Návrh a vyhodnocení aplikace tepelně vodivého geopolymeru ve vysokoteplotním úložišti energie za pomoci numerického modelování

autoreferát disertační práce

Fakulta životního prostředí

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

školitel: Doc. Ing. Václav Kuráž, CSc.

doktorand: Ing. Matěj Černý

Praha 2015

Odborný životopis

Osobní údaje

Jméno a příjmení, titul: Matěj Černý, Ing.
Datum narození: 8.2.1981
Bydliště: Solidarity 39
100 00 Praha 10
E-mail: cernym81@gmail.com

Vzdělání:

2009 – 2015
Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta životního prostředí
doktorské studium Environmentální modelování

2007 – 2009
Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta životního prostředí
magisterské studium Environmentální modelování
téma DP: Model proudění podzemní vody a transportu chlorethylenů v areálu OZ CHEMIE Horní Počernice.

2005 – 2007
Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta lesnická a environmentální
bakalářský obor Krajinářství
téma BP: Důsledky globálního oteplování pro modelové ekosystémy.

1999 – 2002
Česká zemědělská univerzita v Praze, Provozně ekonomická fakulta
bakalářský obor Informatika

1995 – 1999
Střední průmyslová škola sdělovací techniky, Praha
obor Technické lyceum

Praxe:

2010 – současnost
PROGEO, s.r.o.
modelování transportu tepla, hydrogeologické modelování, hydrologický monitoring

2009
Flamesite s.r.o., Praha 1
Grafické práce – maskování – na projektu Patchwork

2009

Partners Czech, o.p.s., Praha 6
Technické zajištění akce Rozhovory s občany Evropy 2009

2008
Visual Connection a.s., Praha 3
Modelování objektů Langweilova modelu ve 3D

2007 – 2008
Software602 a.s., Praha 4
beta-tester

2005
Ministerstvo životního prostředí ČR, Praha 10
Katalogizace knihovny projektů

2002 – 2004
Léčebna dlouhodobě nemocných, Praha 6
Civilní služba – sanitář, zdravotní bratr

1999 – 2000
London Logic Praha spol. s r.o., Praha 8
beta-tester

1998 – 1999
Národní galerie v Praze, Praha 1
Správce počítačové sítě na zámku Zbraslav

Výzkumné projekty

2009 - 2012 Výzkum technologií a metod odstraňování těžkých kovů platinové skupiny z biologických odpadů a možností jejich recyklace (FR-TI1/494)

2010 - 2011 Sběr dat pro hydrogeologický distribuovaný model (IGA FŽP ČZU, r.č.: 201042200055)

2010 - 2014 Reversibilní Skladování Energie (TA01020348)

2011 - 2015 Výzkum získávání tepelné energie z horninového prostředí tunelových staveb (FR-TI4/269)

Publikační činnost

Články indexované v databázi SCOPUS

Jačka, L., Pavlásek, J., Jindrová, M., Bašta, P., Černý, M., Balvín, A., & Pech, P. (2012). Steady infiltration rates estimated for a mountain forest catchment based on the distribution of plant species. Journal of Forest Science, 58(12), 536–544.

Černý, M., Uhlík, J., Nosek, J., Lachman, V., Hladký, R., Franěk, J., & Broz, M. (2014). Evaluation of New Thermally Conductive Geopolymer in Thermal Energy Storage. In

International Congress on Energy Efficiency and Energy Related Materials (ENEFM2013). (A. Y. Oral, Z. B. Bahsi, & M. Ozer, Eds.) Springer Proceedings in Physics (Vol. 155). Springer International Publishing.

Recenzované články

Černý, M. (2014). Vysokoteplotní akumulátor tepla s geopolymerem. TZB-info, roč. 27, č. 16, s. 1-10. ISSN: 1801-4399.

Účast na konferenci

Černý, M. (2010). Monitoring mělké zvodně experimentálního povodí Modrava 2. In Sborník abstraktů z konference Hydromode 2010. Praha: Česká zemědělská universita. ISBN 978-80-213-2100-7

Černý, M. (2010). Groundwater monitoring at Bohemina Forest catchment Modrava 2. In Compilation UCOLIS 2010: University Conference in Life Sciences : proceedings : 25 November 2010. Vyd. 1. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 412 s. ISBN 978-80-213-2141-0.

Černý, M. (2012): Problematika stanovení nasycené hydraulické vodivosti z ustálených infiltračních rychlostí měřených výtopovou infiltrační metodou. In Havlíček, V., Hanel, M. et Kuráž, M. [eds]: Sborník abstraktů z konference HYDROMODE 2012; Datum zahájení: 13. 9. 2012; Místo konání: Kostelec nad Černými Lesy; ISBN 978-80-213-2311-7.

Černý, M. (2014) Matematické modelování termodynamických úloh. In Sborník příspěvků XIV. hydrogeologického kongresu a II. inženýrskogeologického kongresu, Liberec, ČR, 2.-5.9.2014. Technická univerzita v Liberci. ISBN 978-80-903635-4-0.

Vedené bakalářské práce

Marval, Š., (2013). Bakalářská práce: Tepelná úložiště ve zvodni a jejich alternativy, Fakulta Životního Prostředí. Česká Zemědělská Univerzita v Praze. Praha.

Numerical evaluation of high temperature thermal energy storage with thermally conductive geopolymer

Summary

The work evaluates the contribution of newly developed thermally conductive geopolymer (TCG) in high temperature energy thermal storage (HTTES). The work contains a review of energy storage principles with emphasis on storage in the form of heat. Evaluation of the benefits of the thermally conductive geopolymer was carried out by mathematical modeling. Both experiments and modeling itself progressed from simple to more complex. The progress of knowledge and instrumentation experiments and their evaluation were documented. The experiments with simple rock samples, medium-sized experiment with a block of granite with artificial fracture filled with TCG to the actual prototype of thermal energy storage were analyzed by the means of mathematical modeling.). The physical model was constructed in order to verify concept of HTTES with TCG. The physical model of HTTES was build of sawed granite cubes jointed with TCG. The volume of storage core was 0.5 m^3. Cyclic operation tests of the physical model with different cycle lengths were performed. HTTES working temperature was tested up to 400 °C.

The mathematical model was constructed in order to evaluate contribution of TCG on heat distribution, energy balance and heat losses. The nonlinear mathematical model with temperature dependent variables was arranged in the finite element software Comsol Multiphysics. The mathematical model was calibrated and validated against experimental data recorded during the tests. The calibration and validation were based on recorded power load and measured temperatures inside the HTTES core. The evaluation of HTTES performance is based on available stored heat.

The usage of TCG led to higher charging and discharging rate also minimized requirements on heat exchanger density inside the storage. The physical HTTES model with TCG could store 36.1 % heat more in 48 hour cycle scenario compared to same HTTES only made of the granite. The acquired knowledge was used to extrapolate the results and to predict accumulation options of medium-sized storage.

Keywords: modeling, heat transport, thermally conductive geopolymer, thermal energy storage, TES, HTTES

Obsah

1. ÚVOD 7
1.1 CÍLE PRÁCE 8
2. UKLÁDÁNÍ TEPLA S VYUŽITÍM ZJEVNÉHO TEPLA 8
2.1 VYSOKOTEPLOTNÍ TEPELNÉ ÚLOŽIŠTĚ 10
2.2 TEPELNĚ VODIVÝ GEOPOLYMER 11
3. METODIKA MATEMATICKÉHO MODELOVÁNÍ TEPELNÉHO TRANSPORTU 13
3.1 ROVNICE TRANSPORTU TEPLA 14
3.2 ROVNICE PROUDĚNÍ TEKUTINY 15
4. LABORATORNÍ MODEL TEPELNÉHO ÚLOŽIŠTĚ 16
4.1 MODELOVÁ GEOMETRIE TEPELNÉHO ÚLOŽIŠTĚ 18
4.2 SIMULACE TERMODYNAMICKÉHO ZATĚŽOVÁNÍ PROTOTYPU TEPELNÉHO ÚLOŽIŠTĚ 19
4.2.1 Řízený ohřev, stav při plném nabití 20
4.2.2 Úplný odběr tepla proudícím vzduchem 21
4.2.3 Cyklický ohřev a prázdnění 22
4.3 MODELOVÉ POROVNÁNÍ ALTERNATIVNÍCH MATERIÁLŮ ÚLOŽIŠTĚ 24
4.5 MOŽNOSTI NAVÝŠENÍ TEPLOTY VYSTUPUJÍ TEKUTINY 25
5. VÝSLEDKY PRÁCE 27
6. ZÁVĚR 29
LITERATURA 30

1. Úvod

Trvalé zajištění energetické soběstačnosti pro potřeby obyvatel a průmyslu je stěžejní úkol, který řeší všechny vyspělé státy. S pozvolným úbytkem fosilních paliv a trvalým růstem energetické poptávky, se naplnění této vize stává stále naléhavější.

Řešení problematiky zajištění dostupnosti energie spočívá v diverzifikaci zdrojů i dodavatelů. Současná východiska pro dlouhodobé udržení energetické soběstačnosti jsou rozpoznána především:

- v úsporách energií,
- v rozvoji obnovitelných a alternativních zdrojů (vodních, větrných, fotovoltaických, geotermálních, z biomasy),
- v trvalém rozvoji jaderné energetiky,
- ve výzkumu jaderné fůze,
- v možnostech skladování energie.

