



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**  
**ENERGETICKÝ ÚSTAV**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
ENERGY INSTITUTE

# AKUMULACE TEPLA V SOLÁRNÍCH TEPELNÝCH SOUSTAVÁCH

HEAT STORAGE IN SOLAR THERMAL SYSTEMS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**PETR SEDMIDUBSKÝ**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**Ing. PAVEL CHARVÁT, Ph.D.**

BRNO 2014



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2013/14

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Petr Sedmidubský

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Akumulace tepla v solárních tepelných soustavách**

v anglickém jazyce:

### **Heat storage in solar thermal systems**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Sluneční záření je nejvydatnějším zdrojem obnovitelné energie, který je na Zemi k dispozici, a solární tepelné systémy jsou nejrozšířenější formou využití této energie. Protože potřeba tepla ve většině případů neodpovídá době slunečního svitu, je třeba teplo získané ze slunečního záření akumulovat (ukládat), s možností pozdějšího využití, kdy sluneční záření není k dispozici nebo jeho intenzita není dostatečná. Existuje celá řada způsobů akumulace tepla v solárních tepelných systémech.

Cíle bakalářské práce:

Cílem bakalářské práce je provést rešerši různých způsobů akumulace tepla u solárních tepelných systémů a následně provést jejich porovnání z hlediska použití, tepelné kapacity, tepelných ztrát a dalších faktorů.

Seznam odborné literatury:

Duffie, J.A., Beckman, W.A., Solar engineering of thermal processes. Wiley, 2006, ISBN:  
978-0-471-69867-8


Články v časopisech a sbornících konferencí zabývají se problematikou akumulace tepla v  
solárních systémech.

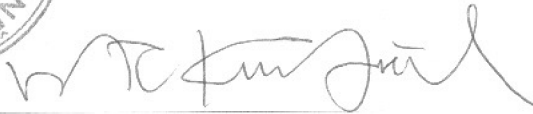
Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Charvát, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 18.11.2013



  
doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.  
Ředitel ústavu

  
prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan

## Abstrakt

Tato bakalářská práce pojednává o akumulaci tepla v solárních tepelných systémech. První část je věnována solární energii a problémům s jejím využitím. Druhá část se věnuje solárním tepelným systémům a obecně nás seznámí s jejich konstrukcí a způsoby jejich dělení. Třetí část se věnuje jednotlivým typům solárních tepelných systémů. U jednotlivých druhů uvádí princip jejich fungování, výhody, nevýhody a možnosti jejich případného praktického využití.

## Klíčová slova

teplo, akumulace, solární tepelný systém, solární energie

## Abstract

This bachelor's thesis deals with heat storage in solar thermal systems. The first part of the thesis is devoted to the solar energy. The problems with its use are described in this part. The second part is devoted to solar thermal systems. Various types and designs of solar thermal systems are described in this part. The third part of thesis is devoted to the various types of solar thermal systems. The principle of their operation, advantages, disadvantages and the possibility of their practical use for each type is describe in this part.

## Keywords

heat, accumulation, solar thermal storage, solar energy

---

## Bibliografická citace

SEDMIDUBSKÝ, P. *Akumulace tepla v solárních tepelných soustavách*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 43s. Vedoucí práce Ing. Pavel Charvát, Ph.D..

---

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Akumulace tepla v solárních tepelných soustavách vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu literatury.

V Brně dne 28. května 2014

.....  
Petr Sedmidubský

---

## Poděkování

Děkuji tímto Ing. Pavlu Charvátovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

---



## Obsah

1 Úvod.....	10
2 Solární energie.....	11
2.1 Získatelná energie ze solární energie.....	11
2.2 Způsoby využití solární energie.....	12
3 Solární tepelný systém.....	13
3.1 Části solárního tepelného systému.....	13
3.2 Solární kolektor.....	13
3.3 Zásobník tepla.....	16
3.3.1 Rozdělení zásobníků tepla podle časového parametru.....	16
3.3.2 Rozdělení zásobníků podle pohybu zásobní látky.....	17
3.3.3 Rozdělení zásobníků podle způsobu uložení termální energie.....	17
3.4 Dělení solárních tepelných systémů.....	18
3.4.1 Rozdělení podle použití solární energie.....	18
3.4.2 Rozdělení zásobníků podle způsobu přenosu tepla v solárním tepelném systému.....	18
3.4.3 Rozdělení zásobníků podle teplotonosné látky.....	19
4 Zásobníky na bázi akumulace citelného tepla.....	20
4.1 Stratifikace.....	21
4.2 Vodní tepelné zásobníky.....	22
4.3 Štěrkové zásobníky.....	23
4.4 Zásobníky zvodeň.....	25
4.5 Zemní zásobníky.....	26
4.6 Solární jezera.....	27
4.7 Příklady materiálů použitých v zásobnících citelného tepla.....	28
5 Zásobníky na bázi akumulace latentního tepla.....	29
5.1 Požadované vlastnosti PCM.....	30
5.2 Dělení PCM materiálů.....	31
5.2.1 Pevná/kapalná změna skupenství.....	32
5.2.2 Změna fáze v pevném skupenství.....	32
5.3 Mikroobalování PCM.....	33
6 Chemické zásobníky.....	34
6.1 Zásobníky využívající chemická reakce.....	35
6.2 Zásobníky využívající sorpční reakce.....	36
6.2.1 Uzavřený systém sorpčního zásobníku.....	36
6.2.2 Otevřený systém sorpčního zásobníku.....	37
7 Závěr.....	39
8 Použitá literatura.....	40
9 Seznam použitých symbolů a zkratk.....	43

# 1 Úvod

V posledních letech roste zájem o obnovitelné zdroje energie na úkor fosilních zdrojů energie jako ropa a uhlí. Důvodem je omezení emisí skleníkových plynů a snaha o zvýšení energetické nezávislosti. Solární energie patří mezi obnovitelné zdroje energie s největším potencialem využitím, přesto má řadu problémů. Hlavní problém solární energie je nerovnoměrnost v její dostupnosti, která je způsobena střídáním dne a noci, střídáním ročních období a vlivy počasí. Řešením tohoto problému je uložit (akumulovat) energii kdy je jí dostatek a použít jí v době nedostatku. K nejjednoduššímu způsobu jak uchovat solární energii je akumulovat teplo v solárních tepelných soustavách.

Úvodní část bakalářské práce bude o solární energii a kolik jí můžeme využít pro akumulaci tepla. Další část bude obecně o solárních tepelných soustavách, o tom z čeho se skládají a jak se rozdělují. Hlavní část bakalářské práce bude pojednávat o jednotlivých způsobech akumulace tepla v solárních tepelných soustavách, o tom jak se od sebe liší a o jejich možném použití.

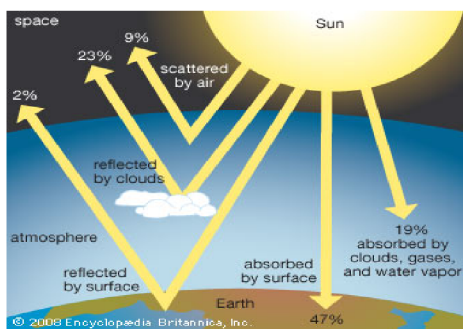
## 2 Solární energie

Solární energie je velký nevyčerpatelný zdroj energie. Množství energie které Země od Slunce přijímá je přibližně 174 PW (1 PW=10<sup>15</sup> W). Přepočtem této hodnoty na 1m<sup>2</sup> vnější atmosféry dostaneme tzv. „Solární konstantu“. Je rovna zhruba 1361 W/m<sup>2</sup>, mění se kvůli eliptické dráze Země kolem Slunce o ± 3 %. Teoreticky by mohla solární energie pokrýt veškeré energetické potřeby. Kromě množství energie má solární energie i další plusy. Například ten, že na rozdíl od fosilních paliv se jedná o čistý zdroj energie který sám o sobě neznečišťuje přírodu. A za druhé, že je zdarma dostupná v adekvátním množství skoro ve všech částech světa kde žijí lidé [2,9].

Velký problém solární energie je to že se jedná o slabý zdroj energie z pohledu výkonu na plochu. I v nejteplejších místech na Zemi se málokdy dostane tok slunečního záření nad 1 kW/m<sup>2</sup> a celkové záření v průběhu dne se v nejlepší případě pohybuje kolem 7 kWh/m<sup>2</sup>. Solární energie poskytuje z technologického pohledu nízká čísla využitelnosti, kvůli tomu je potřeba velké plochy pro příjem solární energii zvláště pro některá použití, což vede ke zvýšení výsledné ceny. Dalším problémem solární energii je, že se její dostupnost výrazně mění v průběhu času. Rozdíl v dostupnosti v průběhu dne je důsledkem střídání dne a noci. V průběhu roku jsou rozdíly v dostupném solárním záření způsobeny oběhem Země kolem Slunce a sklonem rotační osy Země. Důsledek tohoto obíhání se v naší zeměpisné šířce mění délky dne a noci. Další nerovnoměrnost v množství přijaté energie jsou způsobeny vlivy počasí. Na povrchu Země nelze solární energii považovat za stálý rovnoměrný zdroj energie, je tedy nutné energii ukládat když je dostupná a použít jí v době kdy není [2,9].

### 2.1 Získatelná energie ze solární energie

V atmosféře probíhá mnoho procesů které mění charakter a redukují intenzitu solárního záření. Probíhající děje lze rozdělit na rozptyl, absorpci a odraz. Množství dopadajícího záření ovlivňuje absorpce. Rozptyl a odraz způsobují změnu směru solárního záření. Rozptyl v atmosféře způsobují hlavně molekuly vzduchu, vodních par a aerosoly. Hlavní vliv na odražení solárního záření mají mraky a prach v atmosféře. Energií záření v atmosféře pohlcuje ozon, oxid uhličitý, vodní pára a prach. Na obr.1 lze vidět jednotlivé pochody a jejich vliv na solární záření. Z obrázku lze vyčíst že k povrchu Země dosáhne průměrně jen polovina z celkového solárního záření [3].

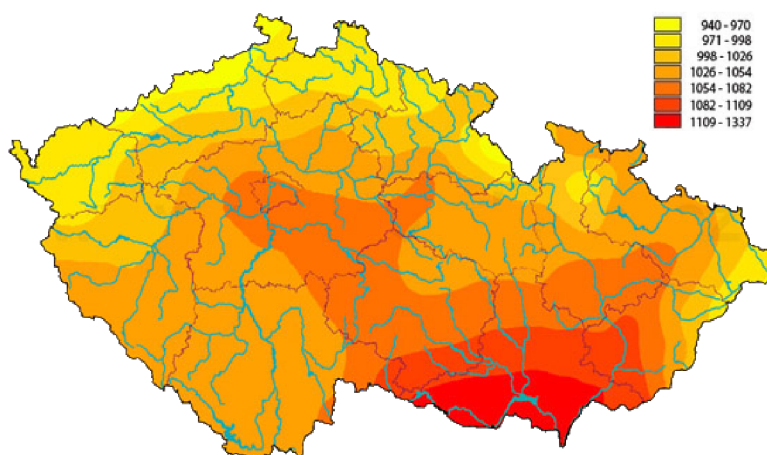


Obr. 1 Průchod solární energie atmosférou [4]

Globální záření je celkové množství solárního záření dopadajícího na povrch Země. Skládá se z přímého záření a difuzního záření. Přímé záření jde přímo ze Slunečního disku a lze u něho měnit směr pro získání vyšší intenzity záření a tím i vyšších teplot. Další část globálního záření je difuzní záření („světlo oblohy“), díky tomuto záření není obloha černá přes den. Vznikne během cesty atmosférou kdy se záření odráží a rozptyluje takže dojde k proměně části přímého záření na difuzní záření. Toto záření nemá jasně daný směr, nelze ho usměrňovat, má horší možnosti využití [3].

