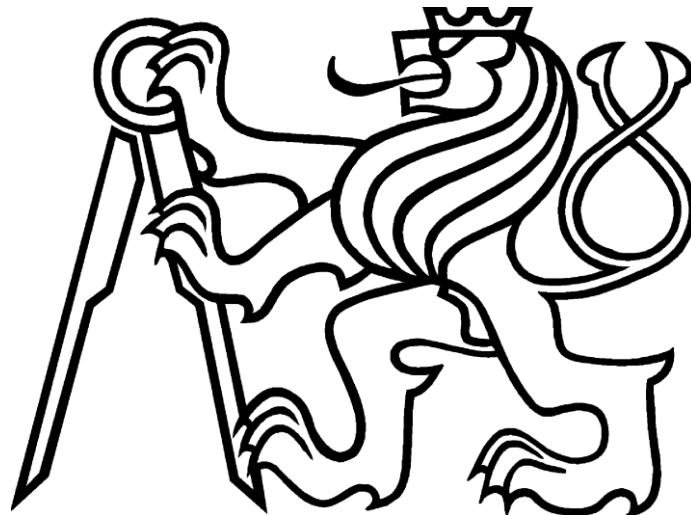


**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V
PRAZE**

FAKULTA STAVEBNÍ



KATEDRA TECHNICKÝCH ZAŘÍZENÍ BUDOV

PÍSKOVÝ AKUMULÁTOR TEPLA

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vypracoval: Bc. Karel Valek

Vedoucí práce: Ing. Zuzana Veverková, Ph.D.



2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE


Příjmení: <u>Valek</u>	Jméno: <u>Karel</u>	Osobní číslo: <u>484590</u>
Zadávací katedra: <u>Katedra technických zařízení budov</u>		
Studijní program: <u>Budovy a prostředí</u>		
Studijní obor/specializace: <u>Budovy a prostředí</u>		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: <u>Pískový akumulátor tepla</u>	
Název diplomové práce anglicky: <u>Sand heat accumulator</u>	
Pokyny pro vypracování:	
1) Zpracujte rešerši problematiky využití písku pro akumulaci tepla.	
2) Praktická část je zaměřena na sestavení experimentálního pískového akumulátoru tepla a následně analýzy jeho provozu - analýza teplotních parametrů a spotřebované a dodané energie. Na základě analýzy provozu navrhnete případná optimalizační opatření pro zlepšení provozních vlastností a zpracujete teoretický návrh možného využití pro praxi; včetně zhodnocení výhod a nevýhod tohoto použití a možných překážek pro uvedení do praxe s tím spojených.	
Seznam doporučené literatury: odborné články, odborné časopisy, příspěvky z konferencí, výzkumné zprávy apod.	
Jméno vedoucího diplomové práce: <u>Ing. Zuzana Veverková, Ph.D.</u>	
Datum zadání diplomové práce: <u>26. 9. 2023</u>	Termín odevzdání DP v IS KOS: <u>8. 1. 2024</u> <small>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</small>
 Podpis vedoucího práce	 Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

<u>26.9.2023</u> Datum převzetí zadání	 Podpis studenta(ky)
---	---

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a podkladů

V Praze dne

podpis

Poděkování:

Chtěl bych poděkovat především své rodině a příbuzným, za velkou podporu, zájem a motivaci po celou dobu mého studia. Dále chci poděkovat Ing. Zuzaně Veverkové Ph.D. za odborné vedení práce a věcné připomínky.

Abstrakt:

Tato diplomová práce se zabývá pískovými akumulátory tepla. První část je rešerší na stávající aplikace pískových akumulátorů, od komerčních po domácí využití. Dále na toto téma navazuje praktická část, kde došlo k provedení experimentů a sledování akumulace tepla v písku. Po praktické části následuje shrnutí poznatků různých překážek, které se během provádění experimentů objevovali a návrh pro pokračování dalších experimentů.

Klíčová slova: pískový akumulátor tepla, písková baterie, obnovitelné zdroje, vytápění, experiment, písek, šíření tepla

Abstract:

This master thesis concerns sand heat accumulators. The first part is recherche about current application of sand accumulators, from commercial to home uses. This topic is followed by a practical part, where experiments were conducted with observation of heat accumulation in sand. After practical part comes summary of notes about different obstacles, which occurred during experiments followed by a suggestions for following experiments.

Key words: sand heat accumulator, sand battery, renewable resource, heating, experiment, sand, heat diffusion

Obsah

Úvod:	9
1. Rešerše	11
Experimenty:	18
2.1 První fáze experimentů	21
2.1.1 Experiment č. 1 20.8. 2023	21
Okrajové podmínky:	21
Pomůcky:	21
Průběh experimentu:	21
Závěr:	23
2.1.2 Experiment č. 2 31.8. 2023	23
Okrajové podmínky:	23
Pomůcky:	24
Průběh experimentu:	24
Závěr:	28
2.1.3 Experiment č. 3 2.9. 2023	29
Okrajové podmínky:	29
Pomůcky:	29
Průběh experimentu:	29
Teoretický výpočet	31
Závěr:	32
2.1.4 Experiment č. 4 10.9. 2023	32
Okrajové podmínky:	32
Pomůcky:	33
Průběh experimentu:	33
2.1.5 Experiment č. 5 5.10. 2023	35
Okrajové podmínky:	35
Pomůcky:	35
Průběh experimentu:	35
Závěr:	36
2.1.6 Experiment č. 6 7.10. 2023	37
Okrajové podmínky:	37
Pomůcky:	37
Průběh experimentu:	37
Teoretický výpočet	39

Závěr:.....	40
Druhá etapa experimentů	41
2.2.1 Experiment č. 7 12.11. 2023	43
Okrajové podmínky:.....	43
Pomůcky:.....	43
Průběh experimentu:.....	44
Teoretický výpočet.....	45
Závěr:.....	47
2.2.2 Experiment č. 8 17.11. 2023	48
Okrajové podmínky:.....	48
Pomůcky:.....	48
Průběh experimentu:.....	48
Teoretický výpočet.....	52
Závěr:.....	55
2.2.3 Experiment č. 9 29.11. 2023	56
Okrajové podmínky:.....	56
Pomůcky:.....	56
Průběh experimentu:.....	56
Teoretický výpočet.....	61
Závěr:.....	62
2.3 Zhodnocení experimentů:	63
3. Simulace:	64
3.1. Simulace experimentálního stavu	65
3.2 Simulace úplného zaizolování	68
3.3 Simulace většího množství písku bez izolace	71
3.4. Simulace 400 mm izolace	73
3.5 Simulace zakopaného akumulátoru s izolací	76
3.6 Simulace zakopaného akumulátoru bez izolace	78
Tepelné ztráty:	80
Vlhkost:	80
Ohřev:	80
Sedání:	81
Váha:	81
Závěr:	82
Seznam obrázků	84
Seznam grafů:	85

Seznam tabulek:	85
Seznam citované literatury	86
Použitý kód	88

Úvod:

„Výroba tepla na vytápění spotřebovává 50 % světové potřeby energie, což je výrazně větší množství spotřeby energie než v jiných sektorech, například výroba elektřiny nebo doprava. Se zvyšujícími se cenami energií na vytápění a zvětšujícími se obavami o globální oteplování se objevuje velký zájem o nové technologie, které by mohly pro vytápění využít levné a ekologické zdroje. Jako reakci na zhoršující se klimatické podmínky předložila Evropská unie nový požadavek “Fit for 55”, který se snaží o snížení produkce skleníkových plynů o 55 % do roku 2030 oproti roku 1990. Tento návrh se zaměřuje na energeticky efektivní budovy a průmysl. Návrh “Fit for 55” chce zvýšit množství obnovitelné energie ve vytápění a chlazení o 1,1 % ročně. Solární elektrárny, větrné elektrárny a tepelná čerpadla budou pro řešení budov nepostradatelná. Několik legislativ v EU míří i na to, aby se zakázalo použití generátorů na fosilní paliva pro potřeby vytápění do 200 °C, což se týká asi 30 % celkového tepla na vytápění v průmyslu EU.“ [1]

Vytváří se tak velký požadavek na trh, neboť spousta budov bude potřebovat pokrýt vytápění přes solární panely, fotovoltaické panely a větrné elektrárny. Tyto ekologické zdroje energie nejsme v dané době schopni na plno využít a bude třeba optimalizace hlavně co se týče pokrytí nadvýroby v určitých fázích dne a roku. K tomu se v dnešní době využívají z velké části lithiové baterie, které jsou marketingované jako součást zeleného energetického řešení, protože se používají v kombinaci s fotovoltaickými panely, větrnými elektrárnami a jinými ekologickými zdroji elektrické energie. Není to však pravda, pro výrobu těchto baterií je třeba lithium, což je materiál, kterého je omezené množství a velká komerční efektivní recyklace baterií zatím není známa. Životnost těchto baterií se počítá 5-15 let, což není nijak dlouhá doba a spotřeba baterií a tedy i materiálu je velká. [2]

Hlavním světovým zdrojem lithia je Afrika a především Kongo, odkud pochází většinová světová potřeba lithia, těžba v těchto dolech probíhá v nehumánních podmínkách, lidé nemají nástroje, žádné bezpečnostní pomůcky a ročně tak dochází k velkému množství úmrtí. Pracují tam jak dospělí lidé, tak děti a na velkou část z nich má těžba dlouhodobé zdravotní dopady, lidé dříve umírají a dochází i k defektům na dětech. [3]

Těžba samotná není nijak ekologická, je to velký zásah do půdy, k těžbě a zpracování je potřeba velké množství energie a velké množství vody, která je těžbou znečištěna, navíc může dojít ke znečištění podzemních vod a znehodnocení tak pitné vody. [4]

Pokud chceme přejít k ekologičtější variantě, tak je teď nejvyužívanějším médiem pro skladování tepla voda. Voda však dokáže pojmout pouze omezené množství energie, protože při dosažení vyšších teplot dochází k varu, tím ke změně skupenství a vypařování a tím ke změně tlaků, které komplikují funkčnost a cenu systému. Je tedy důležité najít nějaký levný, běžný a dostupný materiál s dobrými tepelnými vlastnostmi. Požadované tepelné vlastnosti mohou být různé, můžeme se zaměřit na materiály s teplotou tání mezi 200-1000 °C, tedy využívat k uložení energie změnu skupenství, nebo naopak najít materiály s vysokou teplotou tání a uložit do nich energii bez změny skupenství. Kvůli změnám tlaků a objemů se mi jeví, že materiály s vyšší teplotou tání, kde se tyto změny tlaků a skupenství v takové míře neřeší, budou jednodušší na zkoumání.

Hlavní bod diplomové práce se zabývá možným využitím písku jako média pro dlouhodobější ukládání tepla. V této práci tedy jde o to, vyzkoumat, zda má písek díky svým vlastnostem potenciál pro využití jako zásobník tepla pro větrné nebo solární a fotovoltaické elektrárny. Teplo takto uložené by se dále dalo využít pro vytápění nebo jiné tepelné systémy.

Práce se dělí na více částí, první část je zaměřena na řešení stávajících systémů, které využívají písek pro ukládání tepla. Druhá část popisuje poznatky a experimenty o akumulaci tepla v písku, je to snaha o přidání vlastních poznatků a náhledů na problematiku jinak než z cizích zjištění. Je to jedním z důvodů, proč byla tato problematika vybrána, protože materiály nejsou nijak náročné na sehnání a lze si zjednodušený model sestavit v domácím prostředí. Výsledkem je tedy souhrn zjištění a posouzení poznatků získaných z experimentů a simulací a následný návrh pokračování experimentů, využití v praxi a jaké se jeví možné výhody a nevýhody do budoucna.

Písek je snadno dostupný, je levný, ekologický a má dobré vlastnosti co se týče uchovávání tepla. Teplota tání písku se pohybuje mezi 1400-1700 °C, to znamená, že do písku lze uložit více tepla než do vody a můžeme tak pokrýt špičkové hodiny výroby elektřiny u fotovoltaických a větrných elektráren, a proto byl vybrán jako médiem pro ukládání tepla v experimentech.

1. Rešerše

Hlavním využitím v praxi, které se v dané době řeší, je použití pískového akumulátoru jako baterie pro fotovoltaiky a větrné elektrárny. Tedy pro uložení energie v době nejvyšší produkce. Nyní se energie ukládá do lithiových baterií a v době nejvyšší produkce dochází k posílání nadbytečné energie do sítě, takže u většiny energie v době nadvýroby nedochází k ukládání pro pozdější využití, ale prodává se do sítě, odkud bude muset být zase odkoupena. Takovéto pískové akumulátory by dokázaly pojmout v této době nadměrné množství vyrobené energie a uložit ji pro pozdější využití.

Pískový akumulátor byl zkoumán jen z hlediska uložení energie a dále bylo pracováno s variantou možného využití uložené energie pro vytápění, následná přeměna této energie znovu na elektrickou energii není součástí této práce, i když je to možnou variantou využití. Dle dostupných informací je zpětné získání elektrické energie z písku na 30 % efektivnosti. Kdyby bylo dosaženo vyšší efektivity, poptávka po pískových bateriích by závratně stoupla. [8]

Předpokládaný systém by bylo možné využít v praxi v souběhu s fotovoltaikou nebo větrnou elektrárnou, které dodávají elektrickou energii do topného tělesa, to ohřeje buď rovnou písek anebo nahřeje médium, které teplo dále předá písku. Dojde k ohřátí písku na teploty klidně až přes 1000 °C, pískem se prožene přenosové médium, například vzduch, to odebere teplo a přes výměník předá toto teplo otopné vodě. Možné je pak využití jak pro vytápění, tak ohřev teplé užitkové vody.

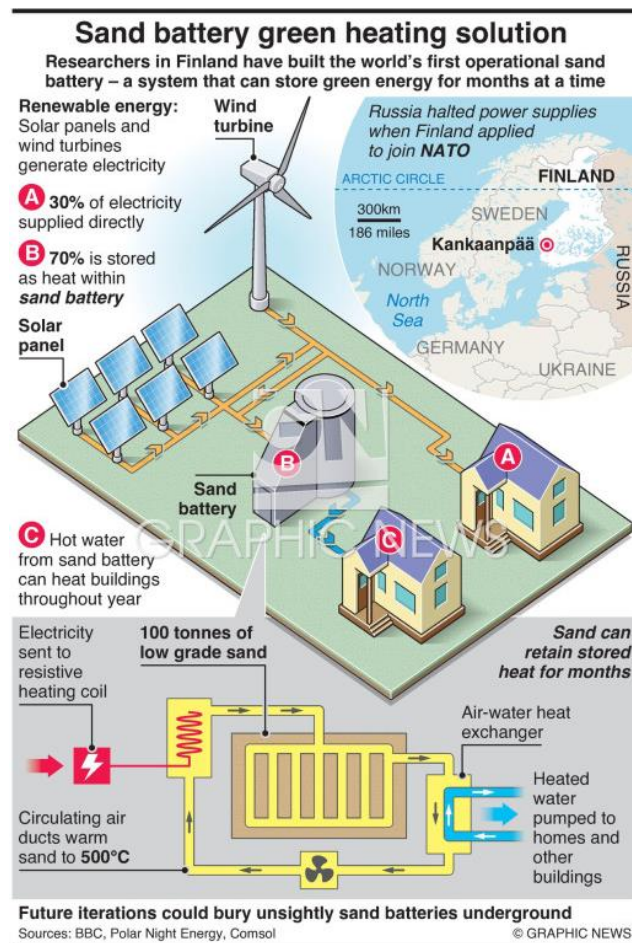
Jak už bylo zmiňováno, ohřev může být přímý rovnou zabudovanou spirálou v nádobě s pískem anebo ohřev písku zprostředkovaný pomocí média. Přímým ohřevem se budu zabývat v experimentech, kvůli jednoduchosti řešení oproti využití média. Dalšími způsoby využití akumulátoru a ohřevu písku pomocí média se budu zabývat v této rešerši.

Firma Polar Night Energy vytvořila pro první komerční pokus silo vysoké 7 metrů, široké 4 metry s obsahem 100 tun písku, toto silo bylo instalováno ve finském městě Kankaanpää v roce 2022 a je napojeno na městské centralizované vytápění. Tento pískový akumulátor se skládá ze 3 hlavních částí: pískové silo, elektrický ohříváč vzduchu a výměník vzduch – voda. Pro ohřev písku, se podle dostupných zdrojů, využívá vzduch nahřátý na 600 °C pomocí elektrického ohříváče. Horký vzduch se po ohřátí prohání vnitřkem pískového sila pomocí výměňkového potrubí a větráku, tímto

způsobem je jádro písku nahřáto na 600 °C. Když je třeba teplo odebírat, začne se výměňikovým potrubím prohánět pomocí větráku vzduch, poté co se vzduch ohřeje na 200 °C, je převeden do výměňiku vzduch – voda, kde slouží k ohřevu vody, odkud je posílána do vytápěcího okruhu. Úložný systém potřebuje neustálý přísun elektrické energie, pro nabíjení akumulátoru, monitorování teplot a běh větráků. Zástupci firmy tvrdí, že pro odebrání 2 MW tepla potřebují 2 kW elektrické energie. Tato instalovaná baterie dokáže skladovat 8 MWh energie a vydávat teplo rychlostí 0,1 MW což dokáže zajistit vytápění 100 domů a plaveckého bazénu, po dobu 80 hodin po plném nabití. Pískový akumulátor nyní funguje spíše jako dodatečný zdroj a město na něm není nijak závislé. [7]

I když je pískový akumulátor schopen uchovat teplo po dobu několika měsíců, tak cyklus ohřevu této baterie nyní funguje ve 2týdenních cyklech a provozovatelé z Polar Night Energy tvrdí, že nejlepší výsledky akumulátor vydává, když je nabit a vybit 20 až 200krát za rok. [9]

Firma se přesné specifikace a řešení snaží zatím nepublikovat mezi širokou veřejnost a nikde není přesně dohledatelné, jak toto jejich řešení funguje, a i při kontaktování této firmy mi bylo sděleno, že přesné informace nemohou sdělit a byly poskytnuty pouze odkazy na články, které se zabývaly efektivitou písku jako materiálu pro akumulátor. Popisované řešení je tedy přebráno z externích zdrojů, které nemusí stoprocentně odpovídat skutečnosti. Předpokládané řešení je takové, že fotovoltaické panely dodávají elektrickou energii do elektrického ohříváče, který ohřívá vzduch. Vzduch je následně proháněn pískem v jakémsi druhu výměňiku a dále se vrací do místa ohřevu anebo je vypouštěn ven. Odběr tepla funguje pomocí větráku, který fouká studený venkovní vzduch skrz výměňik v pískovém akumulátoru a do výměňiku vzduch-voda, kde se voda ohřívá a posílá jako pára do dálkového vytápění anebo jako horká voda pro přímé využití v domech. Tento obrázek obecně popisuje nabíjení, vybíjení a využití pískového akumulátoru obecně. [5] [6]



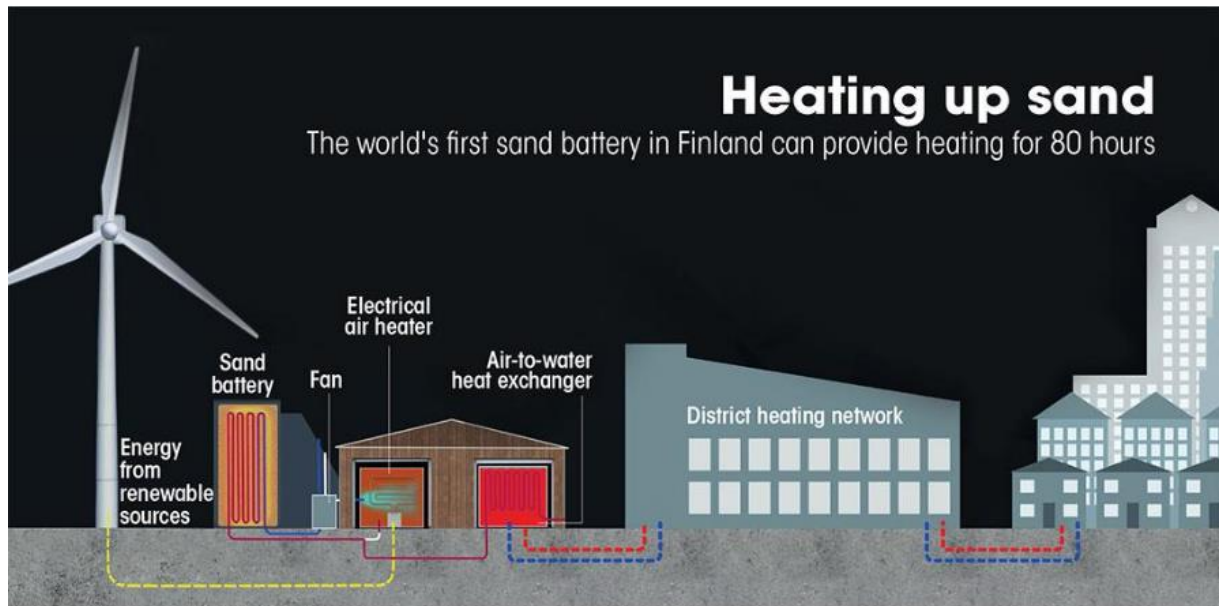
Obrázek 1: obecný diagram pískového akumulátoru od Polar Night Energy [11]

Zobrazované řešení je spojeno s větrnou elektrárnou, která je jednou z možností zásobování energie pro pískový akumulátor. Bližší fungování akumulátoru, jak je zobrazeno, je velice zjednodušeným obrázkem.

V obrázku níže je blíže zobrazené, jak ohřev a odběr tepla nejspíše probíhá, schéma bylo vytvořeno ve spolupráci s Polar Night Energy. Schéma níže odpovídá spíše průběhu ohřevu, ale stále je to zjednodušené schéma, kde nejsou všechny části dořešené.

Větrná elektrárna nebo fotovoltaiky zásobují elektřinou elektrický ohřivač vzduchu, který v oddělené místnosti ohřívá vzduch. Ohřátý vzduch jde do pískového akumulátoru, kde odevzdává teplo a následně se může vracet zpět na ohřátí anebo je vypouštěn ven. Takový je průběh ohřevu, vybíjení baterie je řešeno tak, že je studený vzduch prohnán pískovou baterií, ohřeje se a jde do výměníku vzduch – voda, kde dochází k ohřevu vody na páru pro decentrální vytápění. Z těchto schémat se zdá, že

nelze najednou nabíjet a vybíjet baterii, což je značný nedostatek, ale skutečné řešení může být jiné. [7] [16]



Obrázek 2: fungování ohřevu a vybíjení pískové baterie u Polar Night Energy [7]

Další větší komerční využití jsou v dané době spíše ve fázích výzkumu a nejsou nikde nijak dohledatelná. Na trh pískových akumulátorů se snaží prosadit i česká firma Wattplus, nikde však nebyl přesný způsob řešení jejich systému publikovaný a přesnější informace mi bohužel sdělit nechtěli. Dohledatelné jsou jen některé prvky jejich systému a velmi obecné informace o jejich využití. Firma využívá vysokoteplotní systém určený pro ukládání tepelné energie. Tato technologie jim umožňuje ukládat teplo do písku, pomocí externího zdroje, který nazývají kompaktní předávací stanice. [14]



Obrázek 3: kompaktní předávací stanice Watt [14]

Jedná se o kombinaci tepelného čerpadla s topným faktorem dosahující až hodnoty 11 a ohřívací stanice pískových úložišť. Písek je ohříván na teplotu 400 °C – 480 °C a toto akumulované teplo se využívá na ohřev vody, vzduchu a v některých případech i na zpětné získání elektrické energie. Díky tomuto systému dokáží do 1 m³ písku při dosažení 400 °C uložit přibližně 100 kWh využitelné energie. Dále firma disponuje zařízením Wator, které slouží ke zpětnému získávání tepla z písku. Zařízení by mělo mít účinnost přesahující 50 % a má výkon 20 a 140 kW. [14]

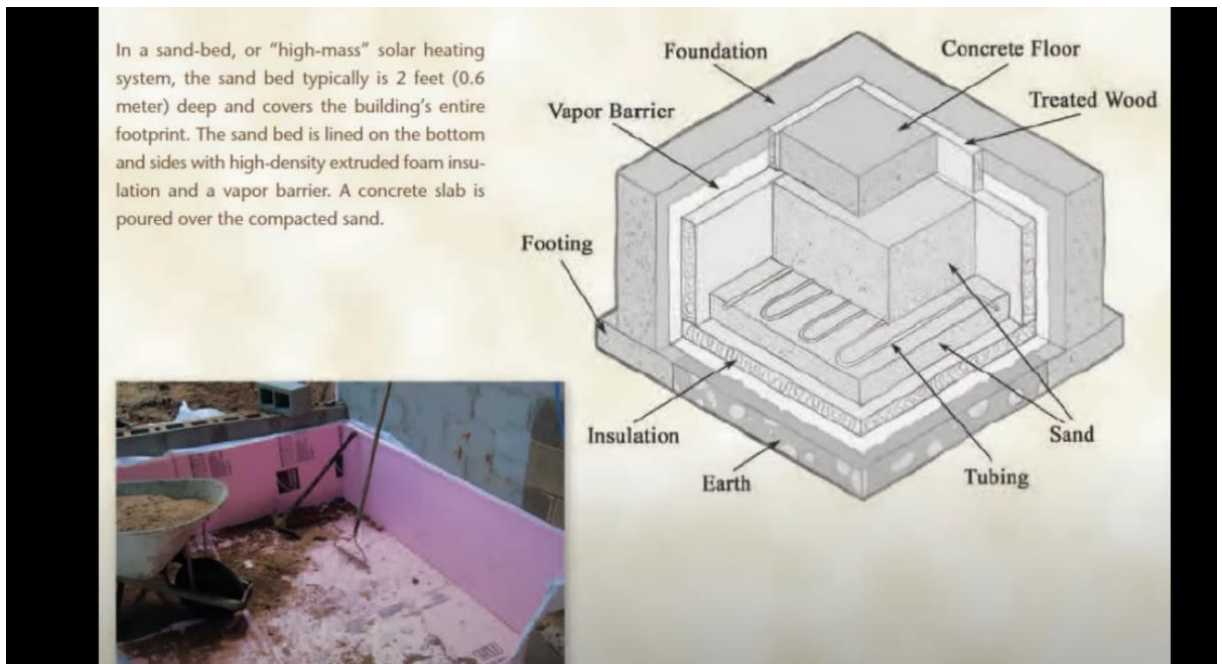
Existuje tedy už i česká firma, která se tímto řešením zabývá, ale technické řešení není veřejnosti známo. A nikde nepublikují, jak jejich řešení přesně funguje, jen to, že ho mají rozděleno na více menších částí a řešení je tak mobilní a využívají výměníků.[14][15]

Další využití pískového akumulátoru se vyskytují různě a spousta států s tímto řešením teprve experimentuje a řešení nechává zatím na papíře. Například firma Alfatech Company v Bratislavě, která mluví o řešení pro rodinné domy, kde uvádí, že na vytápění průměrně velkého rodinného domu měl stačit zásobník o objemu 50 m³, přičemž zdrojem elektrické energie by byly fotovoltaické kolektory o výkonu ve špičce 10-20 kW. Písek by se nahříval topnými kabely na teplotu 500-550 °C a vzduchovými průduchy, které by byly vedeny skrz pískové úložiště, by se v zimních měsících profoukával horký vzduch ventilátorem do výměníku, kde by se teplo předávalo do otopné soustavy. Takový zásobník by měl dle představitelů firmy uložit zhruba 4MWh energie. [10]

Pískové baterie tedy nejsou zatím kompletně komerčním produktem, ale je možné si například v Americe nechat k domu udělat na zakázku druh pískové baterie pro vytápění. Nezabývá se tím specificky žádná firma, ale je možné si to nechat navrhnout vybraným projektantem solárního vyhřívání anebo specializovaným výrobcem solárních systémů. [12]

Jedná se o druh pískového akumulátoru, který po nabití pasivně vytápí dům. Některé tyto systémy využívající pískového úložiště vykazovaly roční pokrytí potřeby na vytápění až 75 %. Tato písková úložiště jsou obvykle 0,6 m hluboká a pokrývají celou půdorysnou plochu budovy. Pískové úložiště je na spodku a stranách pokryt vysokohustotní extrudovanou pěnovou izolací a parozábranou, vrchní vrstva úložiště

bývá tvořena betonem. Do spodní části pískového úložiště je zasazen systém trubek, ve kterém proudí solárně ohříváné médium. Toto médium nahřívá pískovou hmotu a teplo proudí z písku skrze horní betonovou vrstvu a do budovy. [12]



Obrázek 4: pískový akumulátor pro pasivní vytápění [12]

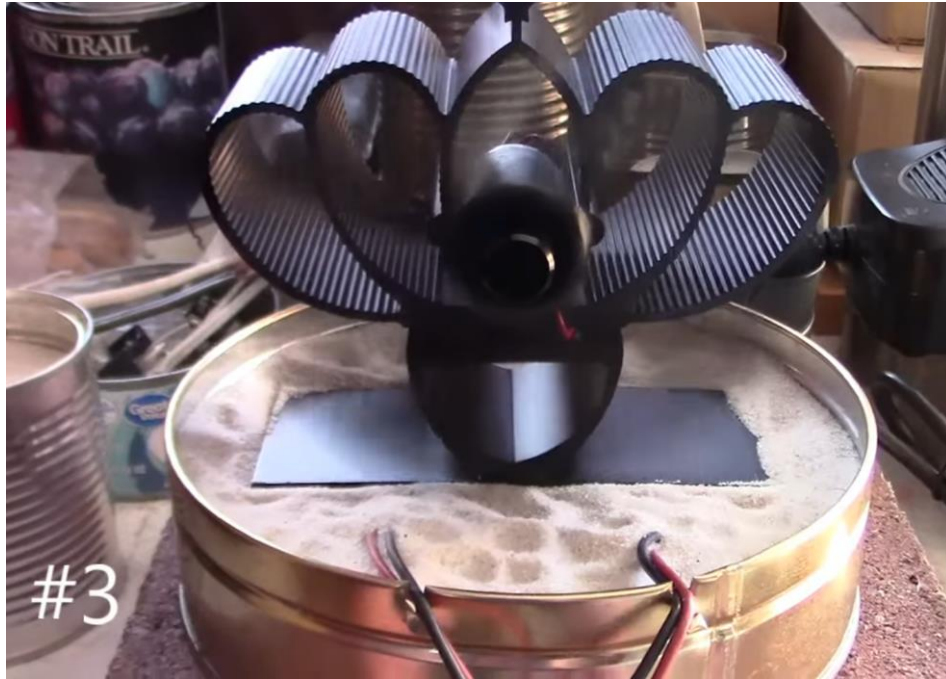
Výpočet množství solárních kolektorů pro ohřev písku využívají firmy stejný jako pro ohřev vodního zásobníku, tedy 0,2 m² kolektorů na 1 m² vyhříváných prostor. Podle těchto výpočtů by vodní zásobník pokryl 50 % roční potřeby a pískový zásobník až 75 %. Pískový akumulátor by si měl udržet teplo získané koncem léta a začátkem podzimu. Díky pomalému prohřívání písku a jeho schopnosti si tak delší dobu udržovat teplo, dochází k pomalému prohřívání celé podlahy budovy. Na testovací budově bylo zjištěno, že tento druh pískového akumulátoru byl sám o sobě po celou zimu schopen zamezit promrznutí budovy a za celou zimu v budově neklesla teplota pod 10 °C. Pro zvýšení efektivity a lepší vedení tepla je však důležité zvolit vhodnou nášlapnou vrstvu podlahy. [12]

Důležitá je také instalace drainback systému tepla, tedy odvodu přebytečného tepla v letních měsících anebo v jiných obdobích, kdybychom nechtěli podlahou vytápět. Způsob zbavování se přebytečného tepla je na majiteli anebo návrhář, není dán žádný přesný způsob, jelikož jsou tepelné akumulátory vyráběny na zakázku. [12]

Pískové akumulátory se například ve Wisconsinu začínají nabíjet začátkem nebo v půlce srpna, neboť v tomto období je možné dostat do písku co nejvíce tepla.