Vzhledem k výrazně nerovnoměrné spotřebě energie a vzhledem k bezpečnostně-technologickým potřebám relativně rovnoměrné produkce energie z jádra je pro účely efektivního fungování energetické soustavy potřeba řešit možnosti skladování energie. Potřeba skladování energie vzniká i ve vztahu k časové proměnlivosti některých obnovitelných zdrojů, zejména sluneční a větrné energie. Možnost energii využít při nárazové produkci energie z těchto zdrojů, může zamezit přetížení nebo případný kolaps distribuční sítě elektrické energie.

Práce analyzuje možnosti skladování energie ve formě tepla v horninovém masivu s využitím látky zlepšující tepelnou vodivost. Látky horninového masivu jsou zkoumány z důvodu jejich schopnosti uložit velké množství tepla na jednotku objemu, vysoké tepelné odolnosti, jejich široké dostupnosti a relativně nízké ceně.

Skladování energie ve formě tepla umožňuje využití zdrojů odpadního tepla z průmyslu bez další nutné přeměny. Odpadní teplo může být následně využito k předehřívání vstupujících látek do procesu výroby a dochází tak k zefektivnění procesu a úspoře energie.

Nezbytným podpůrným nástrojem pro návrh technologických zařízení určených pro ukládání a zpětný odběr tepla do horninového masivu jsou matematické výpočty

šíření tepla. Bilanci a šíření tepla v hmotném prostředí popisují parciální diferenciální rovnice druhého řádu. Pro jejich řešení je potřeba využít matematické modely umožňující popsat komplexní úlohu šíření tepla v tepelném úložišti.

Cílem práce bylo navrhnout, popsat a analyzovat chod vysokoteplotního tepelného úložiště sestávajícího se primárně z materiálu horninového masivu a tepelně vodivého geopolymeru. Tepelně vodivý geopolymer slouží k distribuci tepla v úložišti a umožňuje vyšší dynamiku nabíjení a odběru tepla. Maximální pracovní teploty úložiště se pohybují mezi 380 – 400 °C.

Návrh a analýza úložiště byla založena na vyhodnocení sekundárních experimentů a matematických modelů. Jako podklad pro sestavení a kalibraci finálního modelu byla použita experimentální data fyzického prototypu výše popsaného tepelného úložiště.

1.1 Cíle práce

Hlavním cílem práce je vyhodnocení vlivu přidání tepelně vodivé hmoty v designu vysokoteplotního tepelného úložiště z horninového materiálu. Tepelné úložiště obsahuje nový prvek tepelně vodivého geopolymeru. Jeho funkcí je zlepšení distribuce tepla v hlavním akumulačním horninovém materiálu úložiště. Dílčí cíle jsou shrnuty do následujících bodů:

1. Ověření stanovených parametrů kandidátních hornin na hlavní akumulační medium.
2. Navrhnutí testovací úlohy ověření funkce tepelně vodivé hmoty.
3. Vyhodnocení měření testovací úlohy.
4. Numerické vyhodnocení testovací úlohy.
5. Navrhnutí prototypu tepelného úložiště.
6. Navrhnutí instrumentace monitoringu prototypu tepelného úložiště.
7. Vyhodnocení monitoringu teplot prototypu tepelného úložiště.
8. Sestavení modelu prototypu tepelného úložiště.
9. Kalibrace modelu prototypu tepelného úložiště.
10. Vyhodnocení modelu prototypu tepelného úložiště.
11. Zhodnocení a extrapolace výsledků.

2. Ukládání tepla s využitím zjevného tepla

Při využití zjevného tepla k ukládání energie dochází k ohřevu akumulačního media, aniž by došlo k přeměně jeho skupenství. Množství uložené energie je úměrné

teplotní změně materiálu úložiště, tepelné kapacitě a jeho objemu (Ataer, 2006). Skladování energie pomocí zjevného tepla je poměrně populární, díky nízkým nákladům na výrobu, nicméně hustota této energie je nižší než u jiných technologií tepelného skladování (Evans et al., 2012). Teplo bývá ukládáno v látce v pevném nebo kapalném skupenství (Tian et Zhao, 2013).

Látky v pevném skupenství bývají využity spíše ve vysokoteplotních úložištích. Nejčastěji se jedná o nerosty, beton, ohnivzdorné cihly a materiály ze slitin železa (Gil et al., 2010; Tian et Zhao, 2013). Pracovní teplota těchto materiálů se pohybuje od 200 °C do 1200 °C, mají dobrou tepelnou vodivost v rozmezí 1-7 $W \cdot m^{-1}K^{-1}$ pro horniny a až 37-40 $W \cdot m^{-1}K^{-1}$ pro slitiny železa.

Daschner et al. (2013) popisuje testování tepelného úložiště se sypkým materiálem promývaným proudícím vzduchem. Jako náplň testovali kuličky oxidu hliníku, křemenný štěrk, vulkanitovou a basaltovou drť. Využití přírodního kameniva je popisováno i v dalších aplikacích se sypaným materiálem promývaným vzduchem (Daschner et al., 2013; Zanganeh et al., 2012). Allen et al. (2014) se věnuje využití kameniva v solárních tepelných elektrárnách. Tyto úložiště pracují s teplotami 500-600 °C. Práce obsahuje rešerši popsaných tepelných vlastností hornin, hodnot jejich parametrů a jejich dostupnost v jižní Africe. Další experimenty s 6mm hliníkovými částicemi a jejich výpočetní vyhodnocení popisuje Anderson (2014). Alkilani al. (2011) shrnuje využití vzduchu pro transport tepla v širokém spektru nízko- i vysokoteplotních úložišť.

V literatuře je dále uvedeno testování lité keramiky nebo specificky navrženého betonu ve španělské solární elektrárně Plataforma Solar de Almería. (Tamme et al., 2003, 2004). Jako dalšií kandidát byla studována recyklovaná průmyslová keramika vyrobená vitrifikací odpadů obsahujících asbest (Py 2009, 2011). Většina těchto materiálů jsou relativně levná (Tian et Zhao, 2013). Nevýhodou těchto úložišť je nižší tepelná kapacita a nutnost vytvořit tepelný výměník pro jejich plnění a prázdnění.

Výhodou úložišť využívajících kapalinu jako akumulační medium je možnost využít kapalinu nejen k akumulaci, ale zároveň i k transportu tepla od zdroje tepla do úložiště a dále na místo jeho užití (Hermann, 2004; Xu et al., 2013). Běžně využívanou kapalnou látkou pro ukládání tepla je voda. Hlavní výhodou vody je její vysoká tepelná kapacita, zdravotní nezávadnost a široká dostupnost. Nevýhodou je možnost ukládání tepla jen do teploty bodu varu vody. Tato úložiště jsou nejčastěji využita v nízkoenergetických budovách (Gaine et Duffy, 2010; Evans et al., 2012;

Pinel et al., 2011). Ve vysokoteplotních úložištích jsou používány minerální i syntetické oleje, dusičné soli a anorganické tekuté soli (Tian et Zhao, 2013).

Hlavní nevýhodou olejů je jejich těkavost, což vede ke zvýšení nákladů při výstavbě vzduchotěsných systémů (Zhao et Wu, 2011). Tavené soli jsou považovány jako ideální materiály pro použití v slunečných tepelných elektrárnách (Gil et al., 2010; Zhao et Wu, 2011) pro jejich tepelnou stabilitu, nízký tlak par, nízkou viskozitu, vysokou tepelnou kapacitu, nehořlavost a zdravotní nezávadnost. Zhao et Wu (2011) popisují směsi tavených solí, jejichž bod tuhnutí je pod 100 °C, což zjednodušuje jejich praktické nasazení.

Jedním ze speciálních případů bývají sezónní úložiště ve zvodni (Paksoy et al., 2004; Pinel et al., 2011; Xu et al., 2013). V takovém systému voda slouží nejen jako teplonosná kapalina, ale zároveň jako akumulační medium. Druhou složkou akumulačního média tvoří horninový masív zvodně. Numerickým vyhodnocením takového systému se zabýval např. Clauser (2003), Vanhoudt et al. (2011) nebo Wiberg (1983).

2.1 Vysokoteplotní tepelné úložiště

Vysokoteplotní úložiště – High Temperature Thermal Energy Storage (HTTES) mohou nalézt uplatnění při redistribuci tepla z obtížně regulovatelných zdrojů, nejčastěji při jímání sluneční energie ve formě tepla. Využití tepla spalin z průmyslu nebo odpadního tepla v jiné formě si vyžaduje nasazení technologií odolávající teplotám v řádu stovek stupňů Celsia. Tyto předpoklady splňují úložiště zjevného tepla bez přítomnosti vody a úložiště pracující s latentním teplem (Gil et al., 2010; Medrano et al., 2010).

Alternativou k PCM jsou úložiště využívající zjevného tepla pevné fáze, která nepodléhá fázové přeměně v teplotním rozsahu procesu skladování (Singh et al., 2009). Schopnost ukládat zjevné teplo pro daný materiál je dána tepelnou kapacitou na jednotku objemu. Aby byl materiál vhodný pro tepelné úložiště, musí být levný a musí mít dobrou tepelnou vodivost (Fernandez et al., 2010).