Jakou část z globálního záření tvoří difuzní záření závisí na atmosférických podmínkách. Při jasné obloze když je Slunce vysoko na obloze tvoří difuzní záření kolem 15 % z globálního záření, jak Slunce klesá na obloze tak roste podíl difuzního záření. Pro Slunce 10° nad horizontem dosáhne difuzní záření na 40 %. V zamračené dny může tvořit až 100 %. Výsledný podíl difuzního záření je spojen i s množstvím pohlceného přímého záření.

V ČR dosáhne dopadající solární energie na hodnotu zhruba 950-1340 kWh na 1m<sup>2</sup> za rok. Z toho dopadne 75 % v období duben až říjen. V oblastech se znečištěnou atmosférou je nutné počítat s hodnotami o 5-10% nižšími a v oblastech s nadmořskou výškou 700-2000 m s hodnotami o 5% vyššími [5].



Obr. 2 Roční úhrn globálního záření v ČR (kWh/m<sup>2</sup>) [5]

## 2.2 Způsoby využití solární energie

Využití solární energie lze rozdělit na přímé a nepřímé.

- **Přímé** – využívá se přímo solární energie. Používá se pro získání tepla pomocí solárních tepelných systémů nebo pro získání elektřiny z fotovoltaických systémů.
- **Nepřímé** – využívá se energie vzniklá přeměnou solární energie. Například potencialní energie vody, oceánů, kinetická energie vzdušných mas, chemická energie biomasy.

## 3 Solární tepelný systém

Největší produkce solární energie je v letním období kolem poledne při jasné obloze. Spotřeba energie je větší během zimního období s vrcholy ráno a večer kdy lidé spotřebovávají více energie, například na vytápění a ohřev vody. Časový rozdíl mezi maximem přijaté a odevzdané energie lze vyřešit uskladněním přebytečné energie v tepelném zásobníku a jejím následném použití při nedostatku přímo dostupné energie. Zásobníky tepla kromě uložení energie pomáhají tepelnému systému zlepšit jeho výkonnost a zvýšit jeho spolehlivost. Což je velmi důležité pro nestálý zdroj energie jako je sluneční záření.

### 3.1 Části solárního tepelného systému

Kolektor a zásobník tepla jsou základními částmi solárního tepelného systému. Kolektor slouží k pohlcení slunečního záření a jeho přeměně na tepelnou energii, kterou následně předá teplonosné látce a ta přenesou tepelnou energii do zásobníku tepla kde se energie uloží do doby její potřeby. Zásobník tepla slouží k uskladnění tepla do doby jeho potřeby [2,11].

Po kolektoru požadujeme dobré optické vlastnosti tak aby byl schopen získat co nejvíce tepla. Po zásobníku tepla požadujeme vysokou hustotu akumulovaného tepla, která znamená menší objem a nižší cenu, dále schopnost rychle přenést teplo a dobrou stabilitu pro dlouhodobé použití [2].

Solární tepelné systémy zpravidla obsahují regulátor, který slouží k řízení nabíjení systému tak aby bylo co nejefektivnější (např. v noci odpojí kolektor od zásobníku a tím zabrání tomu aby se ohříval kolektor a teplonosná látka pomocí tepla uloženého v zásobníku tepla.). Pro zkompletování solárního tepelného systému jsou dále třeba různá pomocná zařízení jako jsou ventily, expanzní nádoba, potrubí apod [6,11].

### 3.2 Solární kolektor

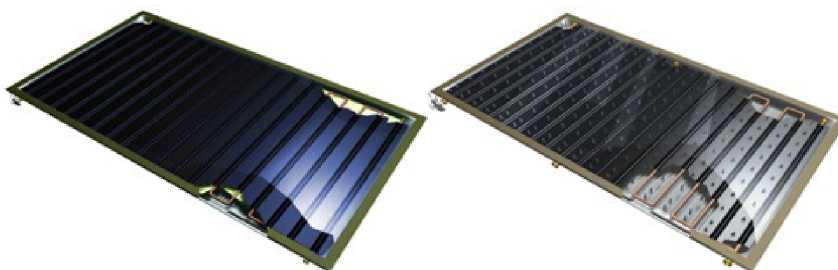
Solární kolektor se skládá z absorberu který slouží k pohlcování sluneční energie a dalších částí jako zrcadla, čočky, skla, izolace které zlepšují jeho vlastnosti a umožňují různá použití. Konstrukce kolektoru určuje jaké teploty a účinnosti získávání solární energie dosáhneme a zda se využije i difuzní část celkového záření. Pro posouzení vlastností kolektorů se určuje selektivita, jako poměr pohltivosti slunečního záření k emisivitě. Absorbér je obvykle matně černý kvůli splnění požadavku aby pohltil co nejvíce solární energie [7,11].

### Dělení solárních kolektorů podle konstrukce

- **Nekoncentrační kolektory** - plocha na kterou dopadá sluneční záření je shodná s koncentrační plochou. Obvykle jsou pevně připevněny. Je nutnost zvolit vhodnou orientaci ke Slunci.
- **Koncentrační kolektory** - v kolektoru jsou použita lineární Fresnelovy čočky nebo zrcadlové plochy (žlabová zrcadla), které soustřeďují přímě sluneční záření do absorberu, díky koncentrování slunečních paprsků lze dosahovat vyšších teplot.

### Příklady nekoncektračních kolektorů

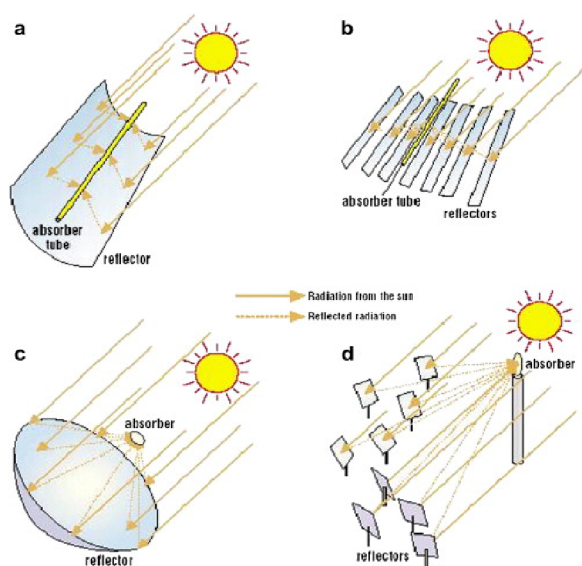
- **Ploché nekrytý kolektor** - nejčastěji plastová rohož kterou proudí voda, velké ztráty závislé na rychlosti větru, používá se k ohřevu vody v bazénech [7].
- **Ploché neselektivní kolektor** – zasklený deskový kolektor a s kovovým absorberem se spektrálně neselektivním povlakem (černý pohltivý nátěr). V zimním období má vysoké ztráty kvůli sálání absorberu. Příliš se nepoužívá, pouze pro sezonní přehřev vody při nízké teplotní úrovni [7].
- **Ploché selektivní kolektor** – zasklený deskový kolektor se selektivním povlakem (cermetové vrstvy) umožňuje využití i difuzní části globálního záření. Kolektor má izolaci na bočních a zadní straně. Nejčastěji používaný krytý typ kolektoru, pro celoroční solární ohřev vody a vytápění [7].
- **Ploché vakuový kolektor** - zasklený deskový kolektor se selektivním povlakem a tlakem v absorberu nižším než atmosférický, absolutní tlak 1-10 kPa. Má nižší ztráty oproti plochému selektivnímu kolektoru díky absenci vzduchu. Lze dosáhnout vyšších teplot kolem 100 °C. Pro celoroční solární ohřev vody a vytápění, případné průmyslové aplikace [7].
- **Trubkový jedностěnný vakuový kolektor** – kolektor má ploché spektrálně selektivní absorber, který je umístěn ve vakuové skleněné trubce (absolutní tlak  $< 10^3$  Pa). Má nízké tepelné ztráty a velké vedení tepla do teplotnosné kapaliny. Kvůli vyšší ceně se používá pro kombinované soustavy pro vytápění či průmyslové vysokoteplotní aplikace [7].



Obr. 3 Konstrukce plochého atmosférického a plochého vakuového kolektoru [7]

### Příklady koncentračních kolektorů

- **Heliostatické pole kolektorů** - skládá se z mnoha plochých zrcadel (heliostat), která usměřují solární záření do centrální věže. Pro zajištění směru odrazu je poloha zrcadel řízená automatickým systémem. Teplo přijaté centrální věží je přeneseno teplonosnou látkou (např. Voda/pára, syntetické oleje, tekutý sodík a roztavené soli [9]).
- **Parabolický talířový kolektor** – používá řadu zrcadel s parabolickým talířovým tvarem (tvar satelitního talíře), které směřují solární záření do společného ohniska (absorbéru). Teplo získané přijímačem je použité ke generování elektřiny v malém motoru. Polohu zrcadel je nutné měnit ve třech osách [9].
- **Parabolický žlabový kolektor** – používají se parabolická žlabová zrcadla která mohou usměřovat solární záření v rovnoběžném směru s přímkou tvořenou symetrickou osou zrcadla a společným ohniskem (absorbérem). Lze dosáhnout teplot 350-400 °C. Polohu zrcadel je potřeba měnit ve dvou osách [9].
- **Fresnelův kolektor** – používá Fresnelovy reflektory přimontované blízko u země které odráží solární záření do společného ohniska (absorbéru). V porovnání s parabolickým žlabovým kolektorem má výhodu v nižším zatížení větrem a nevýhodu v nižší výsledné koncentraci [9,31].



Obr. 4 Schémata koncentračních kolektorů a) parabolický žlabový b) Fresnelův c) parabolický talířový d) heliostat [31]

### 3.3 Zásobník tepla

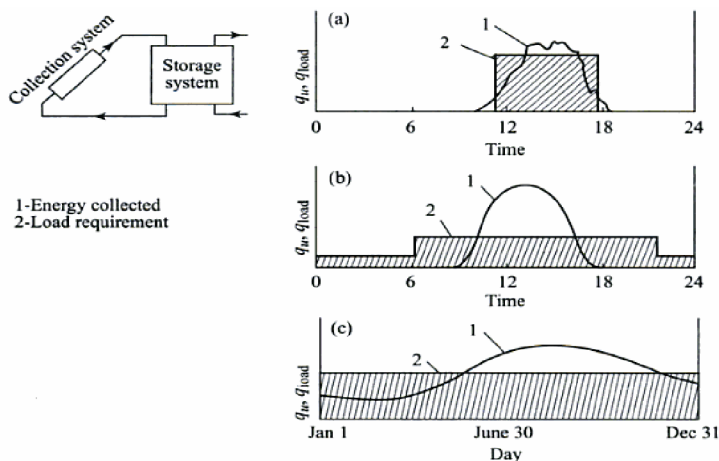
Slouží k uchování energie získané z kolektoru a tím pomáhá vyrovnat nabídku a poptávku po energii. Zásobník se nejčastěji skládá ze tří částí a to samotné látky pro akumulaci tepla, mechanismu pro přenos tepla a skladovacího systému.

