

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2018

**JAROSLAV
DIVIŠ**



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení:	Diviš	Jméno: Jaroslav	Osobní číslo: 457659
Fakulta/ústav:	Fakulta strojní		
Zadávající katedra/ústav:	Ústav energetiky		
Studijní program:	Teoretický základ strojního inženýrství		
Studijní obor:	bez oboru		

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Skladování elektřiny pomocí vysokopotenciálního tepla

Název bakalářské práce anglicky:

Electricity storage by means of high temperature heat

Pokyny pro vypracování:

Skladování elektřiny je aktuální a perspektivní téma. V některých případech (v současnosti hlavně solární tepelné elektrárny) je energie ze slunce skladována ve formě vysokopotenciálního tepla. Tato práce bude obsahovat rešerši těchto metod, včetně nastínění možností integrace do jiných tepelných elektráren a konceptu použití pro akumulaci elektřiny ze sítě. Jeden vybraný koncept bude zhodnocen na jednoduchém bilančním modelu.

Seznam doporučené literatury:


Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:


Ing. Václav Novotný, ústav energetiky FS


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

Datum zadání bakalářské práce: **16.04.2018** Termín odevzdání bakalářské práce: **04.06.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2019**


Ing. Václav Novotný
podpis vedoucí(ho) práce



podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

26-04-2018
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem: „Skladování elektřiny pomocí vysokopotenciálního tepla“ vypracoval samostatně pod vedením pana Ing. Václava Novotného, a že jsem uvedl veškeré zdroje v souladu s Metodickým postupem o dodržování etických principů při tvorbě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne:

Podpis:

Jaroslav Diviš

Anotační list

Jméno autora	Jaroslav Diviš
Název BP/DP	Skladování elektřiny pomocí vysokopotenciálního tepla
Anglický název:	Electricity storage by means of high temperature heat
Akademický rok:	2017/2018
Ústav/Odbor:	Energetika
Vedoucí BP/DP:	Ing. Václav Novotný
Bibliografické údaje:	Počet stran: 43 Počet obrázků: 15 Počet tabulek: 5 Počet příloh: 0
Klíčová slova:	vysokopotenciální teplo, skladování elektrické energie, koncentrovaná solární energie, skladování tepla, citelné teplo, latentní teplo, tekuté soli, tepelné oleje
Keywords:	high temperature heat, electricity storage, concentrated solar power, thermal storage, sensible heat, latent heat, molten salts, thermal oils
Anotace:	Tato bakalářská práce se zabývá možnostmi využití a způsoby akumulace vysokopotenciálního tepla ze solárních zdrojů, používaného pro výrobu elektřiny. V první části jsou popsány možnosti a důvody, proč teplo takto skladovat. Druhá část představuje skladovací technologie rozdělené podle využitých látek a způsobů akumulace. V závěrečné části se zabývá ostatními zdroji pro skladování vysokopotenciálního tepla a obsahuje krátký koncepční výpočet tepelných ztrát.
Abstract:	The bachelor thesis deals with possibilities of utilization and methods of high temperature heat accumulation from solar sources. This heat is then used for electricity production. The first part describes the possibilities and reasons why the heat should be stored this way. The second part presents available storage technologies divided by the type of used substances and ways of accumulation. The final part considers other sources for high temperature heat accumulation followed by a short conceptual calculation of heat losses.

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu této bakalářské práce, panu Ing. Václavu Novotnému za jeho věnovaný čas, připomínky a odbornou pomoc při vypracování této práce.

Obsah

1	Úvod.....	9
2	Technologie solárních tepelných elektráren	10
2.1	Technologie přijímání solární energie CSP	10
2.2	Tepelné oběhy solárních elektráren	11
2.2.1	Rankin-Clausiovův cyklus	12
2.2.2	Bryatonův (S-CO ₂) cyklus	13
3	Technologie skladování	15
3.1	Volba technologie	16
4	Akumulace citelného tepla	17
4.1	Voda	17
4.2	Tepelné oleje	18
4.3	Tekuté soli	19
4.4	Tekuté kovy	22
4.5	Pevné materiály.....	24
5	Akumulace latentního tepla	24
5.1	Organické materiály	25
5.2	Anorganické materiály	26
5.2.1	Soli.....	26
5.2.2	Kovy a slitiny	27
6	Aplikace TES mimo solární energetiku	27
6.1	Jaderné elektrárny	27
6.2	Elektrárny na fosilní paliva	29
6.3	Geotermální energie	29
6.4	Využití TES pro přebytkovou elektřinu.....	30

7	Výpočet tepelných ztrát v nádržích	32
8	Závěr	36
	Seznam použité literatury	37
	Seznam obrázků	43
	Seznam tabulek	43

Seznam použitých anglických zkratek

Zkratka	anglicky	český ekvivalent
TES	thermal energy storage	skladování tepelné energie
CSP	concentrated solar power	koncentrovaná solární energie
PTC	parabolic trough collectors	parabolické žlabové kolektory
LFR	linear fresnel reflectors	lineární fresnelův reflektor
SPT	solar power towers	solární věž
PDC	parabolic dish collectors	parabolické talířové kolektory
HTF	heat transfer fluid	teplonosná tekutina
DSG	direct steam generation	přímá generace páry
DVG	direct vapour generation	přímá generace páry
MSBNF	molten Salt-Based Nanofluid	tekuté soli s nánočásticemi
LBE	lead-bismut eutectic	eutektikum olovo bismut
PCM	phase change materials	materiály s fázovou změnou
ORC	organic Rankine cycle	organický Rankinův cyklus
PWR	pressurized water reactor	tlakovodní reaktor
VHTR	very high temperature reactor	vysokoteplotní reaktor
AHTR	advanced high temp. reactor	pokročilý vysokotep. reaktor
SFR	sodium-cooled fast reactor	rychlý sodíkem chlazený reaktor
PHES	pumped heat electricity storage	skladování el. v čerpaném teple

1 Úvod

Akumulace nevyužitá elektrická energie je zásadní problematikou dnešních zdrojů elektřiny, a to nejen těch obnovitelných. Velké tepelné nebo jaderné elektrárny nemohou svůj výkon nijak významně měnit a solární či větrné elektrárny podléhají přírodním živlům, které nedokážeme ovlivnit. Tyto nedostatky docela úspěšně kompenzují přečerpávací vodní elektrárny spolu s plynovými a v rámci určitých mezí i uhelnými elektrárnami, které ovšem také neobstojí všude a vždycky. Procesem uskladnění elektrické energie se míní její transformace z jedné formy (nejčastěji elektrické) na jinou, uchovatelnou formu a v případě potřeby její převedení zpět na energii elektrickou [1]. Skladování energie má veliký potenciál a přináší několik benefitů např.: lepší využitelnost zdrojů energie, vyšší účinnost energií z obnovitelných zdrojů, minimalizace namáhání rozvodné sítě a mnoho dalších [2].

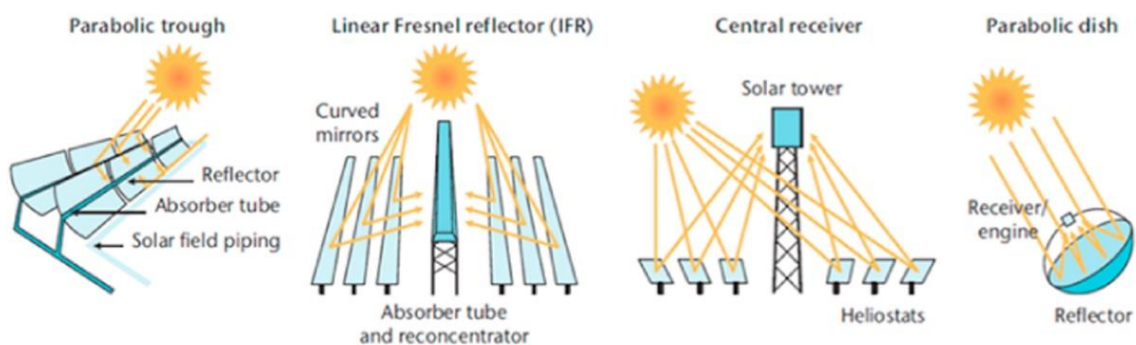
Z množství způsobů akumulace energií se skladování tepelné energie jeví jako potenciálně ekonomicky přijatelná technika, která by mohla přispět ke zlepšení vztahu mezi nabídkou a poptávkou po energiích, neboť poptávka bývá zřídka kdy konstantní [3]. Typickým příkladem je solární aplikace pro skladování tepla.

Solární energie se řadí mezi kolísavé zdroje a její množství záleží na denní době, počasí a na ročním období. Díky těmto fluktuacím je problematika dlouhodobějšího skladování přebytkového tepla velkou výzvou a může znatelně pomoci při aplikacích solárních zdrojů energie [4]. Teplo je uchováváno pomocí různých skladovacích médií a v případě potřeby se jejich vnitřní energie přeměňuje na elektřinu.

2 Technologie solárních tepelných elektráren

2.1 Technologie přijímání solární energie CSP

V podstatě existují čtyři základní druhy a způsoby přijímání sluneční energie, jimiž jsou: parabolické žlabové kolektory (parabolic trough collectors- PTC), lineární fresnelův reflektor (linear fresnel reflectors- LFR), systém s centrální věží (solar power towers- SPT) a parabolický talíř (parabolic dish collectors -PDC). Schematicky jsou tyto čtyři technologie znázorněny na obrázku 1. Dále existuje mnoho jejich konfigurací, které nepatrně upravují geometrii zrcadel. V tabulce 1 jsou uvedeny základní charakteristiky systémů, shrnující jejich použitelnost a pracovní teploty. Ze všech těchto druhů získávání solární energie nabízí systém s centrální věží nejvyšší účinnost (dosahuje nejvyšších teplot) a potenciál využití. Obvykle tento systém zahrnuje pole se solárními heliostaty,



Obrázek 1 Hlavní CPS technologie [12]

přijímač energie, zásobník energie a zařízení, kde dochází k výrobě elektřiny a oběhu pracovního média. Ekonomicky tento systém nemůže konkurovat konvekčním způsobům získávání elektřiny, proto se věnuje mnoho úsilí na zlepšení jeho efektivity. Jedním z možných adeptů mezi parametry, které lze vylepšit, je využití účinnějších tepelných oběhů v solárních elektrárnách [5].

Tabulka 1 Charakteristiky solárních systémů [26]

CPS typ	Poměr koncentrace solární energie	Rozsah pracovních teplot (°C)	Proveditelnost skladování energie	Poznámka
PTC	15-45	20-400	Možná	Běžně užívaný
LFR	10-40	50-300	Možná	Zřídka používaný
SPT	150-1500	300-1000	Možná, s nejnižšími ztrátami	Demonstrativní použití s vys. účinností Rankinova cyklu
PDC	100-1000	120-1500	Obtížná	Zřídka užívaný

2.2 Tepelné oběhy solárních elektráren

Solární elektrárny se dají rozdělit na dva typy: fotovoltaické elektrárny, ve kterých je sluneční záření převáděno přímo na elektřinu s využitím fotoelektrického jevu na polovodičových fotodiodách (s účinností někde mezi 12% a 20%) nebo solární tepelný systém, kde je sluneční energie buďto zachycena a použita přímo v topných aplikacích, a nebo je teplo přeměněno na mechanickou práci pomocí jednoho ze známých pracovních oběhů (s výrazně vyšší účinností) [6].