Při užití pevných materiálů musí být zajištěn transport tepla z a do úložiště. K tomuto účelu se používají teplonosné kapaliny. Přenos tepla z nebo do transportní teplonosné tekutiny zajišťuje tepelný výměník. V případě nižší tepelné vodivosti materiálu úložiště rostou vstupní náklady na komplikovanější tepelný výměník. Problém může nastávat při rozdílné tepelné roztažnosti materiálů úložiště, tepelného výměníku a potrubí. Oddělení tepelného výměníku a materiálu tepelného úložiště vede ke snížení tepelné výměny s teplonosnou kapalinou

(Kousksou et al. 2014). Další vyčerpávající shrnutí a porovnání použitelných materiálů v HTTES aplikacích podává Khare et al. (2013). Shledává několik výhod pevného TES oproti využití tekutin, ve smyslu jednoduchosti designu, stavby a provozu, tudíž i nižších nákladů. Vyhovujícími materiály shledává korundovou a magneziovou keramiku, korundové betony, karbid křemíku, grafit a železité materiály. Metodologii výběru a charakterizaci recyklovaných materiálů pro HTTES se zabývá Navarro et al. (2012). Kritérii výběru jsou energetická hustota, tepelná vodivost a cena. Jako vhodné jsou vybrány vedlejší produkci při výrobě ocele, různé oxidy kovů, halitové minerály a beton.

Mimo tepelné solární elektrárny jsou HTTES využívány v kogeneračních elektrárnách při společné výrobě elekřiny a tepla. Daschner et al. (2013) popisuje využití štěrkového akumulátoru ve spalovně biomasy a následovné využití odpadního tepla. Testován byl kuličkový oxid hlinitý a štěrky z křemene, vulkanitu a basaltu. Průměr zrna se pohyboval v rozmezí 3 až 12 mm. Testovací úložiště bylo válecového tvaru s průměrem 650 mm a výškou 900 mm. Při spalování procházely kouřové plyny dosahující teplot 800 až 1200 °C matricí sypaného materiálu úložiště. Uložené teplo může být použito k předehřívání vstupujícího vzduchu a tím ke zvýšení účinosti, nebo k redistribuci produkované elektřiny v čase. Kapacita tohoto úložiště byla až 80 kWh. Dalším popsaným prototypem HTTES využívajícím vzduchu jako teplonosné tekutiny byla kónická nádrž s výškou 4 m a průměrem klesajícím od 2 m na vrcholu, k 1.25 m u dna (Zanganeh et al. 2012). Projektované teploty se pohybovaly mezi 20 a 650 °C, celková kapacita úložiště 6.5 MWh. Další výpočetní zhodnocení a optimalizace prototypu je popsána v Zanganeh et al. (2015).

Optimalizací designu 10MJ betonového HTTES se zabývá Prasad et Muthukumar (2013). Podstatou optimalizace jsou rozměry úložiště, rozměry registru trubic tepelného výměníku a počet lamel na trubicích, které zvyšují přenos tepla z a do teplonosné kapaliny. K optimalizaci byl vybrán numerický model COMSOL Multiphysics využívající metody konečných prvků. Rešerší numerického modelování a matematického popisu HTTES s porézním mediem se zabývá Andreozzi et al. (2012). Vlastní zhodnocení materiálů se týká sypaného štěrkového úložiště a keramických pěn.

2.2 Tepelně vodivý geopolymer

Hlavním úkolem tepelně vodivé hmoty mělo být zlepšení tepelných charakteristik horninového materiálu (zvýšení tepelné vodivosti) za účelem zlepšení distribuce tepla do horninového prostředí. Dílčím cílem byl výzkum možné elektrické vodivosti materiálu, což by mohlo být velmi efektivně využito pro odporové zahřívání hmoty

a následný přenos tepla do horniny. Posledním žádaným specifickým parametrem materiálu, byla jeho dobrá aplikovatelnost a to jak do makro/mikro trhlin tak i do pórového prostoru horniny. To vše spojeno s vysokou mechanickou i chemickou stabilitou materiálu v intervalu teplot 0 až 400 °C. Tato mez je daná teplotou, při které dochází k nevratným strukturálním změnám hornin vedoucí k jejich degradaci. (Lanchman et al., 2014).

V rámci vývoje tepelně vodivé hmoty bylo testováno několik různých typu základních matric, které musely splňovat několik základních požadavků. Dostatečnou tepelnou odolnost se stálými mechanickými vlastnostmi i při cyklickém tepelném zatěžování do teplot 400 °C; schopnost zapracování co nejvyššího množství tepelně vodivé příměsi (žádná z testovaných matric neměla již v základním stavu požadovanou vysokou tepelnou vodivost) a ekonomickou přijatelnost, aby mohl být v budoucnu materiál využíván také v širším měřítku (Lanchman et al., 2014). V rámci tohoto zadání pak byla soustředěna pozornost hlavně na různé typy geopolymerních matric a to hlavně z portfolia českých výrobců: Vodní Sklo a.s. a ČLUZ a.s., které se nakonec ukázaly být jako nejlepší. Dále pak byly studovány možnosti využití geopolymerní a organicko-minerální pryskyřice, žádný z těchto materiálů však nedosáhl kvalit geopolymerní matrice. (Nosek et al., 2013)

Aby výsledný materiál tepelně vodivé hmoty dosáhl požadované vysoké tepelné vodivosti, bylo nutné do základních matric, které tuto podmínku nesplňovaly, zakomponovat tepelně vodivé příměsi. Zjednodušeně lze říci, že výsledná tepelná vodivost je dána hmotnostním poměrem základních složek a jejich tepelných vodivostí. Čím větší množství tepelně vodivé příměsi se tak podaří do výsledného materiálu zakomponovat, tím lepších výsledných hodnot lze dosáhnout. Při vývoji byly testovány v zásadě dva typy materiálů: různé formy grafitu, které se i s ohledem na cenu jevily již od začátku jako potenciálně nejvýhodnější a práškové kovy, včetně oxidů a některých nano-forem. Z vodivých příměsí byl testován grafit: hrubozrnný (malá, velká vločka), střednězrnný, jemnozrnný, nebo práškové kovy: železo (včetně nano-forem), oxidy železa (magnetit), hliník, měď, bronz. (Nosek et al., 2013)

Z širokého spektra testovaných materiálů byl zvolen geopolymer s příměsí grafitu. Složení a vlastnosti tepelně vodivého geopolymeru (dále jen TVG) je právně chráněno formou užitného vzoru (číslo CZ 25908), přičemž patent je dále v řízení (patentová přihláška PV 2013-137). Jako suroviny pro výrobu TVG jsou použity průmyslově vyráběné materiály. Velkou výhodou je tak velmi příznivá cena výsledného produktu, která umožňuje i jeho širší průmyslové využití. Základem TVG jsou materiály ve složení 7 – 15 $\%_{hmot.}$ Mefisto K05 a 35 až 85 $\%_{hmot.}$ Baucis H110.

Tento materiál je vyráběn kontrolovaným tepelným zpracováním kaolínů a lupků, kdy se přidáním vody a alkalicky rozpustných křemičitanů tvoří hlinito-křemičitý řetězec. Do této základní hmoty je aplikován přídavek tepelně vodivostní složky, kde jako nejvhodnější se jevilo 10 – 50 $\%_{hmot.}$ grafitu SV (vločkový grafit). Konkrétní množství této přísady je závislé na požadované hustotě a cílové tepelné vodivosti. (Nosek et al., 2013)

Měření termofyzikálních parametrů bylo realizováno na pracovišti Západočeské Univerzity – Výzkumného centra nových technologií, na měřícím zařízení HotDisk Constant Thermal Analyser (Hot Disk 2014). Měření probíhalo na dvou vzorcích TVG ve tvaru válce s podstavou o průměru 39 mm a výškou 7 mm. Jedna strana podstavy každého vzorku, která byla použita pro vlastní měření tepelné vodivosti, byla zbroušena na diamantové brusce, aby byl zajištěn co nejlepší styk materiálů při měření se senzorem (Lanchman et al., 2014).

Prezentované výsledky v Tab. 1 jsou vztaženy k TVG obsahujícímu 45 % tepelně vodivé příměsi grafitu SV. Z výsledků je zřejmé, že tepelná vodivost výsledného materiálu dosahuje při pokojové teplotě 19.3 $W{\cdot}m^{-1}K^{-1}$, přičemž s rostoucí teplotou klesá až na hodnotu 16.5 $W{\cdot}m^{-1}K^{-1}$ při 300 °C. U popsaného TVG byly dále stanoveny následující parametry - objemová hmotnost 1150 $kg{\cdot}m^{-3}$, pórovitost 40 %, pevnost v tlaku 4 MPa a nasycená hydraulická vodivost $7{\cdot}10^{-9}$ $m{\cdot}s^{-1}$.

Tab. 1 Měřené hodnoty tepelné vodivosti λ a objemové tepelné kapacity cv tepelně vodivého geopolymeru (TVG)

Tepelně vodivý geopolymer				
teplota měření [°C]	23	106	201	299
λ [$W{\cdot}m^{-1}K^{-1}$]	19.32	19.01	18.1	16.46
c_V [$MJ{\cdot}m^{-3}K^{-1}$]	1.08	1.26	1.4	1.61

3. Metodika matematického modelování tepelného transportu

Postup při aplikaci matematického modelování pro hodnocení tepelného transportu lze shrnout do několika základních bodů:

1) definice, popis zkoumaného problému, vymezení cílů - v tomto případě se jedná o řešení úloh souvisejícími s přenosem tepla v horninových vzorcích a v umělém prostředí tepelného úložiště,

2) volba konceptuálního přístupu a vhodného modelovacího nástroje,
3) analýza a syntéza vstupních modelových dat včetně materiálových charakteristik, analýza a syntéza kalibračních údajů a dat pro porovnání měřených a modelových výstupů,
4) sestavení modelové simulace - definování geometrie, okrajových podmínek, zadání transportních parametrů v podobě funkčních vztahů materiálových charakteristik v závislosti na teplotě,
5) numerický výpočet, kalibrace modelových parametrů včetně materiálových charakteristik pro získání ověřeného funkčního modelu,
6) zpracování a vizualizace výsledků, porovnání a zhodnocení rozdílů mezi měřenými a modelovými daty, diskuze získaných výsledků.