Příklad použití zásobníku je u ohřevu vody v domácnosti. Největší množství vody se v domácnosti spotřebuje ráno a večer tedy v době kdy je množství dopadající solární energie výrazně menší oproti množství dopadající v poledních hodinách. Řešením je tedy získat energii během dne a uchovat ji pro použití večer a ráno.

Množství potřebné energie se mění v průběhu dne, týdne tak i roku. Stejně tak se mění i množství energie kterou můžeme získat ze slunečního záření. Proto aby se pokryla poptávka po energii je potřeba použít zásobníky. Při přebytku energie se uloží do zásobníku a když je přijímané energie nedostatek použije se uskladněná energie ze zásobníku.

#### 3.3.1 Rozdělení zásobníků tepla podle časového parametru

- **Nárazový zásobník** – akumuluje energii jen po krátkou dobu (hodiny), protože energie je potřeba jen po dobu shodnou s dobou záření slunce. Slouží k vyrovnání krátkodobých výpadků [2].
- **Denní zásobníky** - použijeme pokud potřebujeme pokrýt poptávku v průběhu dne až několika dní [2].
- **Dlouhodobý zásobník (sezonní zásobník)** – slouží k pokrytí poptávky energie v průběhu roku. Slouží k uložení tepla v průběhu léta pro následné využití v zimě kdy množství získatelné energie je nedostatečné [2].



Obr. 5 Příklad časového využití zásobníku tepla a) nárazový b) denní c) dlouhodobý [2]



### 3.3.2 Rozdělení zásobníků podle pohybu zásobní látky

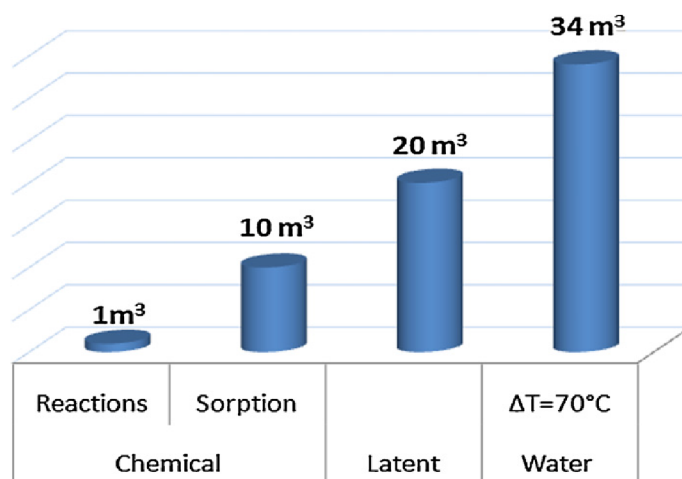
- **Aktivní** – látka pro akumulaci tepla obíhá v systému, dochází k nucené cirkulaci materiálu [10].
  - **Uzavřená smyčka** – látka pro akumulaci tepla proudí solárním kolektorem [10].
  - **Otevřená smyčka** – teplonosná látka v kolektoru a látka pro akumulaci tepla se liší (dva okruhy) [10].
- **Pasivní** – teplonosná látka prochází skrz zásobník a odebírá nebo ukládá energii do látky pro akumulaci tepla [10].

### 3.3.3 Rozdělení zásobníků podle způsobu uložení termální energie

- **Citelné teplo** - dochází k ohřevu látky v kapalném nebo tuhém skupenství beze změny skupenství. Množství uložené energie závisí na velikosti změny teploty, druhu a množství látky [10].
- **Latentní teplo** - ohříváním látky dojde ke změně skupenství. Množství uložené energie závisí na hmotnosti a na latentním teple spojeném se změnou skupenství [10].
- **Chemickou reakcí** – solární energie se využije k pohánění chemické reakce. Výsledek reakce se následně uloží a použije pro získání tepla zpět obrácenou reakcí [10].

Dělí se dále na

- chemickou reakci
- sorpční reakci



Obr. 6 Porovnání potřebného objemu pro uložení 10 000 MJ tepla [10]

Zásobníky citelného a latentního tepla se běžně používají zatímco chemické zásobníky jsou hlavně předmětem výzkumu pro vysokoteplotní použití.

## 3.4 Dělení solárních tepelných systémů

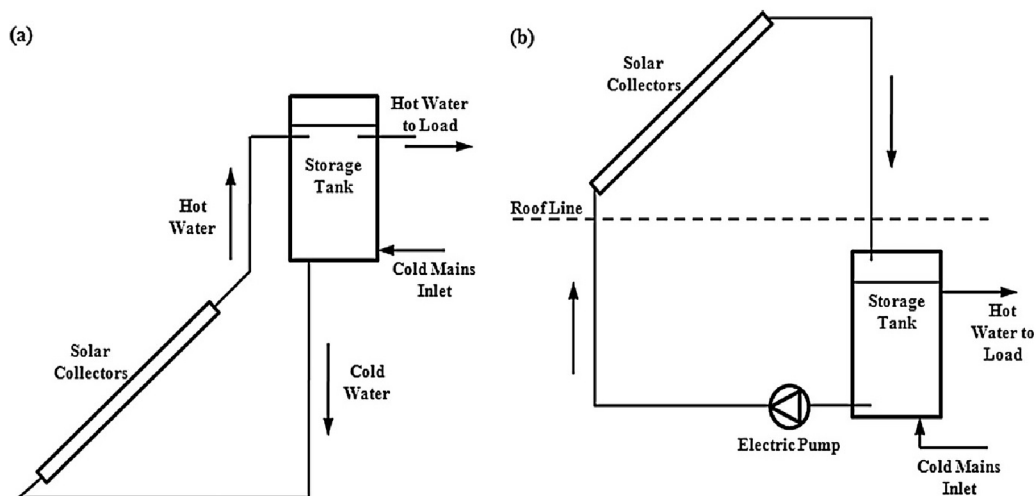
### 3.4.1 Rozdělení podle použití solární energie

- **Prostorové vytápění** – vytápění velkých budov a vytápění budov na dálku [12].
- **Prostorové chlazení** – ochlazování velkých budov a ochlazování budov na dálku. Chlazení a klimatizace patří k největším konzumentům energie v budovách. Místo elektřiny se použije solární teplo jako zdroj pro teplem poháněné chladicí stroje [12].
- **Procesní ohřev pro průmysl** – zhruba 27 % z celkové spotřebované energie v Evropě je spotřebováno ve formě tepla v průmyslu [30]. Podle požadované teploty se určí typ kolektoru který se použije [12].
- **Procesní chlazení pro průmysl** – energie se používá k ochlazování v průmyslovém nasazením [12].
- **Ohřev užitkové vody** – většinou pro rodinné domy, kde se solární teplo uloží v lokálním zásobníku a následně roznáší potrubím na teplou vodu [12].
- **Ohřev bazénové vody** – solární energie se využívá k udržení vody v bazénu na určité teplotě. Zásobník tepla je samotný bazén. Používá se nekrytý plastový absorbér kvůli nízké ceně a nízkým požadavkům na získané teplo [12].

Kombinace solárního tepelného systému s tepelným čerpadlem. V období kdy by se jinak dosahovalo nedostatečných teplot z kolektoru se použitím tepelného čerpadla dostaneme na dostatečné vysoké hodnoty teplot [12].

### 3.4.2 Rozdělení zásobníků podle způsobu přenosu tepla v solárním tepelném systému

- **Pasivní systém** – proudění teplonosné látky probíhá přirozenou konvekcí (pasivně). Jedná se o jednoduchý systém neobsahující čerpadla či ventilátory [2].
- **Aktivní systém** – k proudění teplonosné látky se používají čerpadla nebo ventilátory. Jedná se o složitější systém s větším rizikem poruchy. Výhoda oproti pasivnímu systému je lepší možnost ovládní [2].



Obr. 7 Schéma solárního zásobníku tepla a) pasivní b) aktivní [10]

### 3.4.3 Rozdělení zásobníků podle teplotnosné látky

- **Kapalinové** – používá se ve většině případů. Nejčastěji voda kvůli nízké ceně, velké tepelné kapacitě a rychlosti vedení tepla. Pro celoroční provoz je nutné použít nemrzoucí směs vody. Čistou vodu lze použít v oblastech kde teploty neklesají pod 0 °C, nebo při použití systému „drain-back“ kdy se kontroluje teplota absorbéru a když klesne pod určitou hodnotu tak se voda vypustí z kolektoru a napustí zpět až dosáhne dostatečné hodnoty [2].
- **Vzduchové** – v ČR pouze pro cirkulační vytápění, kvůli nižší tepelné kapacitě je nutné pro dostatečný tepelný průtok použít potrubí o větším průměru [2].

## 4 Zásobníky na bázi akumulace citelného tepla

U zásobníku na bázi akumulace citelného tepla se energie ukládá změnou teploty kapalné či tuhé látky u které nedojde ke změně skupenství látky. V těchto systémech se používají různé druhy látek pro uložení energie. Například tekuté látky jako voda, oleje a určité roztavené soli nebo tuhé látky jako štěrk, žáruvzdorné materiály případně kombinace tekutých a tuhých látek. Plynné látky se nepoužívají kvůli nízké hustotě a z toho plynoucí nízká hodnota akumulovaného tepla na jednotku objemu.

Nevýhoda pro zásobníky citelného tepla je že dochází ke snížení vedení tepla s tím jak se teplota látky v zásobníku přibližuje teplotě teplonosné látky, tepelná vodivost závisí na rozdílu teplot.

**Uloženou energii v zásobníku tepla využívající citelné teplo lze vyjádřit rovnicí [14]**

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} m \cdot c_p \cdot dT = m \cdot c_{ap} \cdot (T_f - T_i) \quad (1)$$

Kde:  $Q$  [J] je uložené teplo,  $T_i$  [°C] je počáteční teplota,  $T_f$  [°C] je konečná teplota,  $m$  [kg] je hmotnost pracovní látky,  $c_p$  [J/kg·K] je měrná tepelná kapacita zásobní látky pro danou teplotu,  $c_{ap}$  je střední hodnota měrné tepelné kapacity mezi teplotami  $T_i$  a  $T_f$ .

Např: 1 kWh tepla lze uložit pomocí ohřevu 1000 kg vody o 0,86 °C nebo 10 kg o 86 °C.