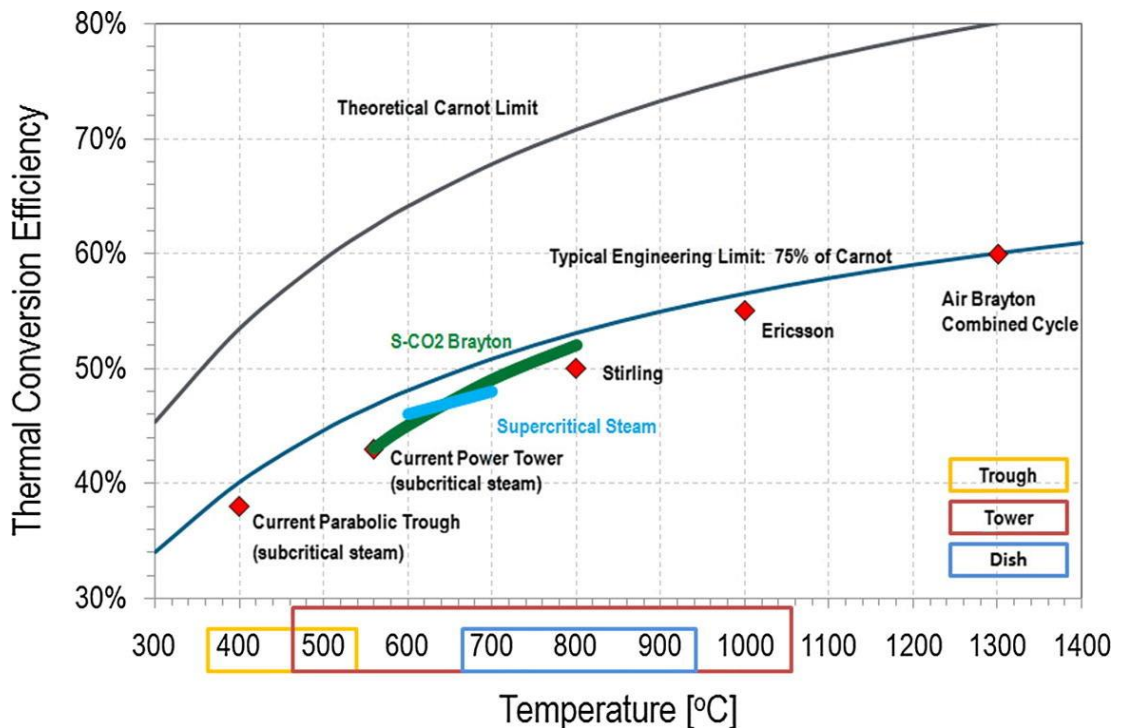
Nejpoužívanějším oběhem zůstává Rankin-Clausiusův parní cyklus, podobný jako je užívaný například v uhelných elektrárnách, s úpravami pro charakter solární energie. Jako jeho velice slibné náhrady se jeví Braytonovy cykly. Jedná se o Braytonův cyklus ideálního plynu (vzduch, He) a hlavně o superkritický CO₂ (S-CO₂) cyklus.

Při výrobě elektřiny je to právě turbínový cyklus, který definuje například teploty, které musí předchozí systémy poskytovat. Je to součást s největším dopadem na ekonomiku a účinnost výroby elektřiny [7]. A protože získávání energie z fotonů je v porovnání se získáváním energie z fosilních paliv mnohem dražší, tím více je zapotřebí vysoká účinnost, a tedy ekonomická přijatelnost této výroby.

Efektivitu cyklu nejvíce ovlivňuje teplota na vstupu turbíny, ostatní parametry mají nižší vliv. Na obrázku 2 je vyobrazena závislost účinnosti turbíny na teplotě pro klasické energetické oběhy.

Současné parabolické žlabové kolektory, které pracují s olejem jako HTF, se dokáží dostat na maximální teplotu 400°C a parní turbína je tak schopna dosáhnout účinnosti cca 37%. Systém s centrální solární věží pracující s tekutými solemi je schopen

dosáhnout vyšších vstupních teplot, cca 550°C a účinnost turbíny zde je vyšší, nějakých 42% [7].



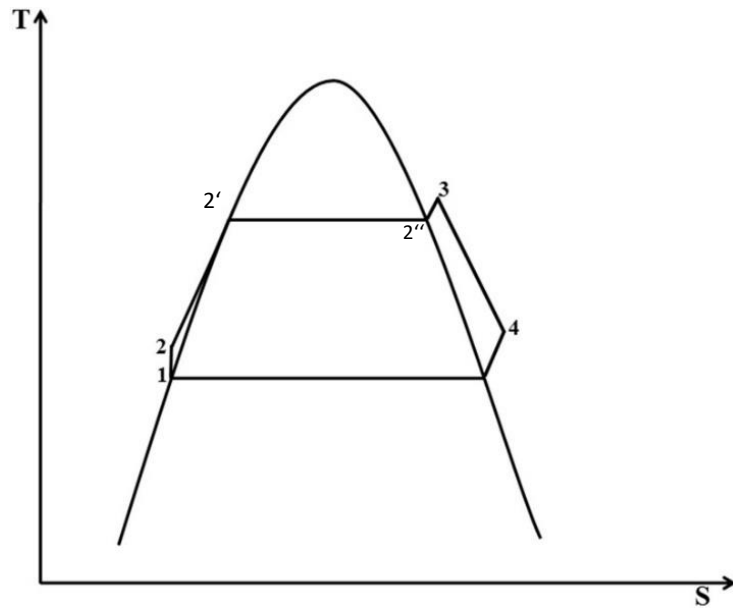
Obrázek 2 Závislost účinnosti turbíny na teplotě a použité CSP technologii [7]

2.2.1 Rankin-Clausiusův cyklus

Tento cyklus je nejpoužívanějším pro výrobu elektřiny ze solárních zdrojů. Vycházející z pracovní látky může být buď parní (využívaný v drtivé většině případů), nebo organický (ORC). Voda se více hodí při vyšších teplotách zdrojů tepla, které přesahují 370°C. Organické látky jsou vhodnější pro aplikace se středními a nižšími teplotami. Výkon elektrárny s ORC se může pohybovat v desítkách až stovkách kW a nejčastěji se používá ve spojení s lineárními fresnelovými kolektory [8]. Komerčně se využívá nepřímý systém (viz kapitola 3), kde se oproti systému s přímou generací páry (DSG-direct steam generation) pomocí slunečního záření, používá jiná látka pro akumulaci tepla. Nejčastěji se využívají například soli nebo oleje, jejichž vlastnosti jsou v práci dále rozebrány. Systémy s DSG (někdy uváděno jako DVG) jsou ve vývoji a mají potenciál dosahovat vyšších účinností.

Rankin-Clausiusův cyklus je zakreslen na obrázku 3 do T-s diagramu [6]. Jednotlivými částmi grafu jsou: 1-2 adiabatické stlačení, bod 2 v reálu téměř splývá s dolní mezní křivkou. Ve stavu 2' voda začíná vřít při tlaku p_2 (provozní tlak parního

generátoru). Přeměňuje se na mokrou páru až do bodu 2''. Zde začíná nutný proces přehřívání, abychom zabránili vstupu látky do turbíny ve dvou stavech, protože tekutý stav dokáže způsobit obrovské škody na lopatkách turbíny. Vznikne tzv. ostrá pára, která vstupuje do turbíny, kde adiabaticky expanduje (3-4) na protitlak v kondenzátoru, který je nižší než atmosférický. Kondenzace je izobarická změna a končí ve stavu 1, kde je kapalná voda [6][37].



Obrázek 3 Rankin- Clausiův organický cyklus [6]

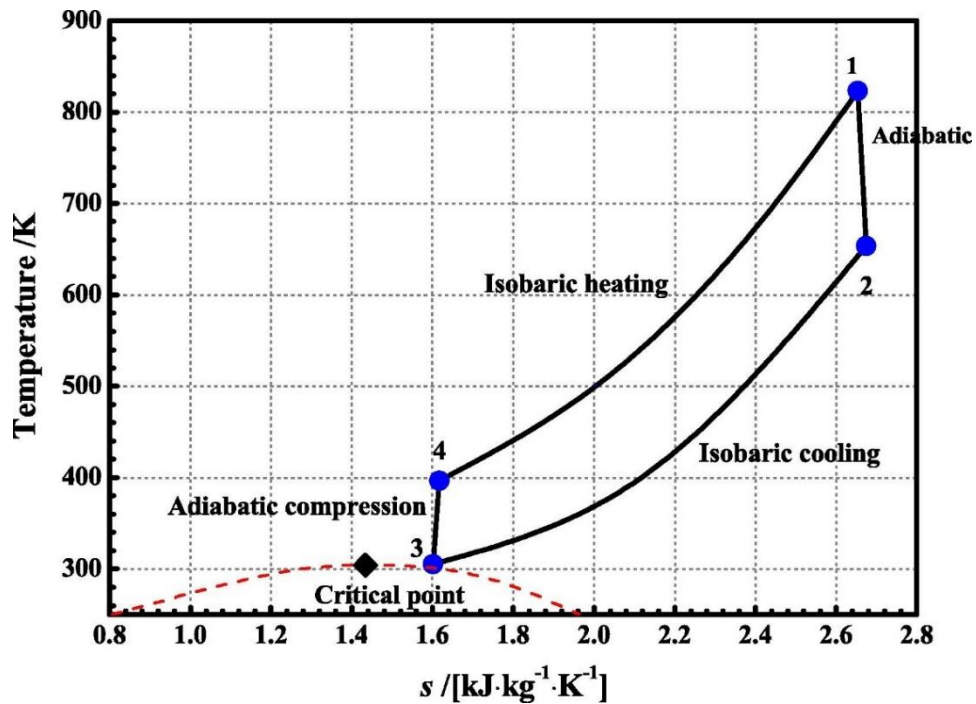
Kromě vody lze použít i jiné pracovní látky. Mezi možnosti patří: izoentropické tekutiny a tzv. suché tekutiny, jež se nemusí přehřívát (bod 2'' se stane bodem 3) a účinnost cyklu lze zvýšit regenerátorem následujícím po turbíně [6].

Volba vhodné pracovní látky má zásadní vliv na účinnost výroby elektřiny, a tedy i na ekonomiku. Volba vychází například z typu použitých solárních kolektorů. Vždy je na výběr více látek pro podobný rozsah teplot. Špatná volba zapříčiní vznik drahé a neefektivně fungující elektrárny [6].

2.2.2 Bryatonův (S-CO₂) cyklus

Braytonův (S-CO₂) cyklus se jeví jako slibná alternativa ke konvekčnímu Rankinovu (voda/vodní pára) cyklu. Označení S-CO₂ znamená stav, kdy teplota a tlak pracovního CO₂ přesahují jeho kritický bod (7,38 MPa, 31°C). Obvykle se aplikuje jako standartní Braytonův cyklus, možné jsou ovšem i jeho modifikace. Tento cyklus je

znázorněn v T-s diagramu na obrázku 4. Zahrnuje adiabatickou kompresi (3-4), izobarický přívod tepla (4-5), adiabatickou expanzi (1-2) a izobarický odvod tepla (2-3).



Obrázek 4 Braytonův (S-CO₂) cyklus [9]

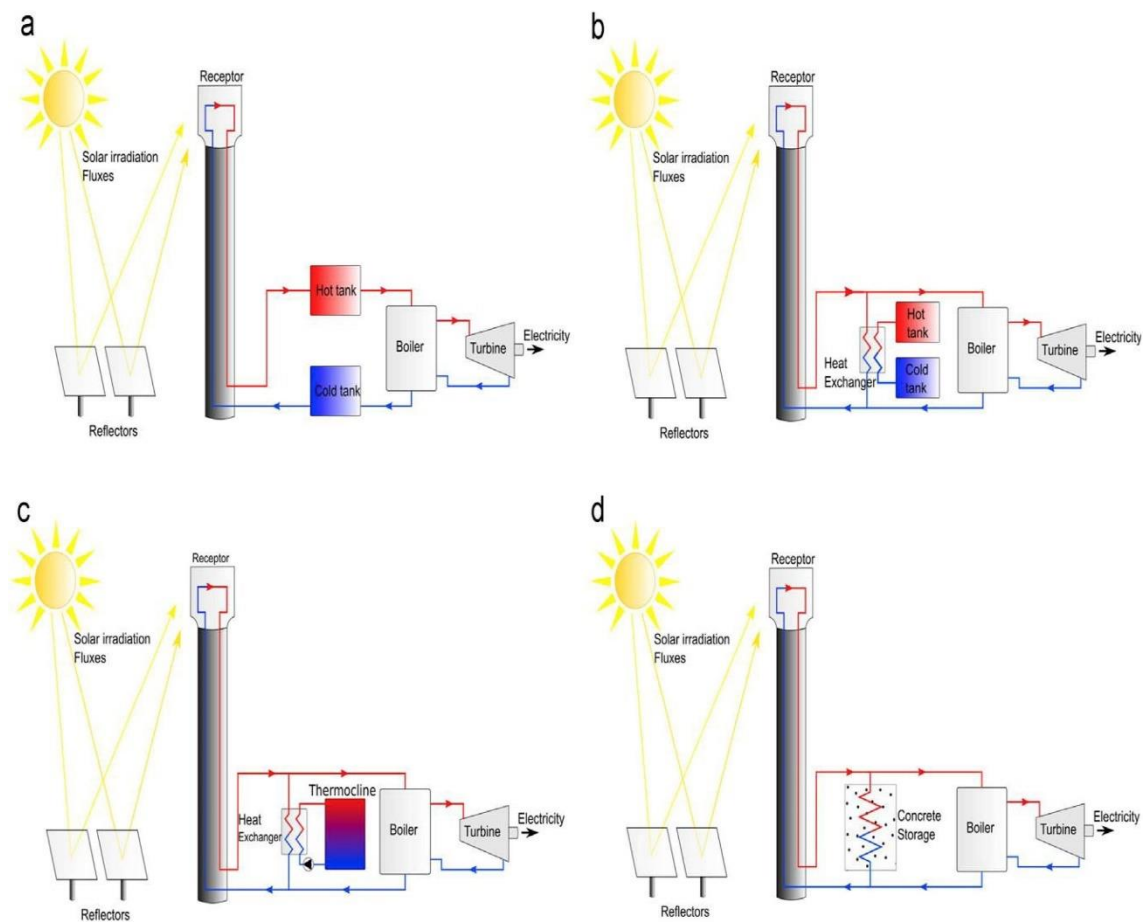
Jeho hlavní výhody jsou shrnuty do následujícího výčtu. Korozivnost CO₂ je nižší než u vodní páry, což snižuje požadavky na materiály při vysoké teplotě. Lze dosáhnout vyšších teplot, a tedy i lepších účinností. Je zapotřebí menší kompresní práce než u klasických plynových oběhů.

