



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

VYSOKOTEPLTNÍ AKUMULACE ENERGIE

HIGH TEMPERATURE ENERGY STORAGE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Lukáš Roden

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	Bc. Lukáš Roden
Studijní program:	Energetické a termofluidní inženýrství
Studijní obor:	Energetické inženýrství
Vedoucí práce:	doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
Akademický rok:	2022/23

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

Vysokoteplotní akumulace energie

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Téma je zaměřeno na akumulaci tepelné energie do pískových akumulátorů s teplotou až 600° C. Následné využití energie je možné buď v podobě nižších teplot pro vytápění nebo na vyšších teplotách pro návazný tepelný oběh. V průběhu řešení bude zpracována rešerše o vysokoteplotní akumulaci, následně bude proveden návrh vysokoteplotního pískového akumulátoru pro zásobování rodinného domu tepelnou energií.

Cíle diplomové práce:

1. Zpracovat rešeršní přehled o akumulaci tepla.
2. Představit vybrané dohledatelné realizace.
3. Realizovat vlastní návrh pískového vysokoteplotního akumulátoru pro rodinný dům.
4. Provést návrh a zhodnocení provozních režimů a ekonomiky provozu navrženého akumulátoru.

Seznam doporučené literatury:

PAVELEK, Milan. Termomechanika. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 192 s., ISBN 978-80-214-4300-6.

JÍCHA, Miroslav. Přenos tepla a látky. Brno: CERM, 2001, 160 s. ISBN 80-214-2029-4.

JIATONG, Jiang, BIN, Hu, R.Z. Wang, Na Deng, Feng Cao, Chi-Chuan Wang, A review and perspective on industry high-temperature heat pumps, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 161, 2022, 112106, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112106>.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Při narůstajícím podílu obnovitelných zdrojů v energetice je třeba vyvíjet technologie skladování energie, ať už jde o skladování elektřiny či tepla. Hlavním cílem této práce je návrh a posouzení vysokoteplotního akumulátoru pro dlouhodobé uskladnění tepelné energie. Navrhovaný zásobník je počítán pro potřeby rodinného domu pokrytého fotovoltaickými panely. V simulaci chování akumulátoru je využito numerických metod v programu Excel. Jedním z hlavních zjištěných nedostatků je velké množství potrubí, které je potřeba pro dodávky a odběr tepla. Tyto a další související nedostatky znemožňují jeho ekonomicky výhodné použití bez patřičných úprav.

Klíčová slova

Akumulátor tepelné energie, vysokoteplotní akumulace, písek, dlouhodobá akumulace, horký vzduch

ABSTRACT

Because of an increase share of renewable energy, there is a need to develop energy storage technologies, whether it is the electricity or the heat one. The main goal of this thesis is to design and assess a high temperature energy storage used for a long-term accumulation of a thermal energy. The designed storage is calculated for the needs of a family house with photovoltaic panels. It is used numerical method in the Excel software to simulate behaviour in storage. One of the biggest lack is a storage is large number of tubes, which are needed for a heat delivery into and out of the storage. This and the other related lacks make it impossible to a cost-effective application without the appropriate modifications.

Key words

Thermal energy storage, high-temperature accumulation, sand, long-term accumulation, hot air

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

RODEN, Lukáš. *Vysokoteplotní akumulace energie* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-01-20]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/149690>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Jiří Pospíšil.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem *diplomovou* práci na téma **Vysokoteplotní akumulace energie** vypracoval(a) samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. Ing. Jiřímu Pospíšilovi, Ph.D. za cenné připomínky, rady a vřelé jednání při vypracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za podporu a své přítelkyni nejen za podporu, ale i za trpělivost a čas, který věnovala korektuře mé práce.

OBSAH

ÚVOD.....	11
1 Principy akumulace tepla.....	12
1.1 Akumulace s využitím citelného tepla.....	12
1.2 Akumulace s využitím skupenského tepla.....	12
1.3 Akumulace s využitím sorpčního tepla.....	13
1.4 Akumulace s využitím chemických reakcí	13
2 Tepelné zásobníky	14
2.1 Akumulátory využívající citelné teplo.....	14
2.1.1 Vodou plněné zásobní tanky	14
2.1.2 Horninové zásobníky.....	15
2.1.3 Půdní zásobníky	15
2.1.4 Zásobníky Aquifer.....	16
2.2 Akumulátory využívající latentní teplo	16
2.3 Akumulátory využívající termochemické reakce	17
2.3.1 Akumulátory využívající sorpční teplo	17
3 Rozdělení tepelných zásobníků na citelné teplo.....	18
3.1 Podle doby akumulace	18
3.2 Podle rozsahu pracovních teplot akumulátoru.....	18
3.2.1 Podle časopisu Energy Procedia	18
3.2.2 Podle časopisu Energy	18
4 Obecný návrh akumulátoru	20
4.1 Teplonosná tekutina	20
4.2 Zásobník.....	20
4.3 Akumulační médium.....	20
5 Současná zařízení	25
5.1 Polar Night Energy	25
5.2 Tepelná baterie Rondo	26
5.3 MGA Thermal.....	27
5.4 ENERGYNEST	28
5.5 Technologie roztavených solí	29
6 Konkrétní návrh akumulátoru.....	30
6.1 Výpočet potřebného výkonu akumulátoru.....	30
6.1.1 Potřeba tepla pro vytápění.....	30
6.1.2 Potřeba pro ohřev teplé užitkové vody (TUV).....	32
6.1.3 Celková roční potřeba energie na vytápění a ohřev TUV	32
6.2 Základní návrh konstrukce akumulátoru	33
6.3 Příkon ohříváče	33
6.4 Vlastnosti materiálů	35
6.4.1 Vlastnosti vzduchu	35
6.4.2 Materiál trubek a stěn zásobníku.....	38