Tab. 1 Příklady materiálů použitých v zásobnících citelného tepla a jejich vlastnosti [8]

<b>Materiál</b>	<b>Operační teplota [°C]</b>	<b>Měrná tepelná kapacita [kJ/kgK]</b>	<b>Hustota (kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>Voda</b>	0-100	4,19	1000
<b>NaCl</b>	200-500	0,85	2160
<b>Syntetický olej</b>	250-350	2,3	900
<b>Křemíková cihla</b>	200-1200	1,15	3000
<b>Beton</b>	200-400	1,1	2400
<b>Litina železa</b>	200-700	0,5	7900
<b>Kámen (štěrk)</b>	0-800	0,84	1600

**Jaký typ zásobníku citelného tepla se použije závisí na [10]**

- kapacitě energie použitého materiálu na jednotku objemu či hmotnosti
- teplotnímu rozsahu ve kterém bude zásobník pracovat
- vlastnostech teplonosné látky jako toxicita, korozivnost, tepelná kapacita
- schopnosti stratifikace v zásobníku
- požadované tepelné vodivosti materiálu (rychlost přidání nebo odebrání tepla)
- materiálech zásobník použitých v závislosti na daném zásobním materiálu
- možnosti kontroly tepelných ztrát ze zásobníku
- ceně

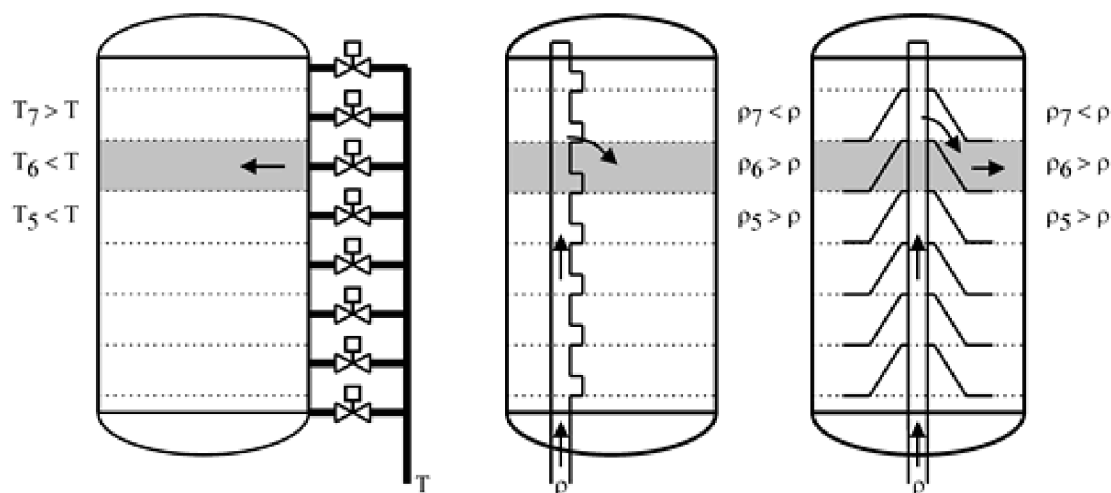
## 4.1 Stratifikace

Stratifikace je důležitá pro zásobníky citelného tepla zvláště ty využívající vodu. Stratifikací rozumíme rozvrstvení látky v zásobníku podle teploty. Například v zásobníku vody je nejteplejší voda v horní části a nejstudenější v dolní, což je umožněno změnou hustoty spojenou se změnou teploty [1,10].

Nedostatečná stratifikace neboli že v celém zásobníku bude mít látka stejnou teplotu, znamená těžší nabíjení zásobníku když je téměř nabit a složitější získávání tepla když je skoro vybit. Důvodem je, že rychlost vedení tepla závisí na rozdílu teplot [1,10].

Potřebujeme-li získat vodu teploty  $T_1$  tak je potřeba dosáhnout této teploty jen ve vrchní části zásobníku ze které čerpáme vodu. Teplota ve zbytku zásobníku tedy může být nižší, tím se sníží ztráty tepla. Další výhodou stratifikace je že kolektory nemusí nutně poskytovat tak vysoké teploty, díky tomu dosáhneme vyšší efektivity sběru.

Stratifikace zvyšuje množství využitelné energie. Například ze stratifikovaného vodního tanku můžeme získat o 38% více tepla než ze zcela promíchaného vodního tanku. Pro lepší stratifikaci je nutné snížit míchání kapaliny v zásobníku. Například změnou tvaru zásobníku, jako je úprava pro dosažení větší výšky kapaliny v zásobníku. Další možností je přivádět vodu do zásobníku z různých vstupů tak aby přiváděná voda byla stejně teplá jako voda v zásobníku. Další zlepšení je možné segmentací zásobníku [10].



Obr. 8 Příklad řízeného teplotního vrstvení [15]

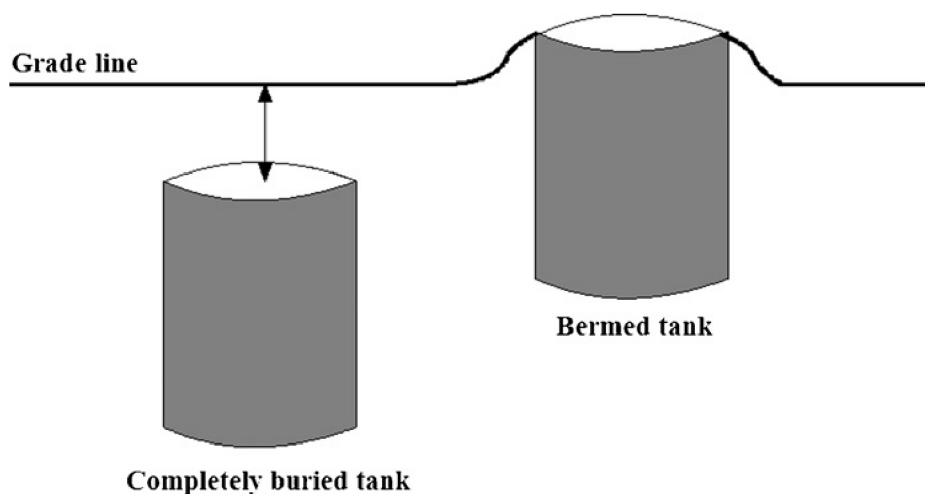
## 4.2 Vodní tepelné zásobníky

V zásobnících citelného tepla se nejčastěji používá voda jako látka pro akumulaci tepla. Důvod popularity vody je dán její velkou tepelnou kapacitou ( $4,2 \text{ kJ/kg}\cdot\text{k}$ ), vysokou hustotou, schopností dobře vést teplo a nízkou cenou. Nevýhoda je v omezeném rozsahu teplot, při  $0^\circ\text{C}$  tuhne v led a při  $100^\circ\text{C}$  vzniká pára. Pro domácí použití tento rozsah ale nepředstavuje překážku jelikož horní teplota je dostatečně velká jak pro vytápění domácnosti tak i ohřev vody. Kvůli bezpečnosti se skladuje nejčastěji voda v rozsahu teplot  $20\text{-}80^\circ\text{C}$ .

Navíc typický plochý kolektor produkuje vodu zhruba odpovídající horní teplotě rozsahu. Schopnost vody dobře vést teplo je výhodou a to v schopnosti přijímat nebo odevzdávat velké hodnoty tepla, ale kvůli této vlastnosti vody je zároveň zateplení zásobníku složitější.

Vodní zásobníky jsou vyrobeny z nerezové oceli nebo zesíleného betonu obklopeného silnou izolací. Vodní tepelné zásobníky jsou obvykle zakopány v podzemí pro omezení tepelných ztrát ze zásobníku do okolí, nebo umístěny na střeše či v okolí budovy pro omezení tepelných ztrát z potrubí přenášející teplotonosnou látku. U zakopaného systému se půda obklopující zásobník ohřeje a tím se zároveň sníží vodivost tepla kvůli změně vlhkosti, která se změnila zároveň s gradientem teploty [10].

Místo zásobníku zcela v podzemí je vhodné použít tzv. „Bermedův zásobník“ který má vrchní část v rovině se zemí. Dosahuje sice nižších provozních vlastností oproti zásobníku zcela v podzemí, ale celkově je vhodnější díky nižší počáteční ceně dané potřebou menšího vykopu a lehčí údržbou díky lepší dostupnosti zásobníku [10].



Obr. 9 Porovnání úplně zakopaného zásobníku a Bermedova zásobníku [10]

#### Příklad vodního tepelného zásobníku

**Solární systém EuroSol XXL** - je určen pro celoroční provoz a může pokrýt až 85 % potřeby tepla na ohřev vody a až 30 % potřeby tepla na vytápění v domácnosti se 4-5 členy. Používá ploché vakuové kolektory s plochou  $5,64 \text{ m}^2$  a zásobník teplé vody o objemu 300 l. Cena systému je 72800 Kč bez DPH. Návratnost investice by měla být od 4 let provozu a životnost systému by měla být kolem 30let [25].

**Vodní tepelný zásobník v Hamburg-Bramfeld Německo** – využívá dlouhodobý betonový zásobník tepla zakopaný v zemi s objemem  $4500 \text{ m}^3$ . Postaven v roce 1996. Do roku 2009 byl nabíjen solárními kolektory o ploše  $3000 \text{ m}^2$  poskytující 2,1 MW. V roce 2009 se provedli úpravy tak že může přijímat teplo i ze spalovny odpadů. Poskytuje energii pro 124 řadových domů. Efektivita systému je 49 % kvůli ztrátám tepla které jsou ve skutečnosti 4krát větší než původně předpokládané. Cena solárního tepla je 256 € za MWh (7000 Kč za MWh). Pro porovnání cena tepla z plynu je kolem 2000 Kč za MWh. Větší obdobný projekt ve Friedrichshafenu se s cenou dostal na 158 € za MWh (4400 Kč za MWh) [26,17].

### 4.3 Štěrkové zásobníky

K uložení tepla se používají malé pevné částice jako oblázky, štěrk nebo cihly s případnou kombinací těchto materiálů a vody.

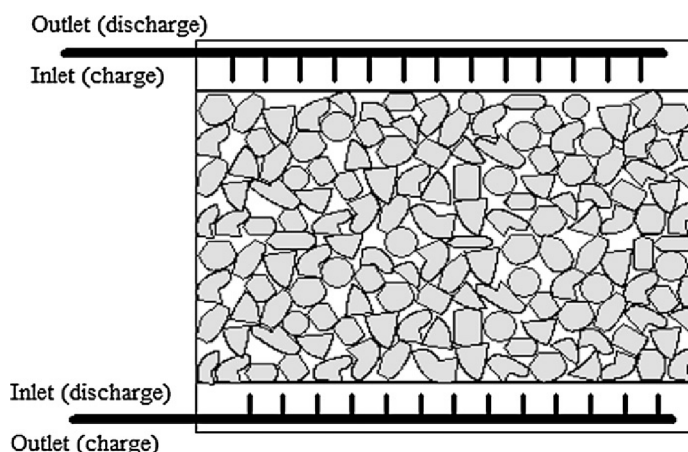
Přes štěrk obvykle proudí teplotná látka, jako je voda nebo vzduch. Voda nejen přenáší teplo ale pomáhá i zvýšit výslednou kapacitu zásobníku. Vzduch jen přenáší teplo a nepomáhá k ukládání tepla. Použitím vzduchu ale můžeme dosáhnout vyšších teplot pro uložení tepla [10].