Operování nad kritickým bodem (7,38 MPa, 31°C) dává možnost použít menší rozměry čerpadel, turbíny a výměníků tepla než u komerčních cyklů. I suchým chlazením lze dosáhnout vysoké účinnosti, což je perfektní právě pro aplikace v CSP, které bývají nejčastěji situovány v suchých a slunných oblastech. Existují dva možné způsoby, jak využívat tohoto cyklu v solární elektrárně s centrální věží. Jedná se o přímé a nepřímé začlenění do systému. V přímém systému plní CO₂ i funkci HTF, ale vzhledem k nezvládnuté technologii absorberu, který by pracoval právě s oxidem uhličitým, se častěji používá nepřímý systém, kde se používá rozdílná HTF jako například tekutá sůl. Je zde tedy zapotřebí výměník tepla [5, 9].

3 Technologie skladování

Za hlavní technologické způsoby skladování termální energie lze považovat: akumulaci citelného tepla, u které nedochází k fázové přeměně skladovacího média, akumulaci skupenského tepla, kde dochází k fázové změně média a akumulaci termochemickou. Dále ho lze rozdělit na skladování přímé a nepřímé. U nepřímého systému se ohřívá jiná pracovní látka, která poté předává své teplo ve výměníku skladovacímu médiu.

Systém se skládá ze 3 hlavních částí: skladované médium, zařízení pro přenos tepla a skladovací nádrž. Na obrázku 5 je schématické znázornění čtyř druhů skladování tepelné energie pro solární aplikaci v systému s centrální solární věží (SPT). Tento systém je perspektivní a spolu s nejpoužívanějšími PTC a dosahuje nejvyšších teplot [10].

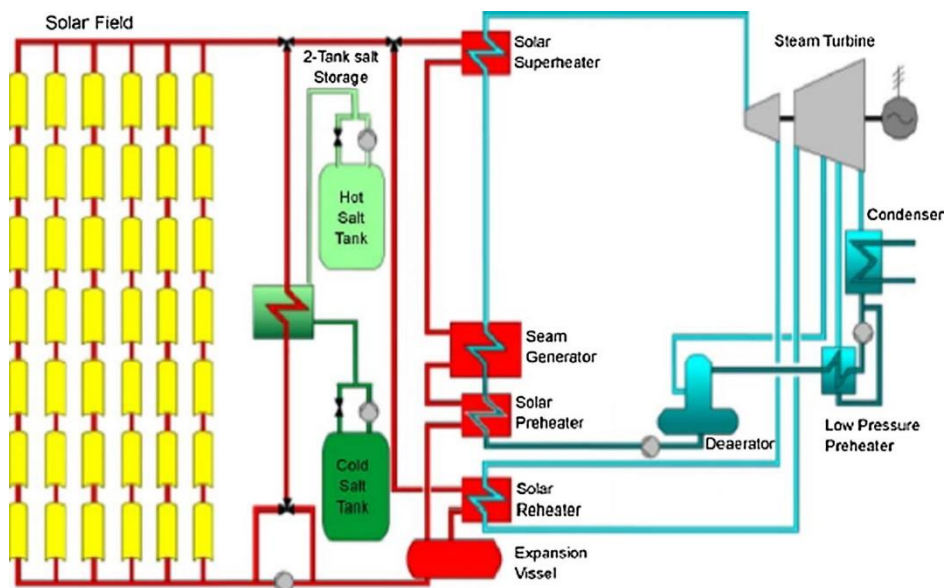


Obrázek 5 Druhy TES v CSP systémech a) přímé skladování se dvěma tanky, b) nepřímé skladování se dvěma tanky, c) systém využívající strmý přechod v teplotní stratifikaci d) systém s betonovými bloky [10]

3.1 Volba technologie

Při volbě technologie se musí brát ohled na několik klíčových parametrů. Celková teplotní kapacita systému hraje velkou roli. Výběr ale závisí i na poměru nákladů a zisků vložených do systému, ekologii, nebo na přírodních poměrech. Z technického hlediska jsou nejdůležitějšími parametry: dobrá tepelná vodivost k urychlení doby při vybíjení a nabíjení systému, vysoká měrná tepelná kapacita, mechanická a chemická stabilita, nominální hodnota maximální teploty, nízké tepelné ztráty, vysoké množství nabíjecích a vybíjecích cyklů, malý ekologický dopad, snadná obsluha systému a možnost jeho integrace do elektrárny [3, 11, 12].

Ve světě nejpoužívanější technologií pro akumulaci tepla je systém se dvěma skladovacími zásobníky pro tekuté soli nebo oleje, jedním pro studené médium a druhým pro médium teplé. Tato technologie se používá ve dvou možných konfiguracích (přímé a nepřímé skladování), z nichž jedna je vidět na obrázku 6. V případě této konfigurace nepřímého skladování se HTF ze solárního pole posílá do tepelného výměníku, který nabíjí akumulaci systém. Ohřívá se médium ve studeném a skladuje se v teplém zásobníku. Při vybíjení systému se médium z teplého zásobníku posílá do výměníku a použije se k ohřevu HTF, která se ohřátá následně posílá do výrobního bloku [13].



Obrázek 6 Schéma konfigurace CSP systému pro nepřímé skladování tepla [13]

4 Akumulace citelného tepla

Jedná se o akumulaci tepla do materiálu pomocí zvyšování jeho teploty, aniž by tento materiál prošel skupenskou (fázovou) změnou. Tato energie se dá definovat pomocí vztahu:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T$$

kde m je hmotnost (kg), c_p je měrná tepelná kapacita (J.kg.K^{-1}) a ΔT (K) je rozdíl teplot při nabíjení a vybíjení energie. Dalšími důležitými parametry pro výběr média jsou jeho cena, dostupnost a hustota [10]. Skladovací materiál může být pevná nebo kapalná látka. Výběr vhodné HTF má zásadní vliv na výslednou účinnost, určuje typ termodynamického cyklu a výkon, který je možné generovat.

4.1 Voda

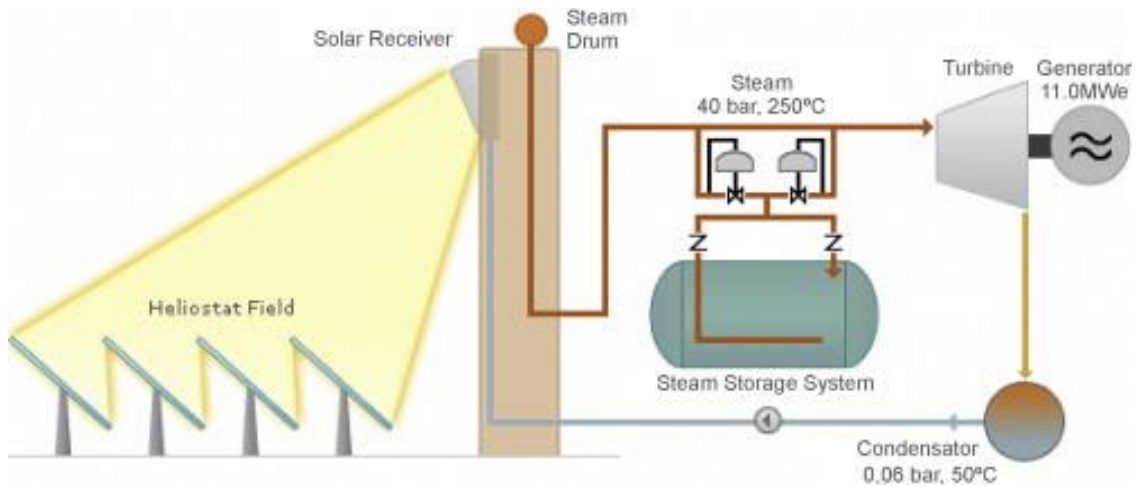
Voda se jako látka vyskytuje ve třech skupenstvích. Její přednosti jsou vysoká tepelná kapacita $c_p = 4182 \text{ J.kg.K}^{-1}$ (při 20°C), je netoxická, levná a snadno dostupná. Mezi hlavní nevýhody patří její korozní vlastnosti. Kapalná forma je snadno aplikovatelná v nízkoteplotních aparátech. Pro vysokoteplotní aplikaci musí voda být pod velkým tlakem, což klade vysoké nároky na potrubí a nádrže.

Maximální teplota je limitována na cca 374°C (při 22,1 MPa), což je dáno kritickým bodem vody. V některých CSP systémech, jak lze vidět na obrázku 7, se používá sluneční energie koncentrovaná z velkého množství zrcadel nebo čoček do malé oblasti, přijímače, kde dochází k přímé generaci syté páry, která by musela být skladována ve velkém množství pod velkým tlakem v ocelových zásobnících [10, 12].

Z tohoto důvodu musí být zásobníky pro uložení páry speciálně upraveny pro tlak nasycené páry až 10 MPa. Tato varianta je neekonomická kvůli nízké energetické hustotě páry. Proto se při vyšších teplotách používá stlačená sytá kapalná voda jako akumulátor energie a poté se přeměňuje na vodní páru.

V tomto odvětví má lidstvo dobré technologie díky zkušenostem z používání podobných systémů v tepelných elektrárnách. Díky tomu je možné sluneční energii

skladovat při vyšších teplotách s lepší účinností. Parní akumulátory se používají pro krátkodobé skladování tepla [14, 15].



Obrázek 7 CSP systém s přímou generací vodní páry [14]

4.2 Tepelné oleje

Jsou to syntetické organické čiré kapalné látky s dobrým potenciálem přenášet teplo. Jejich výhodou oproti vodě je, že zůstávají v kapalně fázi až do teploty 250 °C při atmosférickém tlaku. Díky nižšímu potřebnému tlaku olejové médium méně namáhá stěny potrubí či nádrže. Oleje mají při provozní teplotě nízkou viskozitu, proto je snadný i jejich rozvod po systému. Nepotřebují také, na rozdíl od solí, žádný systém proti přechodu do pevné fáze, neboť tuhnou až při nízkých teplotách. Neznámější jsou například Therminol® VP-1 nebo Dowtherm® A. Jak je patrné z tabulky 2, první jmenovaný je schopen pracovat až do teploty 400 °C. Problémem je, že s vysokými teplotami a počtem cyklů dochází k degradaci tekutiny, tvorbě kalů, které snižují efektivitu a zvyšují náklady na provoz. Oproti vodě mají nižší měrnou tepelnou kapacitu ($c_p \approx 2000 \text{ J.kg.K}^{-1}$) a jsou výrazně dražší. Proti degradaci se lze bránit přidáním aditiv například grafenu, který zlepšuje teplotní stabilitu [10, 16–18].

Tabulka 2 Vlastnosti tepelných olejů [16]

Charakteristika	Therminol® VP-1	Syltherm XLT	Dowtherm® A
Složení	Difenyloxid / bifenyl	Dimethylpolysiloxan	Difenyloxid / bifenyl
Max. provozní teplota (°C)	400	260	400
Teplota tání (°C)	12	-111	12
Atmosférický bod varu (°C)	257	200	257
Hustota při 210°C (kg.m ⁻³)	904	660	897
Teplotní vodivost při 210°C (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0.11	0.06	0.1083
Měrná tepelná kapacita při 210°C (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	2075	2171	1630
Cena (€.t ⁻¹)	25000	29400	-

4.3 Tekuté soli

Pokud provozní teplota systému vyžaduje teploty vyšší než 400 °C volí se jako HTF i jako skladovací médium soli. V dnešní době jsou nejpoužívanějším skladovacím médiem v CPS systémech, zejména dusičnany. Jsou levné a mají vhodnější vlastnosti pro skladování energie než ostatní tekuté materiály, např. nízký tlak par. Dříve nastával problém se zamrzáním solí v potrubí během chladných období. To se jednalo o jednosložkové soli s teplotou tání cca 200°C. Dnes se používají vícesložkové solné směsi, u kterých lze snížit teplotu tání na teplotu blízkou 100°C (Hitec soli) [10, 19]. Zatuhnutí soli v potrubí už dnes nepředstavuje takový problém, nicméně stále je lepší tomu předcházet například užitím krátké délky potrubí nebo využíváním elektroohřevu.