Saturace pískového akumulátoru trvá přibližně měsíc, teplota v budově je pak dále regulována otevíráním oken v budově. [12]

Probíhají i malé domácí experimenty s akumulací tepla v písku pro skladování energie, nejedná se o složité systémy ale spíše zkoumání, kolik energie dokáže písek pojmout a jak dlouho ho udržet. A na jakou teplotu se pomocí fotovoltaických panelů dá písek ohřát. [13] [17]



Obrázek 5: Teplem poháněný ventilátor na domácí pískové baterii [13]

Ohřátí písku a možnou dobu využití ukazují například pomocí teplem poháněného ventilátoru. [13]

Experimenty:

V rámci diplomové práce bylo provedeno 9 experimentů, pro pochopení a pozorování průběhů teplot v písku. Experimenty měli ověřit či vyvrátit, zda je písek opravdu tak vhodný materiál pro ukládání tepla a zdali je jeho ohřev jednoduchý anebo tam jsou překážky, které jeho možné využití značně komplikují. Na první pohled se toto řešení akumulace tepla může zdát jako jednoduché, ale při hlubším zamyšlení se narazí na spoustu problémů, které mají komplexní a náročné řešení. Princip ohřevu, který byl na papíře zkoumán jako první, byl princip od firmy Polar Night Energy. Tato firma vede energii získanou z fotovoltaik do odporového drátu, který ohřívá vzduch, ten je následně veden trubkovým výměníkem umístěným v pískové nádrži. Tímto způsobem je písek ohříván a při odběru tepla z písku je studený vzduch hnán výměníkem v nádrži s pískem a odtud jde do výměníku, kde ohřívá vodu, se kterou už pak dále vytápíme. Při bližším zkoumání tohoto řešení se objevilo hned několik problémů, které byly značnou překážkou pro postavení tohoto systému v domácím prostředí. Jak třeba vést vzduch s co nejmenšími tepelnými ztrátami, jaké ventilátory použít, aby nebyly poničeny horkým vzduchem, kam horký vzduch posílat poté, co ho proženeme pískem. Jaké materiály použít, aby vydržely tak vysoké teploty, jaké by tam mohly vznikat, jak vytvořit výměník. Čím vytvářet dostatečně teplý vzduch a kde ho ohřívát.

Po konzultaci těchto problémů, byl rozsah experimentů zjednodušen. Takto složitý způsob ohřívání a odebírání tepla by vyžadoval komplexní experiment, který v domácím prostředí s běžně dostupnými pomůckami úplně nelze za danou dobu sestavit. Proto je předmětem zkoumání přímý ohřev písku topnou elektrickou spirálou bez potřeby odběru.

Během provádění experimentů došlo k úbytku hmoty v písku při zahřívání, písek byl skladován venku a to byl důvod jeho velké vlhkosti. Úbytek hmoty tedy muselo zapříčinit vypařování vody z písku anebo sedání písku, ale kombinace obou dalo značné množství – okolo 5 l hmoty – které bylo třeba v průběhu experimentů dosypat. Některé úbytky hmoty mohly být zapříčiněny i manipulací a je to tedy spíše odhad.

Trouba využívaná k první polovině experimentů je AEG competence s objemem 51 l s vnitřními dimenzemi HxWxD 31 cm x 40,5 cm x 41 cm, pracovalo se tedy s množstvím cca 0,051 m³ písku.

V druhé polovině experimentů jsem se snažil odstranit nedostatky zjištěné v první fázi pokusů, šlo hlavně o zajištění větší nádoby na písek, a tak zvětšit i množství testovaného písku. Byl tedy zakoupen plechový sud o objemu 200 l s dimenzemi 880 mm x 600 mm s tloušťkou stěny 1 mm a ten byl naplněn pískem. Dále došlo také k zajištění tlustší a celistvější vrstvy izolačního materiálu. Jako u předchozího experimentu muselo dojít znovu k vysušení písku a dále se prováděli experimenty a pozorovali průběhy teplot, kde došlo ke značnému zlepšení oproti první fázi.

Pro získávání dat byla ze školy zajištěna 4 teplotní čidla na měření. Avšak pro většího množství dat byla dokoupena dodatečná tepelná čidla, která sloužila jako doplňková ke školním čidlům. Pro tato dodatečná čidla bylo ještě potřeba dopsat program pro sběr dat a zapojit je, na tuto práci jsem si pozval známého, který je odborník z praxe. Ten mi napsal jak program pro sběr dat, tak mi následně pak i pomohl se zapojením čidel a celkovým zařízením. V zapojení ohřevu se nachází i chytrá zásuvka 3.0 smart power Plug 16a Eu socket 3680 W pro měření spotřeb energií. Pro tuto zásuvku i čidla bylo potřeba napsat program pro sběr dat, ten byl napsán v programovacím jazyce Python. Sběr dat ze zásuvky probíhal bezdrátově, v zásuvce je Zigbee protokol, který vysílá data na frekvenci 2.4 GHz a v počítači je zapojen Zigbee router, který data zachytává. Pro sběr dat bylo ještě potřeba napsat program v jazyce Pythonu pro spuštění a zapisování dat ze zásuvky do Zigbee2MQTT serveru, aby bylo možné uložení dat. Pro sběr dat bylo vždy nutné prvně spustit Zigbee2MQTT server, následně program, který data ze zásuvky vzal a zapsal na daný server. Sběr dat z teplotních čidel byl proveden přes mikročip ESP32, který daná čidla ovládá. Mikročip byl zapojen přes USB port do počítače a byl pro sběr dat z mikročipu napsán další program. Kód vyčítal data teplotních čidel pomocí sériového portu, který bylo třeba při spuštění zadat. Dále lze zadat teplotní maximum, které bylo přidáno jako pojistka proti přehřátí spirály. Při dosažení zadaného maxima se smart plug vypne a ukončí tak i ohřev spirály.

Poprvé když jsem začínal přemýšlet o tom, jak experimenty provedu, tak jsem se chtěl inspirovat firmou Polar Night Energy. Tato finská firma se zabývá pískovými bateriemi a písek má v sílech, která jsou umístěna nad zemí v okolí domů, ve kterých se uložené teplo bude využívat. Líbil se mi jejich jednoduchý systém, kde se písek nahřeje ohřátým vzduchem přes odporový drát a následně se i teplo odebírá přes výměník vzduchem. Přišlo mi, že tento jednoduchý systém by mohlo jít nějakými

oklikami napodobit. Takže jsem přemýšlel o nádobě, která je stavěna na to, že se v ní uchovává teplo, je v ní nějaký zdroj ohřevu a běžně se vyskytuje. Dostal jsem se tedy k elektrickému ohřívači vody, myslel jsem si, že to bude perfektní řešení, zaizolovaná nádoba, lehce dostupná včetně spirály na ohřev vody a s možností výměníku na odběr tepla. Jenomže po hlubší úvaze a přípravě mě napadlo, že spirála možná danou teplotu nezvládne, když je zvyklá se v elektrickém ohřívači vody chladit vodou a v písku bude docházet k neustálé akumulaci tepla v okolí spirály a nebude se teplo odvádět vzhůru tak, jak je to u elektrického ohřívače vody. Bylo tedy třeba spirálu v malé verzi vyzkoušet. Při přípravě sběru dat jsem nastavil čidla tak, aby zaslala data v periodě každých 5 minut a pomocí chytré zásuvky 3.0 smart power Plug 16a Eu socket 3680 W jsem nastavil vypnutí zdroje po dosažení určité teploty, aby nedošlo ke zničení čidel, kdyby se růst teplot nějak odlišil od mých očekávání a já bych nebyl v okolí experimentu a tím by se případně mohlo podařit udržet teplotu spirály v mezích, kde se nespálí. Dostávám se tedy k experimentu číslo 1.

2.1 První fáze experimentů

2.1.1 Experiment č. 1 20.8. 2023

Okrajové podmínky:

Experiment byl prováděn v uzavřeném zastřešeném prostředí plechové haly, s teplotními podmínkami venkovního prostředí. Hala není nijak tepelné izolována a sloužila pouze jako ochrana před větrem a deštěm. Venkovní teploty vzduchu v průběhu provádění experimentu se pohybovaly okolo 31°C. Experiment začal ve 14:12 h dne 20.8. a byl ukončen v 15:00 h dne 20.8.

Pomůcky:

příruba s topným tělesem elektrického ohříváče vody TATRAMAT EOY-1, OVK-1 NT s výkonem 2000 W, 3.0 smart power Plug 16a Eu socket 3680 W, VOLT CRAFT energy logger 4000, prodlužka, PARKSIDE Infračervený teploměr PTIA1, písek frakce 0/4 skladováno venku, teploměr s jímkou

Průběh experimentu:

Úkolem experimentu č. 1 bylo testování spirály elektrického ohříváče vody pro plánovaný experiment a její odolnost vůči přehřátí v písku. Cílem bylo zjistit, zda je možné spirálu v 5minutových intervalech správně vypínat a zapínat a tím zabránit jejímu přehřátí, ale stále zajistit ohřev písku v celé nádobě.

Spirála pochází ze skladiště šrotu společně s elektrickým ohříváčem vody typu Tatramat o objemu 200 l, spirála byla vyjmuta za pomoci odborníka, který následně připojil kontakty spirály ke zdroji elektrické energie, což byla běžná 230 V zásuvka. Následně byl do experimentu využit venku skladovaný písek, do něhož byla zasazena spirála tak, aby byla celá s výjimkou elektrických kontaktů zakryta. Tím byla vytvořena písková hromada o objemu přibližně 20 litrů, což odpovídalo 0,020 m³ písku.

Při spuštění experimentu jsem prvně kontroloval, že spirála pracuje na předepsaný výkon, tedy 2000 W a přes teploměr s jímkou byla měřena teplota u spirály do 200°C. Měření teplot v písku nebylo moc přesné, šlo hlavně o zkoušku spirály. Postupným posouváním teploměru s jímkou do optimální polohy do blízkosti spirály byla naměřena po 3 minutách teplota asi 90 °C pár centimetrů od spirály.

Dále asi po čtyřech minutách a čtyřiceti devíti vteřinách od spuštění se ozvala malá rána a bylo v hromadě vidět že praskla spirála. Došlo k propadnutí písku a bylo vidět žhavé jádro spirály. Dostupné měřiče tepla nebyly schopné změřit teplotu spirály, nejvyšší limit měřidla byl 350 °C, jednalo se o Parkside infračervený teploměr. Teplotu spirály jsem byl schopen naměřit až tak po dvou minutách, co byla vypnuta ze zásuvky a vystavena venkovnímu prostředí, naměřena byla teplota 300 °C. Písek v okolí spirály po vyndání měl teplotu mezi 150–280 °C některé části spirály měly okolo 300°C. Po dalších 5ti minutách byla povrchová teplota písku 28-30°C a vnitřní teplota se držela na 75°C tam, kam bylo možné dosáhnout měřidly. Písek se pomalu prohříval, rychlost prostupu tepla je nízká a za dobu spuštění spirály se prohřálo jen minimální množství písku. Povrchové teploty písku, tedy vrstva necelých 10 cm od povrchu spirály, mělo teplotu max 25-26°C. Dále jsem pozoroval, jak bude písek chladnout a jestli bude úbytek tepla znatelný nebo ne a jestli bude znatelná izolační funkce písku.

Po dalších 4 minutách byla teplota uvnitř hromady písku stále na 75 °C a povrchová teplota se pohybovala od 26 °C v místech s větší vrstvou písku od spirály, až po 45 °C v místech s tenkou vrstvou písku. Průměrná teplota povrchu se však pohybovala okolo 30 °C, bylo tedy znatelné pomalé prohřívání písku. Po uběhnutí dalších 5ti minut teplota v hromadě klesla o 1°C, povrchová teplota se pohybovala mezi 25-31°C s maximem až 42°C a s minimem okolo 23°C.

Po dalších 14 minutách teplota uvnitř klesla na 65 °C a povrchové teploty byly 26 °C, místy až 43°C. Po těchto měřeních jsem chtěl vidět, jakou teplotu bude mít ještě spirála uvnitř a jestli teplota na teploměru odpovídá skutečnosti. Spirálu jsem tedy vyndal a nahlídl jsem dovnitř pomocí infračerveného teploměru. Teplota uvnitř ve vzdálenosti 20 cm od spirály dosahovala od 45 °C do 56 °C, teplota blíže ke spirále se pohybovala mezi 70 °C a 80 °C, samotná teplota spirály se pohybovala okolo 50°C. Byl vidět značný doběh spirály, spirála si i po půl hodině od vypnutí držela značnou teplotu. Místo odkud byla spirála odebrána bylo znovu uzavřeno a zahrabáno, aby se dalo sledovat další postupné chladnutí písku. Patnáct minut po vyndání spirály byla teplota uvnitř okolo 47 °C, povrchové teploty se pohybovaly od 25 °C do 35°C.

Poslední měření proběhlo po dalších 13ti minutách, tedy nějakých 48 minut od spuštění experimentu se teplota uvnitř držela na 45 °C, povrchové teploty se

pohybovaly mezi 25 °C a 33°C. Písek byl poté rozhrnut a nechal se vychladnout a byl použit k dalším experimentům.

Závěr:

Experiment splnil svůj účel, bylo zjištěno, že spirála z elektrického ohřívače vody není vhodná pro tento druh ohřevu a je tedy třeba vymyslet jiný zdroj tepla pro další experimenty. Dále bylo možné vypořadovat, že písek ne úplně dobře vede teplo a pomalu se prohřívá. Tedy i když je teplota uvnitř vysoká, teplota na povrchu, o pár centimetrů dál je značně nižší. Písek má dobrou tepelnou kapacitu a díky pomalému prohřívání má menší tepelné ztráty než například voda, protože trvá poměrně dlouho, než se teplo dostane skrz hromadu písku do kontaktu s okolním prostředím, kde dojde k tepelným ztrátám. Tím pádem se dá předpokládat, že písek by mohl být lepší na dlouhodobé uchovávání tepla než jiné materiály jako je například voda. Vypořadováno bylo také to, že teplo se v písku šíří velice pomalu a je třeba do budoucna přemýšlet o efektivnějším vedení tepla, aby došlo k rychlému a hlavně celému prohřátí hmoty. Což bude asi společně ještě s efektivním odběrem tepla jednou z větších překážek tohoto způsobu ukládání tepla.



Obrázek 6: písek s topnou spirálou z bojleru

2.1.2 Experiment č. 2 31.8. 2023

Okrajové podmínky:

Experiment byl prováděn v uzavřeném zastřešeném prostředí plechové haly, s teplotními podmínkami venkovního prostředí. Hala není nijak tepelně izolována a sloužila pouze jako ochrana před větrem a deštěm. Venkovní teploty vzduchu se v době spuštění experimentu pohybovaly okolo 19 °C, teplota písku v troubě před začátkem experimentu se pohybovala v průměru okolo 20,5 °C.

Pomůcky:

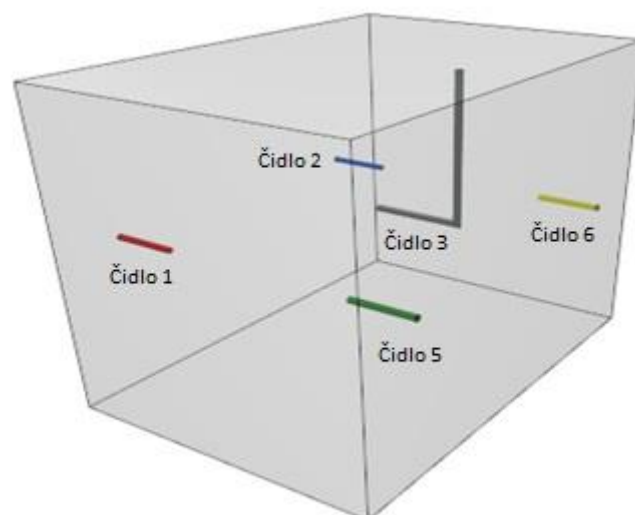
příruba s topným tělesem teplovzdušné elektrické trouby AEG s výkonem jedné spirály 1040 W, COMET teplotní čidlo -80 °C až +200 °C – Pt1000TG8/E 4x, temperature logger SO141, DS18B20 teplotní čidla drátová -55 °C až +125 °C 3x, notebook Lenovo, 3.0 smart power Plug 16a Eu socket 3680 W, VOLTCRAFT energy logger 4000, prodlužka, PARKSIDE Infračervený teploměr PTIA1, písek frakce 0/4 skladováno venku, teploměr s jímkou

Průběh experimentu:

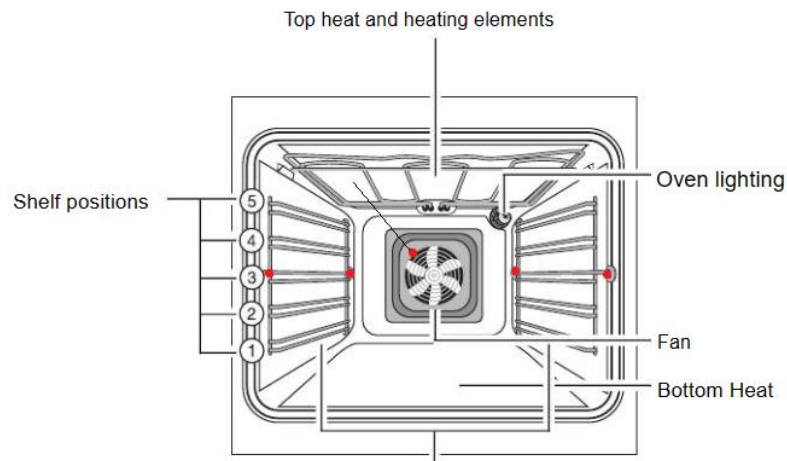
Pro vyřešení problému, jaký použít zdroj tepla pro ohřátí písku, byla zvolena běžná domácí horkovzdušná trouba, ve které je spirála chlazená vzduchem. Lze tedy předpokládat, že by mohla vydržet vysoké teploty, které budou v písku vznikat a nedojde k poškození. Horkovzdušná trouba byla získána z výkupu kovošrotu, následně byla zjištěna funkčnost jejich jednotlivých částí a uvedena do provozu pomocí odborníka. Jádro trouby je ze 4 stran ze 6 obaleno tepelnou izolací, na jedné straně je izolační sklo a spodek trouby není kvůli umístění topné spirály nijak tepelně izolován. Nevýhodou trouby je skutečnost, že zadní strana s připojením elektroniky byla tvořena velkou spoustou tepelných mostů, na vrchní straně trouby je chlazení elektroniky a odvod teplého vzduchu. Horní stranu trouby považuji za její nejslabší místo, nachází se zde totiž větrák pro chlazení elektroniky a pojistky, aby nedošlo k přehřátí trouby. Toto chlazení se bohužel nedalo vypnout, protože jsme měli strach z přehřátí pojistky a jejího následného zkratu, což by vyústilo v nefunkčnost trouby a pro odpojení pojistky byly nedostatečné elektrikářské znalosti. Dále se na horní straně trouby nacházela i trubka pro odvod horkého vzduchu, tedy obrovské ztrátové místo pro mé experimenty. I přes tyto nedostatky jsem však chtěl zkusit funkčnost tohoto řešení a hlavně vyzkoušet možnosti spirál. Tedy jestli by bylo případně možné tyto spirály vymontovat a dále využít pro pokročilejší experimenty ve vhodnějších kontejnerech. V troubě se nachází několik topných spirál nahoře, dole a vzadu u ventilátoru. Horní a spodní spirály jsou podobné a jsou rozprostřené po celé délce a šířce trouby, zadní spirála je menší a kruhová a její funkce nebyla vyzkoušena z důvodu možného zapadání písku skrz větrání do elektronické části trouby a následného zkratu.

Cílem experimentu bylo zjistit, zdali vzduchem chlazená spirála horkovzdušné trouby zvládne ohřev písku bez toho, aniž by se přehřála a praskla. Dále také pozorovat, jak se písek bude chovat a pozorovat průběhy teplot písku v takovéto nádobě.

Před spuštěním bylo třeba ještě vyřešit elektroniku a ovládání trouby, byly tedy pomocí odborníka vyměněny a přepojeny některé nefunkční kabely. První experimentální spuštění spirál proběhlo úspěšně a bylo zjištěno, že ohřev horní spirálou funguje ale není jistota její účinnosti, jelikož většina dodaného tepla stoupá vzhůru pryč, s tím že písku moc tepla nestihne předat. Zadní topná spirála nešla spustit bez chodu ventilátoru, a to bohužel v kombinaci s pískem úplně nefungovalo, takže zbyla jediná možnost, a to ohřev spodní spirálou. Samotná spodní spirála má výkon 1040 W. Do trouby byla umístěna čidla na měření tepla, byla umístěna do stěn, do děr po držácích na gril a kabely k čidlům byly pro jistotu obaleny teflonovou páskou jako ochrana proti přetavení. Tato stěnová čidla byla dotažena do hloubky cca 7 cm a poté zahrabána. Teplotní odolnost čidel byla psána do 200 °C a měl jsem strach o to, že tuto odolnost má jen konečné čidlo, a ne celý kabel, proto byly kabely opatřovány alespoň teflonovou páskou, která má tepelnou odolnost do 260 °C. Modře, červeně a šedě jsou zaznačena čidla COMET a červeně značené je čidlo 1, modře je značeno čidlo 2 a šedě je značeno čidlo 3. Žlutě a zeleně jsou značena čidla DS18B20 a jsou dále popisována zeleně jako čidlo 5 a žlutě jako čidlo 6. Čidlo 4 ze sady COMET bylo vystaveno venkovní teplotě mimo troubu pro měření průběhu venkovních teplot, čidlo 7 DS18B20 bylo položeno na povrch trouby pro sledování možného přehřívání elektroniky.



Obrázek 7: umístění čidel v troubě



Obrázek 8: umístění čidel uvnitř trouby

Experiment začal v 15:45, trouba byla naplněna pískem, nastavena čidla a písek se nahříval horní i spodní spirálou, výkon spirál byl 2880 W. Spotřeba žárovkou v troubě a větrákem chlazení elektroniky je 44 W. Tento experiment byl spíše testem elektroniky a snahou o sušení písku. Písek bylo třeba pořádně dosušit, aby další měření nebyla ovlivněna vlhkostí a úbytkem hmoty v troubě. Ohřev proběhl bez problému, ale během ohřevu bylo možno sledovat kondenzaci vody na skle trouby. Což je důležitý poznatek, protože sednutím a odpařením vody ubylo znatelné množství hmoty v troubě, kterou bylo třeba následně znovu dosypat. Do trubky pro odvod horkého vzduchu byl umístěn teploměr s jímkou pro měření odchozího tepla. V 17:13 byl spuštěn ohřev oběma spirálami a byl ukončen v 18:46. Pouze čidla 3 a 4 byla zahrabána do písku, čidla 3 a 4 měřila venkovní teplotu v okolí.



Obrázek 9: trouba pro experiment



Obrázek 10: vnitřek trouby



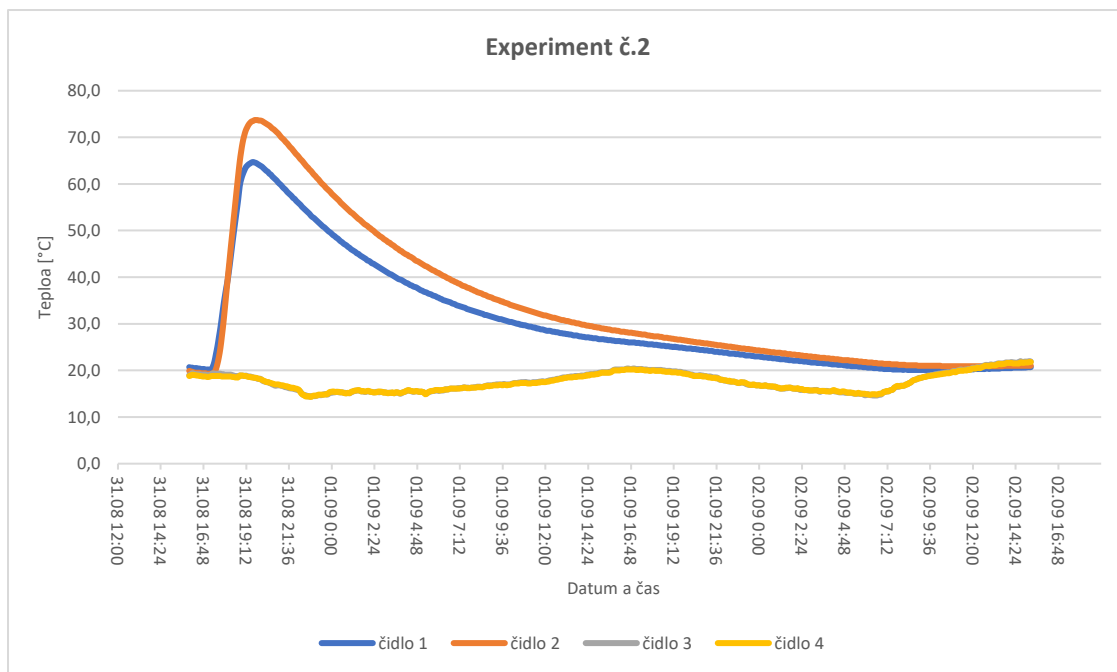
Obrázek 11: horní strana trouby



Obrázek 12: zadní strana trouby



Obrázek 13: naplnění trouby pískem



graf 1: průběh teplot písku v troubě experiment 2

Z grafu je vidět průběh teplot a čas ohřevu písku a následného chladnutí. Písek se ohříval hodinu a třicet tři minut a byli jsme ho schopni výkonem 2880 W ohřát na maximální teplotu 73,7°C. Ohřev započal v 17:13 dne 31.8. a byl ukončen v 18:46 dne 31.8. Písek se ochladil na původní teplotu 20 °C dne 2.9. v 8:15. Trvalo tedy 37 h a 29 minut, než písek úplně vychladl. Bylo možné pozorovat „dojezd“ spirály, ohřev spirálou byl ukončen v 18:46, ale ohřev písku pokračoval až do 19:40, tedy ještě skoro 54 minut po vypnutí. Písek se tedy celkově ohříval 2 hodiny a 37 minut.

Cena 1 kWh je 3,58 Kč v roce 2023, za hodinu a třicet tři minut bylo využito $2,88 \cdot 1,55 = 4,464$ kWh, cena tedy $4,464 \cdot 3,58 = 15,98$ Kč

Závěr:

Cíl tohoto experimentu nebyl kompletně splněn, cílem bylo otestovat jednotlivé komponenty a vysušit písek. Otestování komponentů proběhlo a byly objeveny především nedostatky v čidlech DS18B20 a jejich zapisování dat do počítače. Prvně technika selhala při spuštění experimentu, kdy došlo na aktualizaci počítače a poté se přes noc při chladnutí počítač vypnul a data se neuložila. Velkým úspěchem však bylo, že spirála byla schopna písek ohřát a nepřepálila se, bylo tedy možné pokračovat s touto spirálou v dalších experimentech. Druhým cílem bylo vysušení písku, ale dle dosažených teplot nemohlo dojít k vysušení. Požadované teploty pro vypaření vody nebylo dosaženo z důvodu zdlouhavého ohřevu a obavy, že by bez dohledu mohlo

dojít k nějaké nehodě. Ohřev byl tedy při odchodu ukončen a bylo pouze nechané měření pro sběr dat. Bylo tedy zjištěno, že ohřev takového množství písku bude značně časově náročný a dále i doba chladnutí bude značná a je třeba si vyhradit mnohem delší čas na provádění experimentu. Z doby ohřevu je tedy také vidět pomalý prostup tepla pískem jak při ohřevu tak chladnutí.