Obvyklým cílem modelování transportu tepla je získání informace o rozložení teplot a toků v modelové doméně na základě definovaných okrajových podmínek. Takové numerické modely jsou založeny na matematickém zápisu fyzikálních vztahů.

3.1 Rovnice transportu tepla

Základním předpisem pro veškerý teplený transport v programu COMSOL Multiphysics je první termodynamický zákon, obvykle popisován jako princip zachování energie. Jelikož vnitřní energie je nevhodná veličina ke kvantifikaci, měření a simulaci, bývá zákon přepsán ve smyslu teplot. Pro tekutinu je výsledná rovnice tepla následující (COMSOL, 2012):

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p \boldsymbol{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \boldsymbol{q} = \boldsymbol{Q}$$

ρ … měrná hmotnost [kg·m^{-3}]

c_p … měrná tepelná kapacita [J·kg^{-1}.K^{-1}]

T … absolutní teplota [K]

$\boldsymbol{u}$ … rychlostní vektor proudění kapaliny [m·s^{-1}]

$\boldsymbol{q}$ … konduktivní tepelný tok [W·m^{-2}]

Q … zdroj tepla (jiného než z tření uvnitř kapaliny) [W·m^{-3}]

t … čas [s]

Kombinací rovnice s Furierovovým zákonem získáme předpis pro transport tepla v kapalině pokud je rychlost **u** nulová, rovnice popisuje čistě konduktivní transport

tepla. Rovnici lze pak rozepsat do obecného diferenciálního tvaru (difuzní rovnice vedení tepla v kartezském systému souřadnic (Bergman et al., 2011). Je uvažováno homogenní medium bez účasti konvekce.

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial z}\right)+\dot{q}=\rho c_p\frac{\partial T}{\partial t}$$

T … teplota [K]

$\dot{q}$ … propadový člen: tepelný tok na jednotkový objem [$W\cdot m^{-3}$]

λ … součinitel tepelné vodivosti [$W\cdot m^{-1}K^{-1}$]

ρ … hustota látky [$kg\cdot m^{-3}$]

c_p … měrná tepelná kapacita [$J\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}$]

t … čas [s]

Zmíněná řídící rovnice je využita ve všech dále uvedených modelech pro simulaci šíření tepla v horninových vzorcích a v konglomerátu tepelně vodivého geopolymeru s horninovým materiálem. Pro předpověď teploty výstupní tekutiny je použita rovnice první zmíněná rovnice.

3.2 Rovnice proudění tekutiny

Fyzikální modul Heat Transfer Module obsahuje řídící rovnice a okrajové podmínky pro modelování volně se pohybující tekutiny. K výpočtu rychlostního a tlakového pole je použita Navier-Stokesova rovnice a rovnice kontinuity. Uvedené rovnice platí pro stacionární simulaci. Pro řešení Navier-Stokesovi rovnice je použit model *k-ε low Re* (COMSOL, 2012). Může být uvažována stlačitelnost tekutiny, ale maximální rychlost proudění je omezena na 0.3 Machova čísla.

$$\rho\frac{\partial u}{\partial t}+\rho(\boldsymbol{u}\cdot\nabla)\boldsymbol{u}=\nabla\cdot\left[-p\boldsymbol{I}+\mu(\nabla\boldsymbol{u}+(\nabla\boldsymbol{u})^T)-\tfrac{2}{3}\mu(\nabla\cdot\boldsymbol{u})\boldsymbol{I}\right]+F$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho\boldsymbol{u})=0$$

ρ … měrná hmotnost tekutiny [$kg\cdot m^{-3}$]

$\boldsymbol{u}$ … rychlostní vektor [$m\cdot s^{-1}$]

p … tlak [Pa]

$\boldsymbol{I}$ … jednotková matice 3×3;

μ … dynamická viskozita tekutiny [Pa·s]

F … vnější síly [N]

Speciální případ laminárního proudění je tzv. Stokesovo proudění, při kterém jsou zanedbány setrvačné síly.

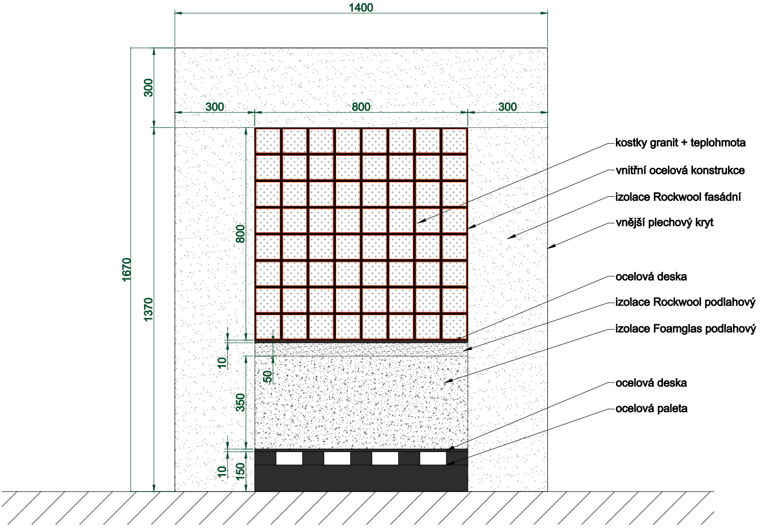
4. Laboratorní model tepelného úložiště

Prototyp vysokoteplotního tepelného úložiště energie vychází z výsledků laboratorních zkoušek materiálů a matematických simulací termodynamického zatěžování modelových variant. Bylo navrženo zařízení, které může jímat elektrickou energii v podobě tepla, za co nejmenších ztrát je tuto energii schopno uchovávat a nakonec ji odevzdávat. Jako materiálem, který je schopen tepelnou energii uchovávat je použita hornina, která byla vyhodnocena s nejvhodnějšími tepelnými vlastnostmi. Touto horninou je granit z lokality Panské Dubenky. Podstatné je, že vybraná hornina má co nejvyšší tepelnou vodivost a nejvyšší tepelnou kapacitu, nízkou míru degradace svých mechanických vlastností tepelným zatěžováním. Její další fyzikální parametry jsou v přijatelných mezích (teplotní dilatace, pevnost v tlaku apod.).

Při společných jednáních s jednotlivými subjekty projektu bylo dohodnuto, že laboratorní model úložiště bude složen z kostek z vybrané horniny a mezerní prostor bude vyplněn TVG. K nabíjení úložiště bude docházet pomocí elektrických topných těles a jeho vybíjení bude realizováno vzdušným tepelným výměníkem. Koncepce úložiště byla navržena co nejjednodušeji s ohledem na možnosti výroby i matematického modelování.

Obr. 1 Fotografie ze stavby akumulačního jádra. Konglomerát granitových kostek a TVG. (Lachman et al., 2014)

Jádro je uloženo v ocelové konstrukci z L-profilů umístěných na hranách jádra a pozinkovaným plechem překrývající stěny. Vespod jádra je ocelová roznášecí deska. Důležitou součástí úložiště je tepelná izolace. Ve spodní části úložiště je umístěna dostatečně únosná a zároveň tepelně odolná izolace Foamglas, určená pro zatěžované podlahy. Ta je v horní části navíc opatřena vrstvou vermikulitu, který snižoval teplotní zatížení Foamglasu. Spodní část tepelné izolace byla spolu s jádrem úložiště položena na dostatečně únosné a tepelně odolné ocelové paletě, která zároveň umožnila mobilitu laboratorního modelu. Na bocích a na horní straně bylo úložiště osazeno 300 mm silnou vrstvou tepelně izolačního materiálu RockWool (bez impregnační pryskyřice). Z vnějšku bylo těleso úložiště oplechováno. Celkové uspořádání úložiště je patrné z Obr. 2.



Obr. 2 Rozměry laboratorního prototypu tepelného úložiště bez vyobrazeného vzdušného výměníku.

Nabíjení úložiště bylo realizováno 5 elektrickými ohřevnými tyčemi délky 400 mm a průměrem 12 mm. Každá tyč má maximální příkon 500 W. Úložiště bylo opatřeno 17 teplotními čidly pro monitoring teploty a 5 teplotními čidly pro termoregulaci topných tyčí.

S ohledem na jednoduchost realizace bylo pro vybíjení zásobníku navrženo vzduchové vyfukování. Jádro zásobníku je opatřeno 4 tenkostěnnými ocelovými trubicemi o průměru 60 mm, které jsou vyústěny na bocích do plechových sběrnic, ze kterých jsou vyvedeny vně plechové roury o průměru 120 mm. Pohyb vzduchu je zajištěn pomocí ventilátoru s regulovatelnými otáčkami. Ventilační potrubí je

opatřeno měřičem průtoku a teploty vzduchu. Ve směru proudění za tepelným jádrem je umístěn slučovací prvek (totožný s rozdělovacím prvkem), který ústí do jedné 120 mm široké výstupní trubice. Na fotografii vlevo na Obr. 3 je zobrazeno jádro bez instalovaného rozdělovacího prvku vzdušného výměníku, vpravo na témže obrázku je již rozdělovací prvek instalován. Průběh teplot a měření průtoku vzduchu bylo registrováno do digitálního záznamového zařízení. Spotřeba elektrická energie potřebná pro nabití úložiště byla měřena elektromeřem.