Tekuté soli jsou již dost populární i v jiných energetických odvětvích. Používají se např. v jaderných reaktorech III a III+ generace [10]. Mají vysoký bod varu, jsou stabilní a také mají poměrně vysokou měrnou tepelnou kapacitu. Maximální možná současná dosažitelná teplota je u dusičných solí, využívaných nejčastěji jako skladovací médium, podle různých zdrojů mezi 535 až 585 °C, což je pod předpokládanými 600-700 °C požadovanými k využití Braytonova CO₂ cyklu s použitím nových generací turbín [12, 20].

Kombinace tekuté soli o takto vysoké teplotě a kovových částí elektrárny a akumulární jednotky tvoří korozní systém, kde sůl zastává funkci elektrolytu srovnatelného s vodním elektrolytem. Zatímco korozní mechanismy kovů ve vodných elektrolytech jsou dobře známy, tak znalostí o mechanismech koroze v solných elektrolytech je nedostatek. Před několika lety bylo prováděno testování ocelí a jiných

slutin při různých teplotách s celkem 9 eutektickými směsmi. Bohužel byly při těchto experimentech použity různé postupy, a proto se výsledky nepodařilo úplně sjednotit. Pro skutečné pracovní podmínky je potřeba korozní vlivy ještě prozkoumat, aby bylo možné snadněji vybrat správnou kombinaci materiálu nádrž-sůl [3].

Vyšší bod varu solí dovoluje použití solí při vyšších teplotách než u předchozích látek a tím dosažení lepší efektivity Rankinova parního cyklu. Mezi nejpoužívanější patří tzv. solární sůl. Jedná se o směs dvou dusičných solí v hmotnostním poměru (60% NaNO₃ a 40% KNO₃). Dalšími populárními solemi jsou tzv. Hitec soli. Hitec je ternární směs NaNO₂, NaNO₃ a KNO₃. Základní parametry těchto solí, jako jsou provozní teploty, tepelné kapacity a ceny jsou uvedeny v tabulce 3. Hitec soli budou možnými nástupci solární soli díky svému nízkému bodu tání i navzdory tomu, že nevydrží tak vysoké teploty [12].

Tabulka 3 Klíčové vlastnosti nejběžnějších termálních solí [12].

Charakteristika	Solární sůl	Hitec	Hitec XL
Hmotnostní složení (-)	60% NaNO ₃ 40% KNO ₃	7% NaNO ₃ 53% KNO ₃ 40% NaNO ₂	45% KNO ₃ 7% NaNO ₂ 48% Ca(NaNO ₃) ₂
Teplota tání (°C)	220	142	120
Maximální provozní teplota (°C)	585	450-538	480-502
Měrná tepelná kapacita při 300°C (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	1495	1560	1447
Hustota při 300°C (kg/m ³)	1899	1860	1992
Cena (\$/kg)	1.30	1.93	1.66

Nejvíce používanou i nadále zůstává solární sůl. Jedná se o binární sloučeninu dvou dusičných solí s tepelnou vodivostí 0.55 W.m⁻¹.K⁻¹ v hmotnostním poměru (60% NaNO₃ a 40% KNO₃) [21]. Je používána hojně po celém světě v CSP aplikacích včetně největšího solárního systému s centrální věží Crescent Dunes v americké Nevadě. V elektrárně takovéto velikosti se musí používat stovky tun HTF potřebné k akumulaci tepla a udržení stabilního výkonu během období, kdy sluneční světlo není k dispozici. Soli všeobecně nepodléhají, na rozdíl od olejů, takové degradaci při vysokých teplotách a jsou méně škodlivé k životnímu prostředí. Na druhou stranu při opravdu vysokých teplotách dochází v termální soli k vylučování škodlivých NOX sloučenin: NO a NO₂, které při vdechnutí způsobují hypoxii a v některých případech i smrt. Proto se doporučuje

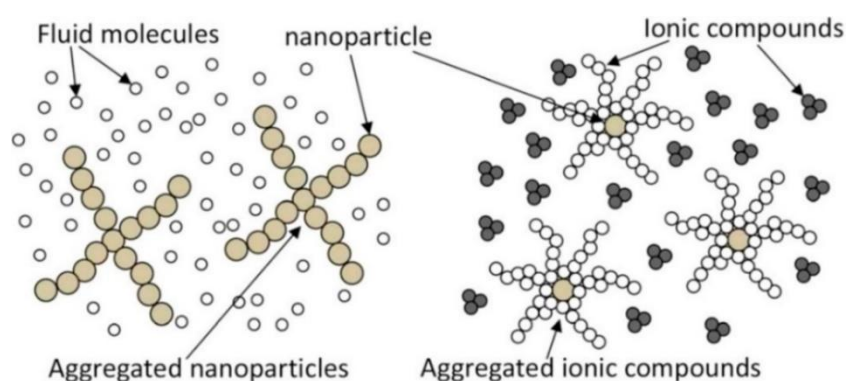


Obrázek 8 Crescent Dunes v americké Nevadě poblíž města Las Vegas jejíž výkon je 110 MW

Převzato z: (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. www.proudgreenbuilding.com [online]. [cit. 5.4.2018]. Dostupný na WWW: <https://www.proudgreenbuilding.com/news/mirage-to-reality-energy-department-investment-brings-crescent-dunes-to-life/>)

používání solární soli do teploty 550°C a krátkodobě lze až 600°C [22]. Na obrázku 8 je zachycena, již jednou zmiňovaná, největší koncentrační solární elektrárna na světě, jejíž stavba byla dokončena v roce 2016, a která využívá právě tekuté soli jako akumulčního média.

Navzdory svým přednostem termální parametry solární soli (měrná tepelná kapacita a tepelná vodivost) a minimální pracovní teplota nejsou nejlepší a je zde stále prostor ke zlepšení. Poměrně snadná cesta k dosažení lepší vlastností vede přes přidávání nanočástic do termální soli. Srovnání molekulárních struktur nanotekutiny je vidět na obrázku 9. Může dojít ke zvýšení měrné tepelné kapacity až na 124% původní hodnoty.



Obrázek 9 Konvenční nanotekutina (vlevo) a roztavená nanotekutina soli [23]

Tepelné vodivosti se nepřikládá až taková důležitost. Nové typy solí na bázi nanotekutin se označují MSBNFs. Jde o mladý objev, který v posledních letech přitahuje zájem vědecké komunity. A protože se jedná o relativně nový objev, je využívání nanotekutin v termálních solích finančně náročné [23, 24].

4.4 Tekuté kovy

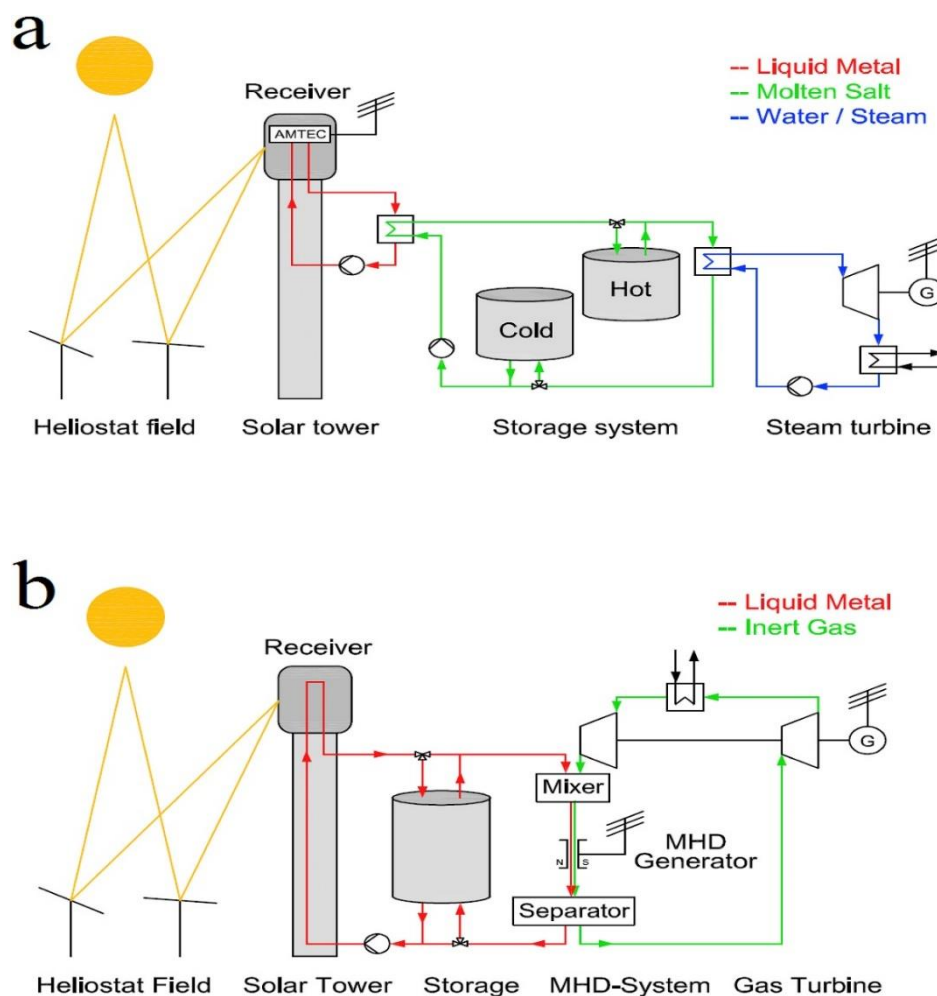
Některé kovy mají nízkou teplotu tání, která se může přibližovat, nebo být klidně pod okolní teplotou a zároveň mají velice vysokou teplotu varu. Není problém se zamrzáním v potrubí a tlak par při vysokých teplotách je téměř nulový. Přesně tyto vlastnosti z nich dělají vhodné HTF v solárních systémech. Mají také nejlepší tepelnou vodivost, ale relativně nízkou tepelnou kapacitu. Například tepelná vodivost sodíku je $64.9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Vysoká pracovní teplota vede k lepší účinnosti termodynamického cyklu a vysoké ΔT zase k velkému množství uskladněného citelného tepla. V Ruské federaci jsou také hojně využívány jako chladiva v jaderných reaktorech [10].

Kromě sodíku připadá v úvahu také LBE (lead-bismut-eutektic) s tepelnou vodivostí $14.9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, který se také používá jako chladivo v některých jaderných reaktorech. Na druhou stranu jsou kovy extrémně drahé a náchylné ke korozi. Se sodíkem přichází také riziko požárů, protože je to jeden z nejreaktivnějších kovů a LBE obsahuje 45% olova, které je známé svou toxicitou [10, 18]. Na obrázku 10 lze vidět dva způsoby použití tekutých kovů. V prvním případě se jedná o nepřímý systém, kde kov neplní funkci akumulačního média a svou energii přenáší přes výměník tepla do tekuté soli. V druhém případě plní kov obě tyto funkce sám. V tabulce 4 je porovnání výše dvou zmiňovaných kovů se vzduchem a solární solí.

Tabulka 4 Porovnání tekutých kovů se vzduchem a solární solí. Vodivost je uvedena pro 550°C. [21]

Charakteristika	Vzduch	Solární sůl	Sodík	LBE
T_{\min} (°C)- teplota tání (pro 1 bar)	< pokojová teplota	220°	98	125
T_{\max} (°C) teplota varu (pro 1 bar)	Neuvádí se	565	883	1553
Tepelná vodivost ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	0,059	0,55	64,9	14,9
Měrná tepelná kapacita ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)	1020 (25°C)	1495 (300°C)	1230 (25°C)	140 (25°C)
Korozivost	3	2	5	1
Bezpečnost	5	3	1	2
Zkušenosti	5	2	3	1
Cena	5	3	2	1

*Provozní aspekty jsou odstupňovány 1=nejhorší, 5= nejlepší



Obrázek 10 Koncepte CSP systému s tekutým kovem jako HTF a) tekutý kov přijímač tepla spolu se solí jako TES b) přímý systém využívající tekutý kov [10]

4.5 Pevné materiály

Materiály jako horniny, písek, štěrk se používají jako plnění do samostatných skladovacích nádrží využívající strmý přechod v teplotní stratifikaci (thermocline). Jsou zde uloženy ve formě náplňové vrstvy (packed bed) a HTF je s nimi v přímém kontaktu, při kterém dochází k přestupu tepla. Jedná se o takzvané pasivní akumulční systémy, kde se tyto materiály používají k nabíjení a vybíjení energie, ale cirkulaci obstarává jiné médium. Při výběru přírodního akumulátoru hraje roli mnoho aspektů jako například: dostupnost, cena, měrná tepelná kapacita, tepelná vodivost. Zajímavostí může být objevení levného keramického odpadu s názvem Cofalit, který se ukázal být plně kompatibilní s termální solí, nikoli však s Hitec solemi, kde vznikala nežádoucí vrstva křemičitanu vápenatého [10, 25]. Jako další pevný materiál je používán beton.