Důvod použití malých částic oproti velkým je kvůli zvětšení celkového povrchu a tím zlepšení vedení tepla. Rychlé vedení tepla má pozitivní vliv na stratifikaci zásobníku. Tím že přiváděná teplotonosná látka rychle předává teplo štěrku, tak u vstupního otvoru je štěrk rychle ohřát na teplotu rovnou teplotě teplotonosné látky. Díky rychlému vedení tepla se teplotonosná látka poměrně rychle ochladí, tak že štěrk u výstupního otvoru nepředá téměř žádné teplo a odcházející teplotonosná látka bude téměř stejně teplá jako původní teplota štěrku.

Při nabíjení dochází k postupnému zvětšování množství štěrku o teplotě teplotonosné látky až po případné úplné nabití kdy má štěrk v celém zásobníku stejnou teplotu. Při vybíjení je výstupní teplota téměř konstantní, štěrk postupně chladne na opačném konci než kde se odebírá.

Pro uložení tepla ve vzduchovém štěrkovém zásobníku je potřeba třikrát větší prostor než u čistě vodního zásobníku kvůli nižší tepelné kapacitě štěrku oproti vodě. Pro kombinaci štěrku a vody je průměrně potřeba zásobníku o polovinu větší než u čistě vodního zásobníku [10].

Pro krátkodobé zásobníky je z ekonomického hlediska vhodnější systém štěrkového zásobníku s vzduchovým kolektorem oproti vodnímu zásobníku s vodním kolektorem. Pro dlouhodobé zásobníky je často problém s nedostatkem prostoru v obydlených oblastech. To souvisí i s případnou izolací a zakopáním u kterých jejich cena přímo závisí na velikosti. Štěrkový zásobník by se tedy měl pro sezonní zásobník použít jen v geologicky vhodných oblastech [10].



Obr. 10 Schéma štěrkového zásobníku [10]

### Příklad štěrkového zásobníku

**Kombinace štěrku a vody ve Steinfurtu, Německo** – k uskladnění energie se používá kombinace vody a štěrku o objemu 1500 m<sup>3</sup>. K získání energie slouží ploché kolektory o ploše 510 m<sup>2</sup>. Slouží k ohřívání obytného prostoru o ploše 3800 m<sup>2</sup>. Nejvyšší teplota v zásobníku je 90 °C. Cena MWh tepla je 424 € (11500 Kč) [28].

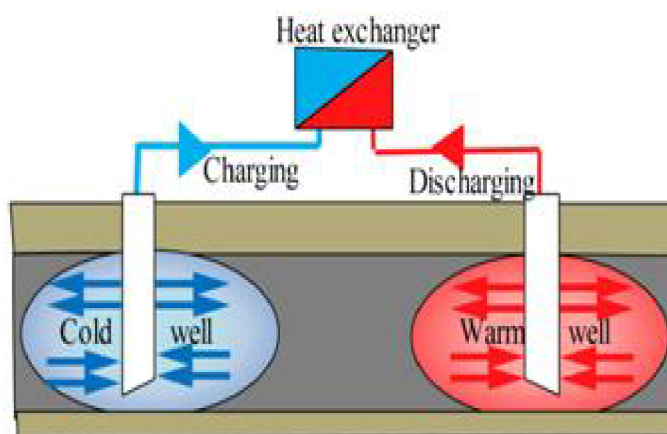


## 4.4 Zásobníky zvodeň

Tento druh zásobníku je vhodný pro dlouhodobé zásobníky díky své cenové efektivitě. Zvodeň je podzemní těleso tvořeno vodou-propustnými materiály jako jsou kameny, štěrk, písek či bahno. Ze zvodně lze získávat jednoduše vodu pomocí vyvrtané studny. Pro použití zvodně jako citelný zásobník tepla jsou potřeba minimálně dvě studny, teplá a studená [17,10].

Energie se ukládá do geologického útvaru zvodně a podzemní voda se využívá jako teplotně nosná látka. Při nabíjení se podzemní voda čerpá ze studené studny, následně se ohřeje solární energií a poté napumpuje zpět do zvodně pomocí teplé studny. Při vybíjení voda proudí obráceně [17].

Tento druh zásobníku je považován za nejvhodnější pro velkokapacitní systémy. Množství uložitelné energie závisí na dovolené teplotní změně, tepelné vodivosti a přirozeném proudění podzemních vod. Voda se ohřívá oproti jiným zásobníkům na nízkou teplotu, kvůli nemožnosti izolace a hrozbě ovlivnění kvality pitné vody [10,17].



Obr. 11 Tepelný zásobník tepla zvodeň [16]

### Příklad zásobníku zvodeň

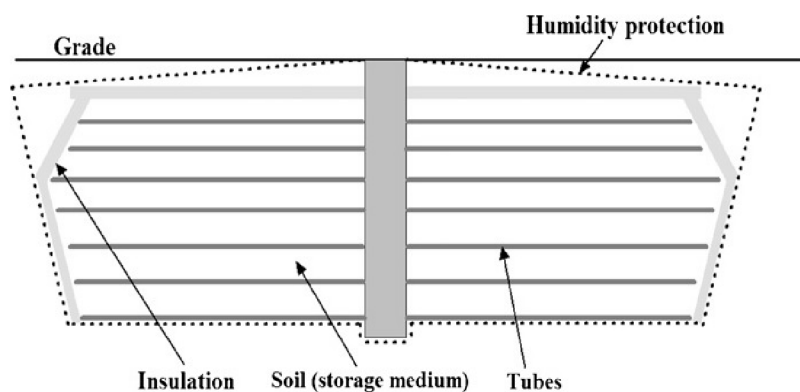
**Rostock Německo** – pro uložení energie v systému se používají studny dosahující do hloubky 15 a 30 m. Objem zásobníku zvodeň je 20000 m<sup>3</sup>. Zásobník byl postaven v roce 1999. Je nabíjen solárními kolektory o ploše 980 m<sup>2</sup> a má účinnost 63 %. Poskytuje energii pro 108 bytů o ploše 7000 m<sup>2</sup>. Nejvyšší teploty které se dosahuje je 50 °C. Cena solárního tepla je přibližně 255 € za MWh (7000 Kč) [27,17].

## 4.5 Zemní zásobníky

Jedná se o typ podzemního termálního zásobníku obdobně jako zásobník zvodeň. V tomto případě samotná půda slouží k akumulaci tepla, jedná se o pasivní systém půda se nepohybuje. Použití půdy má výhodu v nízké ceně systému, dáno tím že půda je zadarmo [17].

Pro uložení tepla se vykope nebo vyvrtá půda pro vložení vertikálních nebo horizontálních trubek kterými proudí voda přenášející teplo z nebo do půdy. Kvůli nízkému vedení tepla půdy se používá pomocný vodní zásobník kvůli pokrytí špiček v poptávce po teple. Dále se mezera mezi trubkou a stěnou vrtu vyplňuje materiálem s vysokou tepelnou vodivostí pro zlepšení vedení tepla [17].

Pro uložení stejného množství tepla jako vodní zásobník tepla je potřeba 3 až 5násobně více prostoru. Významnou cenovou položkou pro sestavení tohoto typu zásobníku je výkop či vyvrtávání půdy. Trubky, zásobníky případně izolace a vodní zábrany použité v určitých zásobnících rovněž zvyšují výslednou cenu. Zemní zásobníky se používají pro dlouhodobé zásobníky v oblastech kde lze zabránit vlivům vody (rozpínání půdy) [10,17].



Obr. 12 Schéma zemního zásobníku [10]

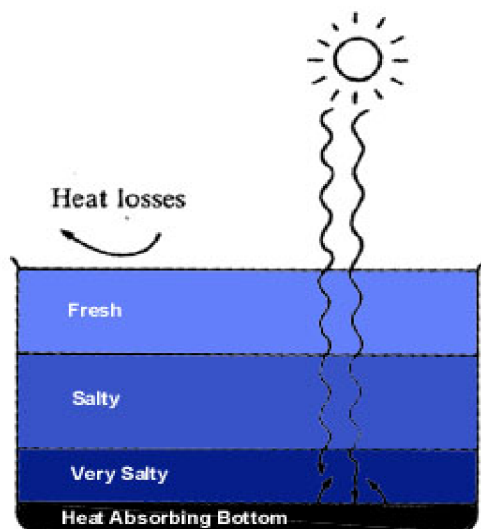
### Příklad zemního zásobníku

**Zemní zásobník z Neckarsulm, Německo** – má objem je  $63400 \text{ m}^3$ . Teplo se získává pomocí plochým kolektorům o ploše  $5000 \text{ m}^2$  a systém následně využije zhruba 50 % solární energie. Poskytuje teplo pro obydlené prostory o ploše  $20000 \text{ m}^2$ . Cena za MWh je 172 € (4700 Kč) [28].

## 4.6 Solární jezera

Pro uložení solární energie se využívá povrchové vody v jezerech ať už přírodních nebo umělých. Solární jezera obsahují roztoky solí. V jezerech vznikne gradient slanosti, s větší koncentrací soli na dně jezera. Gradient slanosti způsobí sníženou přirozenou tepelnou konvekci v jezeře a spolu s tím že energii slunečního záření pohlcuje převážně dno jezera tak získané teplo zůstane u dna jezera. Chladnější voda na povrchu funguje následně jako izolace. Množství přijatého tepla závisí převážně na pohltivosti dna jezera, pro zvětšení množství získaného tepla je tedy vhodné ztmavit dno jezera [10,18].

U tohoto systému je nutná údržba jezera podobně jako u bazénů, kontroluje se růst řas a bakterií. Teplo se získává pomocí proudící vody v potrubí položeném na dně jezera. Tento typ úložiště je vhodný pro oblasti s nízkými sněhovými srážkami a dostatečným volným prostorem pro případná jezera. První návrhy tohoto typu zásobníku pochází z Izraele z 60. let 20. století [10].



Obr. 13 Schéma solárního jezera [18]

### Příklad zásobníku solární jezero

**Solární jezero v Bhuj, Indie** – jezero má 6000 m<sup>2</sup>. Bylo postaveno v roce 1987 a sloužilo k poskytování tepla mlékárně Kutch. Systém fungoval do roku 2000 kdy vlivem zemětřesení mlékárna Kutch zkrachovala. Teplá voda na dně jezera ohřívala užitkovou vodu na teplotu 70 °C a využila se jako přehřátá voda do bojlerů na mytí a čištění. Solární jezero bylo schopno dodávat 80000 l horké vody do mlékárny [29].

## 4.7 Příklady materiálů použitých v zásobnících citelného tepla

Olej se používá místo vody, když je potřeba vyšší teploty v zásobníku. Případnému širšímu nahrazení zabraňuje vyšší cena oleje [10].

Roztoky soli se pro zásobníky používají ve starých zatopených solných dolech které slouží jako zásobník nebo v solárních jezerech [10].

