and Rational Materials Design. *Advanced Science* [online]. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2017 [cit. 2023-08-16]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1002/advs.201700322>
- [16] ANSONE, Ance, Mikelis DZIKEVICS a Aivars ZANDECKIS. Energy Accumulation Using Encapsulated Phase Change Materials with Recycled Material Components. *Energy Procedia* [online]. 2016, (95), 153-158 [cit. 2023-08-17]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.037>

- [17] QIU, Wenjuan, Yu BAI, Yutang FANG a Shuangfeng WANG. Preparation and thermal properties of novel inorganic-organic eutectic composite material with high latent heat and thermal conductivity based on aluminum sulfate salt. *Journal of Energy Storage* [online]. 2022, (55) [cit. 2023-08-17]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105364>
- [18] STRITIH, Uroš. Heat transfer enhancement in latent heat thermal storage system for buildings. *Energy and Buildings* [online]. 2003, (35), 1097-1104 [cit. 2023-08-17]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2003.07.001>
- [19] AMIN, N. A. M., M. BELUSKO, F. BRUNO a M. LIU. Optimising PCM thermal storage systems for maximum energy storage effectiveness. *Solar Energy* [online]. 2012, (86), 2263-2272 [cit. 2023-08-18]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.04.020>
- [20] KUZNIK, Frédéric, Kevyn JOHANNES, Christian OBRECHT a Damien DAVID. A review on recent developments in physisorption thermal energy storage for building applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2018, (94), 576-586 [cit. 2023-08-17]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.038>
- [21] DESAI, Fenil, Sunku Prasad JENNE, P. MUTHUKUMAR a Muhammad Mustafizur RAHMAN. Thermochemical energy storage system for cooling and process heating applications: A review. *Energy Conversion and Management* [online]. 2020, (229) [cit. 2023-08-17]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113617>
- [22] SCAPINO, Luca, Herbert A. ZONDAG, Johan VAN BAEL, Jan DIRIKEN a Camilo C.M. RINDT. Sorption heat storage for long-term low-temperature applications: A review on the advancements at material and prototype scale. *Applied Energy* [online]. 2017, (190), 920-948 [cit. 2023-08-17]. Dostupné z: doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.148>
- [23] YUAN, Yanping, Haiquan ZHANG, Fan YANG, Nan ZHANG a Xiaoling CAO. Inorganic composite sorbents for water vapor sorption: A research progress. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2016, (54), 761-776 [cit. 2023-08-17]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.069>

- [24] PÉREZ-BOTELLA, Eduardo, Susana VALENCIA a Fernando REY. Zeolites in Adsorption Processes: State of the Art and Future Prospects. *Chemical Reviews* [online]. 2022, (122), 17647 - 17695 [cit. 2023-08-17]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00140>
- [25] HENNINGER, S. K., G. MUNZ, K. F. RATZSCH a P. SCHOSSIG. Cycle stability of sorption materials and composites for the use in heat pumps and cooling machines. *Renewable Energy* [online]. 2011, (36), 3043-3049 [cit. 2023-08-17]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.032>
- [26] ARIMI, Hasila, Devrim AYDIN, Zhang YANAN, Gorkem OZANKAYA, Xiangjie CHEN a Saffa RIFFAT. *Review on the recent progress of thermochemical materials and processes for solar thermal energy storage and industrial waste heat recovery* [online]. 2018, (14), 44-69 [cit. 2023-08-17]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1093/ijlct/cty052>
- [27] PRASAD, J. Sunku, P. MUTHUKUMAR, Fenil DESAI, Dipankar N. BASU a Muhammad M. RAHMAN. A critical review of high-temperature reversible thermochemical energy storage systems. *Applied Energy* [online]. 2019, (254) [cit. 2023-08-17]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113733>
- [28] KANT, K. a R. PITCHUMANI. Advances and opportunities in thermochemical heat storage systems for buildings applications. *Applied Energy* [online]. 2022, (321) [cit. 2023-08-17]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119299>
- [29] JOE, Erin Sam a D. Arumuga PERUMAL. Combustion modelling of sequential combustion in steam-methane reformation (SMR) furnace using adiabatic flamelet generated manifold. *Thermal Science and Engineering Progress* [online]. 2023, (40) [cit. 2023-08-17]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.101795>
- [30] *Heinrich Kipp Werk: 1.4301 nerezová ocel* [online]. [cit. 2023-08-18]. Dostupné z: <https://www.kipp.cz/cz/cs/Slu%C5%BEby/P%C5%99ehled-materi%C3%A1l%C5%AF/nerezov%C3%A1-ocel/1-4301-nerezov%C3%A1-ocel.html>