2.1.3 Experiment č. 3 2.9. 2023

Okrajové podmínky:

Experiment byl prováděn v uzavřeném zastřešeném prostředí plechové haly, s teplotními podmínkami venkovního prostředí. Hala není nijak tepelné izolována a sloužila pouze jako ochrana před větrem a deštěm. Venkovní teploty vzduchu se v době spuštění experimentu pohybovaly okolo 19 °C, teplota písku se pohybovala v průměru okolo 20,5 °C

Pomůcky:

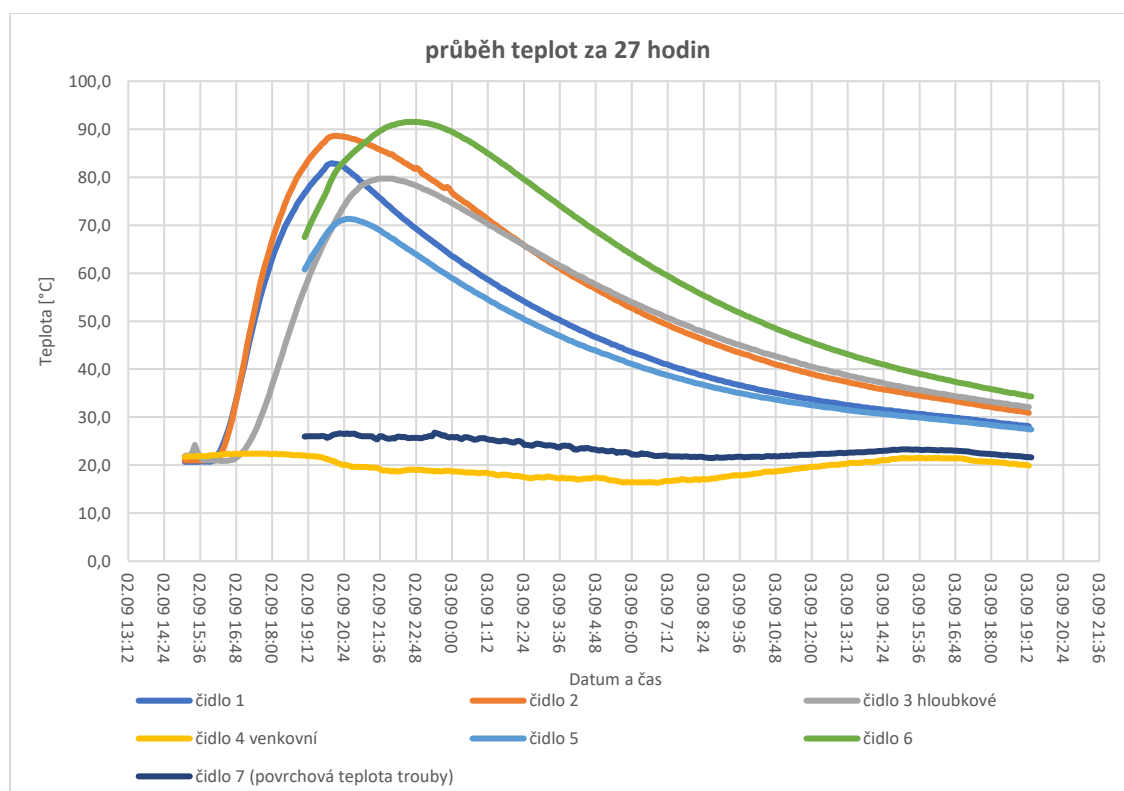
příruba s topným tělesem teplovzdušné elektrické trouby AEG s výkonem jedné spirály 1040 W, COMET teplotní čidlo -80 °C až +200 °C – Pt1000TG8/E 4x, temperature logger SO141, DS18B20 teplotní čidla drátová -55 °C až +125 °C 3x, notebook Lenovo, 3.0 smart power Plug 16a Eu socket 3680 W, VOLTCRAFT energy logger 4000, prodlužka, PARKSIDE Infračervený teploměr PTIA1, písek frakce 0/4 skladováno venku, teploměr s jímkou

Průběh experimentu:

Další experiment proběhl z 2.9. 2023 do 3.9 2023. Šlo o otestování rychlosti ohřevu písku, kolik energie na to bude potřeba a jak dlouho bude pak chladnout a zdali všechna čidla v daných teplotách fungují správně. První fází testování také prošla čidla DS18B20, která sloužila pro objemnější sběr dat. Tato DS18B20 čidla (5,6,7) byla pořízena z Číny a měla maximální teplotu měření +125°C. Pro tato čidla byl tedy napsán program pro sběr dat a naprogramován a připraven server, na který se data dala ukládat. Tato čidla byla umístěna do stěn trouby a jedno čidlo bylo umístěno na povrch trouby pro sledování teploty u elektroniky. Z počátku docházelo k problémům s funkčností dodatečných čidel a jejich správným chodem a při tomto prvním experimentu se z důvodu windows updatu počítače, který začal přesně ve chvíli, kdy bylo spuštěno měření, se start zapisování dat posunul o 4 hodiny, takže čidla z data loggeru začala zapisovat data o 4 hodiny dříve a pouze na nich je vidět průběh ohřevu.

U tohoto měření jsem byl po celou dobu ohřevu přítomen z důvodu ohlídaní průběhu ohřevu a obavy, aby nedošlo k poškození buď čidel, anebo samotné trouby při dosažení vyšších teplot.

Oproti předchozím měřením přibyla data z několika čidel, a to z čidel DS18B20, která byla umístěna do stěn a na povrch trouby k elektronice. Dále bylo přidáno jedno čidlo dovnitř zkoumané hromady písku pro zjištění vnitřních teplot. Teplota v jádře písku by měla být teoreticky nejvyšší, jelikož je prohřev písku postupný a pomalý, tak by se tedy teplo ze středu mělo šířit nejpomaleji a tedy vydržet nejteplejší.



graf 2: průběh teplot písku v troubě experiment 3

Experiment započal dne 2.9. v 15:57, kdy teplota písku byla naměřena okolo 21 °C, ohřev trval do 19:44 a maximální dosažená teplota byla 91,5 °C ve 22:30 téhož dne, a to na čidlo číslo 6. Nejvyšší průměrné teploty bylo dosaženo dne 2.9. ve 21:00, kdy se průměrná teplota písku pohybovala okolo 80,4 °C, tedy 1 hodinu a 16 minut po ukončení ohřevu. Tyto průběhy teplot tedy poukazují na nerovnoměrný prohřev písku, kdy maximální průměrné teploty bylo dosaženo daleko dříve, než bylo dosaženo nejvyšší maximální teploty. Zajímavé je, že nejvyšší teploty bylo dosaženo 2 hodiny a

46 minut po ukončení ohřevu a nejvyšší průměrné teploty bylo dosaženo jen 1 hodinu a 16 minut po ukončení ohřevu. Když bylo dosaženo nejvyšší průměrné teploty, tak na čidle číslo 6, na kterém byla naměřena maximální dosažená teplota ohřevu, bylo pouhých 70,69 °C, což byla nejnižší teplota v danou chvíli. To poukazuje na zpomalené prohřívání střední části písku a její nejvyšší potenciál pro skladování tepla. Ohřev probíhal pouze jednou spirálou, a to spodní spirálou o výkonu 1040 W. Písek se ohříval 3 hodiny a 47 minut, za tu dobu se teplota zvedla z 21 °C na maximální teplotu 91,5 °C. Ohřál se tedy o 70,5 °C při dodaných 1,04 kW/h. Tedy $1,04 \cdot 3,78 = 3,9 \text{ kWh}$, tedy cena $3,9 \cdot 3,58 = 13,962 \text{ Kč}$. Z daných teplot a dodané energie lze usuzovat, že má domněnka, že horní spirála neměla velký dopad na rychlost a teplotu ohřevu, je pravdivá. Když porovnáme rychlost ohřevu, tedy že v experimentu 2 bylo nejvyšší teploty 73,7 °C na čidle 2 dosaženo v 19:40 tedy 2 hodiny 27 minut od začátku. V experimentu číslo 3 bylo teploty 73,7 °C dosaženo na čidle číslo 2 v 18:24, tedy také po 2 hodinách a 27 minutách. Vychází tak tedy, že teploty 73,7 °C dosáhlo čidlo v obou případech po stejném čase a horní spirála v experimentu číslo 2 měla na dané čidlo nulový dopad. Lze tedy z tohoto vyvodit, že je důležité písek ohřívat zespodu, aby teplo přirozeně stoupalo vzhůru do písku a písek se tak tedy prohřál. Tyto výpočty platí pro dané okrajové podmínky, při tomto druhu ohřevu dochází ke značným tepelným ztrátám způsobeným chlazením elektroniky, malým zaizolováním a při jiném druhu ohřívání budou čísla jiná. Horní spirála už se v dalších experimentech nebude používat.

Teoretický výpočet

Topná spirála o výkonu $P = 1032 \text{ W}$, objem horkovzdušné AEG trouby $V = 0,051 \text{ m}^3$,
 $T_{\text{písku, počáteční}} = 21 \text{ °C}$, $t_{\text{ohřevu}} = 303 \text{ minut}$,

$C_{\text{písku}} = 0,8 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, $\rho_{\text{písku}} = 1750 \text{ kg/m}^3$

$T_{\text{průměrná, max}} = \frac{78,9 + 87,4 + 78,3 + 70,69 + 86,69}{5} = 80,4 \text{ °C}$ je průměrná maximální teplota písku během ohřevu

$m_{\text{písku}} = V \cdot \rho = 0,051 \cdot 1750 = 89,25 \text{ kg}$

$Q = m \cdot c \cdot \Delta T = 89,25 \cdot 0,8 \cdot (75,8 - 21) = 3912,72 \text{ kJ}$

$t = \frac{W}{P} = \frac{3912,720}{1032} = 3791,2 \text{ s} = 1,05 \text{ h} = 1 \text{ hodina a 3 minuty}$

Teoretický čas ohřevu za ideálních podmínek na průměrnou teplotu písku 80,4 °C je 1 hodina a 3 minuty, v experimentu to trvalo 5 hodin a 3 minuty. Poukazuje to na značné ztráty tepla při ohřevu. Rozdíl reálné doby ohřevu je 4,8x větší než dle teoretického výpočtu.

Jaké teplo jsem musel skutečně dodat:

$$T=303 \text{ minut} = 18180 \text{ s}$$

$$W=P*t=1032*18180= 18\,761\,760 \text{ J} = 18\,761 \text{ kJ}$$

Bylo tedy třeba dodat skoro 4,8 krát více tepla, než by bylo třeba dle teoretického výpočtu ve kterém nedochází k tepelným ztrátám.

Závěr:

Z grafu tedy lze vyčíst, že ohřev funguje a písek dosahuje v různých bodech odlišných teplot a písek se ne ve všech bodech ohřívá stejně rychle. Z grafu je vidět, že čidlo uprostřed nádoby s pískem chladne nejpomaleji a dá se tedy předpokládat, že tam teplo vydrží nejdéle a bude ze středu docházet k postupnému prohřívání okolního písku. Lze tedy předpokládat, že ve větším množství dojde k pomalejšímu prohřívání a menším únikům tepla do okolního prostředí, čímž dojde k dlouhodobějšímu uchování tepla v testovaném množství písku. Podle těchto experimentů se tedy zdá lepší písek ohřívát ze středu, aby se prohřála nejvíce ta střední část, která drží teplo nejdéle, z toho usuzuji, že pokud budeme chtít teplo z písku odebírat, je nejlepší odebírat teplo středem. Z experimentu 2 a 3 se jeví, že nemá cenu pro ohřev tepla využívat horní topnou spirálu a je lepší ohřev pouze přes spodní spirálu, a to z důvodu ušetření elektrické energie. Z výpočtu a experimentu 3 je vidět zjevný nepoměr teoretického času ohřevu v perfektních podmínkách a skutečná doba ohřevu. Je to nejspíše způsobeno nedostatečným zaizolováním experimentální nádoby a vlhkostí písku.

2.1.4 Experiment č. 4 10.9. 2023

Okrajové podmínky:

Experiment byl prováděn v uzavřeném zastřešeném prostředí plechové haly, s teplotními podmínkami venkovního prostředí. Hala není nijak tepelné izolována a sloužila pouze jako ochrana před větrem a deštěm. Venkovní teploty vzduchu se v době spuštění experimentu pohybovaly okolo 21 °C, teplota písku se pohybovala v průměru okolo 19 °C

Pomůcky:

příruba s topným tělesem teplovzdušné elektrické trouby AEG s výkonem jedné spirály 1040 W, COMET teplotní čidlo -80 °C až +200 °C – Pt1000TG8/E 4x, temperature logger SO141, DS18B20 teplotní čidla drátová -55 °C až +125 °C 3x, notebook Lenovo, 3.0 smart power Plug 16a Eu socket 3680 W, VOLT CRAFT energy logger 4000, prodlužka, PARKSIDE Infračervený teploměr PTIA1, písek frakce 0/4 skladováno venku, teploměr s jímkou

Průběh experimentu:

Experiment byl spuštěn ve 12:01 dne 10.9. a oproti předchozím experimentům nebyly provedeny žádné znatelné změny v provádění nebo uskupení průběhu experimentu. Cílem tohoto experimentu bylo ohřát písek nad 100 °C, aby došlo k úplnému vysušení a zaznamenat celý průběh experimentu. Po předchozích testech vznikly určité pochybnosti o funkčnosti některých měřících zařízení a jejich spolehlivosti, ale věřil jsem, že tentokrát bude experiment úspěšný.

Experiment probíhal poprvé bez konstantního dohledu, jen s občasnými kontrolami. První kontrola teplot a stavu zařízení proběhla po třech a půl hodinách, tedy v 15:37 dne 10.9. a stav měření byl v pořádku a bez zádrhelu. Při kontrole byly zkontrolovány teploty, které se ve všech bodech značně lišily, místy až o 25 °C, písek se tedy neprohřívá rovnoměrně. Čidlo 1 mělo teplotu 75,8 °C, čidlo 2: 86,3 °C, čidlo 3: 53,1 °C, čidlo 4 bylo venkovní a naměřilo teplotu 23,9 °C, čidlo 5: 61,19 °C, čidlo 6: 67,19 °C, čidlo 7 povrchová teplota trouby: 28,37 °C. Ohřev byl poté ukončen v 17:10 dne 10.9. Znovu vše probíhalo bez problému a měření se nechalo běžet přes noc pro zapsání chlazení.

Druhý den jsem přišel na kontrolu v 10:35 a bohužel bylo vidět, že došlo k restartu počítače, buď kvůli nějaké vnitřní chybě, zaplnění paměti, anebo výpadku elektřiny, tudíž byla ztracena data z čidel 5,6,7 a záznamy o spotřebě elektrické energie z ohřevu trouby. Zachovala se pouze data z temperature loggeru, která jsou prezentována v grafu níže.



graf 3: průběh tepla při sušení písku experiment 4

Nejvyšší zaznamenané dosažené teploty bylo dosaženo v 18:30 dne 10.9. a byla dosažena teplota 125,5 °C, této teploty bylo dosaženo po 6 hodinách a 29 minutách, lze tedy pozorovat značné zpomalení ohřevu při vyšších teplotách. Podle grafu to však stále vypadá, že ohřev má stále stejný průběh. Ohřátí o 106 °C trvalo 6 hodin a 29 minut a bylo tedy do písku uloženo $1,04 \cdot 6,48 = 6,74$ kWh, cena tedy $6,74 \cdot 3,58 = 24,13$ Kč. Tyto hodnoty platí pro dané okrajové podmínky.

Závěr:

Experiment neproběhl tak, jak bylo plánováno, ze dvou cílů byl splněn jen jeden a to, že písek byl ohřát nad teplotu 100 °C ale pouze v jedné části nádoby, a ne v celém objemu, tudíž došlo jen k částečnému vysušení. Druhý bod, což bylo zaznamenání celého průběhu teplot při ohřevu a chladnutí, však nebyl splněn, došlo ke značné ztrátě dat a měření je tak neúplné. V některých místech bylo dosaženo velmi vysokých teplot a je tedy znovu vidět, jak nerovnoměrně se písek prohřívá a rozdíly teplot v různých bodech mohou být obrovské. Znovu se potvrdilo, že písek uprostřed nádoby chladne nejpomaleji a také se prohřívá za daných podmínek a tímto způsobem ohřevu pomaleji než další části nádoby.

Došlo tedy k několika úpravám, změna počítače za počítač s větší baterií, větší paměti pro zapisování dat, který by měl měření bezproblémově zvládnout a nemělo by tak tedy dojít k další ztrátě dat. Už z těchto výsledků se zdá, že trouba jako nádoba pro skladování a tepelné izolace písku není dostatečná a bude třeba změnit systém. Rozhodl jsem se však, že chci alespoň jeden experiment v troubě provést celý a správně se zaznamenáním všech hodnot a po získání lepších technických pomůcek bude proveden ještě jeden experiment jen se změnou počítače pro zapisování teplot. Poté bude písek vyndán a přejde se na nový systém skladování, izolace a ohřevu.

2.1.5 Experiment č. 5 5.10. 2023

Okrajové podmínky:

Experiment byl prováděn v uzavřeném zastřešeném prostředí plechové haly, s teplotními podmínkami venkovního prostředí. Hala není nijak tepelně izolována a sloužila pouze jako ochrana před větrem a deštěm. Venkovní teploty vzduchu se v době spuštění experimentu pohybovaly okolo 13 °C, teplota písku se pohybovala v průměru okolo 16 °C

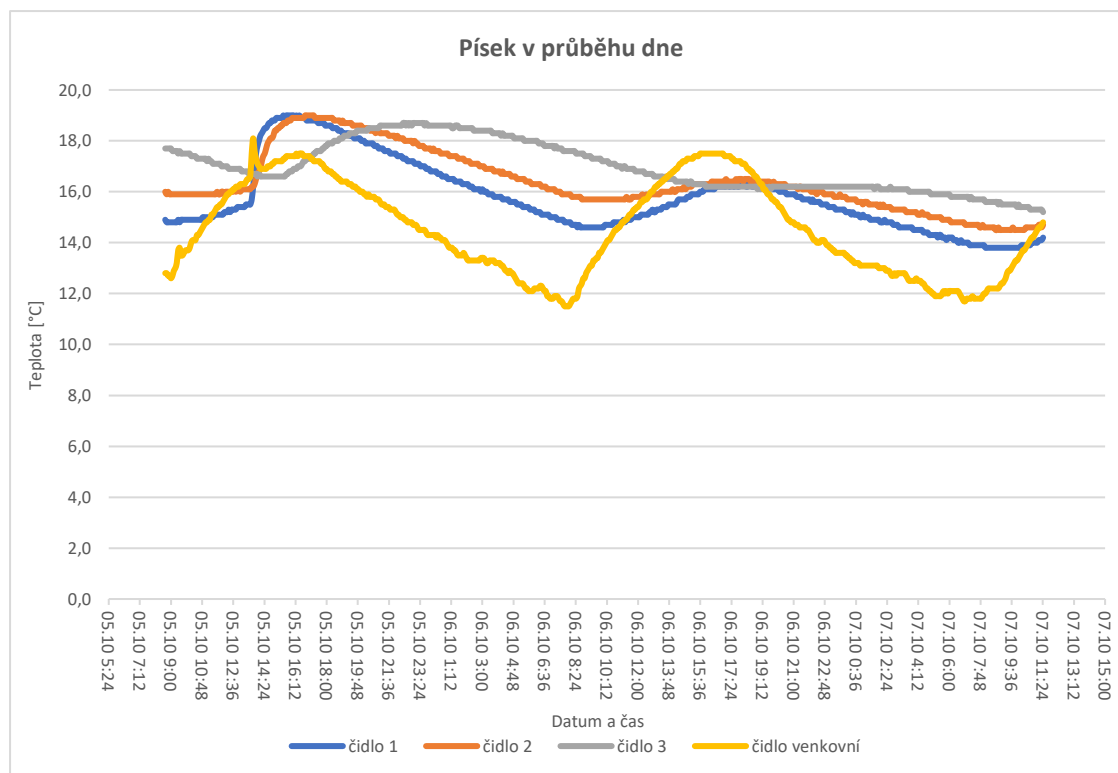
Pomůcky:

COMET teplotní čidla -80 °C až +200 °C – Pt1000TG8/E 4x, VOLTCRAFT energy logger 4000, prodlužka, PARKSIDE Infračervený teploměr PTIA1, písek frakce 0/4 skladováno venku, Teploměr s jímkou

Průběh experimentu:

Před posledním experimentem došlo na provedení příprav a měření písku v klidu za běžného dne. Cílem bylo zjistit a zaznamenat, jak se písek běžně při tomto zaizolování chová a jak moc velký vliv má průběh venkovních teplot na průběhy teplot v písku. Z grafu by mělo následně jít vyzpozorovat, jak písek reaguje na změny venkovních teplot a jak dlouho si je schopný teplo udržet při malé deltě T.

Experiment byl zaznamenáván jen na temperature loggeru, protože ostatní čidla a počítač pro zaznamenávání byla mimo provoz a experiment byl ve fázi změny elektrotechniky. Zaznamenány jsou tedy zase jen 4 teploty, kde čidla 1,2,3 jsou v písku a čidlo 4 měří průběh teplot venkovního vzduchu.



graf 4: průběh teplot v písku bez ohřevu experiment 5

Ovlivnění teploty písku venkovní teplotou při nízké Δt není až tak markantní, lze si tedy všimnout potenciálu písku oproti například vodě při udržování teploty. V grafu a zaznamenaných hodnotách se vyskytovala jedna odchylka, kdy čidlo pro měření venkovní teploty zaznamenalo teplotu o dva stupně vyšší než předchozí a následující chvíli. Tato odchylka byla nejspíše způsobena zasvícením sluníčka na čidlo pro měření venkovní teploty a tím zvýšení naměřené teploty jen na určitou chvíli.

Závěr:

Teploty na okraji hromady skoro jasně kopírují průběh teplot venkovního vzduchu, s menším zpožděním. Teploty na teploměru ve středu hromady nejsou až tak přizpůsobeny průběhu venkovních teplot a mají tedy menší vliv na teplotu uvnitř. Tímto experimentem se mi tedy dále potvrdilo, že je hlavně důležité jádro písku pro ukládání a odběr tepla. Pro co nejpřesnější experiment by bylo třeba větší množství písku, než jsem já logisticky schopný zvládnout, ale pokusím se tedy množství písku nahradit v dalších experimentech tepelnou izolací. Při lepším zaizolování by mohlo dojít k menším ztrátám tepla a tím pádem i více stejným průběhům tepla v nádobě, díky tomu i většímu stejnoměrnému prohřátí celé nádoby. Větším zamezením

ovlivňování vnitřních teplot teplotou venkovní by se rozšířil potenciál písku pro ukládání tepla.

2.1.6 Experiment č. 6 7.10. 2023

Okrajové podmínky:

Experiment byl prováděn v uzavřeném zastřešeném prostředí plechové haly, s teplotními podmínkami venkovního prostředí. Hala není nijak tepelně izolována a sloužila pouze jako ochrana před větrem a deštěm. Venkovní teploty vzduchu se v době spuštění experimentu pohybovaly okolo 24 °C, teplota písku se pohybovala v průměru okolo 15 °C

Pomůcky:

příruba s topným tělesem teplovzdušné elektrické trouby AEG s výkonem jedné spirály 1040 W, COMET teplotní čidlo -80 °C až +200 °C – Pt1000TG8/E 4x, temperature logger SO141, DS18B20 teplotní čidla drátová -55 °C až +125 °C 3x, notebook Lenovo, 3.0 smart power Plug 16a Eu socket 3680 W, VOLTCRAFT energy logger 4000, prodlužka, PARKSIDE Infračervený teploměr PTIA1, písek frakce 0/4 skladováno venku, teploměr s jímkou

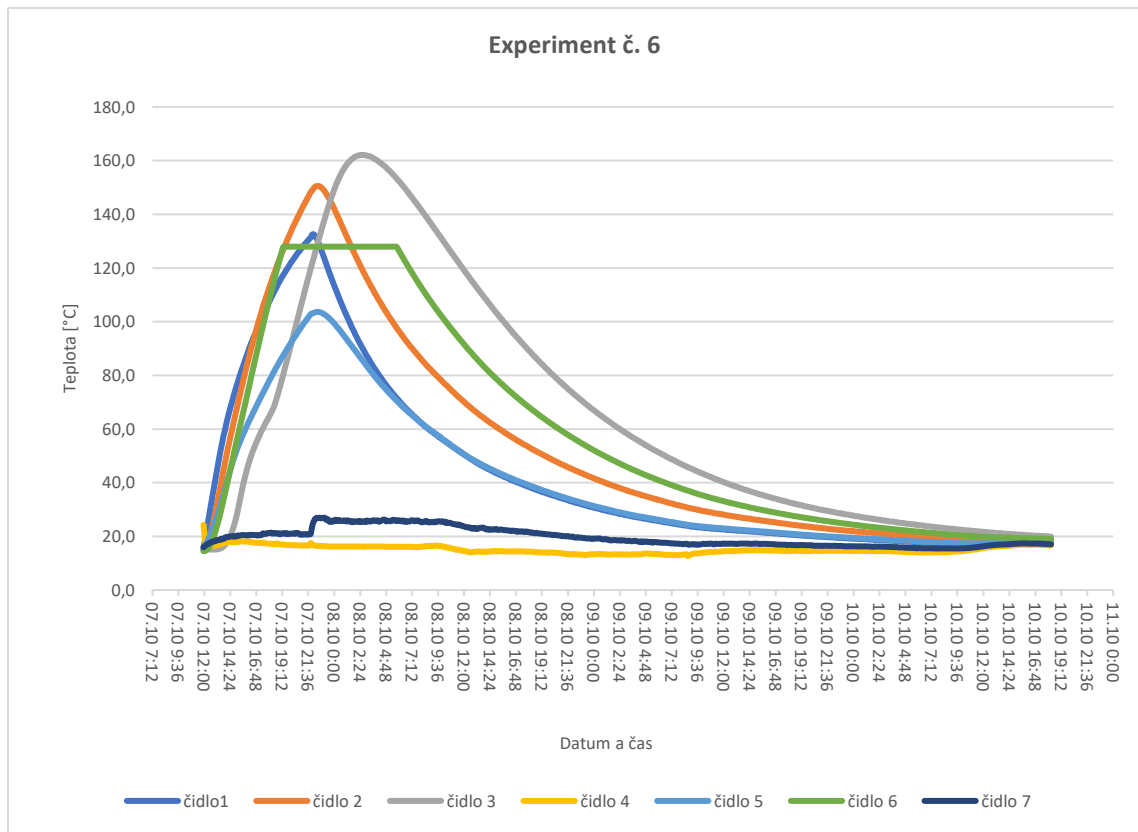
Průběh experimentu:

Před provedením finálního experimentu v troubě došlo dva dny před provedením experimentu, tedy dne 5.10. k doplnění písku, protože experimentem číslo 4 došlo k dalšímu vysušení písku a tedy úbytku hmoty. Trouba je ovázána stahovadlem, aby nedošlo tíhou písku k otevření dveří trouby. Při dosypání písku došlo k nehodě a písek byl rozsypan všude po elektronice trouby a při utahování stahovadla došlo k prasknutí ochranného skla trouby, izolační sklo bylo naštěstí netknuté a bez poškození a nemělo by to tedy snížit izolační schopnosti. Po provedení této údržby byla kvůli zanesení pískem trouba testově spuštěna a fungovala. Druhý den při experimentu o spuštění trouba nefungovala, zavolal jsem tedy elektrikáře – bylo provedeno zprovoznění poškozeného drátu a přepojení, vyfoukání písku kompresorem a vzduchovou pistolí. Spouštění a ovládání trouby začalo fungovat.

Poté mohl být zahájen finální experiment této fáze, jehož cílem je ohřát písek alespoň na 150 °C a sledovat, jak bude při takto vysokých teplotách chladnout a jak dlouho bude písek schopen si udržet vyšší teploty. Při tomto experimentu došlo ke zjištění, že

čidla DS18B20 nefungují do maximální teploty +175 °C ale jen do +125 °C. To se promítlo v grafu, ze kterého je zřejmé, že jedno z čidel nezvládlo zaznamenat teploty vyšší jak +125 °C, ale naštěstí nedošlo k poškození a po snížení teploty pod +125 °C začalo čidlo znovu měřit. Experiment započal dne 7.10. v 11:55 a skončil ve 21:45 dne 7.10., kdy teplota písku byla okolo 15 °C a venkovní teplota se pohybovala okolo 24 °C, podle měření bylo do písku uloženo 10,24 kWh za 9 h a 50 minut ohřevu. Toto množství tepla, z písku vyprchalo dne 10.10. ve 12:10, kdy teplota písku klesla na +17,2 °C, což byla nejnižší dosažená teplota, na původní teplotu 15 °C se to nedostalo kvůli vyšší venkovní teplotě. Dodanému teplu tedy trvalo 62 hodin a 25 minut, než postupně z písku vyprchalo. Nejvyšší průměrné teploty písku +128,4 °C bylo dosaženo v 22:35 dne 7.10. Nejvyšší naměřené teploty písku +162,1 °C bylo dosaženo ve 2:25 dne 08.10. Je tedy vidět značný nepoměr doby, kdy je dosaženo nejvyšší průměrné teploty písku a kdy je dosaženo nejvyšší teploty písku ve středu zkoušeného materiálu. Je to nejspíše způsobeno většími úniky tepla na krajích zkoumaného materiálu a pomalým prostupem tepla ze středu zkoumané hromady písku. Je tedy vidět, že použité množství písku má dopad na to, kolik a jak dlouhodobě lze množství energie skladovat.