Obr. 3 Fotografie z průběhu výstavby prototypu tepelného úložiště. Vlevo jádro úložiště bez rozdělovacího prvku vzdušného výměníku, vpravo již probíhá zaizolování akumulačního jádra i spolu s prvky výměníku.

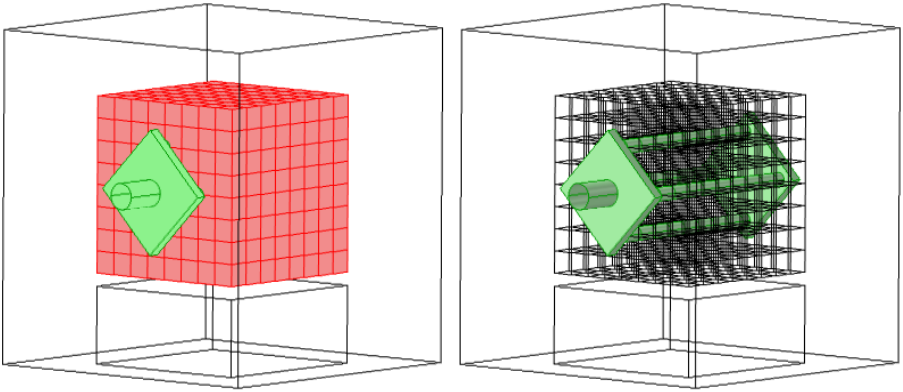
4.1 Modelová geometrie tepelného úložiště

V modelové geometrii bylo zadáno jádro tepelného úložiště tvaru krychle se stranou 800 mm, na Obr. 4 červeně. To je sestaveno z 512 krychlí s hranou 90 mm. Spáry mezi kostkami jsou vytvořené jako doplněk jádra ke kostkám. V prostoru jádra jsou spáry široké 10 mm, na okrajích ve styku s pláštěm jsou 5 mm. Plášť tepelného úložiště byl tvořen jen 2D plochami. Rozsah tepelné izolace odpovídá skutečným rozměrům. Tepelně akumulační jádro bylo izolováno 300 mm termoizolace, ve spodní části je zadána kvádrová geometrie izolace Foamglas.

V modelu je zadáno pět 400 mm dlouhých válcových objektů s průměrem 12 mm reprezentující topné tyče umístěné na jeho diagonálách a v centrální části. Uložení topných tyčí je rovnoběžné s trubicemi tepelného výměníku.

Pro odběr tepla je použit vzdušný výměník. Na vstupu výměníku před tepelným jádrem úložiště je umístěn objekt rovnoměrně rozdělující přivedený vzduch do 4 trubic tepelného výměníku. Jeho rozměry jsou 400×400×5 mm. Průměr přívodní

trubice (před rozdělovacím objektem) je 120 mm, průměr 4 trubic tepelného výměníku procházejících jádrem úložiště je 60 mm. Ve směru proudění za tepelným jádrem je umístěn slučovací prvek (totožný s rozdělovacím prvkem), který ústí do jedné 120mm široké výstupní trubice.



Obr. 4 Geometrie tepelného úložiště. Jádro červeně, soustava vzdušného tepelného výměníku zeleně.

4.2 Simulace termodynamického zatěžování prototypu tepelného úložiště

Počáteční řízené nabití úložiště (fáze 1) v kombinaci s fází udržování konstantní teploty (2) adresuje tepelnou kapacitu a kvalitu izolace ve smyslu tepelného odporu. V rámci kalibrace je kontrolována shoda:

- úniku tepla z úložiště v době ustálení teplot na topných tyčích (fáze 2),
- množství dodaného tepla pro pozorovaný nárůst teplot.

Dynamické prázdnění a plnění (fáze 3, 4 a 5) adresuje především součinitel tepelné vodivosti jádra tepelného úložiště. Cílem modelových simulací je dosáhnout shodu amplitudy a celkového průběhu vývoje teplot úložiště v období dynamického zatěžování.

Kalibrovaný model tepelného úložiště byl docílen odladěním simulací:

- prvotního nabití a ustálení teplot (fáze 1 a 2),
- úplného vyprázdnění (fáze 3),
- cyklického režimu plnění a prázdnění (fáze 4) v režimu 24 hod / 24 hod a plnění a prázdnění v režimu 48/48 hod (fáze 5).

V prvním bloku byly provedeny simulace, které opakují provedený experiment. Tyto simulace slouží pro zpětné vyhodnocení experimentu - zejména stanovení prostorového rozložení teplot, tepelných toků, především stanovení ztrát do okolí.

4.2.1 Řízený ohřev, stav při plném nabití

Cílem simulace je zpracovat režim tepelného úložiště ve fázi 1 (řízené nabíjení) a následný přechod na ustálený stav (fáze 2). Kalibrace modelu spočívá v docílení shody:

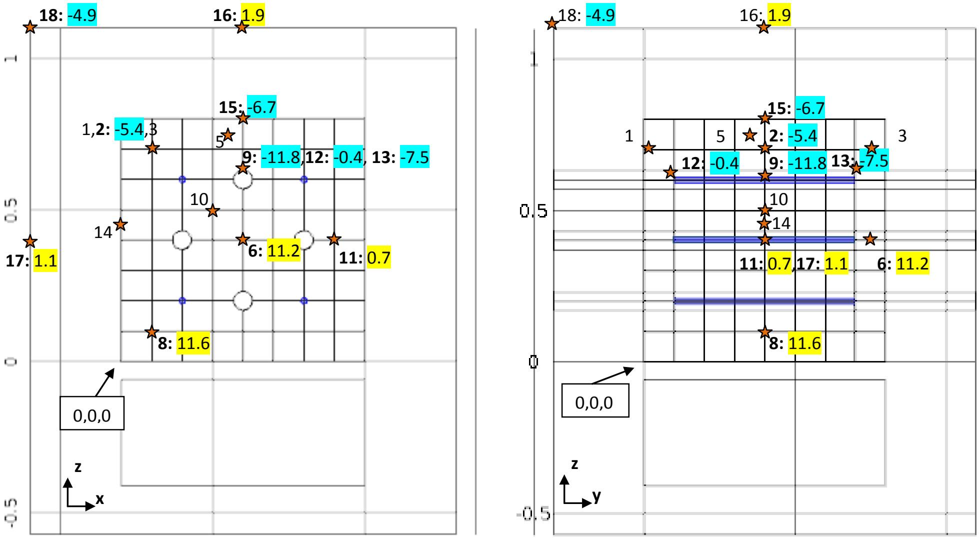
- průběhu měřených a modelových teplot,
- měřeného a modelového úniku tepla v období ustálení teplotního pole (závěr simulace),
- modelového a zaznamenaného příkonu využitého pro ohřev úložiště.

Prvotní kalibrace proběhla na stacionárním modelu za podmínek ustálení druhé fáze experimentu. Okrajové podmínky teplot topných tyčí byly odvozeny z měření v desetihodinovém intervalu před započetím odběru tepla z úložiště. Kalibračním kriteriem modelu byla shoda měřených a simulovaných teplot na jednotlivých teplotních čidlech a shoda množství dodaného tepla při ustálené fázi 2.

Ustálený příkon v modelu vychází 678 W (měřený příkon 690 W). Porovnání měřených a modelový teplot je provedeno v Tab. 2, rozložení rozdílů modelových a měřených teplot je vykresleno na Obr. 5. Kladná hodnota rozdílu (na obrázku žlutě) značí modelové nadhodnocení teploty, modře jsou vyznačena místa, kde je modelová teplota ve srovnání s měřením nižší. Maximální zaznamenaná odchylka měření a modelu je -11.8 °C (čidlo T9), což odpovídá chybě cca 3 % simulovaného rozpětí hodnot.

Tab. 2 Tabulka ustálených měřených a modelových teplot teplotních čidel.

čidlo	T1	T2	T3	T5	T6	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T18
modelová T	326.02	342.47	325.95	345.62	347.07	353.82	352.22	359.55	353.66	340.50	340.74	347.21	343.97	34.47	34.69	20.13
měřená T		347.92			335.86	342.25	364.01		352.96	340.86	348.24		350.63	32.47	33.54	25.09
rozdíl teplot		-5.45			11.21	11.58	-11.79		0.69	-0.36	-7.50		-6.66	1.99	1.15	-4.96



Obr. 5 Rozdíl modelových a měřených teplot na jednotlivých teplotních čidlech při ustáleném stavu.

Pro nestacionární simulaci řízeného ohřevu byl využit nakalibrovaný stacionární model plného nabití úložiště. Hodnoty teplot okrajových podmínek pro jednotlivé topnné tyče byly zadány dle zaznamenaného měření při experimentu. Kalibrace nestacionárního modelu je posuzována na základě shody měřeného a modelového příkonu a měřených a modelových teplot na jednotlivých teplotních čidlech.

Zlepšení shody modelu a měření (zejména pro první fázi řízeného ohřevu) by teoreticky bylo možné dosáhnout úpravou hodnot součinitele měrné tepelné kapacity a jeho funkční závislosti na teplotě. Hodnoty zadávané v simulaci byly ponechány v rozsahu měřených dat pro jednotlivé materiály. V průběhu řízeného ohřevu pravděpodobně ještě docházelo i k realizaci nevratné změny tepelných charakteristik.