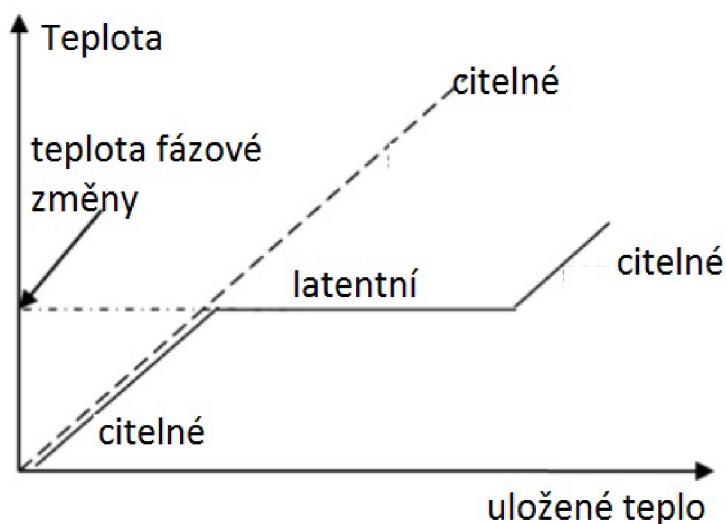
Různé pevné materiály pro ukládání při vyšší teplotě pro následné generování elektřiny. Požadavky jsou na stabilitu a kapacitu materiálu. Např. grafit, beton, železo nebo oxid železitý [10].

Beton ve struktuře budov nebo přidáný ve formě desek je používán jako krátkodobý citelný zásobník pro ohřev budov. Pro dlouhodobý zásobník je vhodnější použít levné materiály jako zeminu nebo kameny [10].

## 5 Zásobníky na bázi akumulace latentního tepla

U zásobníků latentního tepla se hlavní část přiváděného tepla ukládá pomocí změny skupenství látky s pomocnou akumulací citelného tepla viz obr. 14. Při změně skupenství dojde ke změně vnitřní energie. Energie změny skupenství se nazývá latentní, protože se neprojevuje změnou teploty.

Zásobník latentního tepla může dosáhnout vyšší koncentrace uloženého tepla oproti zásobníku citelného tepla. Je to způsobeno že při změně skupenství roste uložené teplo za konstantní teploty, uložené latentní teplo způsobí odskok od křivky citelného tepla. Většinou mají materiály pro zásobník latentního tepla horší tepelnou kapacitu oproti materiálům zásobníků citelného tepla a jsou tedy výhodnější jen v určitém rozsahu teplot kolem teploty fázové přeměny. Obecně může být latentní zásobník menší a lehčí oproti zásobníkům citelného tepla. Další výhodou je jeho schopnost podávat tepelnou energii za konstantní teploty kvůli změně skupenství za konstantní teploty. Zásobníky latentního tepla se používají nejčastěji v zemědělství a pro nárazové případně denní zásobníky. Důvodem je složitá správa systému a nejistota dlouhodobých vlastností použitých materiálů pro uložení tepla [21,10].



Obr. 14 Porovnání dvou materiálů kdy jeden z nich projde změnou skupenství [14]

K akumulaci se využívá nejčastěji změna látky z pevného do kapalného skupenství a to kvůli malé změně objemu oproti změnám látky z kapalného do plynného nebo z pevného do plynného skupenství, těchto změn skupenství téměř nevyužíváme. Občas se využívá změny fáze v pevném stavu kdy dojde ke změně vnitřní struktury látky ale nedojde ke změně skupenství [15].

Energie se ukládá při změně skupenství například pevného do kapalného kdy je materiálu potřeba přivést teplo pro změnu skupenství. Energie se získává při změně skupenství kapalného do pevného, kdy se uvolňuje teplo. Materiály které se používají pro ukládání energie a využívají přitom změnu skupenství mají zkratku PCM (Phase Change Material).

**Změnu tepla lze popsat rovnicí [21]**

$$Q = \int_{T_1}^{T_t} m \cdot c_{ps} \cdot dT + m \cdot l_t + \int_{T_t}^{T_2} m \cdot c_{pl} \cdot dT \quad (2)$$

Kde  $Q$  [J] je uložené teplo,  $T_1$  [°C] je počáteční teplota,  $T_2$  [°C] je konečná teplota,  $T_t$  [°C] je teplota fázové přeměny,  $m$  [kg] je hmotnost pracovní látky,  $c_{ps}$  [J/kg·K] je měrná tepelná kapacita látky pro akumulující tepla v pevném skupenství,  $c_{pl}$  [J/kg·K] je měrná tepelná kapacita látky pro akumulaci tepla v kapalném skupenství,  $l_t$  [J/kg] je skupenské teplo tání

Integrály v rovnici popisují citelnou změnu tepla materiálu pro jednotlivé fáze. Změnu tepla vlivem fázové přeměny popisuje pouze prostřední člen.

## 5.1 Požadované vlastnosti PCM

Volba ideálního materiálu se změnou skupenství závisí na požadovaných termofyzikálních, kinetických a chemických vlastnostech

**Požadované tepelné vlastnosti [21]**

- změna skupenství probíhající v požadované teplotní oblasti
- velká hodnota skupenského tepla
- velká hodnota citelného tepla (pro poskytnutí významného přidaného citelného zásobníku)
- vysoká tepelná vodivost (pro obě fáze)

**Požadované fyzikální vlastnosti [21]**

- malá změna objemu při fázové přeměně
- nízký tlak par (teplonosné látky) při provozní teplotě (k snížení problémů se skladováním)
- vhodná fázová rovnováha (poměr mezi původní a novou fází)
- shodná teplota tání materiálu (může být problém u směsí)
- vysoká hustota

**Požadované kinetické vlastnosti [21]**

- žádné přehlazování (změna skupenství by měla začít probíhat při dosažení teploty fázové změny)
- velká rychlost nukleace
- adekvátní rychlost krystalizace

**Požadované chemické vlastnosti [21]**

- dlouhodobá chemická stabilita
- kompletně vratný cyklus tání/tuhnutí
- kompatibilita s použitými konstrukčními materiály
- žádné korozivní účinky na konstrukční materiály
- netoxičnost, nehořlavost a nevybušnost kvůli bezpečnosti

## 5.2 Dělení PCM materiálů

**Dělení podle pracovní teploty [21]**

- **Nízko teplotní PCM** – změna skupenství pod 15 °C. Používají se pro vzduchovou klimatizaci a v potravinářském průmyslu.
- **Středně teplotní PCM** – změna skupenství v rozsahu 15-90 °C. Používají se nejčastěji. Využívá se pro solární, medicínské, textilní, elektronické aplikace.
- **Vysoko teplotní PCM** – změna skupenství nad 90 °C. používají se v průmyslových a leteckých aplikacích.

**Dělení podle druhu přeměny [21]**

- **Pevná/plynná změna skupenství** – nevyužívá se
- **Kapalná/plynná změna skupenství** – nevyužívá se
- **Pevná/tekutá změna skupenství** – používá se nejčastěji
- **Změna fáze v pevném skupenství**

## 5.2.1 Pevná/kapalná změna skupenství

### **Organické PCM**

Výhodou je že většina je chemicky stabilních, nekorozivních. Dochází u nich k malým podchlazením. Mají vysokou hodnotu latentního tepla na jednotku hmotnosti a nízký výparný tlak. Nevýhodou je nízká tepelná vodivost, velké změny v objemu a hořlavost [11,21].

Př: parafinové vosky, mastné kyseliny, alkoholy, estery

### **Anorganické PCM**

Mají výhodu ve velké hodnotě latentního tepla na jednotku objemu, velkém vedení tepla, nehořlavosti a oproti organickým materiálům jsou levnější. Nevýhodou je, že způsobují korozi většině kovů, dochází u nich k rozkladu a podchlazení, což může ovlivnit jejich vlastnosti. Je nutné použít nukleační a zahušťovací činidla [11,21].

Př: hydráty solí, kovové slitiny

### **Eutektická PCM**

Jedná se o PCM tvořen kombinací dvou a více komponent která mohou být jak organická tak anorganické [11].

## 5.2.2 Změna fáze v pevném skupenství

Používají se materiály se změnou fáze v pevném stavu. Například polyalkoholy v nízkých teplotách jsou heterogenní ale při zvýšení teploty vytvoří fázi tvořenou z kubických stěnově středěných mřížek [21].

Oproti PCM pevná/kapalná změna fáze poskytují PCM se změnou fáze v pevném skupenství menší hodnoty latentního tepla. Výhody má tento typ PCM v menší změně objemu při fázové změně a to že nemůže odtéct ze zásobníku [21].

Př: Polyalkoholy, polymery, polyuretany



Tab. 2 Příklady PCM [21]

PCM	Teplota fázové přeměny [°C]	Teplo fázové přeměny [J/g]	Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]
Parafín (s 25atomy uhlíku)	53,5	238	0,801
Mastná kyselina (kyselina laurová)	41-44	1823-212	0,87
Ester (Methyl-palmitový)	27	163,2	-
Solný roztok (CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O)	28-30	190-200	1,8
Eutektická směs (59 % Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O + 41 % MgBr <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O)	66	168	-
Polyalkohol (pentaglycerine)	82	172,58	-

### 5.3 Mikroobalování PCM

Mikroobalování je technika poskytující příležitost pro tvorbu pokročilých PCM s větší výměnnou plochou, sníženou reaktivitou s okolním prostředím a menší změnou objemu při fázové přeměně. Mikroobal je částice s průměrem 1-1000 μm kterou tvoří materiál jádra obklopený povlakem nebo skořápkou. Mezi nutné vlastnosti obalených PCM patří požadovaná morfologie, vhodná distribuce průměrů, tepelná stabilita, mechanická síla skořápky a penetrační schopnosti. Použití mikroobalených PCM je v tepelných zásobnících značně omezená jejich cenou [20].

## 6 Chemické zásobníky

U těchto typů zásobníků se teplo skladuje pomocí vratných chemických reakcí. Při nabíjení se přebytečná solární energie používá jako zdroj energie pro chemickou reakci a její výsledné produkty se následně oddělí a uskladní. Při nedostatku tepla se oddělené vzniklé produkty znovu smíchají a přitom uvolní teplo při obrácené reakci. Energie je uložena v produktech chemické reakce, výstupní teploty ze zásobníků využívající chemických reakcí nejsou jasně dané protože na rozdíl od akumulace citelného a latentního tepla nezávisí na teplotě uložené látky.

**Materiál použitý v chemickém zásobníku tepla by měl mít tyto vlastnosti [17]**

- vysokou hustotu uloženého tepla
- vysokou tepelnou vodivost
- vhodnou propustnost
- rychlý příjem pracovních párů (pro dostatečnou rychlost reakce)
- nízkou regenerační teplotu (pro lepší využití solární energie)
- vhodný pracovní tlak
- dlouhodobou stabilitu
- nízkou cenu
- ekologickou udržitelnost

Uchování tepla pomocí chemické reakce má významné výhody ve schopnosti akumulovat velké množství tepla na jednotku objemu a zanedbatelným tepelným ztrátám oproti zásobníkům citelného a latentního tepla. Nízké ztráty jsou způsobeny tím, že u zásobníku chemické reakce se látka uchovávající energii skladuje za okolní teploty. Důvodem je, že teplo uložené pomocí vratné chemické reakce je mnohonásobně větší než citelné teplo, které je v podstatě zanedbatelné a lze tedy ignorovat tepelné ztráty spojené se změnou teploty látky pro akumulaci tepla. Jinak teplo uložené v chemickém zásobníku zůstane uskladněné prakticky bez ztrát dokud se nesmíchají jednotlivé sloučenin. Další výhodou je v dobré kontrole průběhu reakce pomocí katalyzátorů. Díky těmto vlastnostem jsou chemické zásobníky široce zkoumány k případnému využití pro sezonní úschovu energie [19,17].