Do písku byla uložena energie za $10,24 \cdot 3,58 = 36,66$ Kč, je možné i spočítat, že 10,24 kWh za 62 h 25 min $10,24 / 62,42 = 0,16$, tedy průměrná ztráta 0,16 kWh za hodinu. Je to značné množství a je třeba podniknout kroky ke snížení těchto hodinových ztrát.



graf 5: průběh teplot nad 125 °C experiment 6

Teoretický výpočet

Topná spirála o výkonu $P= 1032 \text{ W}$, objem trouby $V=0,051 \text{ m}^3$, $T_{\text{počáteční,písku}}=15^\circ\text{C}$, $t=590$ minut,

$$c_{\text{písku}} = 0,8 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}, \rho_{\text{písku}} = 1750 \text{ kg/m}^3$$

$$T_{\text{průměrná,max písku}} = \frac{129,1+150,5+130,8+103,56+127,94}{5} = 128,41 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$m = V \cdot \rho = 0,051 \cdot 1750 = 89,25 \text{ kg}$$

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T = 89,25 \cdot 0,8 \cdot (128,41 - 15) = 8097,5 \text{ kJ}$$

$$t = \frac{W}{P} = \frac{8097,5}{1032} = 7846 \text{ s} = 2,18 \text{ h} = 2 \text{ hodiny a } 11 \text{ minuty}$$

Teoretický čas ohřevu za ideálních podmínek na průměrnou teplotu písku $128,41 \text{ }^\circ\text{C}$ je 2 hodina a 11 minuty, kde v experimentu to trvalo 9 hodin a 50 minut. Doba ohřevu oproti teoretickému výpočtu je 4,5x větší

Jaké teplo jsem musel reálně dodat

$$T = 590 \text{ minut} = 35400 \text{ s}$$

$$W = P \cdot t = 1032 \cdot 35400 = 36\,532\,800 \text{ J} = 35\,532,8 \text{ kJ}$$

Ve skutečnosti bylo potřeba 4,38 krát více tepla než podle teoretického výpočtu.

Dojde tedy ke ztrátě 27 435,3 kJ tepla při ohřevu.

Pro porovnání ohřev stejného množství vody

$$\rho_{\text{vody}} = 997 \text{ kg/m}^3$$

$$c_{\text{vody}} = 43,18 \text{ kJ/kgK}$$

$$m = 0,051 \cdot 997 = 50,85 \text{ kg}$$

$$Q = 50,85 \cdot 43,18 \cdot (128,41 - 15) = 24\,104,2 \text{ kJ}$$

$$t = \frac{W}{P} = \frac{24104213}{1032} = 23357 \text{ s} = 6,5 \text{ h} = 6 \text{ hodin a } 30 \text{ minut}$$

Dle teoretického výpočtu by ohřev vody trval daleko delší dobu než ohřev písku a bylo by k tomu potřeba dodat daleko více energie, až 2,98x. Navíc k tomu, aby mohlo být dosaženo takhle vysokých teplot, musel by být vyšší tlak v nádobě s vodou, aby se voda při teplotách nad 100 °C neodpařila.

Závěr:

Tento experiment splnil to, co se od něj očekávalo a to, změřit celý ohřev, který proběhne alespoň do 150 °C a pak jeho chladnutí. Čidla DS18B20 mají nedostatečný rozptyl měření teplot a bude potřeba objednat nová čidla s měřením do vyšších teplot. Tepelné ztráty písku v troubě jsou značné a bude třeba při dalších experimentech písek lépe izolovat. Také je vidět zajímavý průběh ohřevu střední části písku, kde ohřev byl daleko pomalejší, ale bylo zde dosaženo nejvyšší teploty, jelikož docházelo k nejmenším ztrátám. Průběh chladnutí střední části je také značně pomalejší než ostatních okrajových částí. A dále mě to utvrzuje v tom, že při dostatečném množství písku a zaizolování bude písek skvělým akumulátorem tepla.

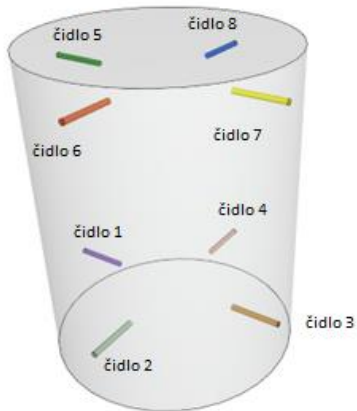
Poměr teoretické doby ohřevu a reálné doby ohřevu se snížil oproti experimentu číslo 2, což je způsobeno větším vysušením, jelikož se ještě k písku nemusí ohřívat voda. Doba ohřevu je také snížena usednutím písku, tedy zmenšením mezer mezi zrny a tím zapříčiněno lepší vedení tepla mezi zrny. Tato vlhkost v písku se nyní jeví jako důležitý faktor při ovlivňování doby ohřevu a potřebné energie.

Při porovnání výpočtu je vidět i velký potenciál ukládání tepla do písku oproti například vodě, kde množství dodaného tepla pro ohřev vody na stejnou teplotu jako písek je několikanásobně větší.

Druhá etapa experimentů

Experimentem číslo 7 se dostáváme k novému druhu experimentů, vylepšených pomocí získaných zkušeností z předchozích experimentů. Řekl jsem si, že budu potřebovat větší nádobu, abych otestoval, jak se bude akumulovat teplo ve větším množství hmoty. Byl tedy zakoupen použitý plechový sud o objemu 200 l na skladování chemikálií. Průměr sudu s obručí je 600 mm, vnitřní průměr 570 mm, výška sudu 880 mm a výška sudu bez víka 870 mm. V zakoupeném sudu byly ještě zbytky marmelády od předchozích majitelů a bylo tedy třeba sud prvně vyčistit. K tomu byla ještě dokoupena nová sada čidel PT100 s větší tepelnou odolností do +400 °C. Další chod experimentu byl naplánován tak, že do plechového sudu se dá písek, do spodní části vložím spirálu z trouby, navrtají se otvory na čidla, obalí se celý sud minerální vatou a vloží se čidla a následně budou probíhat experimenty. K zaizolování sudu byla použita minerální vata KNAUFINSULATION with ECOSE s $\lambda=0,035$ W/mK. Ke spirále byly do sudu navíc ještě přidány měděné trubky pro zlepšení vedení tepla po celé výšce sudu. Měly by se tak co nejvíce omezit tepelné ztráty a dojít tak snad k efektivnější akumulaci tepla. Také místo, kde se experiment provádí se změnilo, bylo potřeba vyklidit halu a experiment tedy probíhá v garáži, dojde tedy i ke změně okrajových podmínek. Kvůli přidání a změně čidel došlo i k přepsání kódu, přidáním více řádku a sběru dat z více čidel. Topná spirála byla umístěna do sudu ve výšce 200 mm od spodku sudu a 200 mm od spirály byla umístěna pojistka pro regulaci teploty, která patří k ovládání spirály. Uložení čidel v sudu vypadá následovně: spodní čidla jsou ze sady COMET a jsou označena barvami takto: růžovou čidlo 4, hnědou čidlo 3, šedou čidlo 2 a fialovou čidlo 1. Čidla byla umístěna po obvodu ve výšce 500 mm od spodku sudu a 300 mm od topné spirály. Horní řada čidel jsou čidla PT100 a jde o nová platinová čidla, modrá barva čidlo 8, žlutá čidlo 7, oranžová čidlo 6, zelená čidlo 5. Tato čidla byla umístěna 70 mm od povrchu, tedy 800 mm od spodku sudu a 300 mm od spodní hrany čidel. Další čidla jsou umístěna mimo sud a jedná se o drátová čidla DS18B20 do +125 °C, čidlo 9 je dáno na povrchu sudu čidlo 10 je v prostoru pro měření okolní teploty vzduchu a čidlo 11 je na spodku sudu. Tato venkovní čidla byla umístěna pro sledování průběhu

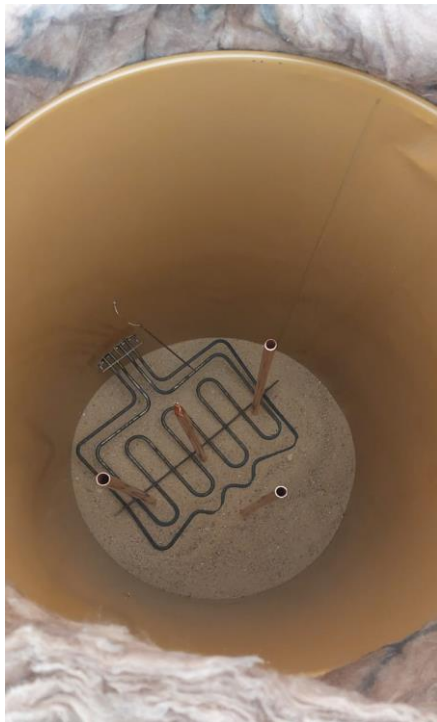
teplot na stěnách a povrchu nádoby, aby se dopředu zjistilo, kdyby mohlo dojít k popálení o povrch sudu a o zjištění kolik tepla se odvádí pryč méně zaizolovanými místy.



Obrázek 14: umístění čidel v sudu



Obrázek 15: zaizolování sudu



Obrázek 16: umístění ohřevu v sudu



Obrázek 17: umístění spodních čidel v sudu



Obrázek 18: umístění horních čidel



Obrázek 19: umístění spirály a spodních čidel

2.2.1 Experiment č. 7 12.11. 2023

Okrajové podmínky:

Experiment byl prováděn v uzavřeném zastřešeném prostředí garáže s teplotními podmínkami uzavřeného prostředí přes noc, kdy se vlivem ohřevu písku vyhřívá i místnost. Přes den jsou proměnlivé teplotní podmínky kvůli využívání garáže, tedy bude proměnlivý vliv venkovních teplot. Venkovní teploty vzduchu se v době spuštění experimentu pohybovaly okolo 12 °C, teplota písku se pohybovala v průměru okolo 11 °C

Pomůcky:

příruba s topným tělesem teplovzdušné elektrické trouby AEG s výkonem jedné spirály 2440 W, COMET teplotní čidlo -80 °C až +200 °C – Pt1000TG8/E 4x, temperature logger SO141, DS18B20 teplotní čidla drátová -55 °C až +125 °C 3x, PT100 platinové teplotní čidlo -80 °C až +400 °C 4x, notebook Lenovo, 3.0 smart power Plug 16a Eu socket 3680 W, VOLTCRAFT energy logger 4000, prodlužka,

PARKSIDE Infračervený teploměr PTIA1, písek frakce 0/4 skladováno venku, teploměr s jímkou

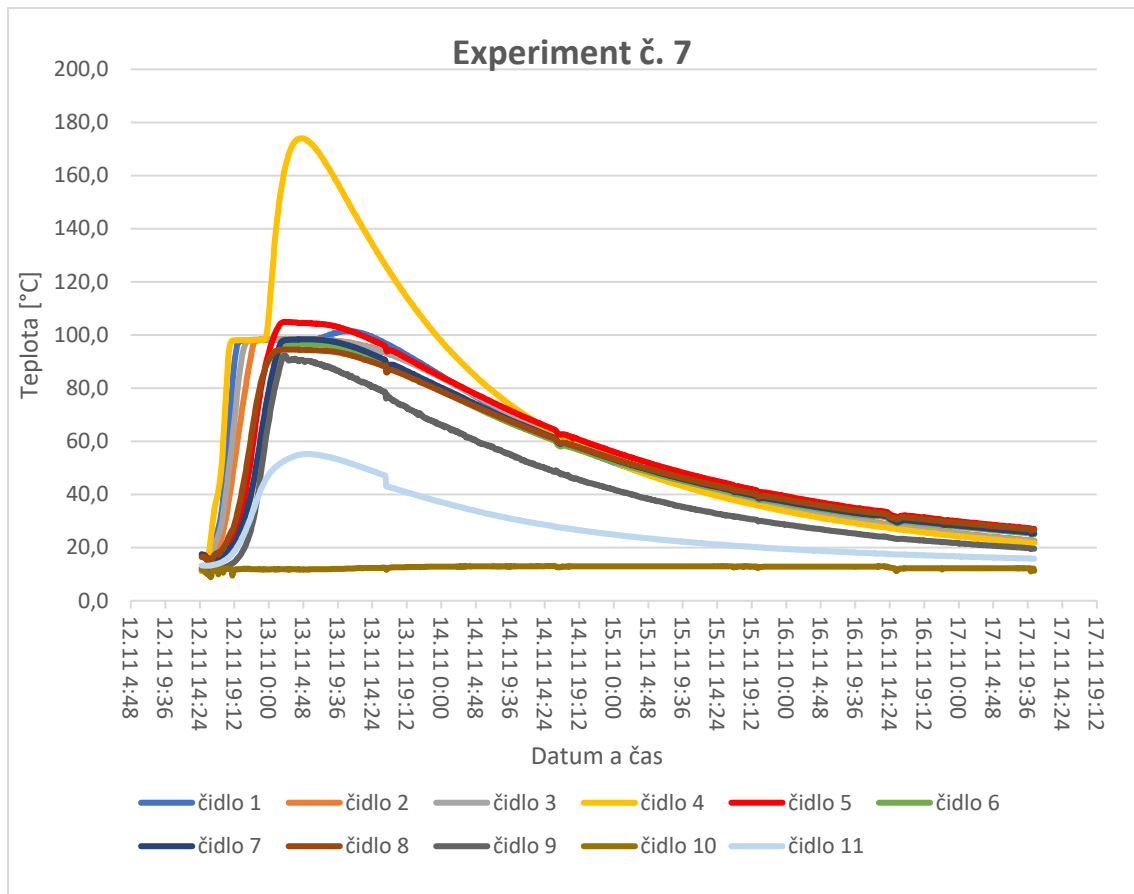
Průběh experimentu:

Experiment číslo 7 byl nový druh experimentu, u kterého byly vylepšeny některé vlastnosti, které by měly experiment více přiblížit k tomu, jak by akumulátor vypadal při komerčním využití. Došlo tedy ke změně nádoby na plechový sud, který by se neměl při vyšších teplotách poškodit.

Použitím plechového sudu se zvětšilo i množství použitého písku, obsah sudu je 200 l, byl tedy smíchán vysušený písek z předchozích pokusů a přidán nový písek, který byl skladován ve venkovním prostředí a bude ho třeba znovu vysušit.

Úkolem tohoto experimentu je tedy vysušit písek, zkontrolovat funkce všech nových čidel a sledovat, jak bude mít množství písku a větší vrstva tepelné izolace vliv na průběh teplot v písku. Do sudu byla dána silnější spirála s vyšším výkonem 2440 W, do prostoru spirály byly navíc umístěny měděné trubky vyplněné pískem, aby pomohly s vedením tepla po celé výšce.

Ohřev písku proběhl v pořádku, jenomže sud byl uzavřen, vlhkost tedy nemohla unikat pryč a docházelo ke kondenzaci na vnitřní straně víka sudu. Tímto došlo k uzavření vlhkosti v sudu a při následné kontrole byl písek do hloubky 50 cm stále velice mokrý, i když se dosáhlo 100°C.



graf 6: průběh teplot písku v sudu s čidlem v blízkosti spirály experiment 7

Teoretický výpočet

Topná spirála o výkonu $P= 2440 \text{ W}$, objem plechového sudu $V=0,2 \text{ m}^3$,
 $T_{\text{počáteční,písku}}=11^\circ\text{C}$, $t_{\text{ohřevu}}= 380 \text{ minut}$,

$$c= 0,8 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}, \rho= 1750 \text{ kg/m}^3$$

$$T_{\text{průměrná,max písku}} = \frac{98,2+98,4+98,4+173,8+104,5+96,58+98,28+94,43}{8} = 95,52 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$m= V\cdot\rho=0,2\cdot 1750=350 \text{ kg}$$

$$Q= m\cdot c\cdot\Delta T=350\cdot 0,8\cdot(95,52-11)= 23665,6 \text{ kJ}$$

$$t = \frac{W}{P} = \frac{23665600}{2440} = 9699 \text{ s} = 2,69 \text{ h} = 2 \text{ hodiny a } 41 \text{ minuty}$$

Teoretický čas ohřevu za ideálních podmínek na průměrnou teplotu písku $95,52 \text{ }^\circ\text{C}$ je 2 hodina a 41 minuty, kde v experimentu to trvalo 6 hodin a 20 minut. Doba ohřevu oproti teoretickému výpočtu je 2,3x delší.

Jaké teplo jsem musel reálně dodat:

$$T=380 \text{ minut} = 22800 \text{ s}$$

$$W=P*t=2440*22800= 55\,632\,000 \text{ J} = 55\,632 \text{ kJ}$$

Ve skutečnosti bylo potřeba 2,3 krát více tepla než podle teoretického výpočtu.

Dojde tedy ke ztrátě 31 826 kJ tepla při ohřevu.

Díky silnější spirále se i tak velký objem písku ohřál relativně rychle. Ohřev probíhal 6 hodin a 20 minut, v době vypnutí spirály byla průměrná teplota písku 68 °C a teplota spodních čidel se pohybovala okolo 98 °C a teplota horních čidel okolo 40 °C, což ukazuje na pomalé prohřívání písku. To, že čím blíže je čidlo ke zdroji tepla, tím je teplota vyšší, je také vidět na čidle číslo 4, které muselo postupným sedáním a vysoušením písku zapadnout blíže ke spirále, protože je na tomto čidle vidět obrovský skok teploty oproti ostatním čidlům. Můžeme tedy jasně vidět, že písek v blízkosti spirály má daleko vyšší teplotu než písek, který je pouze o pár centimetrů dále. Což tedy vypovídá o tom, jak je tento způsob ohřevu neefektivní a je třeba se zaměřit na jiné možné způsoby ohřevu. Tato měření dále poukazují na to, že je pro ohřev potřebné správné médium a efektivní výměník tepla. Oproti předchozím pokusům je vidět pokrok v udržitelnosti tepla v písku, jelikož poměr potřebného a dodaného tepla se výrazně snížil oproti pokusům v troubě. Pokrok je tak značný, že lze uvažovat, že s ještě lepším zaizolováním se můžeme dostat k výpočtovým hodnotám z teoretického výpočtu a písek tak může fungovat jako velice spolehlivý zásobník tepla. Písek už se na původní teplotu nezchladil, ale průměrná teplota písku se ustálila na 23 °C po 4 dnech a 19 hodinách a 50 minutách.

Na čidle 9 lze pozorovat, jaké teplo je mezi sudem a tepelnou izolací, tedy že písek sám o sobě malé množství tepla zaizoluje. Dále na čidle 11 můžeme pozorovat, že relativně velké množství tepla prostoupí skrze písek vzhůru a je odvedeno pryč.

Do písku bylo podle měřiče energií na zásuvce uloženo 13,46 kWh a tato energie z písku skoro kompletně vyprchala po 115 hodinách a 50 minutách. Cena uložené energie $13,46*3,58=48,2$ Kč.

Na vnější bok sudu mezi plech a tepelnou izolaci bylo umístěno čidlo 9 a lze díky němu pozorovat, že prohřátí písku až ke hraně sudu bylo nejpomalejší a nejrychleji chladl písek z boku. Z experimentu tedy vyplývá, že by bylo třeba většího množství písku, aby písek na hraně nádoby neměl až tak vysokou teplotu, a tedy i potom tak

vysokou ztrátu tepla. Zajímavé možné řešení ztrát tepla, by bylo zakopání nádoby do země, čímž by se omezily ztráty a naskytla by se třeba i možnost využití uniklého tepla pro ohřátí zeminy a jejího následného využití.

Závěr:

Zkouška nových čidel a nové nádoby na písek proběhla bez problémů, díky zvýšené izolaci a většímu množství písku bylo chladnutí písku pomalejší než u předchozích pokusů. V předchozích pokusech trvalo daleko kratší dobu, než písek po ohřevu vychladl na teplotu 20 °C, v experimentu číslo 6 trvalo vychladnutí z daleko vyšších teplot na 20 °C přibližně 71 hodin a 45 minut včetně doby ohřevu a v experimentu číslo 7 to trvalo 115 hodin a 50 minut včetně doby ohřevu. Nepovedlo se úplně zbavit písek vlhkosti, bude třeba více pokusů a dosažení vyšších teplot, aby se veškerá voda vypařila.

Na grafu je vidět, že prostup tepla sudem je relativně podobný až na čidlo 4, kde je vidět obrovský výkyv v měření teplot. Z následného vykopání a kontroly čidel usuzují, že tento výkyv byl způsoben zapadnutím čidla blíže ke spirále a přiblížením se k měděným trubkám pro vedení tepla. Odhadem bylo čidlo o 10 centimetrů blíže ke spirále než ostatní čidla, která tedy byla o 10 centimetrů výše oproti čidlu 4 a byla 20 centimetrů od spirály. Pokud byl tento výkyv způsoben tímto rozdílem výšek, poukazuje to na velmi pomalý přesun tepla od spirály do zbytku nádoby. Druhou možností je, že se čidlo dostalo do kontaktu s vodivou měděnou tyčí, která byla nahřata na vysoké teploty a ovlivnilo to teplotu čidla. Od určité úrovně je ale prostup tepla shodný, jak můžeme vidět na grafu, jelikož prohřev písku u zbytku čidel je relativně shodný, pouze s malými výkyvy a nedochází tam k tak markantnímu rozdílu jako u čidla 4.

2.2.2 Experiment č. 8 17.11. 2023

Okrajové podmínky:

Experiment byl prováděn v uzavřeném zastřešeném prostředí garáže s teplotními podmínkami uzavřeného prostředí přes noc, kdy se vlivem ohřevu písku vyhřívá i místnost. Přes den jsou proměnlivé teplotní podmínky kvůli využívání garáže, tedy bude proměnlivý vliv venkovních teplot. Venkovní teploty vzduchu se v době spuštění experimentu pohybovaly okolo 11 °C, teplota písku se pohybovala u dolních čidel v průměru okolo 22°C a u horních čidel 24 °C.

Pomůcky:

příruba s topným tělesem teplovzdušné elektrické trouby AEG s výkonem jedné spirály 890 W, COMET teplotní čidlo -80 °C až +200 °C – Pt1000TG8/E 4x, temperature logger SO141, DS18B20 teplotní čidla drátová -55 °C až +125 °C 3x, PT100 platinové teplotní čidlo -80 °C až +400 °C 4x, notebook Lenovo, 3.0 smart power Plug 16a Eu socket 3680 W, VOLTCRAFT energy logger 4000, prodlužka, PARKSIDE Infračervený teploměr PTIA1, písek frakce 0/4 skladováno venku,

Průběh experimentu:

Úkolem tohoto experimentu bylo ohřát písek ještě na vyšší teploty a následně sledovat průběhy teplot, snaha byla také o odstranění přebytečné vlhkosti, která byla stále v písku. Experiment měl ukázat, zdali se doba udržení tepla znatelně prodlouží při dosažení vyšších teplot, snaha byla také o zjištění, jak by případně mohl vypadat ohřev, kdyby probíhal etapově a jak by tomu bylo v případě, kdyby se k ohřevu využívala elektřina z fotovoltaiky.

Hned při spuštění došlo k nehodě, při které kvůli vysoké vlhkosti v písku a předešlému ohřevu došlo nejspíše ke kondenzaci vody na spirále a při jejím dalším spuštění došlo k porušení spirály. Výkon spirály se tak snížil z 2440 W na pouhých 890 W a to znamenalo, že ohřev bude probíhat daleko pomaleji. Všechna ostatní zařízení i průběh experimentu zůstává nadále stejný.

Experiment byl spuštěn dne 17.11. v 10:40, ohřev probíhal do 20:35 téhož dne.

Počáteční průměrná teplota písku byla 23,32 °C a teplota na jednotlivých čidlech vypadala následovně.

Čidla	čidlo 1	čidlo 2	čidlo 3	čidlo 4	čidlo 5	čidlo 6	čidlo 7	čidlo 8	čidlo 9	čidlo 10	čidlo 11
17.11.2023 10:40	21,9°C	22,6°C	22,4°C	21,7°C	25,33°C	23,73°C	24,07°C	24,84°C	16,87°C	10,94°C	15,75°C

Tabulka 1: počáteční teploty písku experimentu 8

Teplota po prvním ohřevu

Čidla	Čidlo 1	Čidlo 2	Čidlo 3	Čidlo 4	Čidlo 5	Čidlo 6	Čidlo 7	Čidlo 8	Čidlo 9	Čidlo 10	Čidlo 11
17.11.2023 20:35	74,5°C	64,1°C	68,9°C	104,9°C	37,81°C	33,22°C	33,74°C	38,48°C	18,94°C	11,69°C	30,75°C

Tabulka 2: teploty písku po prvním ohřevu experimentu 8

Lze tedy pozorovat, že samotný písek dokázal zaizolovat značnou část tepla unikajícího ze sudu. Což je vidět pomocí čidla 9, které je na vnějším okraji sudu mezi nádobou a tepelnou izolací a má daleko nižší teplotu než čidla uvnitř nádoby. Tam vidíme jasný úbytek teploty oproti teplotě písku uvnitř nádoby. Po tomto proběhlém ohřevu písek chladl do 10:05, kdy byl opět spuštěn ohřev, jak je vidět na grafu.

Prohřívání písku je postupné a horní čidla v této době svého maxima nedosáhla a stále docházelo k jejich ohřevu. Maximální průměrné teploty písku při prvním ohřevu bylo dosaženo ve 2:20, viz tabulka

Čidla	Čidlo 1	Čidlo 2	Čidlo 3	Čidlo 4	Čidlo 5	Čidlo 6	Čidlo 7	Čidlo 8	Čidlo 9	Čidlo 10	Čidlo 11
18.11.2023 2:20	90,0°C	84,3°C	85,1°C	142,5°C	57,6°C	53,86°C	54,76°C	57,76°C	31,06°C	11,63°C	39,75°C

Tabulka 3: maximální průměrná teplota písku experimentu 8

Teplota písku se zvyšovala ještě 5 hodin a 45 minut po vypnutí přísunu elektrické energie. Dalo by se tedy předpokládat, že i v praxi, kde by k ohřevu byla použita například elektřina z fotovoltaických panelů, tak bude docházet k ohřevu i po přerušení dodávky elektřiny z fotovoltaiky. Bude tedy docházet k malému ohřevu i v obdobích, kdy nebude na fotovoltaiky svítit slunce a nebudou mít tedy možnost vyrábět elektrickou energii.

Po vypnutí zdroje ohřevu ve 20:35 dne 17.11. došlo k chladnutí po dobu 13h a 30 minut a teplota písku po této periodě bez ohřevu byla naměřena následovně:

Čidla	Čidlo 1	Čidlo 2	Čidlo 3	Čidlo 4	Čidlo 5	Čidlo 6	Čidlo 7	Čidlo 8	Čidlo 9	Čidlo 10	Čidlo 11
18.11.2023 10:05	79,2°C	77,2°C	76,9°C	107,1°C	60,24°C	57,62°C	58,6°C	58,81°C	35,94°C	11,75°C	36,56°C

Tabulka 4: teploty při ukončení ohřevu experimentu 8

Je tedy vidět, že teplota od vypnutí ohřevu značně stoupala, protože i po takové době je teplota písku vyšší, než byla po ukončení ohřevu, redundantní teplo dodané spirálou je tedy značné. V grafu také můžeme vidět, že teplota písku stoupala do svého maxima až delší dobu po vypnutí zdroje tepla. Lze tedy říct, že během doby chladnutí, tedy doby, kdy nebyl písek přímo ohříván elektrickou energií, stále došlo k prohřátí písku a teploty po této době chladnutí jsou vyšší než v době vypnutí dodávky elektrické energie.

Dalo by se tedy předpokládat, že i v praxi, kde by k ohřevu byla použita například elektrina z fotovoltaických panelů, tak bude docházet k ohřevu i po přerušení dodávky elektřiny z fotovoltaiky. Bude tedy docházet k malému ohřevu i v obdobích, kdy nebude na fotovoltaiky svítit slunce a nebudou mít tedy možnost vyrábět elektrickou energii.

Druhá fáze ohřevu byla spuštěna dne 18.11. v 10:10, kdy teplota písku podle čidel byla:

Čidla	Čidlo 1	Čidlo 2	Čidlo 3	Čidlo 4	Čidlo 5	Čidlo 6	Čidlo 7	Čidlo 8	Čidlo 9	Čidlo 10	Čidlo 11
18.11.2023 10:10	79,1°C	77,1°C	76,7°C	106,7°C	60,15°C	57,52°C	58,49°C	58,69°C	35,94°C	11,19°C	36,5°C

Tabulka 5: teploty před druhým ohřevem experimentu 8

Je tedy vidět na čidlu 9, že teplota na vnější straně nádoby je znatelně nižší, než teplota spodních čidel, na jejichž úrovni je umístěna a lze tedy pozorovat, že písek může fungovat jako podpůrná vrstva okolo teplého jádra pro zpomalení úniků tepla.