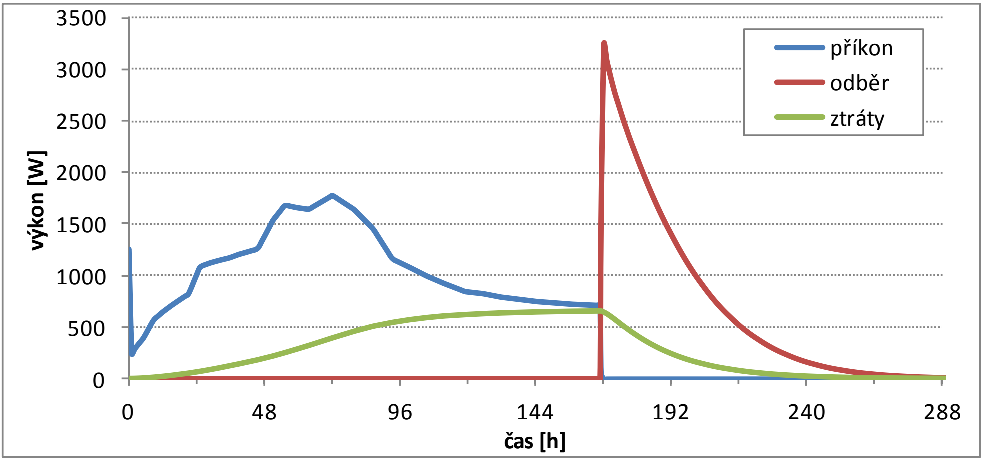
4.2.2 Úplný odběr tepla proudícím vzduchem

Cílem simulace je zpracovat režim tepelného úložiště ve fázi 3 (úplné vybití). Validace modelu spočívá v docílení shody poklesu měřených a modelových teplot.

Model odběru tepla navazuje na výsledky modelu ohřevu. V trubicích výměníku je zadána okrajová podmínka konvektivního přestupu (23) reprezentující vnitřní nucenou konvekci s rychlostí proudění 4.5 $m \cdot s^{-1}$. Jak bylo prokázáno v minulé etapě prací, užitá aproximace konvektivního odběru tepla v trubicích výměníku mírně

podhodnocuje počáteční fázi odběru a následně poněkud nadhodnocuje fázi konečnou ve smyslu množství odebrané energie. Tento jev je patrný i na průběhu simulovaných teplot fáze 3. Na konci fáze 3 jsou dosahované poklesy teplot s měřením ve velmi dobré shodě.

Před ukončením dodávky tepla (konec fáze 2, 168. hodina) je patrné vyrovnání příkonu a ztrát, poté následuje odběr tepla. V maximu (počátek fáze 3) je simulován odběr tepla z úložiště proudícím vzduchem 3244 W. Během následujících 24 hodin odebíraný tepelný výkon poklesne na hodnotu 1500 W, po dalších 24 h na 500 W a během třetího dne odběr tepla klesá k nule (úložiště je vyprázdněno).



Obr. 6 Modelová bilance toků tepla během 1., 2. a 3. fáze experimentu.

4.2.3 Cyklický ohřev a prázdnění

Cílem simulace je modelově zpracovat cyklické zatěžování úložiště v časové rozmezí 288 - 1152 hodin experimentálního provozu. V daném období proběhlo 11 cyklů nabití a vyprázdnění. Validace modelu spočívá v porovnání shody modelové a měřené doby ustálení pracovních cyklů úložiště ve shodném teplotním rozmezí.

Simulace cyklického provozu byla rozdělena do jednotlivých výpočetních celků, reprezentujících ohřev či odběr (každý odběr, nebo ohřev reprezentuje samostatnou výpočetní periodu). Po ukončení simulace ohřevu je výsledné teplotní pole zadáno do simulace odběru jako počáteční podmínka rozložení teplot v modelové doméně.

Rozdíly mezi měřením a simulací jsou pravděpodobně způsobeny především idealizovanou modelovou geometrií úložiště (v modelu mají všechny granitové

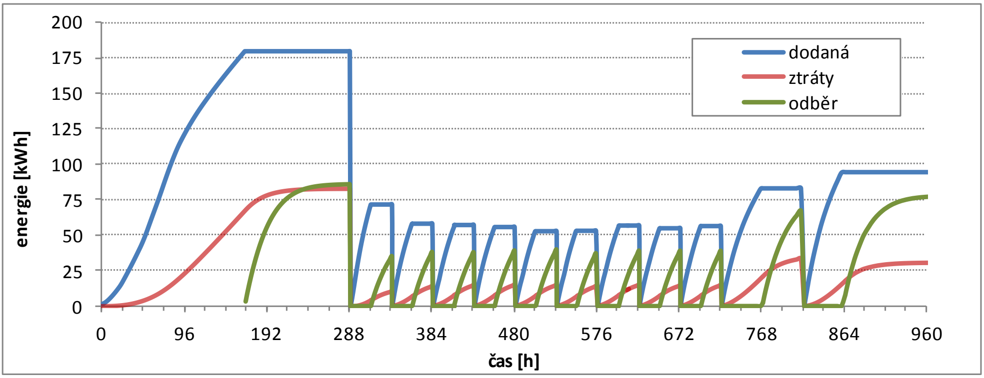
kostky identický rozměr a tepelné vlastnosti, což je v rozporu s heterogenitou přírodních materiálů a vzniklými nepřesnostmi při opracování; v modelu je také zadáno identické rozevření tepelně vodivých spár a jejich homogenní tepelné charakteristiky v celém objemu úložiště; při stavbě úložiště docházelo zčásti k dotvarování spár vyplněných TVG a materiál neměl stejnou hustotu.

Pro výslednou energetickou bilanci cyklického zatěžování teplotního úložiště je primární rozkmit teplot, nikoli absolutní hodnoty. I přes obvykle nižší modelové teploty je shoda velikosti amplitud kolísání teplot velmi dobrá. Modelem stanovená bilance poskytuje kvalitní výsledky.

Na Obr. 7 jsou vykresleny průběhy dodané energie, tepelných ztrát pláštěm a odebraného tepla proudícím vzduchem.

Při prvním prohřátí (fáze 1) bylo dodáno podstatně více tepla, než bylo následně ve třetí fázi odebráno. Příčinou je snaha o navození ustálených teplotních poměrů při plném nabití úložiště (fáze 2).

Po ustálení 48 hodinových cyklů bylo z průměrně dodaných 54 kWh vyfoukáno 39 kWh při ztrátách pláštěm 15 kWh (ztráta 28 %). Při dvou 96 hodinových cyklech nebylo cílem dosáhnout ustálení měřených cyklů - v obou realizovaných odběrech došlo k odčerpání tepla uloženého v předchozích 48 hodinových cyklech. Drobné nepřesnosti v modelové bilanci mohou být způsobeny numerickou integrací.



Obr. 7 Kumulativní průběh dodané energie, tepelných ztrát pláštěm a odebraného tepla - modelová simulace.

4.3 Modelové porovnání alternativních materiálů úložiště

Zhodnocení přínosu TVG pro aplikace tepelných úložišť je možné provést na základě porovnání simulací jejich shodného režimu provozu při užití různých materiálů akumulačního jádra.

Teplené úložiště využívající konglomerát granitových kostek a TVG (v grafech označeno *granit + TVG*) bylo porovnáno s objemově totožným úložištěm využívající betonový nebo granitový monoblok. V simulacích byly uvažovány dva druhy betonů, jeden „běžný“, popsaný (Gil et al. 2010) a druhý „vysokoteplotní“ (v grafech označený *beton (DLR)*), vyvinutý v Německém středisku pro letectví a kosmonautiku (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. - zkratka DLR) určený pro aplikaci v tepelných úložištích s vysokou tepelnou kapacitou ve španělské solární elektrárně Plataforma Solar de Almería (Laing et. al 2006).

Tab. 3 Parametry simulovaných materiálů při teplotě 20 °C.

	součinitel tepelné vodivosti	**měrná tepelná kapacita**	**hustota**
	λ [W·m^{-1}K^{-1}]	**c_p [J·kg^{-1}K^{-1}]**	**ρ [kg·m^{-3}]**
beton	1.5	850	2200
beton (DLR)	1	916	2750

V Tab. 3 jsou uvedeny hodnoty materiálových parametrů zadaných do modelu. Pro granit z Panských Dubenek a TVG byl použit funkční vztah hodnot parametrů a teploty).

Porovnání materiálů bylo provedeno na identické modelové geometrii prototypu tepelného úložiště popsaného v minulé kapitole (Obr. 4). Ve variantě s granitovým nebo betonovým monoblokem je geometrie kostek nahrazena jednou krychlí o stejném objemu (strana krychle jádra a = 800 mm).

Pro srovnání úložné energie čtyř materiálových variant byly zvoleny tři scénáře.

1) Jednorázové nabíjení a vybíjení po dobu 200 hodin.
2) Cyklický režim nabíjení a vybíjení s délkou cyklu 24 hodin.
3) Cyklický režim nabíjení a vybíjení s délkou cyklu 48 hodin.

Bylo zadáno celkem 12 simulací lišících se ve variantě použitého materiálu či zvoleného scénáře nabíjení a odběru tepla. V Tab. 4 jsou shrnuty simulované hodnoty využitelného tepla a procentuálně porovnány s variantou granitového monobloku. Jen v případě jednorázového nabíjení po dobu 200 hodin vychází nejlépe varianta s granitovým monoblokem. Příčina spočívá ve větší kapacitě (ve

srovnání s úložištěm s TVG) a především v dostatečné době pro plné nabití i bez přítomnosti TVG.