Beton je levný netoxický nehořlavý materiál s dobrými mechanickými vlastnostmi. Je to směs písku cementu a štěrku. Štěrk má vlastnosti jako hornina, písek je převážně SiO_2 a cement funguje jako pojivo. Měrná tepelná kapacita je $700 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a tepelná vodivost blízká $0,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Používá se v pasivních systémech, stejně jako ostatní pevné materiály. V betonu dochází k předání tepla skrze trubkový výměník. Výměník je přímo uvnitř betonového bloku. Díky dobrému kontaktu mezi potrubím a betonem je přenos tepla velice efektivní. Další výhodou je, že beton má podobnou teplotní roztažnost jako ocel, která se používá právě jako materiál trubek. Množství trubek a jejich geometrie (průměr) je zásadní pro finální funkčnost. Tento způsob skladování energie je náročný na výrobní náklady. Do betonu se přidávají různá aditiva, která mají za cíl zlepšit jeho vlastnosti. Přidání různých křemičitanů může o 50% zlepšit měrnou tepelnou kapacitu a pro lepší teplotní stabilitu při vysokých teplotách se do betonu přidávají polypropylenová vlákna [10, 11, 26].

5 Akumulace latentního tepla

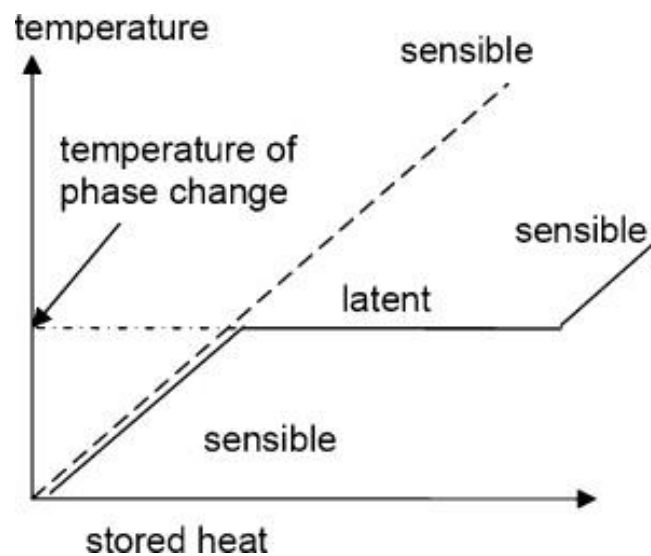
Metoda využívá skupenského tepla, což je teplo absorbované nebo uvolněné při fázové přeměně akumulčního materiálu. Nejčastěji se jedná o fázovou změnu z pevného na kapalné stádium. Největší latentní teplo je potřeba ke změně z kapalného na plynné médium. Problémem je dramatická změna objemu média během této fázové přeměny, proto se tato varianta moc nevyužívá. Ke změně fáze dochází při nabíjení a

vybíjení média. PCM (phase change materials) systémy operují obecně s nižšími teplotami (uvažují se ale i vysokoteplotní) a mají vyšší objemové hustoty energie než systémy pro akumulaci tepla citelného. Nejedná se o hlavní způsob skladování tepla. energii akumulovanou v latentním teple lze popsat rovnicí,

$$Q = m \cdot L$$

kde m je hmotnost (kg) a L je skupenské teplo ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$) [10, 11, 27].

Vhodné materiály se vybírají samozřejmě podle ceny a podle fyzikálních vlastností jako měrná tepelná kapacita. Na obrázku 11 můžeme vidět graf závislosti teploty média na naakumulovaném teple. Při dosažení teploty, při které probíhá fázová přeměna a jejím dalším zvyšování, nedochází u látky ke zvyšování její teploty, ale veškeré teplo je spotřebováno touto přeměnou. Na druhou stranu při skladování citelného tepla (sensible heat) můžeme vidět, že přímka je stále rostoucí, jelikož nedojde ke změně fází.



Obrázek 11 Schéma fázové přeměny PCM [11]

5.1 Organické materiály

Mnoho organických materiálů má jedinečnou kvalitu pro skladování tepla. Jsou chemicky stabilní, netoxické, nekorozivní a snadno dostupné. Při vyšších teplotách ovšem podléhají velké degradaci, a proto se látky jako parafíny, mastné kyseliny a estery příliš neuplatní v aplikacích pro vysokopotenciální teplo. Používají se ale hojně například v domácích aplikacích. Výjimku tvoří cukerné alkoholy [10].

Cukerné alkoholy mají ze všech organických látek nejvyšší bod tání. Teplota pro jejich fázovou přeměnu (od 90°C do 250°C) je činí vhodnými médii pro solární ohřivače nebo využití odpadního tepla. Jsou to levné a netoxické PCM. Jsou schopny krystalizovat ve více krystalových strukturách, jsou tedy polymorfní.

Právě tato vlastnost má dopad na možnost jejich využití, protože různé struktury mají jiné chemicko-fyzikální vlastnosti [28]. Například pro myo – inositol ($C_6H_{12}O_6$) je parametrem ovlivňující polymorfii teplota. Změna polymorfie byla v testech zaznamenána při rozsahu operační teploty 50-260°C, ale nikoli při 150-260°C. Jde spíše o experimentální způsob využití a poznatky v tomto odvětví je třeba ještě rozšířit [28].

5.2 Anorganické materiály

Anorganické materiály jsou vhodnější pro vysokoteplotní aplikace než organické materiály, u kterých by docházelo k rozkladu vlivem vysoké teploty.

5.2.1 Soli

Díky vysokému bodu tání jsou soli vhodnými kandidáty nejen pro skladování citelného ale i latentního tepla. Ke správné a účinné funkci je potřeba vhodně zvolit danou sůl. Nutné je, aby bod tání soli byl mezi extrémy teplot systému. Dá se tak využít jak skladování citelného, tak latentního tepla, což vede k velké objemové kapacitě energie. Ačkoli toto nezbytně vyžaduje ohřívání pevného skupenství soli při procesu tání. Přičemž v pevném skupenství se teplo šíří kondukcí a v kapalném jak kondukcí, tak konvekcí. Zlepšení teplotní vodivosti přináší velkou výhodu [10]. Solí je několik druhů. V CSP systémech jsou nepoužívanější dusičnany, kvůli nejnižší teplotě tání.

Čisté soli mají definované své fyzikální a chemické vlastnosti. Možnost modifikace jejich parametrů přináší použití solných eutektik. U těchto eutektických směsí je možné například snížit bod tání, což přináší obrovské benefity. Eutektických směsí solí je obrovské množství kombinací a na základě teoretických znalostí a výpočtů lze odhadovat jejich vlastnosti, které jsou závislé na složení. Jedná se o určení například hustoty nebo teploty tání s odchylkou 5%. Jejich tepelná vodivost se ovšem přesněji odhadnout nedá [29].

5.2.2 Kovy a slitiny

Výhodou těchto materiálů využitých jako PCM (phase change materials) je jejich vysoká teplotní vodivost. Jejich nevýhodou je vysoká cena a nízká teplotní kapacita na jednotku hmotnosti. Pokud je ovšem rozhodujícím požadavkem na skladování tepla malý objem zařízení, jsou dobrou volbou. Jsou s nimi ovšem spojeny i další problémy. Po opakujících se teplotních cyklech dochází ve změně mikrostruktury způsobenými precipitací, oxidací nebo segregací [10].

6 Aplikace TES mimo solární energetiku

6.1 Jaderné elektrárny

Jaderné elektrárny jsou skvělým zdrojem energie s minimálními emisemi CO₂, ve srovnání s jejich fosilními protějšky. Ve schopnosti se přizpůsobovat poptávce a nabídce po elektřině jsou ovšem nekompetitivní. Není to možné kvůli výrobnímu charakteru reaktoru, který potřebuje konstantní provozní podmínky. Proto by bylo zajímavé integrovat do jaderného energetického zařízení nějaký akumulátor energie. Lze uvažovat o akumulaci do mechanické energie, elektrické akumulaci a akumulaci do tepla, která se jeví jako nejekonomičtější. U novějších typů reaktorů, využívajících tekutých solí nebo plynů jako chladiv aktivní zóny, je aplikace účinnější vzhledem k vyšším dosaženým teplotám, než u světově nejrozšířenějších, vodou chlazených, lehkovodních reaktorů VVER [30].

Teplota vody na výstupu z aktivní zóny u vodou chlazených reaktorů bývá kolem 325°C (Temelínský blok 320°C), což je ve srovnání se solemi chlazeným reaktorem, který dosáhne klidně 700-1000°C, opravdu znatelný rozdíl [30, 31]. Schéma jaderného reaktoru, využívací TES je znázorněno na obrázku 12. Pro lehkovodní reaktory by se jako látky pro skladování tepla hodily tepelné oleje, díky svým nižším provozním teplotám (do 400°C).

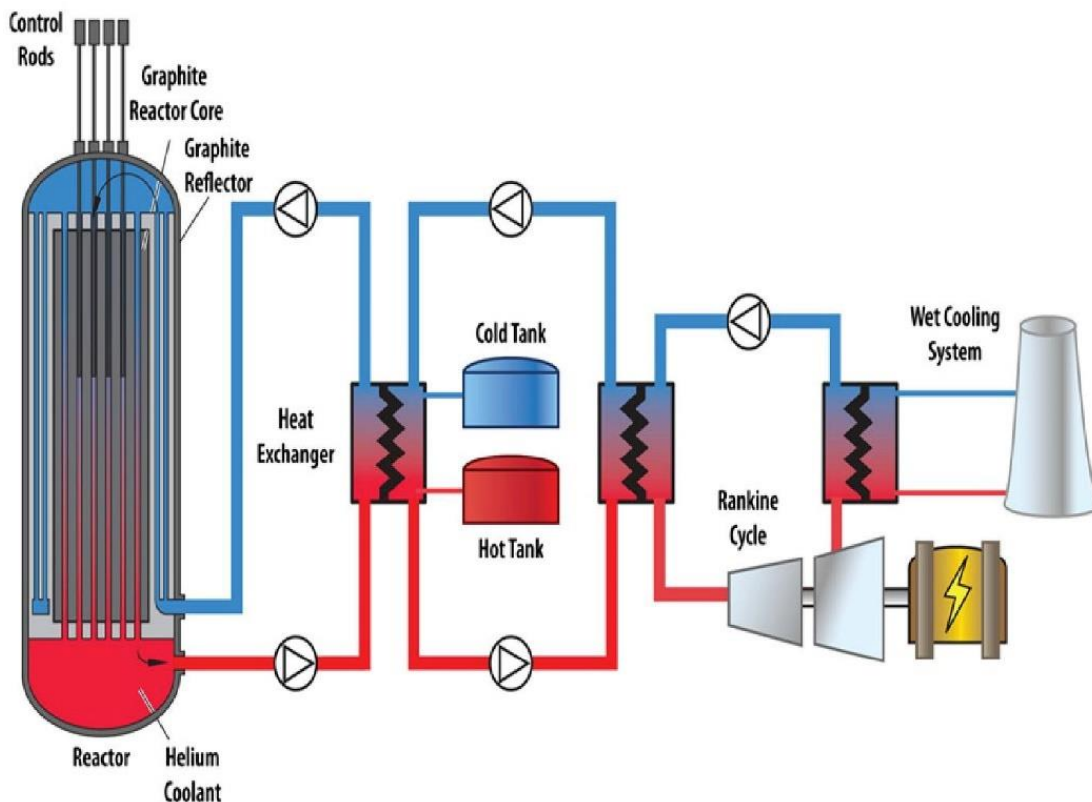
Vysokoteplotní reaktory chlazené tekutými solemi využívají jako akumulační médium nám již dobře známé dusičné soli. V tabulce 5 jsou čtyři druhy jaderných reaktorů, připadající v úvahu pro aplikaci skladování tepla. Soli jsou vhodné díky vyšším provozním teplotám a v kapalném stavu zůstávají i při atmosférickém tlaku. Jak lze vidět

z obrázku 12, princip skladování tepla pro jadernou elektrárnu je téměř totožný se solárními elektrárnami, zde se ovšem klade obrovský důraz na bezpečnost. Teoreticky by se ke skladování tepla dalo využít přímo chladio reaktoru, které by působilo i jako akumulační médium, ale pouze malý počet látek je pro tuto aplikaci kompatibilní. Mnohem pravděpodobnější je tedy situace znázorněná na obrázku 12, tedy využití výměníku tepla mezi chladičem reaktoru a skladovacím médiem [31].