Teploty po ukončení druhého ohřevu vypadaly následovně

Čidla	Čidlo 1	Čidlo 2	Čidlo 3	Čidlo 4	Čidlo 5	Čidlo 6	Čidlo 7	Čidlo 8	Čidlo 9	Čidlo 10	Čidlo 11
18.11.2023 21:30	109,0°C	96,4°C	96,4°C	164,3°C	75,41°C	68,59°C	69,77°C	72,08°C	45,75°C	12,75°C	46,31°C

Tabulka 6: teploty po ukončení druhého ohřevu experimentu 8

Maximální naměřená bodová teplota uvnitř nádoby byla 187,7 °C a ostatní teploty v nádobě vypadaly následovně

Čidla	Čidlo 1	Čidlo 2	Čidlo 3	Čidlo 4	Čidlo 5	Čidlo 6	Čidlo 7	Čidlo 8	Čidlo 9	Čidlo 10	Čidlo 11
19.11.2023 1:25	130,7°C	98,5°C	98,3°C	187,7°C	92,36°C	84,29°C	85,76°C	86,25°C	64,19°C	12,81°C	50,31°C

Tabulka 7: maximální dosažená teplota písku experimentu 8

Maximální dosažená průměrná teplota písku v nádobě byla 108,87 °C a průběh teplot v nádobě vypadal takto

Čidla	Čidlo 1	Čidlo 2	Čidlo 3	Čidlo 4	Čidlo 5	Čidlo 6	Čidlo 7	Čidlo 8	Čidlo 9	Čidlo 10	Čidlo 11
19.11.2023 2:35	132,6°C	98,4°C	98,2°C	185,8°C	94,15°C	86,38°C	87,9°C	87,5°C	67,87°C	12,88°C	50,25°C

Tabulka 8: maximální dosažená průměrná teplota písku experimentu 8

V tabulkách můžeme sledovat velké teplotní rozdíly u čidel spodních, která jsou blíže k topné spirále a relativně malé teplotní rozdíly u čidel horních, kde už pobíhá rovnoměrnější ohřev písku. Předpokládám, že to je způsobeno polohou a zakřivením spirály, tudíž na čidlech, která se nacházejí nad místem ohřevu a jsou blízko spirále, jsou jiné teploty než u čidel, u kterých to tak není. U čidel horních už se tyto věci neprojevují a rozdíly teplot mohou být ovlivněny hloubkou uložení, množstvím vlhkosti v okolí a usednutím písku pod čidlem.

Z průběhu teplot můžeme vypořadovat, že na čidlo 9, které je umístěno na boku nádoby a na čidlo 11, které je na povrchu, se vzrůstajícími teplotami rozdíly na těchto čidlech výrazně zvyšují. Při vyšších teplotách více tepla uniká do boků a teplo nestoupá vzhůru a nedochází k tak efektivnímu ohřevu písku nad zdrojem tepla, jako u předchozích ohřevů na nižší teploty.

Teoretický výpočet

Topná spirála o výkonu $P= 890 \text{ W}$, objem plechového sudu $V=0,2 \text{ m}^3$,
 $T_{\text{počáteční,písku}}=11^\circ\text{C}$, $t_{1,\text{ohřevu}}= 595 \text{ minut}$,

$$c_{\text{písku}}= 0,8 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}, \rho_{\text{písku}}= 1750 \text{ kg/m}^3$$

Pro první ohřátí

$$T_{1,\text{průměrná,max písku}}=\frac{90+84,3+85,1+142,5+57,6+53,86+54,76+57,76}{8} = 78,24^\circ\text{C}$$

$$m= V\cdot\rho=0,2\cdot 1750=350 \text{ kg}$$

$$Q= m\cdot c\cdot\Delta T=350\cdot 0,8\cdot(78,24-11)= 18827,2 \text{ kJ}$$

$$t=\frac{W}{P}=\frac{18827200}{890}= 21\,154 \text{ s} = 5,9 \text{ h} = 5 \text{ hodiny a } 54 \text{ minut}$$

Teoretický čas ohřevu za ideálních podmínek na průměrnou teplotu písku $78,24^\circ\text{C}$ je 5 hodin a 54 minut, zatím co v experimentu to trvalo 9 hodin a 55 minut. Doba ohřevu oproti teoretickému výpočtu je 1,7krát delší.

Jaké teplo jsem musel reálně dodat:

$$T=595 \text{ minut} = 35700 \text{ s}$$

$$W=P\cdot t=890\cdot 35700= 31\,773\,000 \text{ J} = 31\,773 \text{ kJ}$$

Ve skutečnosti bylo potřeba 1,7 krát více tepla než podle teoretického výpočtu.

Dojde tedy ke ztrátě 12 946 kJ tepla při ohřevu.

Pro druhé ohřátí

Topná spirála o výkonu $P= 870 \text{ W}$, objem plechového sudu $V=0,2 \text{ m}^3$, $t_{2,\text{ohřevu}}= 680 \text{ minut}$,

$$c_{\text{písku}}= 0,8 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}, \rho_{\text{písku}}= 1750 \text{ kg/m}^3$$

$$T_{2\text{průměrná,počáteční písku}}=\frac{79,2+77,2+76,9+107,1+60,24+57,62+58,6+58,81}{8} = 72^\circ\text{C}$$

$$T_{2\text{průměrná,max písku}}=\frac{132,6+98,4+98,2+185,8+94,15+86,38+87,9+87,5}{8} = 108,87^\circ\text{C}$$

$$m= V\cdot\rho=0,2\cdot 1750=350 \text{ kg}$$

$$Q= m\cdot c\cdot\Delta T=350\cdot 0,8\cdot(108,87-72)= 10323,6 \text{ kJ}$$

$$t = \frac{W}{P} = \frac{10323600}{870} = 11\,866\text{ s} = 3,3\text{ h} = 3\text{ hodiny a } 18\text{ minut}$$

Teoretický čas ohřevu za ideálních podmínek na průměrnou teplotu písku 108,85 °C je 3 hodiny a 18 minut, zatím co v experimentu to trvalo 11 hodin a 20 minut. Doba ohřevu oproti teoretickému výpočtu je 3,4 x větší.

Jaké teplo jsem musel reálně dodat

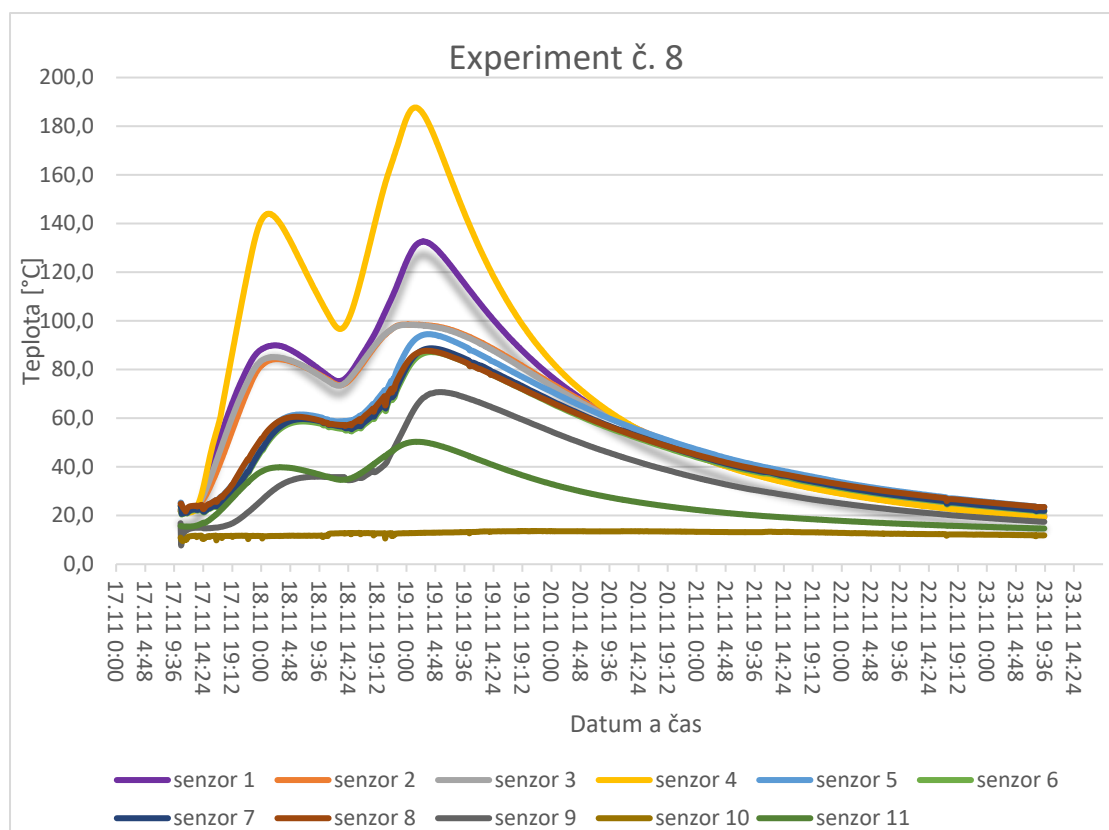
$$T = 680\text{ minut} = 40800\text{ s}$$

$$W = P \cdot t = 890 \cdot 40800 = 36\,312\,000\text{ J} = 36\,312\text{ kJ}$$

Ve skutečnosti bylo potřeba 3,5krát více tepla než podle teoretického výpočtu.

Dojde tedy ke ztrátě 25 988 kJ tepla při ohřevu.

Zajímavým zjištěním tedy je skutečnost, že v první polovině ohřevu, kde byl písek ohřát z 11 °C na průměrných 78,24 °C tedy o 67,24 °C, bylo spotřebováno 31 773 kJ za 9 hodin a 55 minut. Doba ohřevu byla 1,7krát delší než dle teoretického výpočtu a ztráta energie byla 12 946 kJ. Kdežto v druhé polovině ohřevu písku ze 72 °C na 108,87 °C tedy o 36, 87 °C, trval ohřev 11 hodin a 20 minut a bylo k tomu potřeba 36 312 kJ. Doba ohřevu byla 3,5krát delší než dle teoretického výpočtu a ztráta energie byla 25 988 kJ. Je tedy vidět, že doba ohřevu i tepelné ztráty se s rostoucí teplotou značně zvětšují, ohřát písek o skoro poloviční teplotu trvalo u vyšších teplot déle a došlo k o třetinu vyšším teplotním ztrátám. Způsobeno to je větší ΔT , kde vyšší rozdíl teplot znamená větší tepelné ztráty do okolí a tím delší doba ohřevu a s delší dobou ohřevu se více prohřívá písek. Tímto postupnějším prohřátím písku se vyšší teploty dostanou k okraji nádoby a tím dojde k vyšším ztrátám do okolí. Při nejvyšší průměrné naměřené teplotě v ohřevu 2 je teplota čidla 9: 67,87 °C, tedy teplota stěny sudu pod tepelnou izolací, a teplota na horní straně sudu naměřená čidlem 11 byla 50,25 °C. Tyto okrajové části jsou slabými místy, která izoluje už jen 100 mm vrstva tepelné izolace a dochází zde ke ztrátám tepla do okolí.



graf 7: průběh teplot při postupném ohřevu v experimentu 8

Úkol experimentu byl částečně splněn, vyšších teplot písku bylo dosaženo. Kdyby bylo třeba dosáhnout ještě vyšších teplot, bylo by třeba posunout čidlo číslo 4 výše, aby nedošlo k jeho poškození. A bylo by třeba delších postupů v ohřevu, aby došlo k prohřátí písku v celém objemu nádoby. Ani vyšší teploty nestačily k úplnému odstranění vlhkosti z písku, při kontrole bylo zjištěno, že až do hloubky 40 cm od povrchu je stále relativně mokrá. Z grafu je vidět, že vyšších teplot potřebných pro odstranění vlhkosti bylo dosaženo pouze ve spodních vrstvách nádoby a ve vyšších vrstvách nebyla teplota písku dostatečně vysoká pro odpaření vody. Ohřev by to chtělo provádět buď na více místech anebo po celé výšce nádoby. Ohřev po delší dobu s cílem ohřátí na vyšší teploty by byla ztráta času a energie, jelikož s rostoucí ΔT se značně zvyšuje doba ohřevu a tepelné ztráty, bylo by tedy třeba pro vyšší teploty vymyslet efektivnější ohřev anebo lépe zaizolovat.

Díky pomalému ohřevu je také na grafu lépe vidět postupné prohřívání, spodní čidla 1-4 jsou nahřata rychleji a na vyšší teploty. Oproti čidlům na vrchu nádoby, kam se teplo šíří pomaleji a nedosahuje tak vysokých teplot. Dále na čidle 9 a 11 vidíme teplo, které proniká vrstvami písku a je předáváno do okolí.

Do písku za celou dobu ohřevu bylo uloženo 18,3 kWh energie, tedy za 21 hodin a 15 minut, cena této celkové energie byla $18,3 \cdot 3,58 = 65,5$ Kč. Této energii trvalo 4 dny a 11 hodin a 55 minut, než z písku vyprchala. Za první fázi ohřevu bylo spotřebováno 8,7 kWh, Při druhém ohřevu došlo ke spotřebě 9,5 kWh. Cena prvního ohřevu byla $8,7 \cdot 3,58 = 31,15$ Kč a druhého ohřevu byla $9,5 \cdot 3,58 = 34,01$ Kč.

Závěr:

Došlo k zajímavému zjištění, pomalý ohřev 890 W spirálou byl nejefektivnější v porovnání s ostatními experimenty při ohřátí písku na teplotu 78 °C, kde bylo potřeba 1,7krát více tepla a času než dle teoretického výpočtu. Ale při dosažení teploty 108,87 °C už efektivita klesla na 3,4krát delší dobu a 3,5krát více energie než dle výpočtu. Tedy ohřát písek z 23,32 °C na 78 °C stálo skoro stejně energie i peněz jako ohřát písek ze 71 °C na 108,87 °C. Při porovnání s předchozím experimentem bylo dosaženo teploty 95,52 °C a potřeba dodané energie byla 2,3 větší než dle teoretického výpočtu. Zdá se tedy že nejefektivnější je ze začátku pomalý ohřev, aby se prohřála celá nádoba písku a následně se zvedl výkon, aby bylo vyšších teplot dosaženo v tomto případě rychleji a s menšími ztrátami. V tomto experimentu se také dalo pozorovat, jaké rozdíly teplot panovaly u spodních čidel blíže ke spirále a že u horních čidlech byly rozdíly teplot minimální. Podle tohoto experimentu se tedy zdá, že od určité tloušťky vrstvy písku od zdroje tepla, se teplo šíří relativně rovnoměrně. Toto řešení však nemusí být vhodné pro jiný druh experimentu, dané hodnoty by mohlo změnit lepší zaizolování, více písku nebo jiné podněty. Bylo vyzorováno, že při snaze o dosažení vyšších teplot více tepla uniká do stran a teplo už se nešíří hlavně směrem vzhůru, nedochází tedy k tak efektivnímu ohřevu písku nad spirálou, jako při ohřevu na nižší teploty. Při ohřevu do 90 °C je prostup tepla vzhůru a do stran poměrně stejný ale u 100 °C už se to znatelně liší a více tepla proudí do stran než vzhůru. Bylo by tedy potřeba provést další experimenty s větším množstvím písku pro zjištění, jak by šíření tepla vypadalo při jiném uskupení a větším množství písku.

2.2.3 Experiment č. 9 29.11. 2023

Okrajové podmínky:

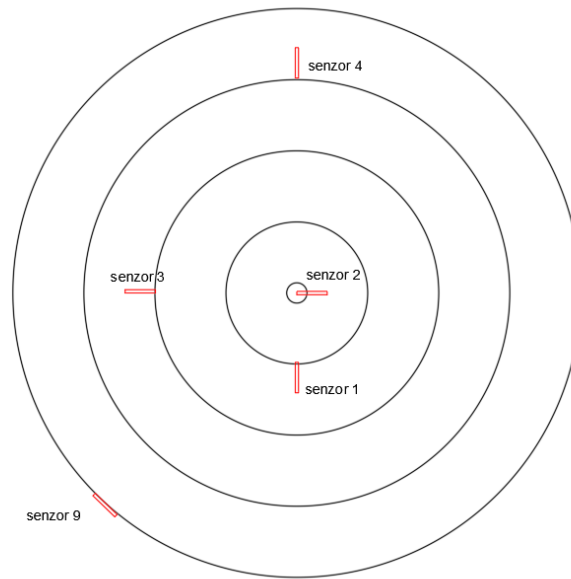
Experiment byl prováděn v uzavřeném zastřešeném prostředí garáže s teplotními podmínkami uzavřeného prostředí přes noc, kdy se vlivem ohřevu písku vyhřívá i místnost. Přes den jsou proměnlivé teplotní podmínky kvůli využívání garáže, tedy bude proměnlivý vliv venkovních teplot. Venkovní teploty vzduchu se v době spuštění experimentu pohybovaly okolo 5 °C, teplota písku se pohybovala u dolních čidel v průměru okolo 9 °C a u horních čidel 6 °C.

Pomůcky:

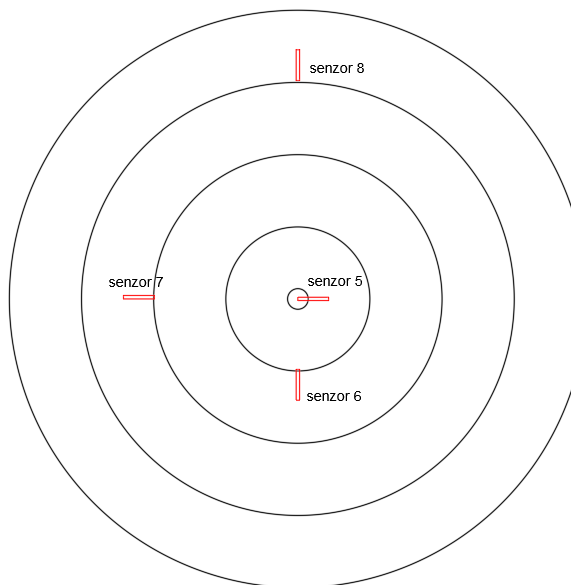
příruba s topným tělesem teplovzdušné elektrické trouby AEG s výkonem jedné spirály 890 W, COMET teplotní čidlo -80 °C až +200 °C – Pt1000TG8/E 4x, temperature logger SO141, DS18B20 teplotní čidla drátová -55 °C až +125 °C 3x, PT100 platinové teplotní čidlo -80 °C až +400 °C 4x, notebook Lenovo, 3.0 smart power Plug 16a Eu socket 3680 W, VOLTCRAFT energy logger 4000, prodlužka, PARKSIDE Infračervený teploměr PTIA1, písek frakce 0/4 skladováno venku

Průběh experimentu:

Úkolem tohoto experimentu bylo zjistit teploty písku v různých poloměrech od středu nádoby, tedy sledovat, jak vypadá prostup tepla od nejteplejšího středu po okraj nádoby. Nádoba má průměr 23,5 cm čidla byla rozdělena do hloubek po 7 centimetrech. Tedy jedno čidlo bylo umístěno na hraně sudu, další byla umístěna o 7 cm hlouběji, další 14 cm, poté další o 21 cm hlouběji a poslední do středu hromady. Od experimentu se očekává, že ukáže, že každá další vrstva dále od středu, bude mít znatelný pokles teploty a že jádro nádoby s pískem je nejteplejší a teplo se tam drží nejdéle.



Obrázek 20: umístění spodních čidel v experimentální nádobě



Obrázek 21: umístění horních čidel v experimentální nádobě

Čidlo 10 bylo umístěno mimo nádobu pro sledování venkovních teplot a čidlo 11 bylo uloženo na povrch nádoby pro sledování povrchové teploty.

Experiment byl spuštěn dne 29.11. v 17:00, kdy se jednalo o předeřev s tím, že hlavní ohřev proběhne až druhý den.

Teploty písku v době spuštění vypadaly takto.

Čidla	Čidlo 1	Čidlo 2	Čidlo 3	Čidlo 4	Čidlo 5	Čidlo 6	Čidlo 7	Čidlo 8	Čidlo 9	Čidlo 10	Čidlo 11
29.11.2023 17:00	9,0°C	9,3°C	9,1°C	8,8°C	6,99°C	5,96°C	5,96°C	8,02°C	8,94°C	5,06°C	3,56°C

Tabulka 9: počáteční teploty písku experiment 9

Topná spirála pro ohřev písku byla vypnuta dne 30.11. v 0:50 a teplota písku byla

Čidla	Čidlo 1	Čidlo 2	Čidlo 3	Čidlo 4	Čidlo 5	Čidlo 6	Čidlo 7	Čidlo 8	Čidlo 9	Čidlo 10	Čidlo 11
30.11.2023 0:50	53,6°C	57,9°C	51,4°C	36,1°C	12,46°C	13,5°C	13,64°C	13,57°C	44,56°C	8,75°C	9,44°C

Tabulka 10: teplota písku po prvním ohřevu experiment 9

Maximální průměrné teploty písku při prvním ohřevu bylo dosaženo 5 minut před spuštěním druhého ohřevu, a to dne 30.11. v 10:10, kdy průměrná teplota písku byla 54,42 °C a jednotlivé naměřené teploty písku vypadly takto.

Čidla	Čidlo 1	Čidlo 2	Čidlo 3	Čidlo 4	Čidlo 5	Čidlo 6	Čidlo 7	Čidlo 8	Čidlo 9	Čidlo 10	Čidlo 11
30.11.2023 10:10	70,9°C	72,8°C	69,7°C	64,0°C	41,22°C	39,52°C	40,15°C	37,09°C	47,25°C	9°C	25,19°C

Tabulka 11: maximální průměrná teplota písku po prvním ohřevu experimentu 9

Teplota písku, od vypnutí spirály na ohřev, tedy po dobu 9 hodin a 20 minut stále stoupala až do doby, kdy byl znovu spuštěn ohřev. Ohřev byl znovu spuštěn dne 30.11. v 10:15 a průměrná teplota písku byla 54,39 °C a jednotlivé teploty vypadaly takto.

Čidla	Čidlo 1	Čidlo 2	Čidlo 3	Čidlo 4	Čidlo 5	Čidlo 6	Čidlo 7	Čidlo 8	Čidlo 9	Čidlo 10	Čidlo 11
30.11.2023 10:15	70,9°C	72,7°C	69,6°C	64,0°C	41,3°C	39,45°C	40,08°C	37,09°C	47,25°C	9°C	25,19°C

Tabulka 12: maximální teploty písku při druhém ohřevu experiment 9

Můžeme tedy pozorovat, že během těchto 5ti minut už došlo ke zlomu, kdy se průměrná teplota písku začala snižovat. Snižovala se do 10:20, kdy průměrná teplota klesla na 54,15 °C a jednotlivé teploty vypadaly následovně

Čidla	Čidlo 1	Čidlo 2	Čidlo 3	Čidlo 4	Čidlo 5	Čidlo 6	Čidlo 7	Čidlo 8	Čidlo 9	Čidlo 10	Čidlo 11
30.11.2023 10:20	70,8°C	72,7°C	69,7°C	64,0°C	41,07°C	38,79°C	39,41°C	36,7°C	46,44°C	7,81°C	25,0°C

Tabulka 13: Teploty písku při spuštění druhého ohřevu experiment 9

Dále tedy začal druhý ohřev, který probíhal dne 30.11. od 10:10 do 16:55 téhož dne. Nejvyšší průměrné teploty písku bylo dosaženo dne 1.12. ve 2:30, kdy průměrná teplota písku byla 83,1 °C a teploty byly

Čidla	Čidlo 1	Čidlo 2	Čidlo 3	Čidlo 4	Čidlo 5	Čidlo 6	Čidlo 7	Čidlo 8	Čidlo 9	Čidlo 10	Čidlo 11
1.12.2023 2:30	107,4°C	124,5°C	104,5°C	82,0°C	65,27°C	60,53°C	61,55°C	59,05°C	57,75°C	9,44°C	42,5°C

Tabulka 14: maximální průměrná teplota písku experiment 9

Nejvyšší teploty bylo dosaženo ve středu nádoby, a to od 23:20 dne 30.11. do 0:05 dne 1.12. a teploty v celé nádobě vypadaly takto.

Čidla	Čidlo 1	Čidlo 2	Čidlo 3	Čidlo 4	Čidlo 5	Čidlo 6	Čidlo 7	Čidlo 8	Čidlo 9	Čidlo 10	Čidlo 11
30.11.2023 23:20	100,9°C	126,5°C	101,4°C	83,2°C	62,3°C	58,34°C	59,32°C	56,09°C	63,19°C	9,38°C	39,19°C
30.11.2023 23:25	101,2°C	126,5°C	101,6°C	83,2°C	62,39°C	58,44°C	59,43°C	56,22°C	63,06°C	9,38°C	39,25°C
30.11.2023 23:30	101,5°C	126,5°C	101,7°C	83,1°C	62,54°C	58,53°C	59,53°C	56,32°C	62,94°C	9,38°C	39,25°C
30.11.2023 23:35	101,8°C	126,5°C	101,9°C	83,2°C	62,67°C	58,62°C	59,61°C	56,42°C	62,81°C	9,44°C	39,5°C
30.11.2023 23:40	102,1°C	126,5°C	102,1°C	83,1°C	62,74°C	58,7°C	59,68°C	56,53°C	62,69°C	9,38°C	39,44°C
30.11.2023 23:45	102,3°C	126,5°C	102,2°C	83,1°C	62,89°C	58,79°C	59,79°C	56,64°C	62,5°C	9,44°C	39,63°C
30.11.2023 23:50	102,6°C	126,5°C	102,4°C	83,1°C	62,95°C	58,87°C	59,87°C	56,75°C	62,38°C	9,44°C	39,63°C
30.11.2023 23:55	102,9°C	126,5°C	102,5°C	83,1°C	63,08°C	58,94°C	59,94°C	56,84°C	62,25°C	9,44°C	39,81°C
01.12.2023 0:00	103,1°C	126,5°C	102,7°C	83,1°C	63,16°C	59,03°C	60,02°C	56,94°C	62,13°C	9,44°C	40°C
01.12.2023 0:05	103,3°C	126,5°C	102,8°C	83,0°C	63,32°C	59,11°C	60,1°C	57,04°C	61,94°C	9,44°C	39,88°C

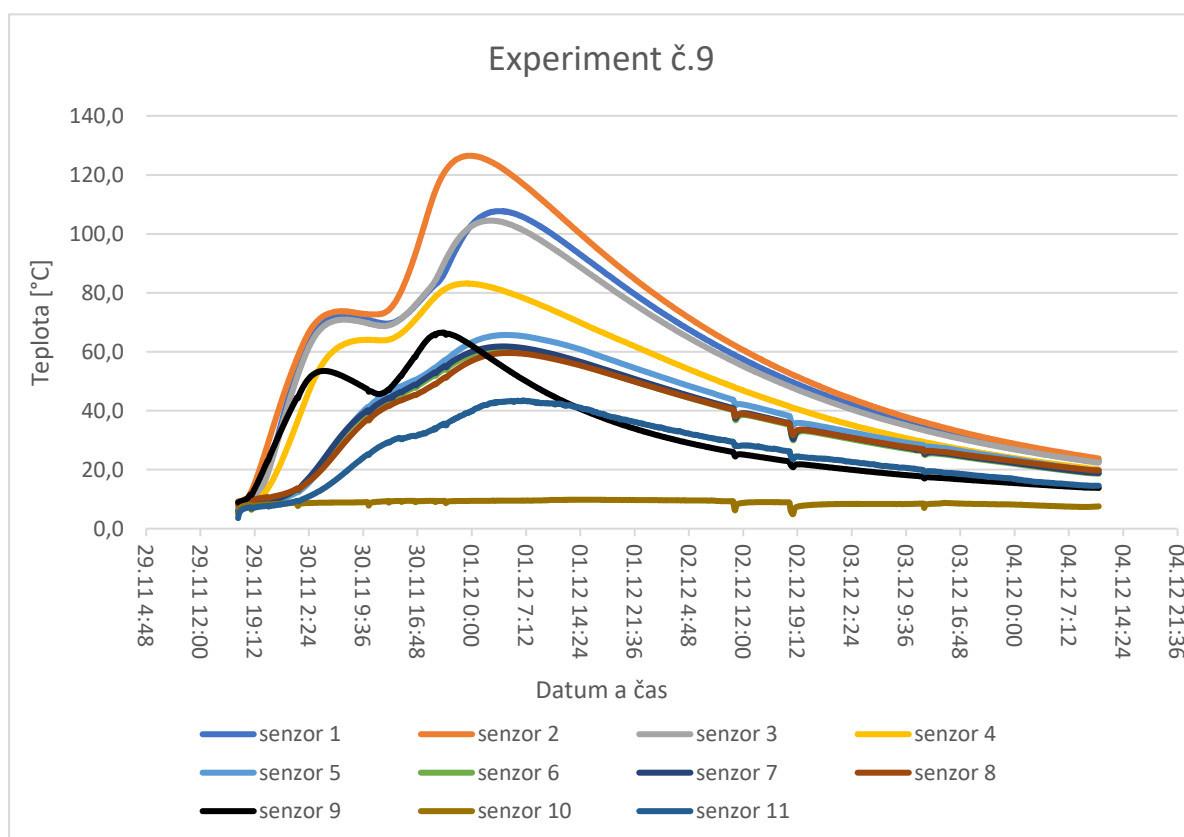
Tabulka 15: průběh maximální dosažené teploty písku experiment 9

Ve chvíli, co přestala stoupat teplota středu, se teploty okolního písku dále zvyšovaly, proto bylo dosaženo průměrné nejvyšší teploty v jinou dobu, než bylo dosaženo nejvyšší teploty písku. Lze i vidět, že od dosažení nejvyšší teploty středu trvalo 3 hodiny a 10 minut, kdy se zbytek nádoby dále prohříval, i když střed ztrácel teplotu.

Celkový čas ohřevu s první i druhou fází byl 14 hodin a 25 minut a dodanému teplu trvalo do dne 4.12., než teplota písku klesla na takovou teplotu, kdy následné úbytky tepla jsou v desetinách stupňů Celsia. Finální ustálené teploty bylo dosaženo dne 4.12. v 11:10 a teploty vypadaly následovně

Čidla	Čidlo 1	Čidlo 2	Čidlo 3	Čidlo 4	Čidlo 5	Čidlo 6	Čidlo 7	Čidlo 8	Čidlo 9	Čidlo 10	Čidlo 11
4.12.2023 11:10	22,9°C	23,8°C	22,4°C	20,0°C	19,71°C	18,64°C	18,88°C	19,74°C	13,81°C	7,56°C	14,56°C

Tabulka 16: teploty písku při ukončení měření



graf 8: průběhy jednotlivých teplot experimentu 9

Viditelné poklesy teplot u horních čidel, byly způsobeny otevíráním dveří do místnosti, kde byly pokusy prováděny. Docházelo k poklesu venkovní teploty a tak i teploty povrchových čidel.