6.4.3	Vlastnosti písku	38
6.4.4	Vlastnosti izolace	41
6.5	Součinitel přestupu tepla uvnitř trubky	43
6.5.1	Kritéria podobnosti	43
6.6	Konvekce vně zásobníku	45
6.6.1	Konvekce u stěn zásobníku	45
6.6.2	Konvekce z vrchní části zásobníku	47
6.7	Odhad hmotnosti písku	48
6.8	Metoda výpočtu	49
6.9	Ztráty z horní části zásobníku	49
6.10	Ztráty ve spodní části zásobníku	50
6.11	Nabíjecí fáze	51
6.11.1	Teplota povrchu zásobníku	55
6.11.2	Výpočet rozměrů a množství nabíjecích trubek	55
6.12	Vyrovnávací fáze	57
6.13	Vybíjecí fáze	58
6.13.1	Výpočet rozměrů a množství vybíjecích trubek	58
6.13.2	Směšovací výměník	61
6.14	Upravení velikosti zásobníku	61
6.14.1	Nové rozestavení potrubí	62
6.15	Přidružené komponenty zásobníku	63
6.16	Numerické řešení chování akumulátoru	64
7	Ekonomické zhodnocení	72
7.1	Investice	72
7.2	Úspora	73
	ZÁVĚR	74
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	75
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	79

ÚVOD

Poslední roky byly pro Evropu a její energetiku napjaté. Ceny ropy a zemního plynu prudce vzrostly, a dokonce hrozil jejich nedostatek. Plánové snížení spotřeby fosilních paliv, především uhlí a zemního plynu, je v ohrožení. Proto se začala hledat nová inovativní řešení. Taková, která budou co možná nejlevnější a budou zohledňovat energetickou soběstačnost, čímž i bezpečnost Evropy v oblasti energetiky. Ať už je řeč o jaderné energetice, která zaujímá jednu ze stěžejních pozic při výrobě energie v ČR, nebo i o obnovitelných zdrojích. Myšlena je tím především větrná a sluneční energie.

Ačkoliv se jedná o populární zdroje, mají řadu nedostatků. Jsou ovlivňované počasím, ročním obdobím a také denní dobou. Spotřeba elektřiny a tepla ale nemůže záviset na tom, jestli je zrovna slunečno nebo větrno, a proto je nutné energii přechodně uložit a použít v době potřeby. Z tohoto důvodu byl vymyšlen koncept energetických úložišť. V rámci vývoje akumulátoru vzniklo za poslední dobu mnoho různých konceptů, od mechanických až po indukční supravodivá.

Má diplomová práce se týká jednoho z jednodušších, ale o to dostupnějších akumulátorů. Jedná se o akumulátory čistě tepelné energie, ve kterých bude použito jako akumulací médium písek. Zvláštností tohoto akumulátoru tkví v zahřívání písku na teploty až 500 °C, teoreticky i více. Díky vysoké teplotě v jádru akumulátoru je možné snížit jeho velikost v závislosti na maximální předpokládané teplotě. Nejedná se o krátkodobý akumulátor, jenž by uchoval energii pouze v řádech hodin a dnů. Tento akumulátor by měl být schopen udržet teplo z teplých, větrných a slunečných dní až do zimy, kdy je teplo nejvíce potřeba. Jeho aplikace bude zaměřena primárně na rodinné domy. Ty pak například mohou díky přebytkům ze solárních panelů nabíjet úložiště.

Hlavní inspirace pochází od firmy [Polar Night Energy](#), která v nedávné době postavila první komerční vysokoteplotní pískovou baterii. Ta slouží pro dodávky tepla do systému centrálního zásobování teplem ve finském městě Kankaanpää.

První část práce se zabývá rešerší, jež bude obsahovat principy ukládání tepla a rozdělení teplených zásobníků. Další část bude konkrétněji zaměřena na zásobníky využívající vysokých teplot a pevné materiály jako akumulací média. Z rešerše by měla vyplynout základní podoba akumulátoru.

V navazující části budou zmíněny současné koncepce a realizace vysokoteplotních zásobníků. Tato část bude pojednávat i o koncepci výše zmíněné Polar Night Energy.