Chemické zásobníky se nepoužívají kvůli velké složitosti daného systému, drahé investici, nízkému vedení tepla a v praxi nízkým hodnotám hustoty uloženého tepla kdy se zdaleka nedosahuje teoretických hodnot. Pro použití v praxi je nutný výzkum použitých materiálů které jsou v současné době buď příliš drahé, nebo nemají požadované vlastnosti nebo se nesesestrojil prototyp který by potvrdil funkčnost pro reálné podmínky [23].

**Obecně lze Reakci v chemickém zásobníku popsat rovnicí [19]**

kde: AB je původní chemická sloučenina,  $\Delta H$  [J/mol] vyjadřuje entalpii reakce (teplo dodané pro endotermický rozpad sloučeniny AB) a A,B jsou sloučeniny vzniklé endotermickým rozpadem

Teplota při které se začne ukládat teplo pomocí rozpadu AB závisí na síle vazby. Takže i když existuje mnoho reakcí fungující na tomto principu jen několik jich má vhodnou reakční teplotu.

**Množství uloženého tepla lze vyjádřit rovnicí [24]**

$$Q = n \cdot \Delta H \quad (4)$$

kde  $Q$  [J] je množství uloženého tepla,  $n$  [mol] je molární množství AB a  $\Delta H$  [J/mol] vyjadřuje entalpii reakce

**Chemické zásobníky se dělí na zásobníky využívající**

- chemické reakce
- sorpční reakce

Rozdělení chemických zásobníků nemá jasně daná pravidla. Mnoho sloučenin lze zařadit k obou typům reakcí (např: hydráty).

## 6.1 Zásobníky využívající chemická reakce

Zásobník využívající chemické reakce funguje na principu vratné reakce, která probíhá mezi dvěma sloučeninami. Využívá se zde, že dojde ke změně mezi entalpií látek vzniklých reakcí a mezi entalpií látek vstupující do reakce. Tato změna entalpie se označuje jako teplo reakce. Teplo se uchová pomocí endotermické reakce ve vzniklé látce a při vratné exotermické reakci se teplo uvolní. Jakákoliv reakce s vysokou teplotou reakce může být použita v zásobníku tepla pokud látky vzniklé reakcí lze uskladnit a teplo uložené v průběhu reakce se uvolní při obrácené reakci [17].

Pokud se sloučeniny v reakci nacházejí v kapalném případně tuhém stavu tak pro uložení stačí jednoduchý malý zásobník. Pokud ale vzniká reakcí plynná látka je potřeba složitějšího zásobníku, který musí vydržet vysoký tlak od plynu. Problém se skladováním plynu nenastane pokud vznikne kyslík, který lze jednoduše získat ze vzduchu a nemusí se tedy skladovat a místo toho ho lze rovnou využít (vzniká například při rozkladu oxidů kovů) [19].

### **Příklad chemické reakce (Rozklad uhličitanu železnatého) [17]**



Endotermický rozpad začne při dosažení teploty 180 °C. Teoreticky by tato reakce mohla uložit 722 kWh/m<sup>3</sup> tepla. Pro porovnání voda má hustotu uloženého tepla 69 kWh/m<sup>3</sup> pro rozsah teplot 25-85 °C [22].

## **6.2 Zásobníky využívající sorpční reakce**

V tomto typu zásobníku se energie ukládá pomocí přerušení vazby mezi vodními molekulami a příslušnou substancí (tzv. sorbent), kdy se následně odpaří jeden produkt této reakce (tzv. sorbát) a kondenzuje pro budoucí použití. Tomuto procesu se říká desorpce. Teplo se získává opětovným vypařením zkondenzované látky (sorbátu) a zpětným zavazbením s druhou látkou (sorbentem). Tomuto procesu se říká sorpční reakce. Desorpce je endotermická reakce a sorpční reakce je exotermická [23].

Pokud sorbent nezmění svou strukturu během sorpčního procesu, říká se takovému procesu adsorpce. Molekuly vody se poutají pouze k povrchu. Například u materiálů jako silikagely a zeolity. Pokud při sorpčním procesu dojde ke změně v struktuře sorpčního materiálu, tak mluvíme o absorpci. Vodní molekuly jsou pohlceny celým objem. Například u materiálů jako bromid lithný a amoniak [23,22].

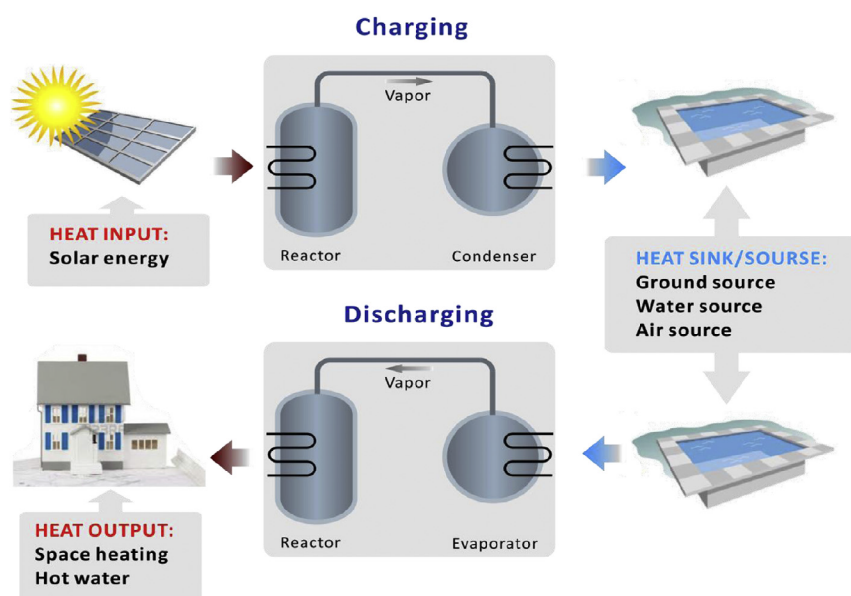
### **6.2.1 Uzavřený systém sorpčního zásobníku**

Tento systém je kompletně oddělen od okolní atmosféry. Skladuje se sorbent tak i sorbát. S okolím se vyměňuje pouze energie. Obecně se uzavřený sorpční zásobník skládá z reaktoru kde se nachází sorbent a kondenzátoru/výparníku kde se skladuje voda v kapalném stavu a potrubím kterým proudí pára. Při nabíjení proběhne desorpce v reaktoru, která je poháněna teplem ze solárního kolektoru a tím se uvolní pára ze sorbentu. V kondenzátoru následně proběhne kondenzace páry na vodu. Teplo vzniklé kondenzací je odvedeno chladičem. Po proběhlém nabití se reaktor a kondenzátor oddělí [23,22].

Pro vybíjení se reaktor a kondenzátor/výparník znovu spojí. Uskladněné vodě je nutné přidat teplo ke změně na páru. Vzniklá pára z výparníku putuje do reaktoru a při sorpčním procesu se spojí se sorbentem a tím vznikne teplo. Podle požadavku se může využít změna tepla buď výparníku ke chlazení (v létě) nebo reaktoru k ohřevu (v zimě) [23].

Pro vybíjení je potřeba zdroj energie k pohánění výparníku. Většinou stačí vzduchový výparník, pokud se ale nedosáhne dostatečné teploty pro vypařování je potřeba použít púdní výměník tepla[23].

Uzavřené systémy jsou vhodné pro použití v malém rozsahu kdy je požadována kompaktnost a vysoká efektivita, nestačí citelný případně latentní zásobník [23].



Obr. 15 Schéma uzavřeného sorpčního systému [23]

### 6.2.2 Otevřený systém sorpčního zásobníku

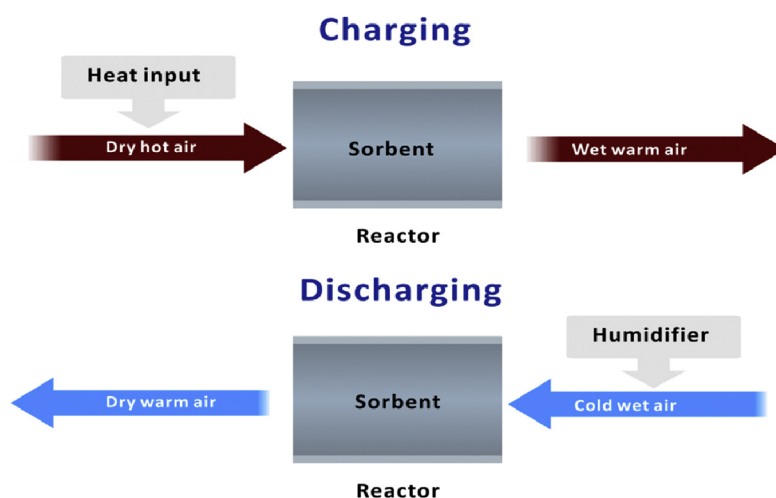
Tento systém je používán v otevřeném prostředí, které umožňuje uvolnění a sorpci sorbatu. V tomto typu sorpčního zásobníku lze používat pouze vodu.

Při nabíjení, suchý vzduch ohřátý solárním kolektorem proudí reaktorem naplněným sorbentem. Voda absorbovaná/adsorbována sorbentem je uvolněna horkým vzduchem. Vzduch se následkem ochladí a vzroste jeho vlhkost [23,22].

Při vybíjení se použije vlhký studený vzduch z okolí který proudí přes sorbent v reaktoru. Vlhkost vzduchu se pohltí sorbentem a uvolní se teplo které ohřeje vzduch [23,22].

Před konstrukcí tohoto typu zásobníku by se mělo zkontrolovat zda nabízí dostatečnou vlhkost vzduchu pro zajištění dostatečné rychlosti vybíjení. Musel by se jinak použít zvlhčovač vzduchu [23].

Porovnáním otevřeného a uzavřeného systému vychází lépe otevřený systém. Důvodem jsou lepší možnosti vedení tepla a látky oproti uzavřenému systému. V kombinaci s nižší cenou která je dána jednodušší konstrukcí neobsahující kondenzátor, výparník, vodní zásobník a dále nepotřebou kontrolovat tlak v systému, vychází že otevřený systém je obecně vhodnější [23].