Teoretický výpočet

Topná spirála o výkonu $P= 890 \text{ W}$, objem plechového sudu $V=0,2 \text{ m}^3$,
 $T_{\text{počáteční,písku}}=7,9 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_{1,\text{ohřevu}}= 470 \text{ minut}$,

$$c_{\text{písku}}= 0,8 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}, \rho_{\text{písku}}= 1750 \text{ kg/m}^3$$

Pro první ohřátí

$$T_{1,\text{průměrná,max písku}}=\frac{70,9+72,8+69,7+64,0+41,22+39,52+40,15+37,09}{8} = 54,42 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$m= V*\rho=0,2*1750=350 \text{ kg}$$

$$Q= m*c*\Delta T=350*0,8*(54,42-7,9)= 13025,6 \text{ kJ}$$

$$t=\frac{W}{P}=\frac{13025600}{890}= 14\ 636 \text{ s} = 4,1 \text{ h} = 4 \text{ hodiny a } 6 \text{ minut}$$

Teoretický čas ohřevu za ideálních podmínek na průměrnou teplotu písku $54,42 \text{ }^\circ\text{C}$ je 4 hodiny a 6 minut, zatím co v experimentu to trvalo 7 hodin a 55 minut. Doba ohřevu oproti teoretickému výpočtu je 1,9krát delší.

Jaké teplo jsem musel reálně dodat:

$$T=470 \text{ minut} = 28200 \text{ s}$$

$$W=P*t=890*28200= 25\ 098\ 000 \text{ J} = 25\ 098 \text{ kJ}$$

Ve skutečnosti bylo potřeba 1,9krát více tepla než podle teoretického výpočtu.

Dojde tedy ke ztrátě $12\ 073,6 \text{ kJ}$ tepla při ohřevu.

Pro druhé ohřátí

Topná spirála o výkonu $P= 890 \text{ W}$, objem plechového sudu $V=0,2 \text{ m}^3$, $t_{2,\text{ohřevu}}= 395 \text{ minut}$,

$$c_{\text{písku}}= 0,8 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}, \rho_{\text{písku}}= 1750 \text{ kg/m}^3$$

$$T_{2\text{průměrná,počáteční písku}}=\frac{70,9+72,7+69,6+64,0+41,3+39,45+40,08+37,09}{8} = 54,39 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{2\text{průměrná,max písku}}=\frac{107,4+124,5+104,5+82+65,27+60,53+61,55+59,05}{8} = 83,1 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$m= V*\rho=0,2*1750=350 \text{ kg}$$

$$Q= m*c*\Delta T=350*0,8*(83,1-54,39)= 8038,8 \text{ kJ}$$

$$t = \frac{W}{P} = \frac{8038000}{890} = 9032 \text{ s} = 2,5 \text{ h} = 2 \text{ hodiny a } 30 \text{ minut}$$

Teoretický čas ohřevu za ideálních podmínek na průměrnou teplotu písku 83,1 °C z 54,39 °C je 2 hodiny a 30 minut, zatím co v experimentu to trvalo 6 hodin a 35 minut. Doba ohřevu oproti teoretickému výpočtu je 2,6 x větší.

Jaké teplo jsem musel reálně dodat:

$$T = 395 \text{ minut} = 23700 \text{ s}$$

$$W = P * t = 890 * 23700 = 21\,093\,000 \text{ J} = 21\,093 \text{ kJ}$$

Ve skutečnosti bylo potřeba 2,6krát více tepla než podle teoretického výpočtu.

Dojde tedy ke ztrátě 13 055 kJ tepla při ohřevu.

Pro ohřev písku bylo celkově spotřebováno 13,1 kWh v ceně 13,1*3,58=46,9 Kč. Za první fázi ohřevu bylo spotřebováno 7,14 kWh v ceně 7,14*3,58=25,56 Kč a pro ohřev v druhé fázi bylo spotřebováno 5,96 kWh v ceně 5,96*3,58=21,3 Kč.

Závěr:

Úkol experimentu byl splněn, byla naměřena teplota v různých vzdálenost od středu nádoby a bylo možno posoudit, které vrstvy se ohřály nejrychleji a jak se teplo šířilo od středu do okolních vrstev. Jak se dalo předpokládat, prostřední vrstva byla nejteplejší a vydržela nejdéle teplá. Zajímavé zjištění bylo, že vrstvy vzdálené 7 a 14 cm od středu mají skoro identický průběh teplot, takže mezi nimi není tak velký rozdíl, jak by se na první pohled mohlo zdát. Vrstva písku 7 cm do hloubky nádoby, tedy skoro na kraji, dosáhla už znatelně nižších teplot a nejrychleji chladla. Teplota na vnější hraně nádoby měla průběh relativně podle očekávání, dosáhla nejnižších hodnot a chladla nejrychleji, je tedy znatelný rozdíl, když dochází k izolaci jak za pomoci tepelné vaty, tak i písku oproti pouze izolací vatou. Sedmicentimetrový rozdíl mezi čidlem na okraji nádoby a čidlem uvnitř nádoby je dost znatelný.

Ukázal se i dopad nižších venkovních teplot, kdy při prvním ohřevu byl čas 1,9krát delší než výpočet, přitom v pokusu 7 bylo s podobným zadáním dosaženo 1,7krát delší doby ohřevu. A i když bylo u pokusu 7 dosaženo vyšších teplot za delší čas, tepelné ztráty byly u prvních ohřevů u obou pokusů shodné. Při druhém ohřevu bylo dosaženo o 25 °C nižší teploty než u pokusu 7 a efektivita pokusu 7 byla 3,4krát větší než výpočet, kdežto u experimentu 8 byla 2,6krát větší. Je tedy vidět, že tepelné ztráty

značně rostou s vyššími teplotami písku. A průměrná efektivita ohřevu slabší spirálou je podobná efektivitě ohřevu silnější spirálou, bylo by třeba sledovat, jestli tento trend pokračuje i při dosažení vyšších teplot, anebo se poměr efektivit bude měnit.

2.3 Zhodnocení experimentů:

Měrná tepelná kapacita vody, která je v nynější době nejužívanějším médiem pro ukládání tepla na ohřev TUV a vytápění, je 5,225 větší než měrná tepelná kapacita písku a písek se tedy ohřívá daleko rychleji. Toto tvrzení bylo ověřeno ve výpočtech při provádění experimentů. V experimentech bylo otestováno předpokládané pomalé prostupování tepla pískem, rozdíly teplot u ohřevné spirály a ve zbytku nádoby jsou markantní. Desítky centimetrů v rozdílech hloubky vykazovaly obrovské rozdíly teplot, v některých případech, kdy se čidlo dostalo na vzdálenost 10 cm od topné spirály a teplota naměřená čidlem byla až o 70 °C vyšší než u ostatních čidel. Tento pomalý prostup tepla, je další ze složek, které dělají písek tak dobrým pro ukládání tepla. Díky pomalému prostupu trvá dlouhou dobu, než se teplo dostane skrze písek a do kontaktu s okolním prostředím, do kterého pak teplo může unikat. Tato vlastnost však může být také nevýhodou při okamžité potřebě tepla, tedy jakmile budeme teplo ukládat a chtěli bychom ho po chvíli z písku odebírat, nemusí potom dojít k takovému prohřátí, aby se teplo dalo využít. Je tedy důležité se při stavbě akumulátoru soustředit na provozní stavy odběru a přizpůsobit tomu umístění a způsob odběru a ohřevu. Z experimentů bylo vyzorováno, že nejvyšších teplot dosahuje střed ohřívané nádoby písku a nejdéle také teplo drží, okrajová vrstva písku na stěně nádoby dosahuje nejnižších teplot a nejrychleji chladne. Byl tedy proveden experiment, při kterém byla čidla rozmístěna ve stejné výšce ale různě hluboko v nádobě a došlo tak k rozdělení obsahu na 5 různých vrstev po 7 centimetrech viz. Obrázky 20 a 21. Bylo zjištěno, že blíže ke spirále se teplota střední vrstvy u čidla 2 značně teplotně lišila od ostatních teplot, ale dále od topné spirály už docházelo k rovnoměrnému ohřevu písku a teplota se už tolik nelišila. Další středové vrstvy, tedy oblast čidla 1 a 3 vzdálená 7 a 14 cm od středu, se teplotně skoro nelišila. Nejchladnější vrstvou byla okrajová vrstva u čidla 4, které bylo na okraji nádoby kryté 100 mm silnou vrstvou tepelné minerální vaty a docházelo v této vrstvě ke ztrátám tepla do okolí. Směr největšího úniku tepla do okolí se lišil podle dosažených teplot, tedy při dosažení teplot okolo 90 °C, byl únik teplot ve směrech vzhůru a do stran shodný. Při dosažení teplot nad 100 °C bylo pozorováno, že únik tepla do stran, tedy nejkratší možnou cestou, byl daleko větší než únik vzhůru.

Při rovnoměrném rozdělení hmoty v nádobě a umístění topného média doprostřed by mohlo dojít ke zefektivnění ohřevu. Teploty se při ohřevu v experimentální nádobě dělily podle vzdálenosti od středu nádoby na několik oblastí. Ve středu nádoby byly naměřeny vždy nejvyšší dosažené teploty a písek se zde ohříval nejrychleji. Ve vzdálenosti 7–14 cm od středu byly zóny stejných teplot, v tomto rozmezí nedocházelo k velkým rozdílům teplot písku a ohřev v těchto zónách probíhal podobnou rychlostí. Dále byla okrajová vrstva písku tedy 7 cm od stěny nádoby, kde byly naměřeny nejnižší teploty a docházelo zde k nejpomalejšímu ohřevu. Tyto průběhy však platí pouze ve střední části experimentální nádoby.

V horních vrstvách nádoby byly průběhy teplot a rychlosti ohřevu v těchto zónách velice podobné se stejnou rychlostí ohřevu. Dalším velkým rozdílem oproti nižším vrstvám v nádobě byl viditelný faktor ovlivnění venkovními teplotami, čidla v horní vrstvě písku byla umístěna 70 mm od povrchu a při rychlém poklesu teplot v experimentální místnosti, došlo i ke značnému poklesu naměřených teplot písku v nádobě. Tyto poklesy venkovních teplot byly způsobeny změnou teplot v experimentální místnosti v důsledku používání garáže. Lze tedy pozorovat, že vrstva písku tloušťky cca 7 cm na povrchu, je velice náchylná na změny teplot okolí ale vrstvy hlouběji už ne.

Provedené experimenty ukázaly rovněž určité nedostatky, které by bylo třeba v dalších pokusech optimalizovat. A dále sledovat jaké výsledky tyto změny budou mít na ohřev, udržení teplot a chladnutí písku.

3. Simulace:

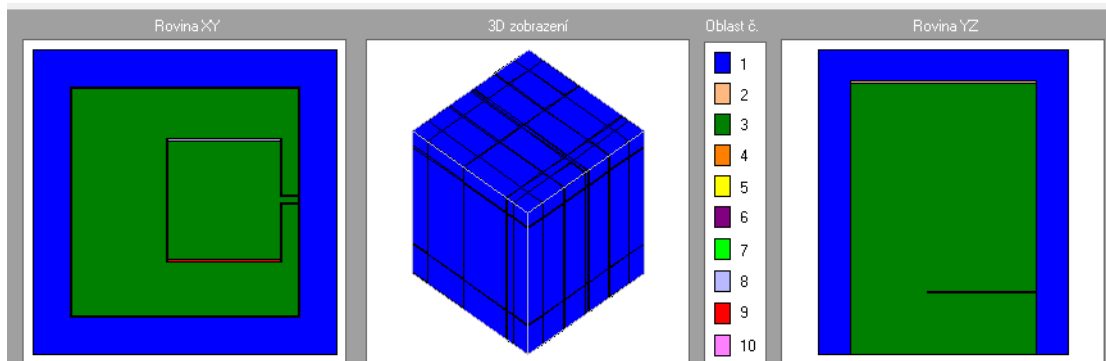
Proběhla simulace experimentu ve 3D programu Cube, pro porovnání teplot dosažených v experimentu a maximálních možných teplot podle simulace.

Pro potřeby programu byly některé tvary upraveny, aby s nimi bylo možné pracovat. A v programu nelze vytvořit oblé tvary, jde tedy pouze o aproximace.

Byla tedy místo sudu modelována krychle, o stejném objemu jako experimentální sud. Do nádoby byl vložen přibližný tvar spirály o výkonu 890 W, stejném jako byl v experimentech, a dále na nádobu byla umístěna minerální vata s podobnými vlastnostmi jako v experimentu.

3.1. Simulace experimentálního stavu

Minerální vata nebyla umístěna na spodu nádoby stejně jako v experimentu. Teplota okolí byla nastavena po celém obvodu na 10 °C.

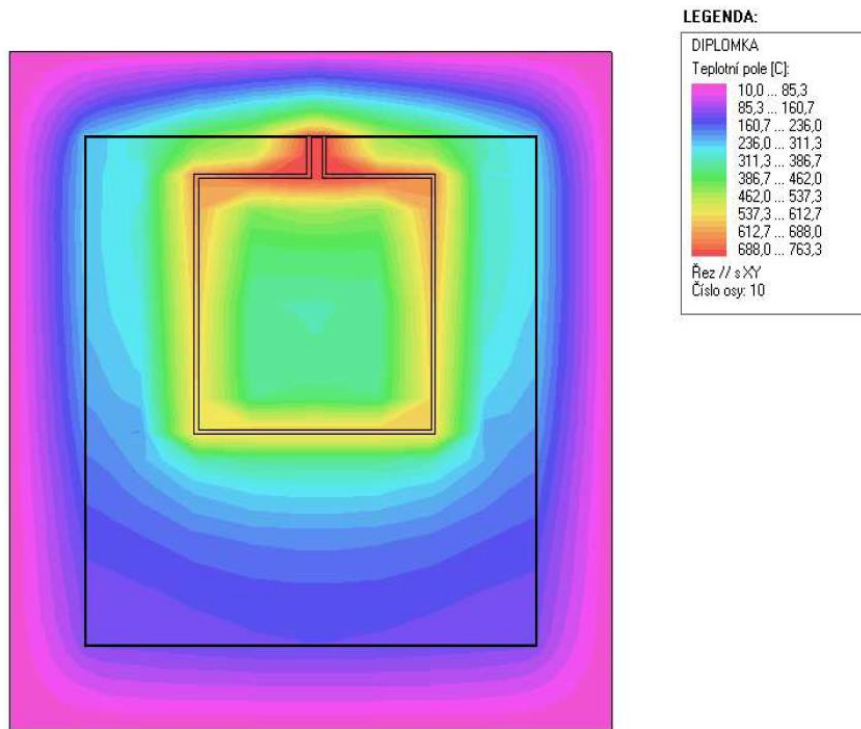


Obrázek 22: model simulace experimentálního stavu

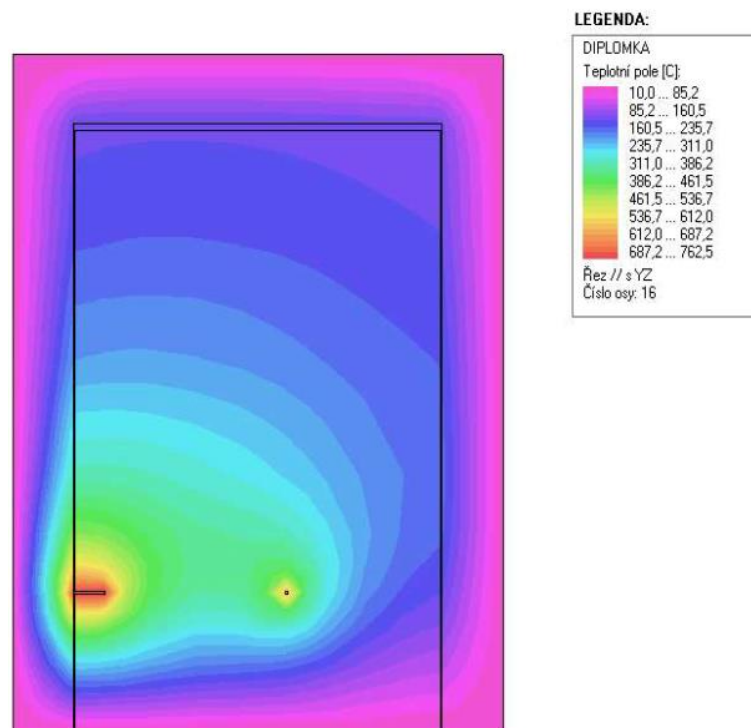
- 1 Minerální vata ul. 100 mm
- 2 Vzduchová mezera mezi okrajem sudu a pískem
- 3 Písek
- 4 Jednotlivé části topné spirály
- 5 Jednotlivé části topné spirály
- 6 Jednotlivé části topné spirály
- 7 Jednotlivé části topné spirály
- 8 Jednotlivé části topné spirály
- 9 Jednotlivé části topné spirály
- 10 Jednotlivé části topné spirály

Obrázek 23: legenda modelu

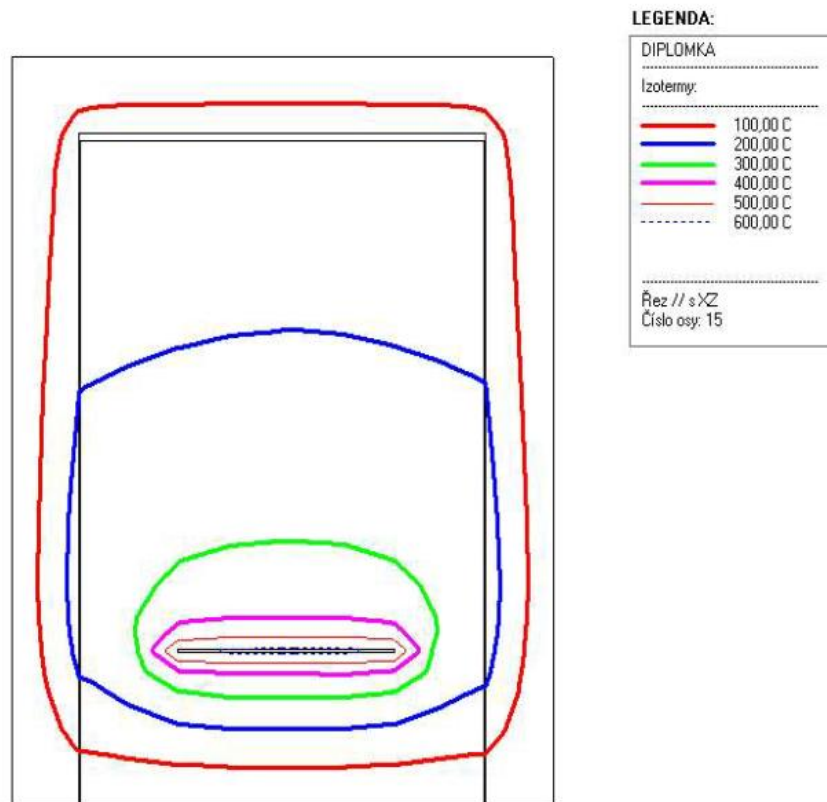
Simulace ukazuje ustálený stav teplot při dlouhodobém ohřevu. Teploty podle simulace vypadají takto



Obrázek 24: průběh teplot v půdorysu experimentální nádoby



Obrázek 25: průběh teplot v řezu experimentální nádoby

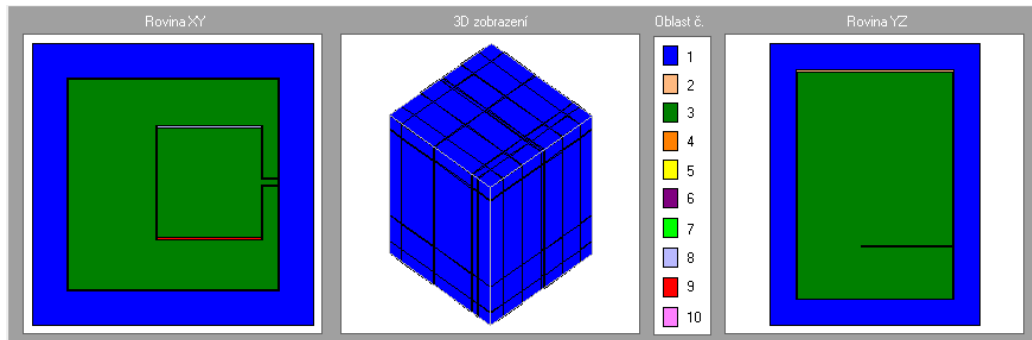


Obrázek 26: teplotní oblasti experimentální nádoby

Dle simulace jsou tedy potenciální dosažitelné teploty až 3krát větší než teploty dosažené v experimentech. Simulace také hezky znázorňuje rozložení teplot, je vidět, že nejvyšších teplot je dosaženo v bezprostřední blízkosti spirály a teplota vzdáleností od spirály značně rychle klesá. Skoro celý objem písku v nádobě se nahřál na minimální teplotu 100 °C.

3.2 Simulace úplného zaizolování

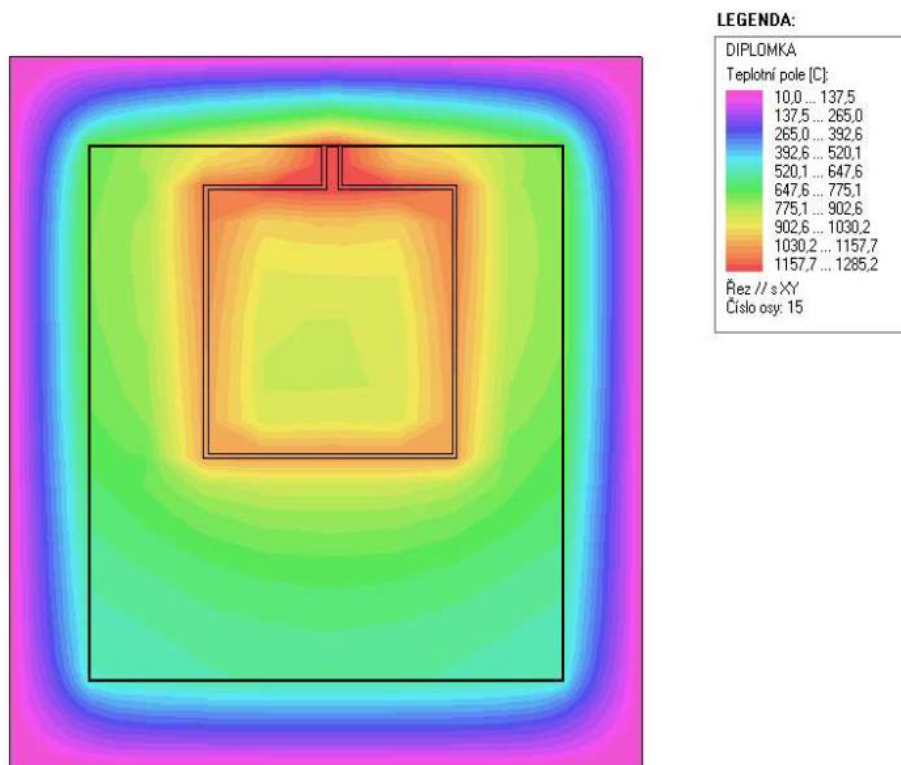
Při úplném zaizolování experimentální nádoby teploty vypadají značně jinak.



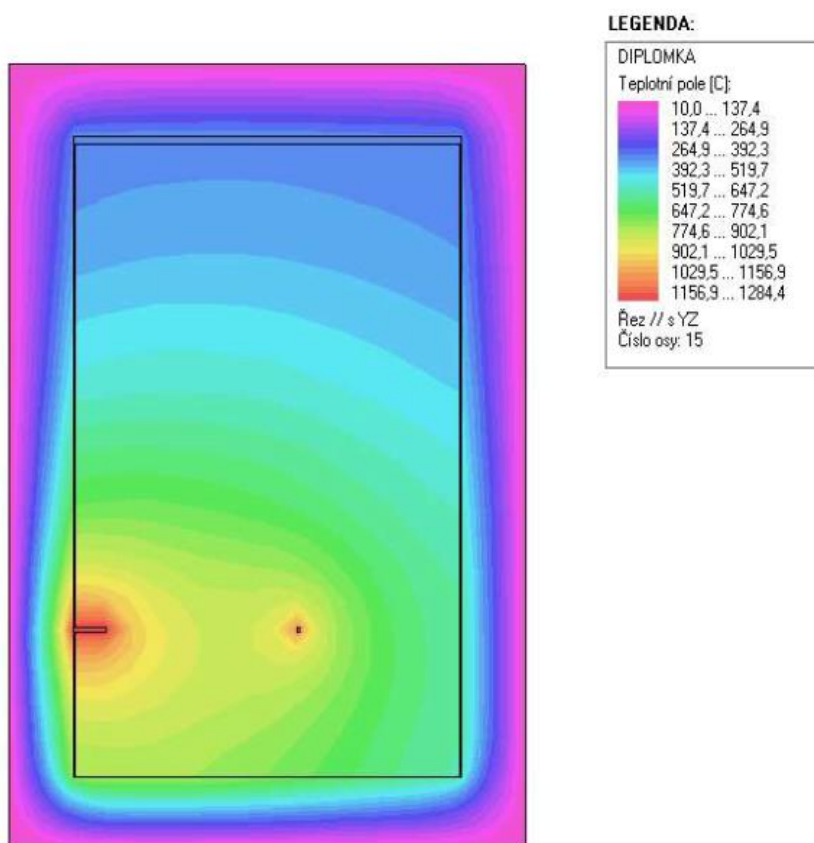
Obrázek 27: schéma provedené simulace

- 1 Minerální vata ul. 100 mm
- 2 Vzduchová mezera mezi okrajem sudu a pískem
- 3 Písek
- 4 Jednotlivé části topné spirály
- 5 Jednotlivé části topné spirály
- 6 Jednotlivé části topné spirály
- 7 Jednotlivé části topné spirály
- 8 Jednotlivé části topné spirály
- 9 Jednotlivé části topné spirály
- 10 Jednotlivé části topné spirály

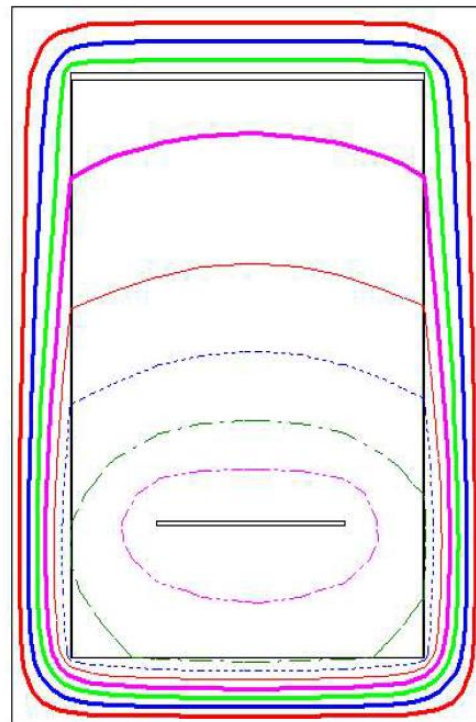
Obrázek 28: legenda k obrázku 27



Obrázek 29: průběh teplot v půdorysu simulace 2



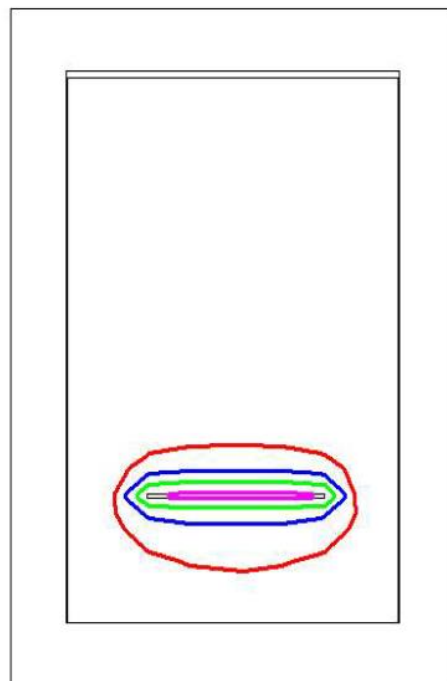
Obrázek 30: průběh teplot v řezu nádobou simulace 2



LEGENDA:

DIPLOMKA	
Izotermy:	
— (red)	100,00 C
— (blue)	200,00 C
— (green)	300,00 C
— (magenta)	400,00 C
— (orange)	500,00 C
- - - (black)	600,00 C
- - - (green)	700,00 C
- - - (purple)	800,00 C
Řez // sXZ Číslo osy: 15	

Obrázek 31: tepelné oblasti 100-800 °C simulace 2



LEGENDA:

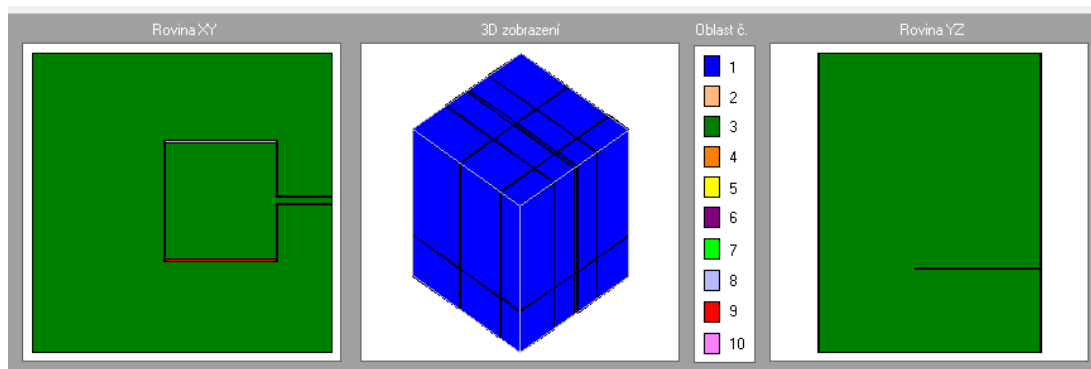
DIPLOMKA	
Izotermy:	
— (red)	800,00 C
— (blue)	900,00 C
— (green)	1000,00 C
— (magenta)	1100,00 C
Řez // sXZ Číslo osy: 15	

Obrázek 32: tepelné oblasti 800-1100 °C simulace 2

Zaizolováním spodní strany experimentální nádoby jsem dosáhl skoro dvojnásobné maximální teploty oproti maximální možné teploty při neúplném obalení nádoby. Úplné zaizolování akumulátoru je tedy důležitým bodem pro správné fungování systému. Při zaizolování 100 mm minerální vaty je možné dosáhnout teplot písku až 1000 °C. V této simulaci je vidět, že díky úplné izolaci dosáhneme daleko vyšších teplot než v předchozí simulaci.