- [31] *Tepelné izolace nejvyšší kvality: Tepelná izolace typ AB* [online]. [cit. 2023-08-18]. Dostupné z: <https://www.dape.cz/tepelna-izolace-tyt-ab>
- [32] *MAX6675: Cold junction compensated K-thermocouple to digital converter* [online]. Maxim Integrated Products, 2021 [cit. 2023-08-18]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/MAX6675.pdf>
- [33] *Arduino: What is Arduino?* [online]. 2018 [cit. 2023-08-18]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>
- [34] *Den Braven: Technický list: TL 06.13F Montážní lepidlo Fix Flex* [online]. Úvalno 353, Česká republika, 2021 [cit. 2023-08-18]. Dostupné z: [https://dokumentace.denbraven.cz/?p=03+Lepidla%2FMonta%CC%81z%CC%8Cni%CC%81+lepidlo+FIX+FLEX%2FTechnicky%CC%81+list&dl=TL+06\\_12F+rev+2++Monta%CC%81z%CC%8Cni%CC%81+lepidlo+FIX+FLEX+%281%29.pdf](https://dokumentace.denbraven.cz/?p=03+Lepidla%2FMonta%CC%81z%CC%8Cni%CC%81+lepidlo+FIX+FLEX%2FTechnicky%CC%81+list&dl=TL+06_12F+rev+2++Monta%CC%81z%CC%8Cni%CC%81+lepidlo+FIX+FLEX+%281%29.pdf)
- [35] *Isover EPS 70F* [online]. Smrčkova 2485/4, 180 00 Praha 8 – Libeň, Česká republika: Saint-Gobain Construction Products CZ [cit. 2023-08-18]. Dostupné z: <https://www.isover.cz/dokumenty/technicke-listy/tl-2019-isover-eps-70f-cz.pdf>

## Seznam obrázků

Obrázek 1 Schéma rekuperačního výměníku.....	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
Obrázek 2 Schéma regeneračního výměníku.....	15
Obrázek 3 Schéma směšovacího výměníku na příkladu chladicí věže .....	16
Obrázek 4 Energetický cyklus tepelného akumulátoru .....	17
Obrázek 5 Porovnání akumulační schopnosti jednotlivých typů úložných médií: TCM - materiály pro termochemickou akumulaci, PCM - materiály pro akumulaci pomocí latentního tepla, Voda - představuje porovnání s materiály pro akumulaci pomocí tepelné kapacity .....	18
Obrázek 6 Závislost uložené energie na teplotě.....	19
Obrázek 7 Závislost uložené energie na teplotě pro latentní akumulaci tepla .....	24
Obrázek 8 Fáze nabíjení, skladování a vybití sorpčního akumulátoru .....	34
Obrázek 9 struktura zeolitů.....	35
Obrázek 10 Přeložit.....	37
Obrázek 11 Model návrhu akumulační nádoby .....	43
Obrázek 12 Model návrhu akumulační nádoby ve tří čtvrtinovém řezu.....	43
Obrázek 13 Reflexní izolační folie Typ AB.....	44
Obrázek 14 Model návrhu uzávěru akumulační nádoby (rozměry v mm).....	45
Obrázek 15 Model návrhu obložení akumulační nádoby (rozměry v mm). .....	46
Obrázek 16 Model návrhu uzávěru obložení akumulační nádoby (rozměry v mm). .....	47
Obrázek 17 Model návrhu konstrukce akumulačního měřicího zařízení (rozměry v mm).....	47
Obrázek 18 Pohled do útrob modelu návrhu konstrukce akumulačního měřicího zařízení.....	48
Obrázek 19 Fotografie zvolené topné spirály. ....	49

Obrázek 20 Fotografie termočlátku typu K.....	50
Obrázek 21 Převodníkový modul MAX6675 [dratek cz]. .....	51
Obrázek 22 Vývojová deska Arduino Uno Rev3 .....	52
Obrázek 23 Bočnice delší.....	54
Obrázek 24 Bočnice kratší. ....	54
Obrázek 25 Dno.....	54
Obrázek 26 Víko. ....	54
Obrázek 27 Pohled na uzavřené obložení. ....	55
Obrázek 28 Pohled dovnitř obložení.....	55
Obrázek 29 Boční pohled na akumulární nádobu .....	57
Obrázek 30 Pohled shora na akumulární nádobu .....	57
Obrázek 31 Pohled dovnitř akumulární nádoby .....	57
Obrázek 32 Pohled na dno akumulární nádoby.....	57
Obrázek 33 Pohled na izolaci pláště akumulární nádoby.....	59
Obrázek 34 Pohled na izolaci dna akumulární nádoby .....	59
Obrázek 35 Pohled na nádobu s uzávěrem .....	60
Obrázek 36 Zapojení termočlátku typu K k modulu MAX6675 .....	61
Obrázek 37 Zapojení měřicího systému.....	62
Obrázek 38 Kód pro čtení teplotních dat.....	63
Obrázek 39 Pohled do akumulární nádoby ve fázi přípravy měření .....	65
Obrázek 40 Zkompletované měřicí zařízení .....	66
Obrázek 41 Graf závislosti teploty na čase v průběhu pracovního cyklu akumulátoru .....	67
Obrázek 42 Detail na fázi nabíjení závislosti teploty na čase .....	68
Obrázek 43 Detail na fázi vybíjení závislosti teploty na čase.....	68

Obrázek 44 Závislost teplotního gradientu v radiálním směru na čase ..... 69

## **Seznam tabulek**

Tabulka 1 Porovnání tepelné vodivosti materiálů při teplotě 20 °C.....	13
Tabulka 2 Porovnání důležitých vlastností akumulčních materiálů pro metodu tepelné kapacity .....	23
Tabulka 3 Porovnání důležitých vlastností organických akumulčních materiálů pro metodu latentního tepla.....	29
Tabulka 4 Porovnání důležitých vlastností anorganických akumulčních materiálů pro metodu latentního tepla .....	32
Tabulka 5 Porovnání materiálů pro akumulaci pomocí chemické reakce.....	41
Tabulka 6 Soupiska polystyrenových desek s rozměry.....	53
Tabulka 7 Soupiska svařované konstrukce .....	56
Tabulka 8 Rozměry přístřihů folie Typu AB.....	58



## **Seznam příloh**

Příloha 1: výpočtový excel