Ve všech ostatních případech je pro konstrukci úložiště nejefektivnější použití TVG v kombinaci s granitem. Při porovnání variant pro cyklické scénáře byl stanoven přínos TVG na 36 až 38 % v množství uloženého tepla během stejně dlouhého provozního cyklu. Použití betonu by snížilo kapacitu identického úložiště o 24-30 % podle uvažovaného scénáře. Vysokoteplotní beton (DLR) se pro navrhované uspořádání úložiště jeví nevhodně. Z trendů lze předpovědět jeho vhodnost použití pouze pro dlouhé doby nabíjení nebo při odlišném způsobu ohřevu úložiště, zajišťujícím rychlejší distribuci tepla uvnitř jádra.

Tab. 4 Shrnutí výsledků tří scénářů nabíjení (jednorázové, cyklické 12/12h a cyklické 24/24h) a čtyř variant použitých materiálů úložiště.

scénář / varianta	jednorázové [kWh]	12/12h [kWh]	24/24h [kWh]	jednorázové	12/12h	24/24h
beton	75.9	11.1	25.2	-30.05%	-30.63%	-24.10%
beton (DLR)	92.6	8.5	20.3	-14.65%	-46.88%	-38.86%
granit	108.5	16.0	33.2	0.00%	0.00%	0.00%
granit + TVG	99.9	22.2	45.2	-7.93%	38.75%	36.14%

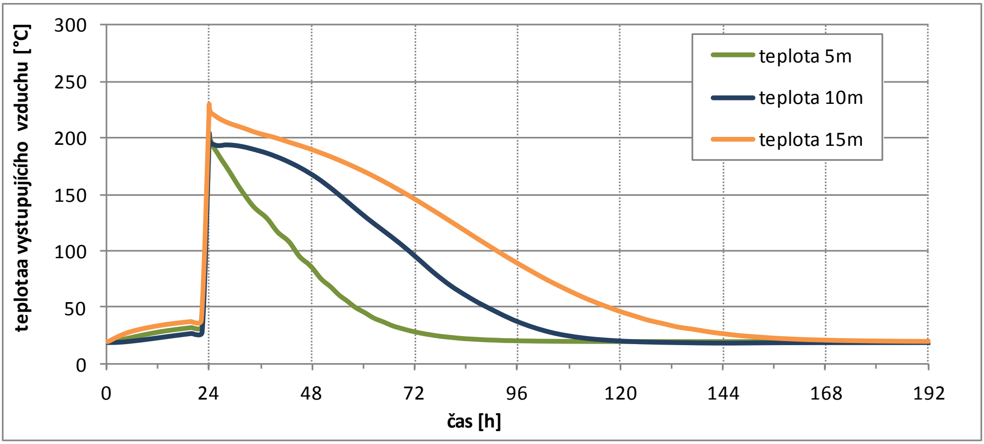
4.5 Možnosti navýšení teploty vystupují tekutiny

Pro účely praktického nasazení je možné návrh tepelného úložiště modifikovat s cílem zajistit optimální provoz. Základním parametrem modifikace je změna rozměrů. Touto změnou lze docílit řádově větší kapacitu úložiště a podstatně tak lze modifikovat i teplotu na výstupu z tepelného výměníku.

Udržení vyšších teplot vystupující teplonosné tekutiny z tepelného výměníku po delší časové období lze nejsnáze docílit při liniové geometrii úložiště. Z těchto důvodů byl sestaven matematický model úložiště ve tvaru kvádru a byla provedena předpověď průběhu teploty vystupující teplonosné tekutiny. V modelu byla zachována konstrukce tepelného jádra založená na granitových kostkách a na TVG. Tepelné jádro (i s výměníkem a topnými tyčemi) bylo prodlouženo na délku 5, 10 a 15 metrů.

Ohřev úložiště byl simulován po dobu 24 hodin, odběr tepla následujících 168 hodin (7 dní) do úplného vyčerpání úložiště. Rychlost proudění byla zadána shodně s předchozími simulacemi 4.5 $m \cdot s^{-1}$. Na grafu z Obr. 8 je zobrazen průběh simulované teploty vystupujícího vzduchu. Po aktivaci odběru tepla z výměníku vystupuje

vzduch s průměrnou teplotou nad 200 °C. Teplota 150 °C je podkročena po 8 hodinách odběru při délce jádra 5 m, pro délku 10 m je tato doba téměř 29 hodin. Při 15m jádru je 150 °C podkročeno až po 44 hodinách odběru. Další možnost regulace teploty výstupního média spočívá v regulaci rychlosti média v tělese výměníku.



Obr. 8 Průběh teplot vystupujícího vzduchu z tepelného výměníku pro 5, 10 a 15 metrové jádro úložiště.

Pětimetrové úložiště na počátku plnění odebírá příkon přes 30 kW. Během 24 hodin dochází k jeho poklesu na 12 kW, příkon v dalších variantách je přibližně úměrný prodloužení úložiště. Počáteční odebírané teplo odpovídá výkonu 15 kW a téměř lineárně, během 48 hodin odběru (24 - 72), klesá až k nule. Tepelné ztráty pláštěm ve špičce činí 1.1 kW. Uvedené hodnoty jsou přepočteny pro celé úložiště. Během simulace bylo do úložiště doplněno 369 kWh tepla, z toho bylo následně odebráno 336 kWh. Celková ztráta pláštěm činila 33 kWh (9Množství uloženého tepla je přímo úměrné velikosti úložiště a přibližně odpovídá 0.4 MWh na 5 metrů úložiště při době nabíjení 24 hodin. Ze simulací lze odtušit, že návrhem geometrie úložiště lze snadno optimalizovat provoz pro konkrétní účel.

5. Výsledky práce

K simulacím a numerickému vyhodnocení provedených experimentů byl použit program COMSOL Multiphysics. Program popisuje sledované jevy pomocí matematického zápisu fyzikálních vztahů. K řešení matematického problému je použito výpočetní metody konečných prvků.

Při analýze prvotních měření prohřívání horninových vzorků byl identifikován neočekávaně výrazný vliv tepelného odporu, který vzniká na styku dvou materiálů. Díky zavedení odporu do modelových simulací byla dosažena lepší shoda měření a výsledků modelů. Tento jev byl pozorován i ve všech následujících experimentech.

Při výzkumu horninových vzorků s TVG byl měřením i modelově prokázán pozitivní vliv TVG na rozložení teplot a zvýšení tepelného toku. V experimentu s granitovým blokem s umělou spárou vyplněnou v jedné polovině TVG a v druhé balotinou byl ověřen způsob instrumentace komplexnějších experimentů, způsoby měření, sběru dat a jejich zpracování. Při modelovém vyhodnocení byly stanoveny toky v každé z polovin bloku a toky (ztráty) přes hranice modelu. Při maximu byl tepelný tok do poloviny s TVG o 38 % vyšší, v průměru o 24 %, oproti toku do poloviny s balotinou. Spára tvořila 5 % objemu bloku. Při analýze tepelných toků přes hranice modelu byl identifikován výrazný únik tepla malými plochami ocelového rámu mimo tepelnou izolaci. Část rozdílů mezi měřenými hodnotami a simulací lze přisoudit mechanické degradaci TVG v těsné blízkosti topné patrony.

Ze sérií variantních jednodušších i komplikovanějších modelových úloh vyplynulo doporučené zastoupení TVG v tepelném úložišti a konstrukce tepelného výměníku pro odběr tepla z akumulačního jádra. Doporučené zastoupení TVG v tepelném úložišti bylo stanoveno v rozmezí 20 až 30 %. Jako dostatečný, vzhledem k funkci, konstrukce a nákladů, byl navrhnut vzdušný tepelný výměník sestávající se ze čtyř tenkostěnných trubic s průměrem 60 mm. Na základě předběžných simulací bylo také navrženo rozmístění monitorovacích teploměrů ve finálním experimentu.

Celý finální experiment s prototypem vysokoteplotního úložiště trval 48 dní. Následně byly zpracovány zaznamenané časové řady z 25 čidel teploty, 2 čidel rychlosti proudění na vstupu a výstupu ze vzdušného výměníku a celkového příkonu při ohřevu tepelného úložiště. Na základě dat byla provedena simulace experimentu numerickým modelem. Nejprve byl kalibrován stacionární stav při plném nabití. Model dobře reprezentoval tento stav. K nadhodnocení modelových teplot dochází téměř výhradně v dolní polovině jádra úložiště, naopak k podhodnocení teplot dochází v horní části. Maximální zaznamenaná odchylka

teploty v monitorovacích bodech byla 11.8 °C při plném nabití úložiště. Následně byly provedeny časově závislé simulace reprezentující dobu celého experimentu. V tomto případě model podhodnocuje dodané množství tepla, v průměru za jednotlivé periody vychází chyba 5.9 %. Z vývoje měřených teplot a průběhu zaznamenaného příkonu topných tyčí pochází nepotvrzené podezření o opětovné degradaci TVG v okolí topné tyče č. 3. Díky modelové simulaci byla sestavena bilance celého experimentu sestávající se z dodaného tepla, tepelných ztrát pláštěm a odebraným teplem proudícím vzduchem. Ztráta izolací při cyklickém režimu tvořila 28 %. Za celou dobu experimentu bylo spotřebováno 928.51 kWh energie.

Z variantních simulací různých materiálů tepelného úložiště byl vyhodnocen přínos TVG. Při 24 hodinovém ohřevu dokáže tepelné úložiště z kompozitu granitu a TVG akumulovat 45 kWh tepla. Identické úložiště pouze z granitu by pojmulo za stejný časový úsek 33.2 kWh, úložiště z běžného betonu 25.2 kWh. Nárůst akumulovaného tepla je v řádu desítek procent.