3.3 Simulace většího množství písku bez izolace

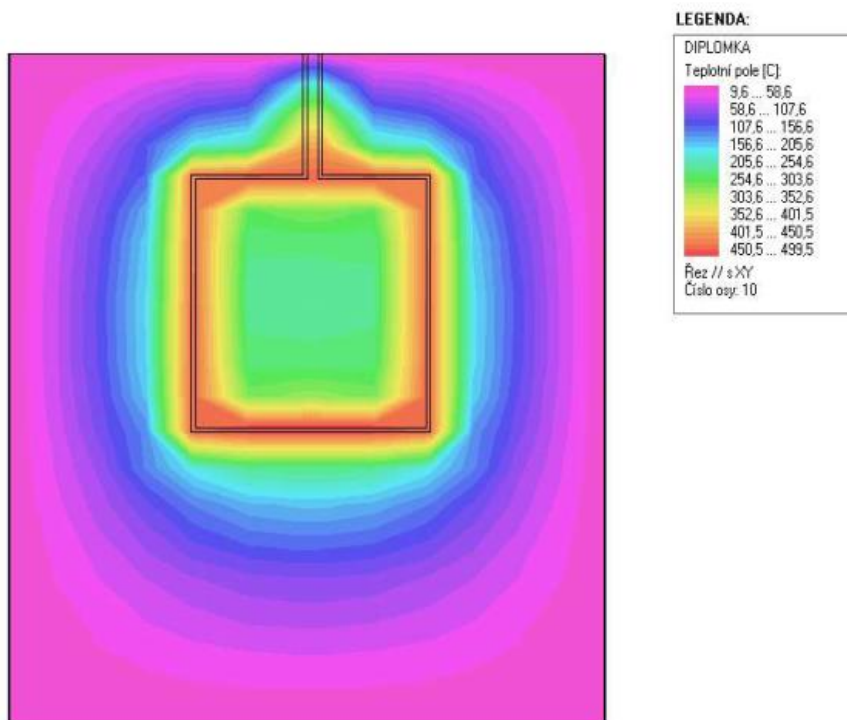
Dále k porovnání proběhla simulace zvětšení pouze hmoty písku v akumulátoru, bez tepelné izolace. Pro zjištění, zdali nestačí pouze zvětšit množství písku a tím by se zamezilo únikům tepla.



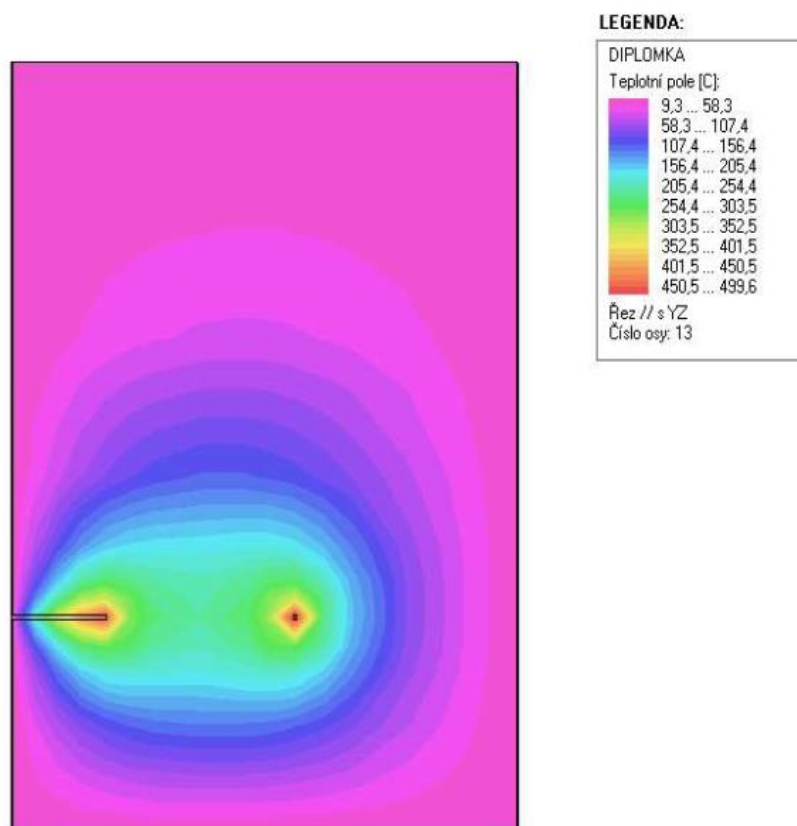
Obrázek 33: schéma nádoby s pískem pro simulaci 3

- 1 Plechový sud
- 2
- 3 Písek
- 4 Jednotlivé části topné spirály
- 5 Jednotlivé části topné spirály
- 6 Jednotlivé části topné spirály
- 7 Jednotlivé části topné spirály
- 8 Jednotlivé části topné spirály
- 9 Jednotlivé části topné spirály
- 10 Jednotlivé části topné spirály

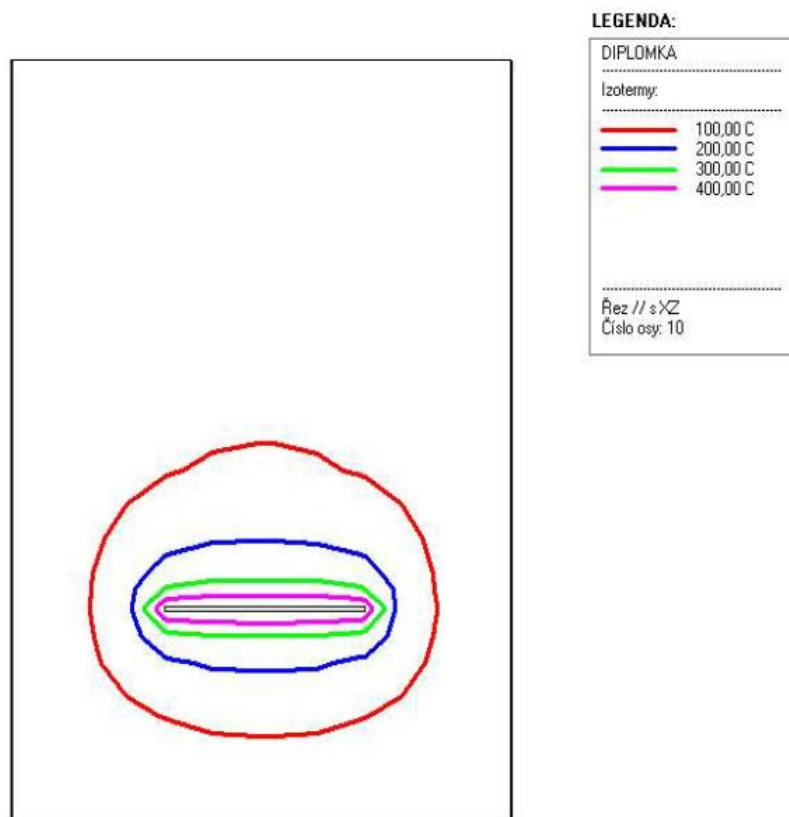
Obrázek 34: Legenda k obrázku 33



Obrázek 35: průběh teplot v půdorysu simulace 3



Obrázek 36: průběh teplot v řezu nádoby simulace 3

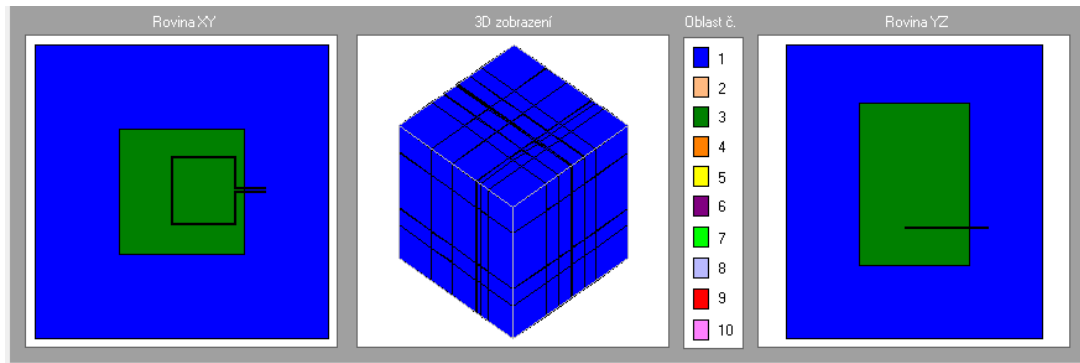


Obrázek 37: tepelné oblasti simulace 3

I bez zaizolování si dokáže písek udržet stabilní teplotu okolo 100 °C. Avšak pouze v malém množství a v relativně úzké blízkosti u spirály. Efektivita udržení tepla se však s odstraněním tepelné izolace značně snížila. Dle simulací lze usoudit, že akumulátor bude potřebovat určité množství tepelné izolace a nelze tepelnou izolaci nahradit větším množstvím písku, jak sem u dřívějších experimentů předpokládal.

3.4. Simulace 400 mm izolace

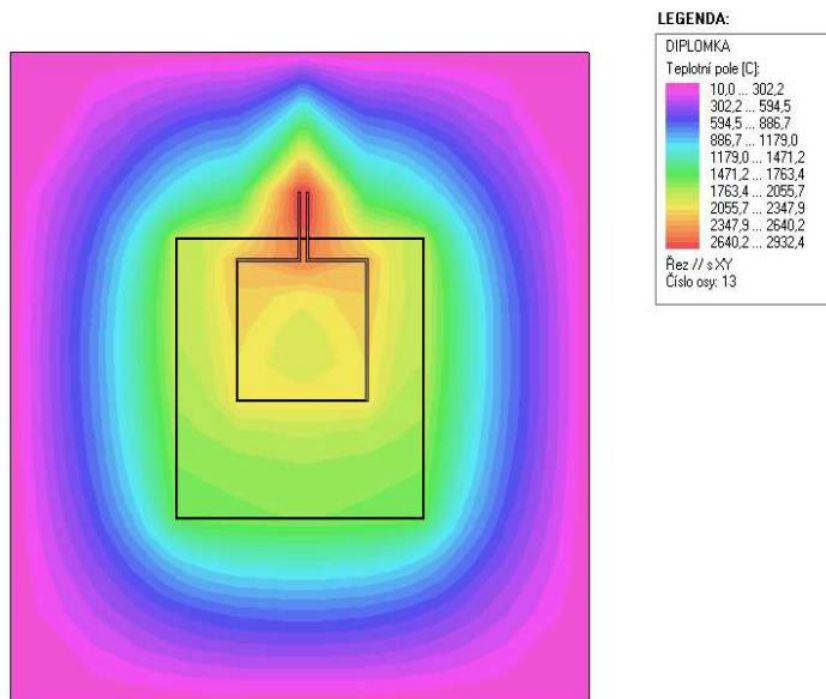
Při zaizolování nádoby 400 mm minerální vaty dojde k dosažení teplot písku ke 3000 °C, tedy více než je schopen pojmout bez změny skupenství. Dosažení těchto teplot je čistě teoretické a doba, kterou by trvalo těchto teplot dosáhnout není specifikována. Ani bychom těchto teplot nechtěli dosáhnout, ale ukazuje to na potenciál ohřevu při daném zaizolování.



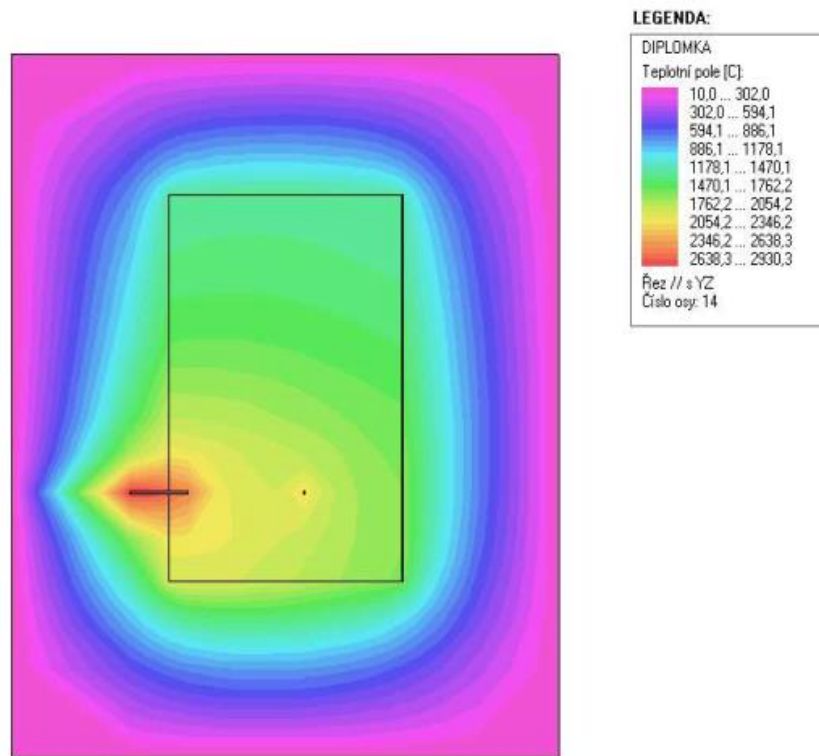
Obrázek 38: schéma simulace 4

- 1 Minerální vata ul. 100 mm
- 2 Vzduchová mezera mezi okrajem sudu a pískem
- 3 Písek
- 4 Jednotlivé části topné spirály
- 5 Jednotlivé části topné spirály
- 6 Jednotlivé části topné spirály
- 7 Jednotlivé části topné spirály
- 8 Jednotlivé části topné spirály
- 9 Jednotlivé části topné spirály
- 10 Jednotlivé části topné spirály

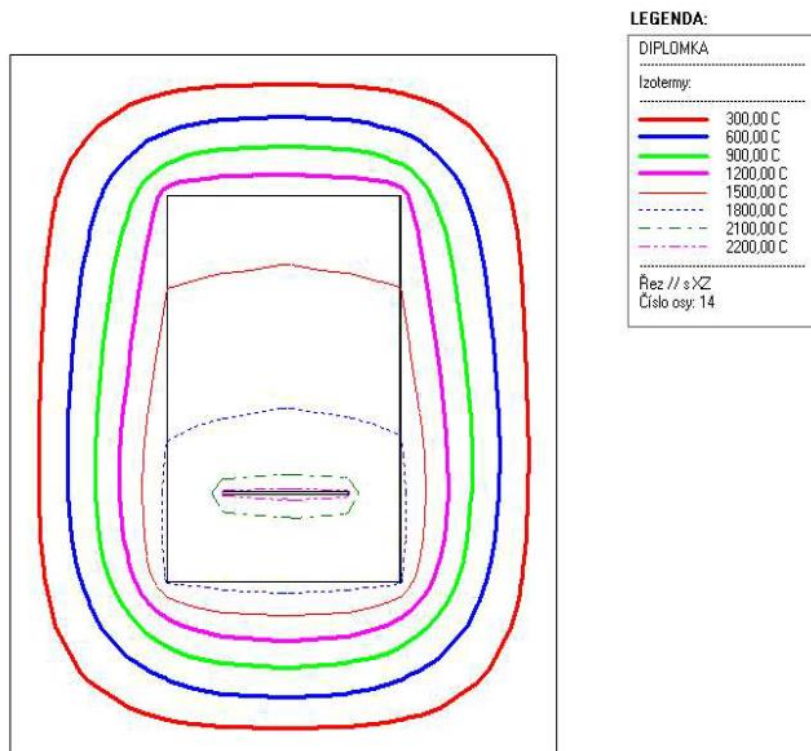
Obrázek 39: legenda k obrázku 38



Obrázek 40: průběh teplot v půdorysu simulace 4



Obrázek 41: průběh teplot v řezu simulace 4

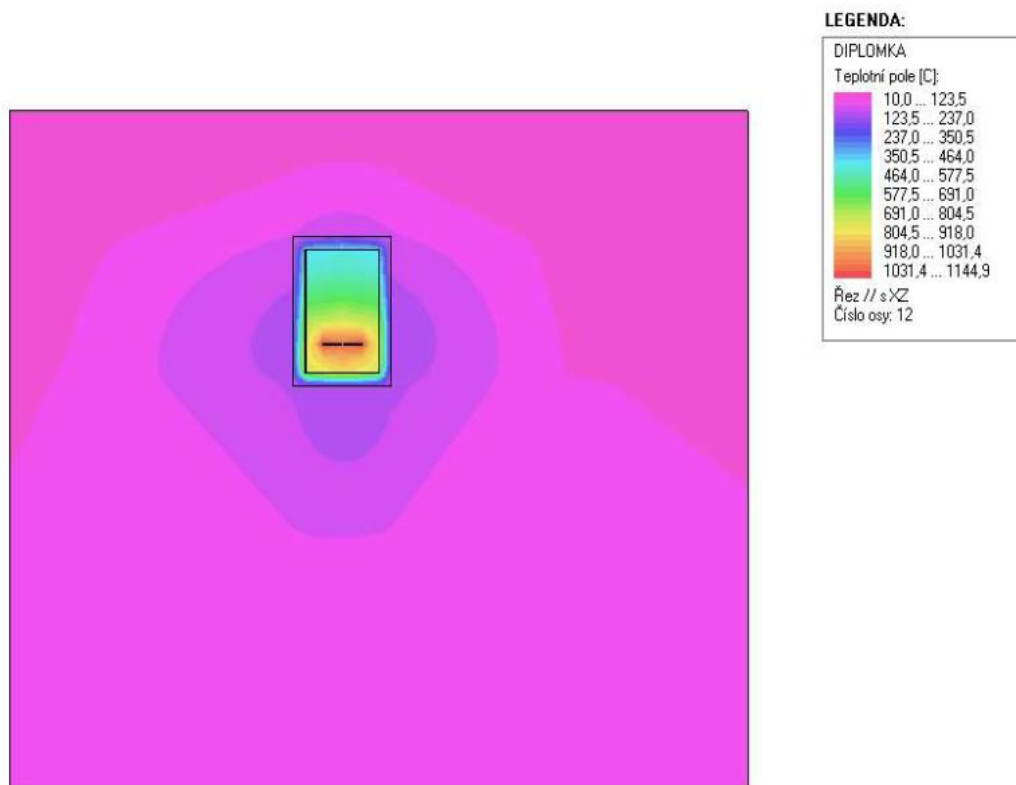


Obrázek 42: teplotní oblasti simulace 4

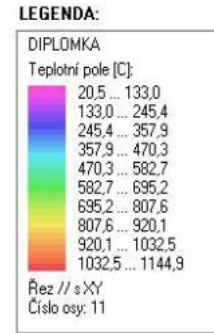
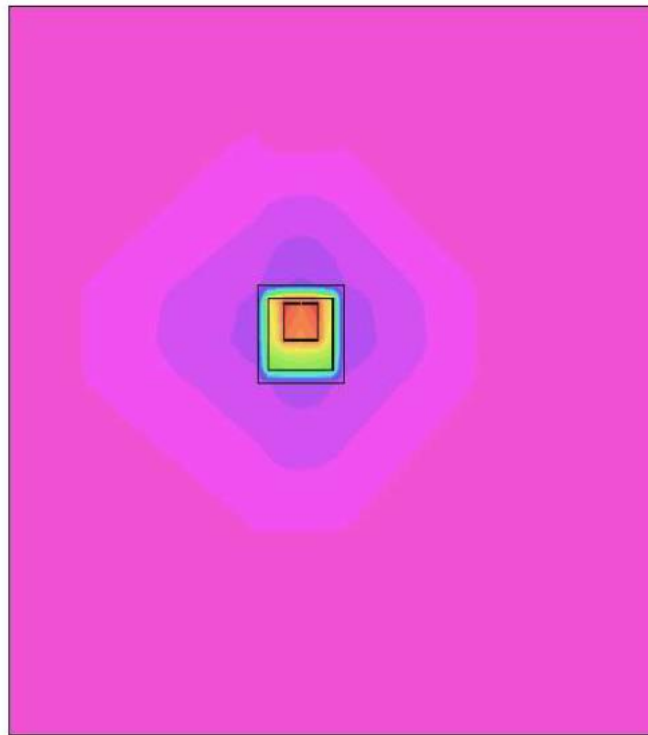
Zaizolování pískového akumulátoru tedy lze dosáhnout vysokých teplot, ale ty nejvyšší teploty jsou pouze v bezprostřední blízkosti spirály. Při dosažení těchto teplot by došlo k poškození materiálu i písku v některých místech. Je tedy třeba množství izolace napočítat dle požadovaných teplot a je třeba do písku umístit čidla aby nedošlo k přehřátí.

3.5 Simulace zakopaného akumulátoru s izolací

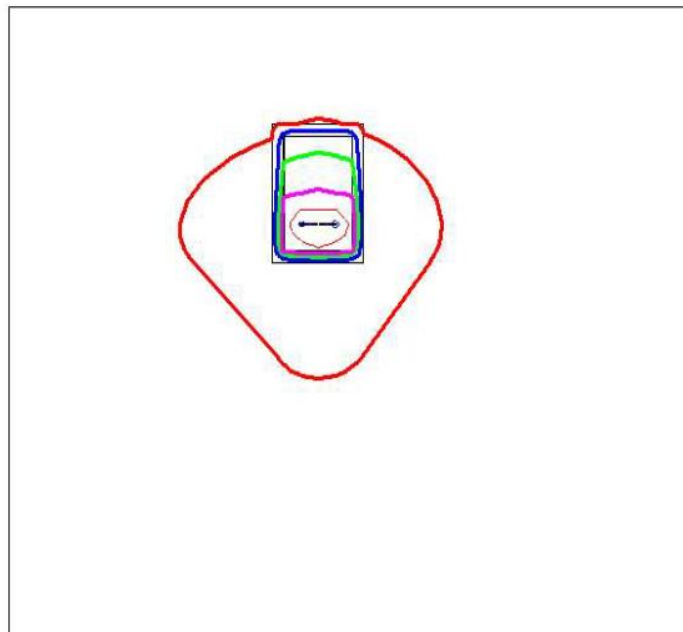
Byla provedena simulace zakopané experimentální nádoby do země. Experimentální nádoba byla ze všech stran obalena 100 mm minerální vaty a byla zakopána do nezámrzné hloubky 1 m.



Obrázek 43: průběhy teplot v řezu experimentální nádoby ze simulace 2



Obrázek 44: průběhy teplot v půdoryse simulace 5

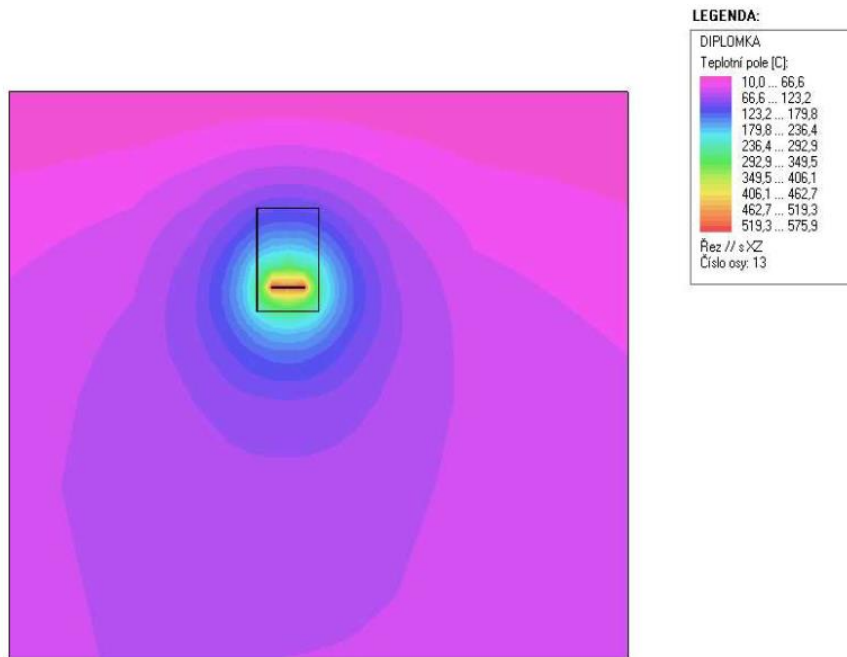


Obrázek 45: teplotní oblasti simulace 5

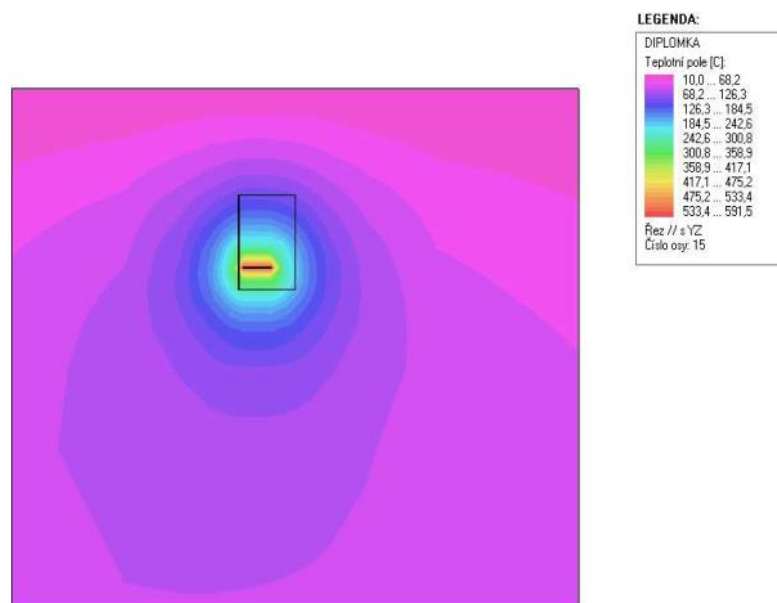
Můžeme tedy pozorovat, že zakopáním do země nebylo dosaženo nijak vyšších teplot oproti klasickému obalení akumulátoru 100 mm minerální vaty. Lze tedy říct, že se toto řešení nezdá izolačně nijak přínosné řešení.

3.6 Simulace zakopaného akumulátoru bez izolace

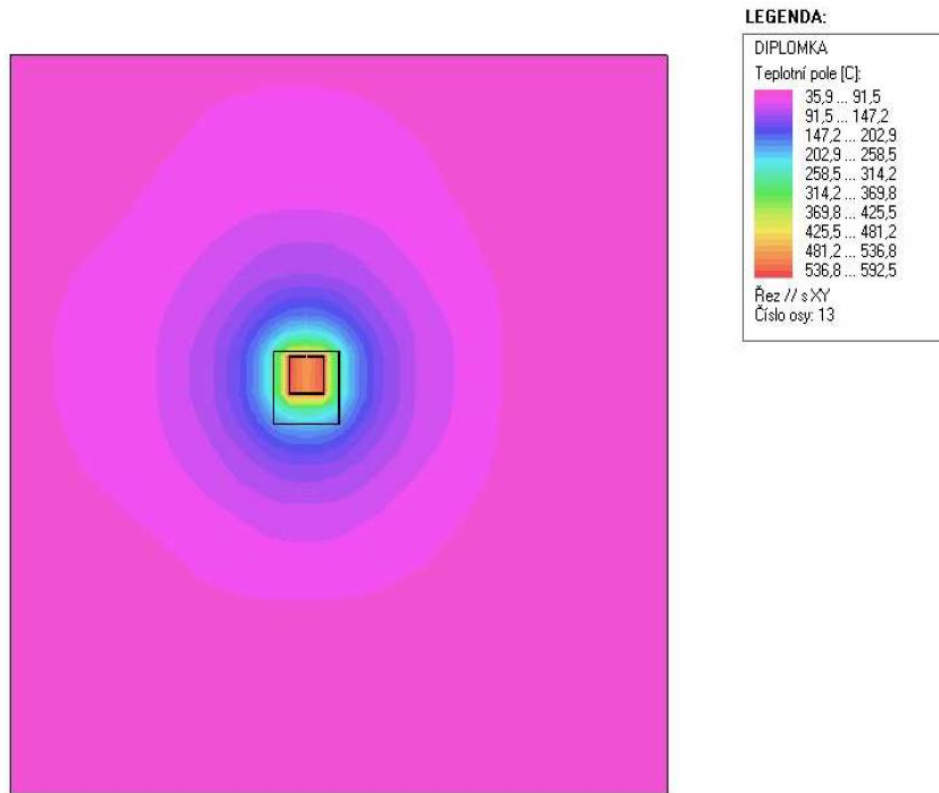
Nasimulována byla také nádoba bez tepelné izolace pro sledování průběhu teplot.