Jaderná energetika je politicky nejcitlivějším odvětvím, kvůli vznikajícím odpadům a radioaktivitě, a proto podléhá nejpřísnějším bezpečnostním a administrativním podmínkám. Právě kvůli tomu by k výměně tepla mezi chladičem reaktoru a skladovacím médiem muselo docházet uvnitř kontejneru, který nesmí opustit nic aktivního z primární zóny. I parogenerátory jsou vždy umístěny v kontejnerech. Toto by kladlo obrovské nároky na objem této schránky tím i na její cenu [30].

Tabulka 5 Potenciálně použitelné jaderné reaktory pro TES a jejich charakteristiky [31]

Charakteristika	Tlakovodní reaktor (PWR)	Vysokoteplotní reaktor (VHTR)	Pokročilý vysokoteplotní reaktor (AHTR)	Sodíkový rychlý reaktor (SFR)
Chladio	Voda	Helium	Tekutá sůl	Sodík
Tepelná energie (MW)	~1100	600	2400	1000-5000
Teplota na výstupu z aktivní zóny (°C)	300	850-1000	705-1000	530-550
Tepelný oběh	Rankyn	Brayton	Brayton	Rankyn nebo Brayton
Status	Běžně v provozu	Ve vývoji/Předveden	Koncept	Předveden



Obrázek 12 Schéma aplikace TES pro jaderný reaktor [31]

6.2 Elektrárny na fosilní paliva

Tyto elektrárny generují elektrickou energii spalováním fosilních paliv, jakými jsou: uhlí nebo zemní plyn. Elektrárny těchto typů jsou zodpovědné za 40% celkových světových emisí CO₂. Jejich generátory pohánějí turbíny využívající buď Rankinův, nebo Braytonův cyklus. Uhelňé elektrárny jsou při provozu flexibilnější než jejich jaderné protějšky a dokáží lépe reagovat například na vyšší poptávku po elektřině zvýšením výkonu. Účinnost jejich výroby by se dala zvýšit lepším zužitkováním tepla pomocí systémů kogenerace nebo trigenerace, kde by TES mohl hrát významnou roli. Fosilní paliva by také mohla figurovat jako sekundární paliva pro kombinované CSP elektrárny [10].

6.3 Geotermální energie

Planeta Země je sama o sobě obrovské úložiště a zdroj tepelné energie. Pod zemskou kůrou a pláštěm v zemském jádru dochází už miliardy let k rozpadu jader

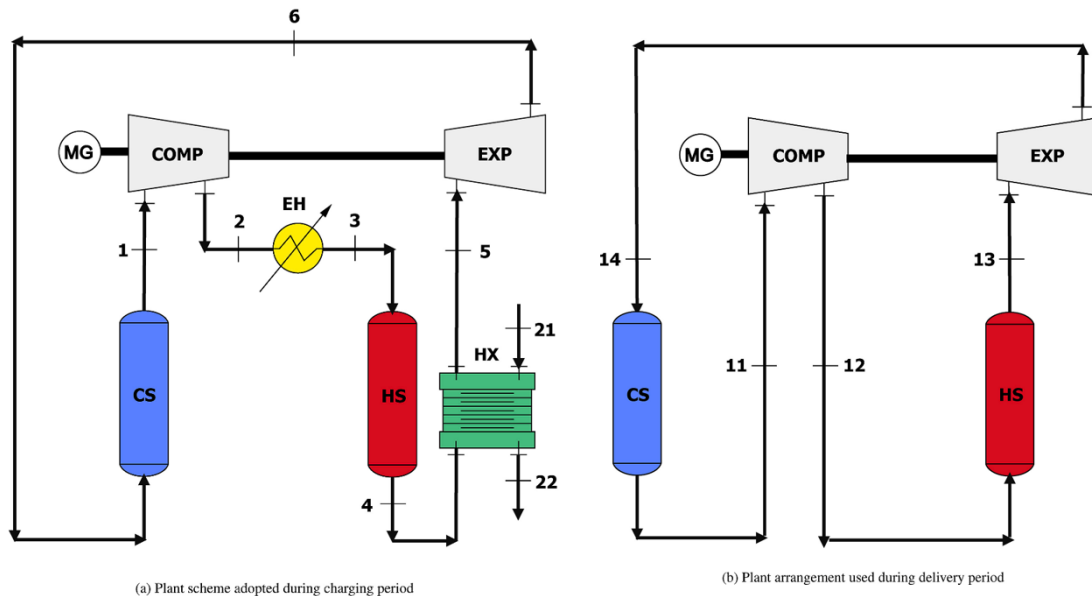
těžkých kovů a tím vznikáním tepla. Výhodou tohoto zdroje tepla je to, že je k dispozici, na rozdíl od solární energie, 24 hodin denně. Vrty poskytují sice nižší teploty (cca 150°C), které jsou ovšem ideální k výrobě elektřiny využitím ORC s pracovní látkou například isopentan nebo isobutan. Prostor pro TES zde existuje v podobě kogenerace, trigenerace nebo více stupňové generace [10].

6.4 Využití TES pro přebytkovou elektřinu

Tyto technologie jsou teprve v raných fázích vývoje. Zájem o jejich vývoj mají společnosti jako Google nebo Tesla. V již existujících systémech pro skladování elektřiny PHES (Pumped heat electricity storage) je elektřina používána pro pohon motoru připojenému ke dvěma zásobníkům tepla. Přebytečná elektřina pohání motor, který uvádí do provozu tepelné čerpadlo. To pak čerpá teplo ze studené do teplé nádrže (princip podobný jako lednice). Pro získání energie se chod čerpadla obrátí a stane se z něj tepelný motor, který pohání generátor [32, 33].

Systém PHES musí obsahovat dvě nádrže, naplněné nejčastěji částicemi nějakých minerálů (drcené horniny) nebo náplňovou vrstvou jiného materiálu (například betonu), zařízení pro expandování a kompresi plynu a uzavřený okruh s pracovním plynem, který propojuje obě nádrže, kompresor a expandér. Nejvhodnějším pracovním plynem je jednoatomový argon, který dokáže převádět teplo lépe než vzduch za stejného tlaku.

Na obrázku 13 je vidět princip PHES. Vlevo je nabíjení systému a vpravo jeho vybíjení. Argon vstupuje do kompresoru (COMP) za okolního tlaku a teploty. Kompresor je poháněn motorem/generátorem (MG), poháněným elektřinou, kterou je třeba naakumulovat. Plyn je stlačen na 12 bar a dosáhne přitom teploty 500°C. Poté ještě prochází elektrickým ohříváčem (EH). Takto ohřátý vstupuje do horní části teplé skladovací nádrže (HS), kde pomalu proudí, ohřívá částice minerálů a sám se chladí. Po průchodu nádrží vystupuje argon v dolní části nádrže, stále při 12 barech, ale už za okolní teploty. Pokud je třeba teplotu ještě snížit, využije se výměníku tepla (HX). Dále jeho cesta vede do expandéru (EXP, turbíny), kde expanduje na okolní tlak a dojde k jeho ochlazení na -160°C. Poté vstupuje do dna studené nádrže (CS), kde při průchodu nahoru ochlazuje částice a sám se ohřívá zpět na okolní teplotu.



Obrázek 13 systém PHES vlevo při nabíjení, vpravo při vybíjení [32]

Při vybíjení, a tedy potřebě výroby elektřiny se chod systému obrací. Argon za okolní teploty vstupuje do studené nádrže. Otepluje částice a sám chladne. Dále jde do kompresoru, stlačí se a ohřeje zpět na teplotu okolí. Při vstupu do teplé nádrže ochlazuje částice a sám se ohřeje na 500°C. Horký stlačený vzduch jde do expandéru, kde předá svou energii a pohání motor/generátor. Účinnost tohoto systému může být až 80% [32, 33].

7 Výpočet tepelných ztrát v nádržích

Budeme uvažovat systém se solární soli (40% NaNO₃ + 60% KNO₃) jako akumulacním médiem. Její fyzikálně-termální vlastnosti v závislosti na termodynamické teplotě jsou popsány následujícími empirickými rovnicemi. Solární sůl se volí pro její vhodné vlastnosti jako je třeba stabilita při vysokých teplotách [34].

$$\rho = 2090 - 0,636 \cdot T \text{ (kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{)}$$

$$c_p(T) = 1443 + 0,172 \cdot T \text{ (J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}\text{)}$$

$$\lambda(T) = 0,443 + 1,9 \cdot 10^{-4} \cdot T \text{ (W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}\text{)}$$

$$\eta(T) = (22,714 - 0,120 \cdot T + 2,281 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - 1,474 \cdot 10^{-7} \cdot T^3) \cdot 10^{-3} \text{ (Pa} \cdot \text{s)}$$

ρ je hustota, c_p měrná tepelná kapacita, λ tepelná vodivost, η je dynamická viskozita a teplota T se to rovnic dosazuje ve °C.

Teplota média je zde v teplé nádrži předpokládána 390°C a ve studené nádrži 270°C, což odpovídá aplikaci pro parabolické žlabové kolektory [10]. Požadavek na skladování tepla bude pro elektrické zařízení s výkonem 8 MW s potřebou dodávání elektřiny 5-10 hodin. Účinnost systému (limitovanou tepelným oběhem) předpokládám 40%. Je potřeba skladovat tedy 100-200 MWh tepla. Tedy 200 MWh je 720 GJ = Q . Množství soli získám z kalorimetrické rovnice

$$Q = \int_{T_s}^{T_t} m \cdot c_p \cdot dT \rightarrow m = \frac{Q}{c_p \cdot (T_t - T_s)} = \frac{720 \cdot 10^9}{1500 \cdot (390 - 270)} = 4 \cdot 10^6 \text{ kg}$$

Kde c_p je spočítáno pro aritmetický průměr dvou teplot = 330°C (odchylka c_p u těchto teplot je zanedbatelná, řádově jde o jednotky J/(kgK)). Uvažuji, že v teplé nádrži bude 50% hm. soli, a že budou mít obě válcovitý tvar.

Nádrže tedy obsahují 4000 t soli, která má při střední teplotě 320°C (odchylka ve stavech minimální a maximální teploty je v tomto koncepčním výpočtu zanedbána) Hustotu vycházející z rovnice:

$$\rho = 2090 - 0,636 \cdot 320 = \mathbf{1886,5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}}$$

Tudíž sůl zabírá objem o velikosti:

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{2 \cdot 10^6}{1886,5} = 1060,17 \text{ m}^3, \text{ z čehož spočítám rozměry válce (o průměru } D \text{ a výšce}$$

H), kde proporčně bude $D \approx 2,7 \cdot H$ (návrh).

$$V = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot \frac{D}{2,7} = \pi \cdot \frac{D^3}{10,8} \rightarrow D = \sqrt[3]{\frac{1060,17 \cdot 10,8}{\pi}} = 15,38 \text{ m}$$

Získávám rozměry válcové nádrže pro akumulaci citelného tepla do soli, kde D volím 15,4 m a H volím 5,7 m, tímto zvýším objem soli na 1061,7 m³ a hodnota celkového uložitelného tepla vzroste na hodnotu $Q = 721 \text{ GJ}$,

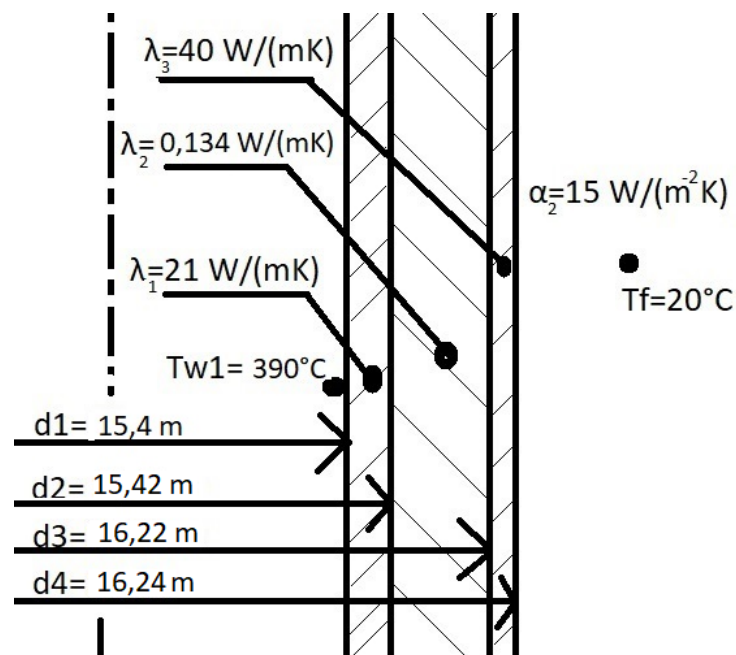
Tloušťku stěny i dno i strop jsou zvoleny z nerezové oceli tloušťky 10 mm na základě konstrukce jiných použitých nádrží [13].