Pro analýzu možností optimalizace teplot vystupujícího vzduchu při odběru tepla byly sestaveny modely s liniovou geometrií. Průmět jádra byl protáhnut ve směru trubic tepelného výměníku na délku 5, 10 a 15 metrů. Simulace prokazují možnost škálování potřebného vývoje teploty vystupujícího vzduchu. Při 5m jádru úložiště je podkročena teplota 150 °C vystupujícího vzduchu po 8 hodinách, při 15m jádru je toto podkročení simulováno až po 29 hodinách odběru.

Vyvinutá technologie konglomerátu TVG s granitovým materiálem se jeví jako konkurence schopná při vhodném nasazení v solárních tepelných elektrárnách nebo při využití odpadního tepla v těžkém nebo energetickém průmyslu. Ve spolupráci s Univerzitním centrem energeticky efektivních budov z ČVUT bylo uvažováno o ukládání tepla z odpadních spalin a jejich opětovnému využití při předehřívání vstupujících surovin.

6. Závěr

V práci byl zpracován přínos nového materiálu - tepelně vodivého geopolymeru, při skladování tepla ve vysokoteplotních úložištích. V textu je provedena rešerše způsobů ukládání energie s důrazem na ukládání ve formě tepla. Byly popsány principy ukládání zjevného, latentního i termochemického tepla. V části věnované konkrétním typům tepelných úložišť byly popsány způsoby a technologie ukládání tepla při nízkých i vysokých teplotách. V rešeršní části práce je v neposlední řadě dokumentován výběr horninového materiálu vysokoteplotního úložiště a vývoj tepelně vodivého geopolymeru.

Vyhodnocení přínosu tepelně vodivého geopolymeru bylo provedeno metodou matematického modelování. Jak experimenty, tak samotné modelování postupovalo od jednodušího ke složitějšímu. Postupně byl zdokumentován vývoj znalostí a instrumentace experimentů a jejich vyhodnocení. Díky matematickému modelování jsou analyzovány experimenty s jednoduchými horninovými vzorky, středně velký experiment s blokem granitu s umělou spárou vyplněnou TVG až po samotný prototyp tepelného úložiště. Byl prokázán pozitivní vliv TVG na distribuci tepla v akumulačním jádru úložiště. Získané znalosti byly použity k extrapolaci výsledků a byly předpovězeny možnosti ukládání a odběru tepla ze středně velkých úložišť.

Ačkoli se může tepelné úložiště jevit na první pohled málo perspektivní, v kombinaci s fotovoltaickými články, v nasazení v průmyslových procesech při využití odpadního tepla, nebo zbytkového tepla spalin může konglomerát granitových hornin s TVG sloužit jako levný dočasný akumulátor, jinak v daný okamžik nevyužitelné energie.

Literatura

Allen, K. G., Von Backström, T. W., Kröger, D. G., Kisters, F. M. (2014). Rock bed storage for solar thermal power plants: Rock characteristics, suitability, and availability. Solar Energy Materials and Solar Cells, 126, 170–183.

Andreozzi, A., Buonomo, B., Manca, O., Mesolella, P., Tamburrino, S. (2012). Numerical investigation on sensible thermal energy storage with porous media for high temperature solar systems. Journal of Physics: Conference Series, 395.

Ataer, E. (2006): Storage of thermal energy. In: Yalcin, A., Gogus, A. [eds]: Energy Storage Systems. Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Oxford ,UK: 20s

Bergman, T. L., Lavine, A.S., Incropera, F.P., DeWitt, D.P. (2011): Fundamentals heat mass transfers. JOHN WILEY & SONS, Hoboken.

Clauser, Ch., (2003). Numerical Simulation of Reactive Flow in Hot Aquifers, SHEMAT and Processing SHEMAT, Springer. Berlin.

COMSOL AB. (2012). Heat Transfer Module – User's Guide, version 4.3, Stockholm.

Daschner, R., Binder, S., Mocker, M. (2013). Pebble bed regenerator and storage system for high temperature use. Applied Energy, 109, 394–401.

Evans, A., Strezov, V., Evans, T. (2012). Assessment of utility energy storage options for increased renewable energy penetration. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(6), 4141-4147.

Gaine, K., Duffy, A., 2010: A life cycle cost analysis of large-scale thermal energy storage technologies for buildings using combined heat and power. ARROW@DIT Conference Papers, Dublin Energy Lab, Dublin Institute of Technology, 1-11.

Gil, A., Medrano, M. Martorell, I., Lázaro, A., Dolado, P., Zalba, B., Cabeza, L. F. (2010). State of art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1 – Concepts, materials and modelization. Renewable and Sustainable Energy Reviews 14(1),31-55.

Herrmann, U., Kelly, B., Price, H. (2004). Two-tank molten salt storage for parabolic trough solar power plants. Energy, 29(5-6), 883–893.

Hot Disk AB. (2014). Testing Thermal Conductivity | TPS 2500 S. [online] Dostupné z: http://www.hotdiskinstruments.com/products/instruments-for-thermal-conductivity-measurements/tps-2500-s.html [cit. 8.2.2014]

Khare, S., Dell'Amico, M., Knight, C., McGarry, S. (2013). Selection of materials for high temperature sensible energy storage. Solar Energy Materials and Solar Cells, 115, 114–122.

Kousksou, T., Bruel, P., Jamil, a., El Rhafiki, T., Zeraouli, Y. (2014). Energy storage: Applications and challenges. Solar Energy Materials and Solar Cells, 120(PART A), 59–80.

Laing, D., Steinmann, W.-D., Tamme, R., & Richter, C. (2006). Solid media thermal storage for parabolic trough power plants. Solar Energy, 80(10)

Lachman, V. et al. (2014). Reverzibilní skladování energie. Odborná zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích - Závěrečná zpráva za project. ISATech, s.r.o., Praha.

Medrano, M., Gil, A., Martorell, I., Potau, X., Cabeza, L. F. (2010). State of the art on high-temperature thermal energy storage for power generation. Part 2 - Case studies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(1), 56–72.

Navarro, M. E., Martínez, M., Gil, A., Fernández, A. I., Cabeza, L. F., Olives, R., Py, X. (2012). Selection and characterization of recycled materials for sensible thermal energy storage. Solar Energy Materials and Solar Cells, 107, 131–135.

Nosek, J., Kvapilová, Š., Cádrová, L. (2013). Zpráva za 3. etapu Vývoj geopolymeru a vodivé nanohmoty. Ústav nových technologií a aplikované informatiky, Technická univerzita v Liberci, Liberec.

Paksoy, H. O., Gürbüz, Z., Turgut, B., Dikici, D., Evliya, H. (2004). Aquifer thermal storage (ATES) for air-conditioning of a supermarket in Turkey. Renewable Energy, 29(12), 1991–1996.

Pinel, P., Cruickshank, C. A., Beausoleil-Morrison, I., Wills, A. (2011). A review of available methods for seasonal storage of solar thermal energy in residential applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15(7), 3341–3359.

Prasad, L., Muthukumar, P. (2013). Design and optimization of lab-scale sensible heat storage prototype for solar thermal power plant application. Solar Energy, 97, 217–229.

Py, X., Calvet, N., Echegut, P., Bassada, C., Olives, R., Meffre, A., Veron, E., Ory, S. (2011). Recycled Material for Sensible Heat Based Thermal Energy Storage to be Used in Concentrated Solar Thermal Power Plants, Journal of Solar Energy Engineering, 133(3).

Py, X., Calvet, N., Olive,s R., Echegut, P., Bassada, C., Jay, F. (2009). Thermal storage for solar power plants based on low cost recycled material. Online 7.5.2014: http://www.researchgate.net/profile/Catherine_Bessada/publication/228474806_Thermal_storage_for_solar_power_plants_based_on_low_cost_recycled_material/file/5046351cd111911da4.pdf

Singh, H., Saini, R. P., Saini, J. S. (2010). A review on packed bed solar energy storage systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(3), 1059–1069.

Tamme, R., Laing, D., Steinmann, W. D. (2004). Advanced Thermal Energy Storage Technology for Parabolic Trough, Journal of Solar Energy Engineering 126(2), 794-800.

Tamme. R., Laing. D., Steinmann. W. D. (2003). Advanced Thermal Energy Storage Technology for Parabolic Trough. Proceedings of International Solar Energy Conference.

Tian, Y., Zhao, C. Y. (2013). A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. Applied Energy, 104, 538–553.

Vanhoudt, D., Desmedt, J., Van Bael, J., Robeyn, N., Hoes, H. (2011). An aquifer thermal storage system in a Belgian hospital: Long-term experimental evaluation of energy and cost savings. Energy and Buildings, 43(12), 3657–3665.

Wiberg, N. E. (1983). Heat Storage in Aquifers Analyzed by the Finite Element Method. Ground Water, 21(2).

Xu, J., Wang, R. Z., Li, Y. (2013). A review of available technologies for seasonal thermal energy storage. Solar Energy, 103, 610–638.

Zanganeh, G., Pedretti, A., Haselbacher, A., Steinfeld, A. (2015). Design of packed bed thermal energy storage systems for high-temperature industrial process heat. Applied Energy, 137, 812–822.

Zanganeh, G., Pedretti, A., Zavattoni, S., Barbato, M., Steinfeld, A. (2012). Packed-bed thermal storage for concentrated solar power – Pilot-scale demonstration and industrial-scale design. Solar Energy, 86(10).

Zhao, C. Y., Wu, Z. G. (2011). Thermal property characterization of a low melting-temperature ternary nitrate salt mixture for thermal energy storage systems. Solar Energy Materials and Solar Cells, 95(12), 3341–3346.