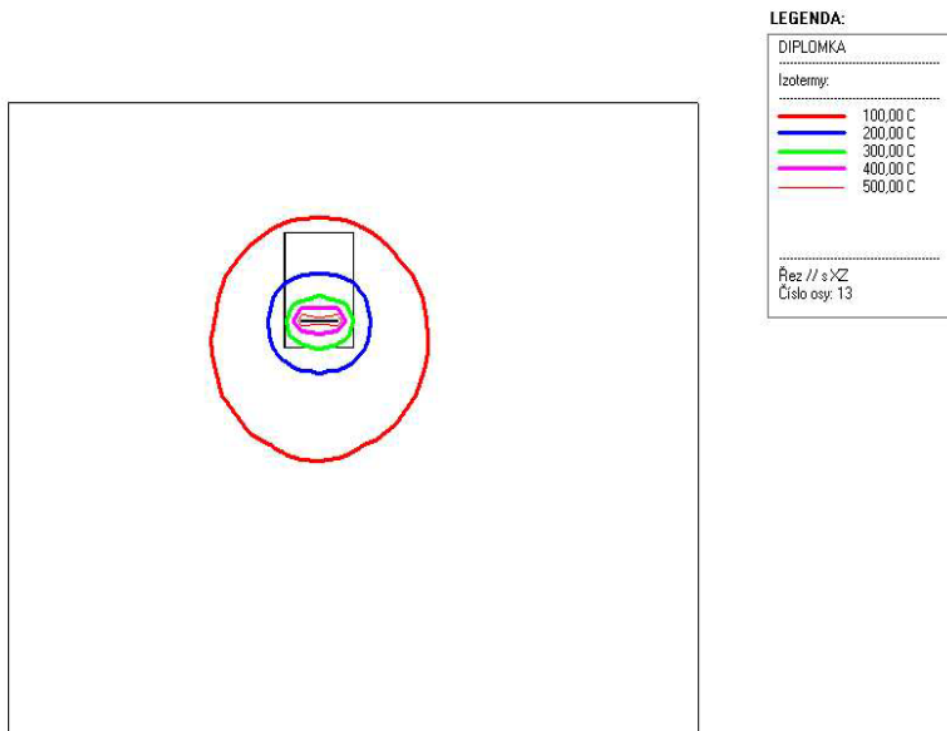
Obrázek 46: průběh teplot nádoby v zemi pohled zepředu simulace 6



Obrázek 47: průběh teplot v řezu pískové nádoby v zemi simulace 6



Obrázek 48: průběh teplot v půdoryse simulace 6



Obrázek 49: oblasti teplot simulace 6

V této simulaci lze sledovat, že teplota se šířila volně do všech směrů. Není to tedy nejefektivnější způsob izolace a pouze dochází ke ztrátám tepla do okolní země. Při dlouhodobém ohřevu dochází ke zbytečným ztrátám. Pro zvětšení účinnosti by bylo třeba přizpůsobit tvar akumulátoru tvaru šíření tepla.

Tepelné ztráty:

I u druhé fáze experimentů docházelo stále k velkým tepelným ztrátám, kterým by bylo v dalších pokusech třeba zamezit vložení zdroje tepla do středu nádoby, aby ve všech směrech bylo stejné množství písku a nedocházelo tak ve směru, kde je méně písku a tedy snazší vedení tepla, k únikům. Únikům tepla do okolí by zamezila rovněž lepší tepelná izolace. Hlavním nedostatkem v druhé fázi experimentů, kterému by bylo třeba v další fázi předejít, bylo neúplné zaizolování nádoby. Kompletním zaizolováním nádoby by se podle simulací, teploty písku zvedli skoro trojnásobně.

Vlhkost:

Je třeba lépe vysušit písek, zbavit ho vlhkosti, aby nedocházelo k tomu, že se bude část tepelné energie využívat k jejímu vypaření. Úplné odpaření vody z písku je docela náročné, obzvláště když je písek dlouhodobě skladován ve venkovním prostředí a je celý promočený. Když je písek už umístěn v nádobě a není vysušen, je jeho vysušení náročné z důvodu nutnosti prohřátí celé nádoby nad 100 °C s tím, že nádoba s pískem nesmí být kompletně uzavřena, aby bylo umožněno odpařenou vlhkost odvětrat a nedošlo v nádobě k opětovné kondenzaci, jako se stalo v experimentech. Bylo by tedy rozumnější písek vysušit před umístěním do nádoby, nejlépe písek rozhrnout ve vytápěné hale se vzduchotechnikou a odvlhčovači, tak by byl písek připraven pro maximální efektivní využití při ohřevu. Důležité také je zamezit vniknutí další vlhkosti do nádoby s pískem, tedy například zakopáním do země, což se může ukázat jako relativně složitý problém. Navíc vysoušení písku bude energeticky, prostorově i časově náročná činnost, kterou bude třeba zahrnout do pořizovací ceny.

Ohřev:

V prováděných experimentech byla k ohřevu písku využita topná spirála, která se z daných pokusů nezdá jako úplně nejefektivnější řešení. Při ohřevu písku topnou spirálou dochází k největšímu prohřátí v okolí spirály a teplota se velice pomalu šíří

od místa ohřevu dále po nádobě. Bylo by tedy vhodnější využít nějakého ohřevu, který by nebyl takto lokální, ale byl by rozveden po celém středu nádoby a došlo tak k rychlejšímu ohřátí písku. Myšleno je to tak, že topná spirála by byla například skoro v celé výšce sudu tak, aby mezi spodní a dolní hranou byla ochranná vrstva například 10 cm písku a nedocházelo v těchto místech k příliš velkým únikům tepla, ale došlo k prohřátí po celé výšce nádoby. Došlo by tak k ohřevu celého středu nádoby a teplo by se odtud rychleji šířilo do boků nádoby, kde by došlo k prohřátí zbylého množství písku. Ohřev by bylo možné provést pomocí média, tedy ohřát nejdříve například vzduch, poté vzduch prohnat skrz písek tak, aby došlo k co nejefektivnějšímu prohřátí, mohlo by tedy dojít k vytvoření více horkých míst, ze kterých by se teplo dále šířilo. Při nedostatečném vysušení písku může dojít k poškození části nádob rží a poškození elektronických částí.

Sedání:

Při ohřevu písku v nádobě bude třeba písek postupně po ohřevu dosypávat kvůli usednutí a případnému zbavení vlhkosti. Bude potřeba písku v nádobě dopomoci k usednutí vibračními prvky, anebo se po prvotním ohřevu bude muset písek do nádoby dosypávat kvůli usednutí při ohřevu. Pokud se písek bude vysoušet v nádobě, ve které bude finálně usazen, tak bude také potřeba písek dosypávat, protože dojde k úbytku hmoty.

Váha:

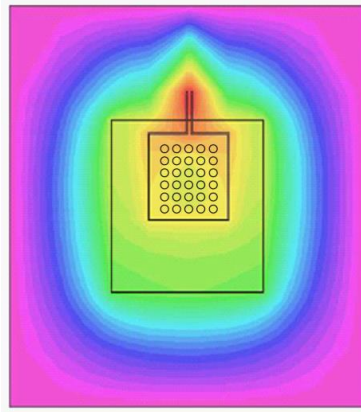
Kvůli velkému množství hmoty je složitá manipulace s nádobou, při potřebě nějaké výměny komponentů, opravě nebo přesunu nádoby je potřeba písek vyndat, aby mohlo dojít k přesunu. Manipulace s pískem není tak jednoduchá jako například u vody, tedy složitější technická podpora.

Závěr:

Z provedených simulací a experimentů hodnotím, že písek jako materiál je vhodný pro dlouhodobé ukládání tepla ale je třeba písek vysušit pro zvýšení efektivity ohřevu a zbavit nečistot, které by při ohřevu mohly hořet. Při ponechání vlhkosti v písku dojde ke snížení efektivity ohřevu a vlhkostí může docházet ke korozi a dalším poškozením materiálu. Dále je také třeba správná volba materiálů, které zvládnou velké změny teplot a nedojde u nich při dlouhodobém vystavení vysokým teplotám k poškození.

Nádobu s pískem je důležité kompletně zaizolovat dostatečnou tloušťkou tepelné izolace, ze simulace experimentu a simulace 2, můžeme pozorovat, jak velký dopad na teploty mělo zaizolování spodní strany experimentální nádoby. Pro zvýšení efektivity ohřevu je vhodné umístit zdroj tepla do středu nádoby, aby došlo k rovnoměrnému šíření tepla do všech směrů. Důležité je provést simulaci šíření tepla, aby se vyzorovalo, jak se teplo bude v dané situaci šířit a případně uzpůsobit tvar akumulční nádoby tvaru rozložení teplot a dále tak ohřev zefektivnit viz obrázky teplotních oblastí ze simulací. Efektivita retence tepla se zakopáním do země nijak výrazně nezlepšila, je to tedy spíše způsob, jak ušetřit místo.

Při využití akumulátoru pro odběr tepla je třeba provést dodatečné experimenty, ale už z mnou provedených experimentů se jeví, že vzdálenost odběrového média a topného zdroje bude mít značný dopad na rychlost odběru, efektivitu a dostupnou teplotu k odběru. V daných experimentech se jako nejefektivnější řešení ukazuje provést trubky s odběrovým médiem středem spirály viz obrázek 50. Teplo by se tak dalo odebírat hned při nabíjení a nemuselo by se čekat na prohřátí velkého množství písku. Dále by také fungoval provozní stav, kdy by se akumulátor nabíjel i vybíjel najednou. Dalšími provozními stavy by bylo samostatné nabíjení bez odběru a samostatný odběr bez nabíjení. Bylo by to tedy přizpůsobivé řešení, které by fungovalo v několika stavech. Záleželo by na provezech budovy a potřeby využití.



Obrázek 50: možný odběr tepla v experimentech

Jako odběrové médium tepla je třeba využít prvek, který dokáže přenášet vysoké teploty bez změn tlaků. Z provedených rešerší a dostupných informací se mi jako nejlepší přenosové médium jeví vzduch.

Dále je třeba u praktického využití tohoto řešení stále sledovat teploty v akumulátoru, aby nedošlo v obdobích vyšší produkce energie, k přehřátí akumulátoru a tedy jeho následného poškození. Je tedy třeba u každého řešení navrhnout umístění monitorovacích zařízení aby se zabránilo přehřátí.

V dalších experimentech bych pokračoval s plně zaizolovanou nádobou a zavedeným odběrem tepla pomocí potrubí, ve kterém by byl proháněn vzduch do výměníku vzduch-voda a tato ohřátá voda by se následně využívala pro vytápění a ohřev teplé užitkové vody. Z těchto dalších experimentů by se dalo následně spočítat, jak efektivní odběr je a kolik tepla je třeba odebírat, dále kolik je tepla možno uložit pomocí fotovoltaických panelů a dále tedy určit efektivní množství písku pro potřeby budov.

Ze simulací bohužel nejde zjistit, jak dlouho by trvalo, než se dosáhne ustáleného stavu teplot a je třeba tedy dále experimentovat s ohřevem, aby se zajistila efektivní doba ohřevu pomocí správně navržené izolace a dostatečně výkonné topné spirály. Doba ohřevu se dá zkrátit pomocí dostatečné izolace a výkonnější spirály, je tedy potřeba zjistit podle množství odebíraného tepla a doby nabíjení zásobníku, jak dlouho a kdy začít akumulátor nabíjet, aby nedošlo k přehřátí a bylo naakumulováno dostatečné množství energie.

Seznam obrázků

OBRÁZEK 1: OBECNÝ DIAGRAM PÍSKOVÉHO AKUMULÁTORU OD POLAR NIGHT ENERGY [11].....	13
OBRÁZEK 2: FUNGOVÁNÍ OHŘEVU A VYBÍJENÍ PÍSKOVÉ BATERIE U POLAR NIGHT ENERGY [7].....	14
OBRÁZEK 3: KOMPAKTNÍ PŘEDÁVACÍ STANICE WATT [14]	14
OBRÁZEK 4: PÍSKOVÝ AKUMULÁTOR PRO PASIVNÍ VYTÁPĚNÍ [12]	16
OBRÁZEK 5: TEPEM POHÁNĚNÝ VENTILÁTOR NA DOMÁCÍ PÍSKOVÉ BATERII [13].....	17
OBRÁZEK 6: PÍSEK S TOPNOU SPIRÁLOU Z BOJLERU	23
OBRÁZEK 7: UMÍSTĚNÍ ČIDEL V TROUBĚ	25
OBRÁZEK 8: UMÍSTĚNÍ ČIDEL UVNITŘ TROUBY	26
OBRÁZEK 9: TROUBA PRO EXPERIMENT	26
OBRÁZEK 10: VNITŘEK TROUBY	27
OBRÁZEK 11: HORNÍ STRANA TROUBY	27
OBRÁZEK 12: ZADNÍ STRANA TROUBY	27
OBRÁZEK 13: NAPLNĚNÍ TROUBY PÍSKEM	27
OBRÁZEK 14: UMÍSTĚNÍ ČIDEL V SUDU.....	42
OBRÁZEK 15: ZAIZOLOVÁNÍ SUDU	42
OBRÁZEK 16: UMÍSTĚNÍ OHŘEVU V SUDU.....	42
OBRÁZEK 17: UMÍSTĚNÍ SPODNÍCH ČIDEL V SUDU	42
OBRÁZEK 18: UMÍSTĚNÍ HORNÍCH ČIDEL	43
OBRÁZEK 19: UMÍSTĚNÍ SPIRÁLY A SPODNÍCH ČIDEL.....	43
OBRÁZEK 20: UMÍSTĚNÍ SPODNÍCH ČIDEL V EXPERIMENTÁLNÍ NÁDOBĚ	57
OBRÁZEK 21: UMÍSTĚNÍ HORNÍCH ČIDEL V EXPERIMENTÁLNÍ NÁDOBĚ.....	57
OBRÁZEK 22: MODEL SIMULACE EXPERIMENTÁLNÍHO STAVU	65
OBRÁZEK 23: LEGENDA MODELU	65
OBRÁZEK 24: PRŮBĚH TEPLIT V PŮDORYSU EXPERIMENTÁLNÍ NÁDOBY	66
OBRÁZEK 25: PRŮBĚH TEPLIT V ŘEZU EXPERIMENTÁLNÍ NÁDOBY	66
OBRÁZEK 26: TEPLTNÍ OBLASTI EXPERIMENTÁLNÍ NÁDOBY	67
OBRÁZEK 27: SCHÉMA PROVEDENÉ SIMULACE.....	68
OBRÁZEK 28: LEGENDA K OBRÁZKU 27.....	68
OBRÁZEK 29: PRŮBĚH TEPLIT V PŮDORYSU SIMULACE 2.....	69
OBRÁZEK 30: PRŮBĚH TEPLIT V ŘEZU NÁDOBY SIMULACE 2	69
OBRÁZEK 31: TEPELNÉ OBLASTI 100-800 °C SIMULACE 2.....	70
OBRÁZEK 32: TEPELNÉ OBLASTI 800-1100 °C SIMULACE 2.....	70
OBRÁZEK 33: SCHÉMA NÁDOBY S PÍSKEM PRO SIMULACI 3	71
OBRÁZEK 34: LEGENDA K OBRÁZKU 33	71
OBRÁZEK 35: PRŮBĚH TEPLIT V PŮDORYSU SIMULACE 3.....	72
OBRÁZEK 36: PRŮBĚH TEPLIT V ŘEZU NÁDOBY SIMULACE 3	72
OBRÁZEK 37: TEPELNÉ OBLASTI SIMULACE 3	73
OBRÁZEK 38: SCHÉMA SIMULACE 4.....	74

OBRÁZEK 39: LEGENDA K OBRÁZKU 38.....	74
OBRÁZEK 40: PRŮBĚH TEPLIT V PŮDORYSU SIMULACE 4.....	74
OBRÁZEK 41: PRŮBĚH TEPLIT V ŘEZU SIMULACE 4	75
OBRÁZEK 42: TEPLITNÍ OBLASTI SIMULACE 4	75
OBRÁZEK 43: PRŮBĚHY TEPLIT V ŘEZU EXPERIMENTÁLNÍ NÁDOBY ZE SIMULACE 2...	76
OBRÁZEK 44: PRŮBĚHY TEPLIT V PŮDORYSE SIMULACE 5.....	77
OBRÁZEK 45: TEPLITNÍ OBLASTI SIMULACE 5	77
OBRÁZEK 46: PRŮBĚH TEPLIT NÁDOBY V ZEMI POHLED ZEPŘEDU SIMULACE 6	78
OBRÁZEK 47: PRŮBĚH TEPLIT V ŘEZU PÍSKOVÉ NÁDOBY V ZEMI SIMULACE 6	78
OBRÁZEK 48: PRŮBĚH TEPLIT V PŮDORYSE SIMULACE 6	79
OBRÁZEK 49: OBLASTI TEPLIT SIMULACE 6.....	79
OBRÁZEK 50: MOŽNÝ ODBĚR TEPLA V EXPERIMENTECH	83

Seznam grafů:

GRAF 1: PRŮBĚH TEPLIT PÍSKU V TROUBĚ	28
GRAF 2: PRŮBĚH TEPLIT PÍSKU V TROUBĚ	30
GRAF 3: PRŮBĚH TEPLA PŘI SUŠENÍ PÍSKU	34
GRAF 4: PRŮBĚH TEPLIT V PÍSKU BEZ OHŘEVU	36
GRAF 5: PRŮBĚH TEPLIT NAD 125 °C.....	39
GRAF 6: PRŮBĚH TEPLIT PÍSKU V SUDU S ČIDLEM V BLÍZKOSTI SPIRÁLY.....	45
GRAF 7: PRŮBĚHY TEPLIT V EXPERIMENTU 8	54
GRAF 8: PRŮBĚHY JEDNOTLIVÝCH TEPLIT EXPERIMENTU 9.....	60

Seznam tabulek:

TABULKA 1: POČÁTEČNÍ TEPLITY PÍSKU EXPERIMENTU 8.....	49
TABULKA 2: TEPLITY PÍSKU PO PRVNÍM OHŘEVU EXPERIMENTU 8.....	49
TABULKA 3: MAXIMÁLNÍ PRŮMĚRNÁ TEPLITA PÍSKU EXPERIMENTU 8	49
TABULKA 4: TEPLITY PŘI UKONČENÍ OHŘEVU EXPERIMENTU 8	50
TABULKA 5: TEPLITY PŘED DRUHÝM OHŘEVEM EXPERIMENTU 8	50
TABULKA 6: TEPLITY PO UKONČENÍ DRUHÉHO OHŘEVU EXPERIMENTU 8.....	50
TABULKA 7: MAXIMÁLNÍ DOSAŽENÁ TEPLITA PÍSKU EXPERIMENTU 8.....	51
TABULKA 8: MAXIMÁLNÍ DOSAŽENÁ PRŮMĚRNÁ TEPLITA PÍSKU EXPERIMENTU 8	51
TABULKA 9: POČÁTEČNÍ TEPLITY PÍSKU EXPERIMENT 9	58
TABULKA 10: TEPLITA PÍSKU PO PRVNÍM OHŘEVU EXPERIMENT 9.....	58
TABULKA 11: MAXIMÁLNÍ PRŮMĚRNÁ TEPLITA PÍSKU PO PRVNÍM OHŘEVU EXPERIMENTU 9	58
TABULKA 12: MAXIMÁLNÍ TEPLITY PÍSKU PŘI DRUHÉM OHŘEVU EXPERIMENT 9.....	58
TABULKA 13: TEPLITY PÍSKU PŘI SPUŠTĚNÍ DRUHÉHO OHŘEVU EXPERIMENT 9.....	59
TABULKA 14: MAXIMÁLNÍ PRŮMĚRNÁ TEPLITA PÍSKU EXPERIMENT 9.....	59
TABULKA 15: PRŮBĚH MAXIMÁLNÍ DOSAŽENÉ TEPLITY PÍSKU EXPERIMENT 9	59
TABULKA 16: TEPLITY PÍSKU PŘI UKONČENÍ MĚŘENÍ	60

Seznam citované literatury

- [1] SAINI, Puneet, Ville KIVIOJA, Liisa NASKALI, Joakim BYSTRÖM, Carlo SEMERARO, Andrea GAMBARDELLA a Xingxing ZHANG. Techno-economic assessment of a novel hybrid system of solar thermal and photovoltaic driven sand storage for sustainable industrial steam production. *Energy Conversion and Management* [online]. 2023(292), 18 [cit. 2023-11-25]. ISSN 0196-8904. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890423007604>
- [2] WOLF, Sara. PARADISE ENERGY SOLUTION. What's the lifespan of a Solar Battery. *Paradise Energy Solutions* [online]. [cit. 2023-11-25]. Dostupné z: <https://www.paradisolarenergy.com/blog/how-long-do-solar-batteries-last>
- [3] FRANKEL, Todd C. THE WASHINGTON POST. The Cobalt Pipeline. *The Washington Post* [online]. 2016 [cit. 2023-11-25]. Dostupné z: <https://www.washingtonpost.com/graphics/business/batteries/congo-cobalt-mining-for-lithium-ion-battery/>
- [4] POWELL, Lee a Ricky CARIOTI. THE WASHINGTON POST. How lithium gets from the earth into your electric car. *The Washington Post* [online]. 2023 [cit. 2023-11-25]. Dostupné z: <https://www.washingtonpost.com/business/interactive/2023/how-is-lithium-mined/>
- [5] *Polar Night Energy* [online]. 2022 [cit. 2023-12-19]. Dostupné z: <https://polarnightenergy.fi/technology>
- [6] *What Is a Sand Battery? Polar Night Energy's Sand-based Thermal Energy Storage Explained* [online]. In: . [cit. 2023-12-19]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?time_continue=1&v=bZ9TyJ1bQ3Y&embeds_referring_euri=https%3A%2F%2Fpolarnightenergy.fi%2F
- [7] PRASAD, Seema. Dirt cheap backup: Why Finland's installation of the world's 1st sand battery may be a game-changer. Online. *DownTOEarth*. 2023. Dostupné z: <https://www.downtoearth.org.in/news/energy/dirt-cheap-backup-why-finland-s-installation-of-the-world-s-1st-sand-battery-may-be-a-game-changer-87804>. [cit. 2023-12-20].
- [8] BENKE, Erika. A new way of storing renewable energy is providing clean heat through the long Nordic nights. Online. *Future Planet*. 2022. Dostupné

z: <https://www.bbc.com/future/article/20221102-how-a-sand-battery-could-transform-clean-energy>. [cit. 2023-12-20].

[9] NEWCOMB, Tim. This Massive ‘Sand Battery’ Can Store Excess Solar and Wind Energy for Months. *POPULAR MECHANICS* [online]. 2022, **2022** [cit. 2023-12-20]. Dostupné z: <https://www.popularmechanics.com/science/energy/a41869336/sand-battery/>

[10] BLŮMELOVÁ, Kristina Kadlas. Pískové baterie mají potenciál ekologického a velmi efektivního způsobu skladování energie. Online. *Technický týdeník*. 2022, roč. 2022. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/poutaky/piskove-baterie-maji-potencial-ekologickeho-a-velmi-efektivniho-zpusobu-skladovani-energie_57085.html. [cit. 2023-12-20].

[11] CARTER, Ninian. Sand battery experiment creates eco-friendly central heating. Online. *Graphic News*. 2022, roč. 2022. Dostupné z: <https://www.graphicnews.com/en/pages/42921/environment-sand-battery-green-heating-solution>. [cit. 2023-12-20].

[12] RAMLOW, Bob. Warm, Radiant Comfort in the sand. Online. *Solar Today*. 2007, s. 5. Dostupné z: https://web.archive.org/web/20150712073105/http://www.arthaonline.com/Word%20Files/Ramlow_SolarToday_ND07.pdf. [cit. 2023-12-27].

[13] desertsun02. 5 DIY Sand Battery Space Heaters! with Heating Elements! 300F/150C (self-regulating Ceramic PTC) 12v. Online. In: . Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=MM0d4fVKMoI&t=89s>. [cit. 2024-01-03].

[14] WATT+. *ULTRAÚSPORNÁ PÍSKOVÁ ÚLOŽIŠTĚ WATT sand+*. Online. WATT PLUS S.R.O. Wattplus.cz. 2023. Dostupné z: <https://www.wattplus.cz/sandplus/>. [cit. 2024-01-03].

[15] ZUOLOVÁ, Lenka. Češi vymysleli nový způsob, jak akumulovat teplo v písku. Budou tak vytápět domy. Online. *Novinky.cz*. Roč. 2023. Dostupné z: <https://www.novinky.cz/clanek/bydleni-cesi-vymysleli-novy-zpusob-jak-akumulovat-teplo-v-pisku-budou-tak-vytapet-domy-40447160>. [cit. 2024-01-07].

[16] BENKE, Erika. A new way of storing renewable energy is providing clean heat through the long Nordic nights. Online. *BBC Future Planet*. 2022. Dostupné

z: <https://www.bbc.com/future/article/20221102-how-a-sand-battery-could-transform-clean-energy>. [cit. 2024-01-07].

[17] POSCH, Maya. MAKING A DO-IT-YOURSELF SAND BATTERY. Online. *HACKADAY*. 2022. Dostupné z: <https://hackaday.com/2022/11/21/making-a-do-it-yourself-sand-battery/>. [cit. 2024-07-01].

Použitý kód

```
import serial

from datetime import datetime, timedelta

import pandas as pd

import openpyxl

import os

import paho.mqtt.client as mqtt

import time

def get_str_between(start, end, string):

    return str(string).split(start)[1].split(end)[0]

# MQTT

power="" #W

voltage="" #V

current="" #A

energy="" #kWh

state=""

def on_connect(client, userdata, flags, rc):

    print("Connected with result code "+str(rc))

    client.subscribe("zigbee2mqtt/zasuvka_1")

def on_message(client, userdata, msg):

    global power

    global voltage

    global current

    global energy

    global state
```



```
#print(msg.payload)

#print(msg.topic+" "+str(msg.payload))

power = get_str_between(string = msg.payload, start = "\"power\":", end =
",\"power_outage_memory\"")

voltage = get_str_between(start = "\"voltage\":",end = "}",string = msg.payload)

current = get_str_between(start = "\"current\":",end = ",\"energy\"",string = msg.payload)

energy = get_str_between(start = "\"energy\":",end = ",\"indicator_mode\"",string =
msg.payload)

state = get_str_between("\"state\":", ",\"voltage\"", msg.payload).replace("\"", "")

client = mqtt.Client()

client.on_connect = on_connect

client.on_message = on_message

client.connect("localhost", 9000, 60)

# TEMP

port = input("Enter serial port: ")
temp_limit = input("Enter temp limit: ")

read_delay = 5

if temp_limit == "":
    temp_limit = 100000
else:
    temp_limit = int(temp_limit)

ser = serial.Serial(port=port, baudrate=9600)

data = []

save_folder="./mereni/"

if(not os.path.exists(save_folder+"backups/")):
    os.makedirs(save_folder+"backups/")

def save():
```

```
df = pd.DataFrame(data,
                  index=[i for i in range(len(data))], columns=['time', 'sensor1(C)', 'sensor2(C)',
                    'sensor3(C)', 'sensor4(C)', 'sensor5(C)', 'sensor6(C)', 'sensor7(C)', "power(W)", "voltage(V)",
                    "current(A)", "energy(kWh)"])

now = datetime.now()

current_time = now.strftime("%d.%m_%H_%M")

name = "mereni_"+current_time+".xlsx"

df.to_excel(str(save_folder+name), sheet_name='teploty')

with open(str(save_folder+"backups/mereni_"+current_time+".bac"), "w") as f:

    f.write(str(data))

    f.close()

#print(df)

last_data_append_time = datetime.now() - timedelta(minutes=read_delay)

try:

    while True:

        client.loop()

        line = str(ser.readline())

        #print(line)

        sensor1 = line.split("Sensor1:")[1].split("Sensor2:")[0]
        sensor2 = line.split("Sensor2:")[1].split("Sensor3:")[0]
        sensor3 = line.split("Sensor3:")[1].split("Sensor4:")[0]
        sensor4 = line.split("Sensor4:")[1].split("Sensor5:")[0]
        sensor5 = line.split("Sensor5:")[1].split("Sensor6:")[0]
        sensor6 = line.split("Sensor6:")[1].split("Sensor7:")[0]
        sensor7 = line.split("Sensor7:")[1].split("\n")[0].replace("\n", "")

        #print(float(sensor1), " >= ", temp_limit + 2, " or ", float(sensor2), " >= ", temp_limit +
        2, " and ON==", state)

        if not temp_limit == 100000:

            if (float(sensor1) >= temp_limit + 2 or float(sensor2) >= temp_limit + 2 or
            float(sensor3) >= temp_limit + 2) and state=="ON":

                print("Sensor temp on limit. Turning off.")

                client.publish("zigbee2mqtt/zasuvka_1/set", "{\"state\":\"OFF\"}")

            if float(sensor1) <= temp_limit - 2 and float(sensor2) <= temp_limit - 2 and
            float(sensor3) <= temp_limit - 2 and state=="OFF":
```

```
        print("Sensor temp under limit. Turning on.")
        client.publish("zigbee2mqtt/zasuvka_1/set", "{\"state\":\"ON\"}")
    client.loop()
    now = datetime.now()
    current_time = now.strftime("%H:%M:%S")
    # Append data to the list if 5 minutes have passed since the last append
    if now - last_data_append_time >= timedelta(minutes=read_delay):
        data.append([current_time, sensor1, sensor2, sensor3, sensor4, sensor5, sensor6,
                    sensor7, power, voltage, current, energy])
        last_data_append_time = last_data_append_time + timedelta(minutes=read_delay) #
        Update the last append time
        with
        open(save_folder+"/backups/tmp/mereni_"+now.strftime("%d.%m_%H_%M")+".bac", "w")
        as f:
            f.write(str(data))
            f.close()
        print(f"Time: {current_time} Sensor1: {sensor1} Sensor2: {sensor2} Sensor3:
        {sensor3} Sensor4: {sensor4} Sensor5: {sensor5} Sensor6: {sensor6} Sensor7: {sensor7}
        Power: {power} Voltage: {voltage} Current: {current} Energy: {energy}")

except KeyboardInterrupt:
    print("Saving...")
    save()
    print("Saved!")
    exit(0)

except Exception as e:
    print("Saving...")
    save()
    print("Saved!")
    print("Some problems occurred...")
    print(str(e))
```