Stěna a strop nádrže budou pokryty izolací ve formě kamenné vlny o tloušťce 40 cm a celá nádrž pak krycím plechem tloušťky 1 mm. Ztráty do dna nádrže ve svém výpočtu zanedbám.

Díky velkému poloměru a tenkým stěnám izolace by nebyl problém místo válcové stěny řešit příkladem pomocí rozvinutí do stěny rovinné s chybou menší než 1 %, protože

$$\gamma = \frac{R_1}{R_4} = \frac{7,7}{8,12} \cong 1 \rightarrow \text{zanedbatelná chyba [38].}$$

Schéma válce pro teplou sůl lze vidět na následujícím obrázku č. 14.



Obrázek 14 Schéma řešené cylindrické nádoby pro solární sůl

Jako stěnu nádoby použijí nerezovou ocel s tepelnou vodivostí $\lambda = 21 \text{ W/(mK)}$ [35]. Vrstva izolace podle katalogu firmy ISOVER (Orstech DP 65) pro 400°C , $\lambda = 0,134 \text{ W/(mK)}$ pro 270° $\lambda = 0,081 \text{ W/(mK)}$ a vrchní ocelový kryt z oceli s vodivostí $\lambda = 40 \text{ W/(mK)}$ [36]. Teplotu okolí (T_f) uvažují 20°C a součinitel přestupu tepla je roven $\alpha_2 = 15 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Teplota stěny je $T_{w1} = 390^\circ\text{C}$ [38].

Součinitel přestupu tepla vztážený na 1 m délky stěny (W/(mK))

$$k_{na1m} = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2\lambda_1} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_2} \cdot \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{2\lambda_3} \cdot \ln \frac{d_4}{d_3} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_4}}$$

kde člen $\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} = 0$, protože počítám přímo s teplotou stěny, tudíž $\alpha_1 = \infty$. Tím pádem se součinitel přestupu tepla na 1 m délky se rovná po dosažení

$$k_{na1m} = \frac{\pi}{\frac{1}{2 \cdot 21} \cdot \ln \frac{15,42}{15,4} + \frac{1}{2 \cdot 0,134} \cdot \ln \frac{16,22}{15,42} + \frac{1}{2 \cdot 40} \cdot \ln \frac{16,24}{16,22} + \frac{1}{15 \cdot 16,24}}$$

$$= \mathbf{16,288 \text{ W/(mK)}}$$

Součinitel přestupu tepla vztážený na 1 m^2 vnitřní stěny

$$k_{Hw} = \frac{k_{na1m}}{\pi \cdot d_1} = \frac{16,288}{\pi \cdot 15,4} = \mathbf{0,337 \text{ W/(m}^2\text{K)}}$$

Hustota tepelného toku: $q = k_{Hw} \cdot (T_{w1} - T_f) = 0,337 \cdot (390 - 20) = \mathbf{124,9 \text{ W/m}^2}$

Tep. tok ze stěny nádrže: $\dot{Q}_w = q \cdot S = q \cdot \pi \cdot d_1 \cdot H = 124,9 \cdot \pi \cdot 15,4 \cdot 5,7 = \mathbf{34442 \text{ W}}$

Součinitel přestupu tepla pro vršek nádrže pokrytý stejnou izolací jako stěna h jsou tloušťky jednotlivých vrstev. Teplotu stěny znám tudíž $\alpha_1 = \infty$

$$k_{Hr} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{h_1}{\lambda_1} + \frac{h_2}{\lambda_2} + \frac{h_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{0 + \frac{0,01}{21} + \frac{0,4}{0,134} + \frac{0,01}{40} + \frac{1}{15}} = \mathbf{0,327 \text{ W/(m}^2\text{K)}}$$

Tep. tok ze vrchu nádrže: $\dot{Q}_r = k_{Hr} \cdot (T_{w1} - T_f) \cdot S = 0,327 \cdot (390 - 20) \cdot \pi \cdot 7,7^2 = \mathbf{22536 \text{ W}}$

Celkový tep tok u teplé nádrže je: $\dot{Q}_H = \dot{Q}_w + \dot{Q}_r = 34442 + 22536 = \mathbf{56978 \text{ W}}$

U studené nádrže, za předpokladu stejného izolování vyjdou součinitele přestupu tepla $k_{cw} = 0,205 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, $k_{cr} = 0,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ Změna nastala kvůli rozdílné teplotní vodivosti u izolace, která je pro 270°C $\lambda = 0,081 \text{ W}/(\text{mK})$ [36].

$$\begin{aligned}\dot{Q}_w &= q \cdot S = k_{cw} \cdot (T_{w1} - T_f) \cdot \pi \cdot d_1 \cdot H = 0,205 \cdot (270 - 20) \cdot \pi \cdot 15,4 \cdot 5,7 \\ &= \mathbf{14133 \text{ W}}\end{aligned}$$

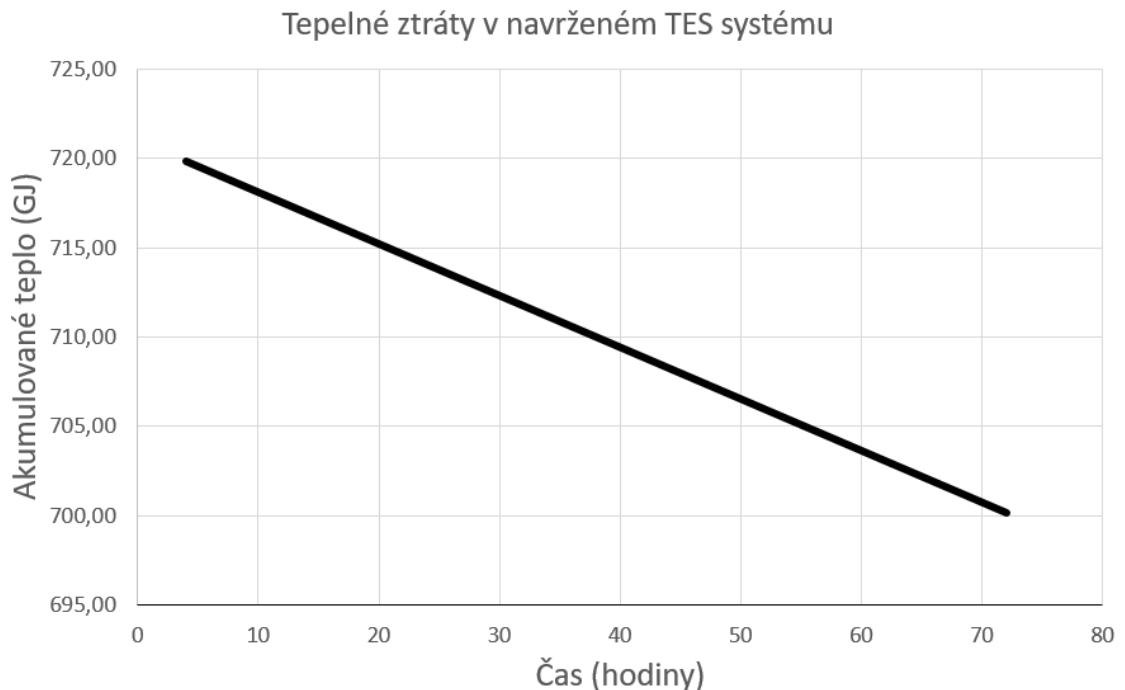
$$\dot{Q}_r = k_{cr} \cdot (T_{w1} - T_f) \cdot S = 0,2 \cdot (270 - 20) \cdot \pi \cdot 7,7^2 = \mathbf{9313 \text{ W}}$$

Celkový tep tok u studené nádrže je: $\dot{Q}_c = \dot{Q}_w + \dot{Q}_r = 14133 + 9313 = \mathbf{23446 \text{ W}}$

Ztrátu tepla Q v čase získáme: $Q = (\dot{Q}_c + \dot{Q}_H) \cdot t = \mathbf{80424 \cdot t (J)}$ [38]

kde t je čas v sekundách. Na následujícím obrázku 15 je graf zobrazující pokles akumulovaného tepla v čase.

Z obrázku můžeme vyčíst že během 3 dnů poklesne hodnota akumulovaného tepla na 700 GJ, to znamená, že došlo k poklesu na 97% původně akumulovaného tepla. (v reálu by ztráty byly ještě o něco vyšší, kvůli aproximacím a kvůli zanedbanému úniku tepla dnem nádrže).



Obrázek 15 Graf znázorňující úbytek tepla z TES systému se dvěma zásobníky

Ke ztuhnutí soli ve studené nádrži dojde, pokud teplota soli klesne na 220°C.

c_p při 270°C = 1490 J/(kg.K) a teplo, které se musí ze studené nádrže uvolnit pro ztuhnutí soli je tedy vyjádřeno jako:

$$Q_{zatuh} = m \cdot c_p (T_1 - T_2) = 2 \cdot 10^6 \cdot 1490 \cdot (270 - 220) = \mathbf{149 \text{ GJ}}$$

A čas t pro ztuhnutí se vyjádří jako teplo vydělené tepelným tokem ze studeného tanku.

$$t = \frac{Q_{zatuh}}{\dot{Q}_c} = \frac{149 \cdot 10^9}{23446} = 6355028 \text{ s} = \mathbf{73 \text{ dní}}$$

Kvůli aproximacím lze očekávat ztuhnutí soli v kratším časovém horizontu.

8 Závěr

V této bakalářské práci zabývající se skladováním tepla, které je poté použito pro výrobu elektřiny, bylo nejprve uvedeno téma skladování tepla, jeho potenciál a jeho postavení mezi ostatními možnostmi akumulace energií. Dále byly popsány různé technologie pojící se významně s koncentrovanou solární energií. Práce se věnuje i běžně užívaným pracovním energetickým cyklům a jejich zakomponováním do solární energetiky. Poté se práce zabývá jak komerčně užívanými způsoby a látkami pro akumulaci tepla, tak i experimentálními aplikacím. Na konci práce jsou rozebrány i možnosti aplikace mimo odvětví solárních elektráren, například do jaderné energetiky. Tyto aplikace by mohly být zajímavým přínosem pro budoucnost, protože zvyšují účinnosti elektráren. Následuje drobný koncepční výpočet pro množství akumulovaného tepla v elektrárně a tepelné ztráty, ke kterým dochází v průběhu času.

Obecně se akumulace tepla jeví jako perspektivní možnost pro lepší využívání energií. Fosilní paliva se musí zákonitě jednou vyčerpát, a proto se musí hledat nové možnosti využití obnovitelných zdrojů nebo vylepšení těch stávajících. Skladování vysokopotenciálního tepla je jednou z nich.