Obr. 16 Schéma otevřeného sorpčního zásobníku [23]

Tab. 3 Příklady materiálů použitých v chemických zásobnících [17]

Materiál	Materiály vzniklé reakcí rozpadu		Hustota uloženého tepla [kWh/m <sup>3</sup> ]	Teplota pro zahájení reakce [°C]
	A	B		
AB	A	B	-	-
<b>Materiály pro sorpční zásobníky</b>				
MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	MgSO <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> O	778	122
MgSO <sub>4</sub> ·H <sub>2</sub> O	MgSO <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> O	361	216
BaCl <sub>2</sub> ·8NH <sub>3</sub>	BaCl <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	167	174
CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	CaSO <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> O	389	89
<b>Materiály pro zásobníky chemické reakce</b>				
Ca(OH) <sub>2</sub>	CaO	H <sub>2</sub> O	872	505
NH <sub>3</sub>	0,5N <sub>2</sub>	1,5H <sub>2</sub>	67 kJ/mol	400-500
SiO <sub>2</sub>	Si	O <sub>2</sub>	10,528	150 (+ katalyzátor HF)
Fe(OH) <sub>2</sub>	FeO	H <sub>2</sub> O	611	150

## 7 Závěr

Tato bakalářská práce byla zaměřena na metody akumulace tepla v solárních tepelných soustavách. Akumulaci tepla lze rozdělit do tří typů a to akumulaci citelného tepla, akumulaci latentního tepla a akumulaci tepla pomocí chemické reakce.

Akumulace citelného tepla je nejrozšířenější metoda akumulace tepla. To je dáno nejdelší dobou využívání této metody a díky dobrým znalostem vlastností materiálů použitých pro tento typ akumulace. Využívá se změna teploty látky pro akumulaci tepla a tím i změna tepla. Jako látka pro akumulaci tepla se nejčastěji používá voda. Důvodem je její nízká cena, vysoká dostupnost, vysoká měrná tepelná kapacita a vysoká hodnota součinitele přenosu tepla. Nevýhodou vody je nízký rozsah pracovních teplot. Pro běžné nasazení jako vytápění a ohřev užitkové vody je rozsah dostatečný, problémy nastanou při nasazení v průmyslu kdy se požadují vyšší teploty a je tedy nutné použít jinou látku pro akumulaci tepla. I když existují dlouhodobé zásobníky citelného tepla, jejich širšímu nasazení zabraňuje vyšší cena tepla z těchto systémů oproti klasickým zdrojům.

Pro akumulaci latentního tepla se k akumulaci tepla využívá kromě změny teploty látky i změnu skupenství látky. Se změnou skupenství se uvolní/pohlčí tzv. latentní teplo které se neprojeví změnou teploty látky pro akumulaci tepla ale změnou skupenství případně struktury. Výhoda zásobníků latentního tepla je ve vyšší koncentraci tepla díky využití skupenského tepla tání/tuhnutí a možnosti poskytovat teplo za konstantní teploty při probíhající změně skupenství látky pro akumulaci tepla. Zásobníky latentního tepla se nepoužívají jako sezonní zásobníky kvůli možným problémům při dlouhodobém provozu a větší složitosti zásobníků latentního tepla oproti citelným zásobníkům.

U chemických zásobníků se využívají vratné chemické reakce pomocí kterých se akumuluje teplo. Dělí se podle toho zda využívají chemické reakce nebo sorpční reakce. Výhody chemických zásobníků jsou v jejich schopnosti akumulovat teplo o velké hustotě a nulových tepelných ztrátách ze zásobníku při skladování látky pro akumulaci tepla na rozdíl od látek pro akumulaci citelného a latentního tepla. Chemické zásobníky jsou teoreticky vhodné pro použití v sezonních zásobnících. Důvod proč se nepoužívají je že jsou stále ve vývoji a je potřeba u nich vyřešit mnoho problémů jako je nedosahování teoretických hodnot akumulace tepla a nízké hodnoty vedení tepla.

Pro budoucí širší nasazení akumulace tepla v solárních tepelných soustavách je potřeba vyzkoumat materiály použitelné v chemickém zásobníku a zásobníku latentního tepla a obecně zlepšit vlastnosti tepelných soustav hlavně jejich cenu. Lze říci že akumulace tepla v solárních tepelných soustavách má velký potenciál který neumíme plně využít.

## 8 Použitá literatura

- [1] DUFFIE, J.A. a W.A. BECKMAN. *Solar engineering of thermal processes*. Wiley, 2006. ISBN: 978-0-471-69867-8
- [2] SUHAS P. SUHKATME a J.K. NAYAK . *Solar energy: principles of thermal collection and storage*. 3rd ed. New Delhi: Tata McGraw-Hill. ISBN: 978-007-0260-641.
- [3] JOSEFSSON, Weine a Marie-Louise WESTERBERG. *Solar radiation data source catalogue*. Stockholm, Sweden: Swedish Council for Building Research, 1981, 149 p. in various pagings. ISBN: 91-540-3581-3.
- [4] *atmosphere: solar energy absorption*. Art. *Britannica Online for Kids*. [cit. 2014-04-12 ] Dostupné z: <<http://kids.britannica.com/comptons/art-108061>>
- [5] *ISOFEN ENERGY s.r.o.* [online]. [cit. 2014-04-15]. Dostupné z: <<http://www.isofenenergy.cz/Slunecni-zareni-v-CR.aspx>>
- [6] *Solární energie – ohřev vody, fotovoltaika a další možnosti využití*. MURTINGER, Karel. *Nazeleno.cz* [online]. 2008. [cit. 2014-03-18]. Dostupné z: <<http://www.nazeleno.cz/energie/solarni-energie/solarni-energie-ohrev-vody-fotovoltaika-a-dalsi-moznosti-vyuziti.aspx>>
- [7] *Typy solárních kolektorů*. MATUŠKA, Tomáš. *TZB-info* [online]. [cit. 2014-03-18]. Dostupné z: <<http://oze.tzb-info.cz/solarni-kolektory/typy-solarnich-kolektoru>>
- [8] KURAVI, Sarada, Jamie TRAHAN a D. Yogi GOSWAMI. *Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants*. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2013, č. 39, s. 285-319. ISSN: 0360-1285.
- [9] TIAN, Y. a C.Y. ZHAO. *A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications*. *Applied Energy*. 2013, č. 104, s. 538-553. ISSN: 0306-2619.
- [10] PINEL, Patrice, Cynthia A. CRUICKSHANK, Ian BEAUSOLEIL-MORRISON a Adam WILLS. *A review of available methods for seasonal storage of solar thermal energy in residential applications*. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2011, č. 15, s. 3341-3359. ISSN: 1364-0321.
- [11] *Solárně termické kolektory*. *Mzp.cz* [online]. [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <[http://www.mzp.cz/cz/solarne\\_termicke\\_kolektory](http://www.mzp.cz/cz/solarne_termicke_kolektory)>
- [12] *IEA SHC task 45: Applications of Large Solar Thermal Systems* [online]. 2013 [cit. 2014-04-15]. Dostupné z: <<http://task45.iea-shc.org/publications>>



- [13] DINÇER, Ibrahim a Marc ROSEN. *Thermal energy storage: systems and applications*. Chichester: Wiley, c2002, 579 s. ISBN: 04-714-9573-5.
- [14] MEHLING, Harald a Luisa F CABEZA. *Heat and cold storage with PCM: an up to date introduction into basics and applications*. Berlin: Springer-Verlag, 2008, xvi, 308 s. ISBN: 978-3-540-68556-2. Dostupné z: <<http://books.google.cz/books?id=N8LGwUNYWX8C&printsec=frontcover&hl=cs#v=onepage&q&f=false>>
- [15] *Tzb-info.cz* [online]. 2014 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <<http://www.tzb-info.cz>>
- [16] *Seasonal Sensible Thermal Energy Storage Solutions*. Ph.academicdirect.org[online]. 2014 [cit. 2014-04-29]. Dostupné z: <[http://lejpt.academicdirect.org/A19/049\\_068.htm](http://lejpt.academicdirect.org/A19/049_068.htm)>
- [17] XU, J., R.Z. WANG A Y. LI. *A review of available technologies for seasonal thermal energy storage*. Solar Energy. 2014, č. 103.S. 610-638.ISSN: 0038-092X.
- [18] *Energy from salt lakes*. Soilwater.com.au [online]. 2014 [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: <<http://soilwater.com.au/solarponds/>>
- [19] KHARTCHENKO, Nikolai V. a Vadym M. KHARCHENKO. *Advanced energy systems*. 2nd ed. Boca Raton, Fla: CRC, 2012. ISBN: 978-143-9886-588. Dostupné z: <<http://books.google.cz/books?id=BSAtAgAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=cs#v=onepage&q&f=false>>
- [20] JAMERKHORSHID, A, S.M. SADRAMELI a M FARID. *A review of microencapsulation methods of phase change materials (PCMs) as a thermal energy storage (TES) medium*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014, č. 31, s. 531-542. ISSN: 1364-0321.
- [21] PIELICHOWSKA, Kinga a Krzysztof PIELICHOWSKI. *Phase change materials for thermal energy storage*. Progress in Materials Science. 2014, č. 65. s. 67-123. ISSN: 0079-6425.
- [22] *IEA SHC task 32* [online]. 2008[cit. 2014-05-04]. Dostupné z: <<http://task32.iea-shc.org/publications>>
- [23] YU, N., R.Z. WANG a L.W. WANG. *Sorption thermal storage for solar energy*. Progress in Energy and Combustion Science. 2013, č. 39, s. 489-514. ISSN: 0360-1285.
- [24] PAKSOY, Halime Ö. *Thermal energy storage for sustainable energy consumption: fundamentals, case studies and design*. Dordrecht: Springer, 2007, xii, 447 p. ISBN: 9781402052903.
- [25] *Solární ohřev vody*. Tepelná čerpadla EURONOM CZ [online]. 2014 [cit. 2014-05-14]. Dostupné z: <[www.euronom.cz/solarni-ohrev-vody](http://www.euronom.cz/solarni-ohrev-vody)>

- [26] WITZEL, Walter a Dieter SEIFRIED. *Renewable Energy - The Facts*. Routledge: Taylor & Francis, 2013. 3rd edition. ISBN: 1136540121.
- [27] SCHMIDT, T., F. KABUS a H. MÜLLER-STEINHAGEN. 2000. *The central solar heating plant with aquifer thermal energy store in Rostock, Germany*. In Proc. Terrastock 2000, Stuttgart, Germany:275-278.
- [28] PAVLOV, G. K. a B. W. OLESEN. 2011. *Seasonal Ground Solar Thermal Energy Storage - Review of Systems and Applications*. International Centre for Indoor Environment and Energy – ICIEE. Dánsko.
- [29] ENTERIA, Napoleon a Aliakbar AKBARZADEH. *Solar energy sciences and engineering applications*. CRC Press. ISBN: 9781138000131.
- [30] *ECOHEATCOOL (IEE ALTENER Project)*, The European Heat Market, Work Package 1, Závěrečná zpráva publikována Euroheat & Power
- [31] TAYLAN Onur a Halil BERBEROGLU. 2013. *Fuel Production Using Concentrated Solar Energy, Application of Solar Energy*, Prof. Radu Rugescu (Ed.). ISBN: 978-953-51-0969-3. Dostupné z: <<http://www.intechopen.com/books/application-of-solar-energy/fuel-production-using-concentrated-solar-energy>>

## 9 Seznam použitých symbolů a zkratek

Q	[J]	Uložené teplo
T	[°C]	Teplota
m	[kg]	hmotnost
c	[J/kg·K]	Měrná tepelná kapacita
$l_t$	[J/kg]	Skupenské teplo tání
$\Delta H$	[J/mol]	Reakční teplo
n	[mol]	Molární množství

např.	například
obr.	obrázek
tab.	tabulka
př.	příklad