Seznam použité literatury

- [1] LUO, Xing, Jihong WANG, Mark DOONER a Jonathan CLARKE. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Applied Energy* [online]. 2015, **137**, 511–536 [vid. 2018-03-25]. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2014.09.081
- [2] LANDRY, Mathieu a Yves GAGNON. Energy Storage: Technology Applications and Policy Options. In: *Energy Procedia* [online]. B.m.: Elsevier, 2015, s. 315–320 [vid. 2018-03-25]. ISBN 18766102. Dostupné z: doi:10.1016/j.egypro.2015.11.494
- [3] GASIA, Jaume, Laia MIRÓ a Luisa F. CABEZA. Review on system and materials requirements for high temperature thermal energy storage. Part 1: General requirements. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2017, **75**, 1320–1338 [vid. 2018-03-23]. ISSN 18790690. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2016.11.119
- [4] LEFEBVRE, Dominique a F. Handan TEZEL. *A review of energy storage technologies with a focus on adsorption thermal energy storage processes for heating applications* [online]. B.m.: Pergamon. 1. leden 2017 [vid. 2018-03-28]. ISBN 1364-0321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2016.08.019
- [5] WANG, Kun, Ya Ling HE a Han Hui ZHU. Integration between supercritical CO₂ Brayton cycles and molten salt solar power towers: A review and a comprehensive comparison of different cycle layouts. *Applied Energy* [online]. 2017, **195**, 819–836 [vid. 2018-05-12]. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2017.03.099
- [6] ABOELWAFI, Omar, Seif Eddeen K. FATEEN, Ahmed SOLIMAN a Ibrahim M. ISMAIL. *A review on solar Rankine cycles: Working fluids, applications, and cycle modifications* [online]. B.m.: Pergamon. 1. únor 2018 [vid. 2018-05-19]. ISSN 18790690. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2017.09.097

- [7] STEIN, W. H. a R. BUCK. Advanced power cycles for concentrated solar power. *Solar Energy* [online]. 2017, **152**, 91–105 [vid. 2018-05-13]. ISSN 0038092X. Dostupné z: doi:10.1016/j.solener.2017.04.054
- [8] QUOILIN, Sylvain, Martijn Van Den BROEK, Sébastien DECLAYE, Pierre DEWALLEF a Vincent LEMORT. Techno-economic survey of organic rankine cycle (ORC) systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2013, **22**, 168–186 [vid. 2018-05-21]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2013.01.028
- [9] LI, Ming Jia, Han Hui ZHU, Jia Qi GUO, Kun WANG a Wen Quan TAO. *The development technology and applications of supercritical CO₂ power cycle in nuclear energy, solar energy and other energy industries* [online]. B.m.: Pergamon. 5. listopad 2017 [vid. 2018-05-12]. ISSN 13594311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2017.07.173
- [10] ALVA, Guruprasad, Yaxue LIN a Guiyin FANG. *An overview of thermal energy storage systems* [online]. B.m.: Pergamon. 1. únor 2018 [vid. 2018-03-28]. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2017.12.037
- [11] GIL, Antoni, Marc MEDRANO, Ingrid MARTORELL, Ana LÁZARO, Pablo DOLADO, Belén ZALBA a Luisa F. CABEZA. *State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1-Concepts, materials and modellization* [online]. 2010 [vid. 2018-03-30]. ISBN 9781617792618. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2009.07.035
- [12] GONZÁLEZ-ROUBAUD, Edouard, David PÉREZ-OSORIO a Cristina PRIETO. *Review of commercial thermal energy storage in concentrated solar power plants: Steam vs. molten salts* [online]. B.m.: Pergamon. 1. prosinec 2017 [vid. 2018-03-30]. ISBN 1364-0321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2017.05.084
- [13] PRIETO, Cristina, Laia MIRÓ, Gerard PEIRÓ, Eduard ORÓ, Antoni GIL a Luisa F. CABEZA. Temperature distribution and heat losses in molten salts tanks for CSP plants. *Solar Energy* [online]. 2016, **135**, 518–526 [vid. 2018-05-22].

- [14] MEDRANO, Marc, Antoni GIL, Ingrid MARTORELL, Xavi POTAU a Luisa F. CABEZA. *State of the art on high-temperature thermal energy storage for power generation. Part 2-Case studies* [online]. 2010 [vid. 2018-03-30]. ISBN 1364-0321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2009.07.036
- [15] STEINMANN, Wolf-Dieter a Markus ECK. Buffer storage for direct steam generation. *Solar Energy* [online]. 2006, **80**(10), 1277–1282 [vid. 2018-03-30]. ISSN 0038-092X. Dostupné z: doi:10.1016/J.SOLENER.2005.05.013
- [16] KENDA, Eric Serge, Kokouvi Edem N'TSOUKPOE, Igor W.K. OUÉDRAOGO, Yézouma COULIBALY, Xavier PY a Fabrice Marie Armel W. OUÉDRAOGO. Jatropha curcas crude oil as heat transfer fluid or thermal energy storage material for concentrating solar power plants. *Energy for Sustainable Development* [online]. 2017, **40**, 59–67 [vid. 2018-03-30]. ISSN 09730826. Dostupné z: doi:10.1016/j.esd.2017.07.003
- [17] WANG, Ning, Guoying XU, Shuhong LI a Xiaosong ZHANG. Thermal Properties and Solar Collection Characteristics of Oil-based Nanofluids with Low Graphene Concentration. *Energy Procedia* [online]. 2017, **105**, 194–199 [vid. 2018-03-30]. ISSN 1876-6102. Dostupné z: doi:10.1016/J.EGYPRO.2017.03.301
- [18] BENOIT, H., L. SPREAFICO, D. GAUTHIER a G. FLAMANT. *Review of heat transfer fluids in tube-receivers used in concentrating solar thermal systems: Properties and heat transfer coefficients* [online]. B.m.: Pergamon. 1. březen 2016 [vid. 2018-03-30]. ISBN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2015.10.059
- [19] ALVA, Guruprasad, Lingkun LIU, Xiang HUANG a Guiyin FANG. *Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications* [online]. B.m.: Pergamon. 1. únor 2017 [vid. 2018-04-03]. ISBN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2016.10.021
- [20] JACOB, Rhys, Martin BELUSKO, A. INÉS FERNÁNDEZ, Luisa F. CABEZA, Wasim SAMAN a Frank BRUNO. Embodied energy and cost of high temperature thermal

- energy storage systems for use with concentrated solar power plants. *Applied Energy* [online]. 2016, **180**, 586–597 [vid. 2018-03-30]. ISSN 03062619.
Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2016.08.027
- [21] PACIO, J., A. FRITSCH, C. SINGER a R. UHLIG. Liquid metals as efficient coolants for high-intensity point-focus receivers: Implications to the design and performance of next-generation CSP systems. In: *Energy Procedia* [online]. B.m.: Elsevier, 2013, s. 647–655 [vid. 2018-04-07]. ISSN 18766102. Dostupné z: doi:10.1016/j.egypro.2014.03.070
- [22] PENG, Qiang, Jing DING, Xiaolan WEI a Gan JIANG. The Release Properties of Nitrogen Oxides of Solar Salt Used for Thermal Energy Storage in Different Environment. In: *Energy Procedia* [online]. B.m.: Elsevier, 2017, s. 4420–4427 [vid. 2018-04-04]. ISSN 18766102. Dostupné z: doi:10.1016/j.egypro.2017.03.937
- [23] ARTHUR, Owen a M. A. KARIM. An investigation into the thermophysical and rheological properties of nanofluids for solar thermal applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2016, **55**, 739–755 [vid. 2018-04-05]. ISSN 18790690. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2015.10.065
- [24] MUÑOZ-SÁNCHEZ, Belén, Javier NIETO-MAESTRE, Elisabetta VECA, Raffaele LIBERATORE, Salvatore SAU, Helena NAVARRO, Yulong DING, Nuria NAVARRETE, J. Enrique JULIÁ, Ángel G. FERNÁNDEZ a Ana GARCÍA-ROMERO. Rheology of Solar-Salt based nanofluids for concentrated solar power. Influence of the salt purity, nanoparticle concentration, temperature and rheometer geometry. *Solar Energy Materials and Solar Cells* [online]. 2018, **176**, 357–373 [vid. 2018-04-05]. ISSN 09270248. Dostupné z: doi:10.1016/j.solmat.2017.10.022
- [25] CALVET, Nicolas, Judith C. GOMEZ, Abdessamad FAIK, Vladimir V. RODDATIS, Antoine MEFFRE, Greg C. GLATZMAIER, Stefania DOPPIU a Xavier PY. Compatibility of a post-industrial ceramic with nitrate molten salts for use as filler material in a thermocline storage system. *Applied Energy* [online]. 2013, **109**, 387–393 [vid. 2018-04-07]. ISSN 0306-2619. Dostupné

z: doi:10.1016/J.APENERGY.2012.12.078

- [26] PELAY, Ugo, Lingai LUO, Yilin FAN, Driss STITOU a Mark ROOD. *Thermal energy storage systems for concentrated solar power plants* [online]. B.m.: Pergamon. 1. listopad 2017 [vid. 2018-03-28]. ISBN 9781604567397. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2017.03.139.
- [27] ANEKE, Mathew a Meihong WANG. *Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review* [online]. B.m.: Elsevier. 1. říjen 2016 [vid. 2018-04-08]. ISBN 9780954452933. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2016.06.097
- [28] SOLÉ, Aran, Hannah NEUMANN, Sophia NIEDERMAIER, Ingrid MARTORELL, Peter SCHOSSIG a Luisa F. CABEZA. Stability of sugar alcohols as PCM for thermal energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells* [online]. 2014, **126**, 125–134 [vid. 2018-04-08]. ISSN 09270248. Dostupné z: doi:10.1016/j.solmat.2014.03.020
- [29] RAUD, Ralf, Rhys JACOB, Frank BRUNO, Geoffrey WILL a Theodore A. STEINBERG. *A critical review of eutectic salt property prediction for latent heat energy storage systems* [online]. B.m.: Pergamon. 1. duben 2017 [vid. 2018-04-08]. ISSN 18790690. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2016.11.274
- [30] EDWARDS, Jacob, Hitesh BINDRA a Piyush SABHARWALL. Exergy analysis of thermal energy storage options with nuclear power plants. *Annals of Nuclear Energy* [online]. 2016, **96**, 104–111 [vid. 2018-05-22]. ISSN 18732100. Dostupné z: doi:10.1016/j.anucene.2016.06.005
- [31] DENHOLM, Paul, Jeffrey C. KING, Charles F. KUTCHER a Paul P H WILSON. Decarbonizing the electric sector: Combining renewable and nuclear energy using thermal storage. *Energy Policy* [online]. 2012, **44**, 301–311 [vid. 2018-05-23]. ISSN 03014215. Dostupné z: doi:10.1016/j.enpol.2012.01.055
- [32] BENATO, Alberto a Anna STOPPATO. Heat transfer fluid and material selection for an innovative Pumped Thermal Electricity Storage system. *Energy* [online].

- 2018, **147**, 155–168 [vid. 2018-05-26]. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2018.01.045
- [33] *Pumped Heat Electrical Storage (PHES) | Energy Storage Association* [online]. [vid. 2018-05-30]. Dostupné z: <http://energystorage.org/energy-storage/technologies/pumped-heat-electrical-storage-phes>
- [34] LI, Xiaolei, Ershu XU, Shuang SONG, Xiangyan WANG a Guofeng YUAN. Dynamic simulation of two-tank indirect thermal energy storage system with molten salt. *Renewable Energy* [online]. 2017, **113**, 1311–1319 [vid. 2018-05-22]. ISSN 18790682. Dostupné z: doi:10.1016/j.renene.2017.06.024
- [35] ZAVERSKY, Fritz, Javier GARCÍA-BARBERENA, Marcelino SÁNCHEZ a David ASTRAIN. Transient molten salt two-tank thermal storage modeling for CSP performance simulations. *Solar Energy* [online]. 2013, **93**, 294–311 [vid. 2018-05-27]. ISSN 0038092X. Dostupné z: doi:10.1016/j.solener.2013.02.034
- [36] *Izolace kotlů a pecí* [online]. [vid. 2018-05-30]. Dostupné z: <https://www.isover.cz/aplikace/technicke-prumyslove-izolace/izolace-kotlu-peci>
- [37] NOŽIČKA, Jiří. *Základy termomechaniky*. Vyd. 2. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2008. ISBN 9788001040225.
- [38] ŠESTÁK, Jiří a František RIEGER. *Přenos hybnosti, tepla a hmoty*. Dot. 1. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-01-00957-2.

Seznam obrázků

Obrázek 1 Hlavní CPS technologie [12].....	10
Obrázek 2 Závislost účinnosti turbíny na teplotě a použité CSP technologii [7]	12
Obrázek 3 Rankin- Clausiův organický cyklus [6].....	13
Obrázek 4 Braytonův (S-CO ₂) cyklus [9]	14
Obrázek 5 Druhy TES v CSP systémech [10]	15
Obrázek 6 Schéma konfigurace CSP systému pro nepřímé skladování tepla [13]	16
Obrázek 7 CSP systém s přímou generací vodní páry [14]	18
Obrázek 8 Crescent Dunes v americké Nevadě	21
Obrázek 9 Konvenční nanotekutina (vlevo) a roztavená nanotekutina soli [23]	21
Obrázek 10 Koncepce CSP systému s tekutým kovem jako HTF [10].....	23
Obrázek 11 Schéma fázové přeměny PCM [11]	25
Obrázek 12 Schéma aplikace TES pro jaderný reaktor [31].....	29
Obrázek 13 systém PHES vlevo při nabíjení, vpravo při vybíjení [32]	31
Obrázek 14 Schéma řešené cylindrické nádoby pro solární sůl	33
Obrázek 15 Graf znázorňující úbytek tepla z TES systému se dvěma zásobníky.....	35

Seznam tabulek

Tabulka 1 Charakteristiky solárních systémů [26]	11
Tabulka 2 Vlastnosti tepelných olejů [16].....	19
Tabulka 3 Klíčové vlastnosti nejběžnějších termálních solí [12].....	20
Tabulka 4 Porovnání tekutých kovů se vzduchem a solární solí [21]	23
Tabulka 5 Potenciálně použitelné jaderné reaktory pro TES [31]	28