Závěrečný oddíl bude vymezen pro výpočet a návrh vlastního akumulátoru. Bude se jednat o největší část, ve které budou zahrnuty jak znalosti získané rešerší, tak i vědomosti nabyté během studia. Tímto bych měl získat potřebné rozměry, teploty, materiály a další parametry potřebné pro úplnost návrhu. Na konci této kapitoly budou shrnuty dosažené výsledky. Rovněž bude pojednáno o splnění cílů diplomové práce.

1 Principy akumulace tepla

Tepelná energie může být ukládána dvěma základními mechanismy. Prvním z nich je termický, spočívající v ukládání pomocí citelného nebo latentního tepla. Druhým je fyzikálně-chemický princip, který buď využívá sorpce látek, anebo ukládání do vratných chemických reakcí.

1.1 Akumulace s využitím citelného tepla

Jímání, popřípadě uvolňování tepla, je doprovázeno ohřevem, respektive ochlazením pracovní látky. Toto chování lze popsat základní rovnicí:

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} V \cdot \rho \cdot c \cdot (t_1 - t_2) \quad (1.1)$$

V je objem pracovní látky [m^3];

ρ je hustota pracovní látky [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$];

c je měrná tepelná kapacita [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$];

$t_{1,2}$ jsou teploty na začátku a konci ohřevu, resp. chlazení [$^{\circ}\text{C}$];

Pracovní látka by měla mít co největší tepelnou kapacitu. Tepelná kapacita je definována jako součin měrné tepelné kapacity a hustoty pracovní látky $\rho \cdot c = C$ [$\text{m}^3 \cdot \text{K}^{-1}$]. Těmto vlastnostem nejvíce odpovídá voda, která má navíc další výhody, jako jsou například nízká cena, dostupnost, trvanlivost a ekologický dopad. Dále se používají šterky, beton, zemina apod. Pevné látky oproti vodě disponují vyšším rozsahem provozních teplot a mnohdy i jednodušší konstrukcí. Obecně má citelné teplo oproti zbylým principům akumulace relativně nízkou energetickou hustotu, což vede k velkým rozměrům zásobníků. [2]

Pracovní látka	Měrná tepelná kapacita	Hustota	Objemová tepelná kapacita	Hustota akumulace pro $\Delta t = 60 \text{ K}$
jednotky	[$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]	[$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]	[$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$]	[$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3}$]
voda	4187	998	4,2	251
vzduch	1010	1,2	0	0
šterk	750	1650	1,2	74
beton	1020	2300	2,3	141
cihla	900	1800	1,6	97
dřevo	2510	600	1,5	90
zemina	900 ÷ 2900	1600 ÷ 2800	2,0 ÷ 3,0	120 ÷ 180
železo	440	7850	3,5	207

Tabulka 1.1 Vlastnosti pracovních látek pro akumulaci v oblasti citelného tepla [2]

1.2 Akumulace s využitím skupenského tepla

Při změně skupenství látky se buď uvolňuje, nebo je přijímáno skupenské teplo. Změna skupenství se děje za konstantní teploty bez ovlivnění chemického složení látky, díky čemuž může být využita pro specifické aplikace. Obecně vzato akumulátory využívající latentní (skupenské) teplo dokáží uchovat větší množství energie v daném objemu. Typicky je

využívána přeměna mezi kapalinou a pevnou látkou, tedy táním a tuhnutím. Naopak při přechodu z plynu na kapalinu dochází k výrazné změně objemu a také zvýšení tlaku. [4]

Akumulované skupenské teplo Q je matematicky definováno rovnicí:

$$Q = V \cdot [\rho_p \cdot c_p \cdot (t_t - t_1) + \rho_t \cdot l_t + \rho_k \cdot c_k \cdot (t_2 - t_t)] \quad (1.2)$$

V je objem pracovní látky [m^3], $\rho_{p,k}$ je hustota pracovní látky v pevném (kapalném) stavu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$], $c_{p,k}$ je měrná tepelná kapacita pracovní látky v pevném (kapalném) stavu [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$], l_t je skupenské teplo tání/tuhnutí [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$], $t_{1,2}$ jsou teploty na počátku a na konci jímání/uvolňování tepla [$^{\circ}\text{C}$], t_t je teplota tání/tuhnutí [$^{\circ}\text{C}$]

Látky používané pro akumulaci tepelné energie jsou anglicky označovány jako PCM (Phase Change Materials). Jsou charakteristické vysokou hodnotou skupenského tepla tání l_t , dobrou tepelnou vodivostí a teplotou tání t_t , která se musí nacházet ve vhodném rozsahu pro dané použití. Pro jejich praktické využití jsou důležité další vlastnosti jako například chemická stálost, nízká korozivita, nulová míra toxicity či nízká cena. Stejně významné je i udržení těchto vlastností při dlouhodobém periodickém používání. [2]

1.3 Akumulace s využitím sorpčního tepla

Pojem sorpce souhrnně označuje absorpci, adsorpci a chemisorpci. Sorpce je založena na odlišném mechanismu ukládání tepla než výše zmíněné. K uchování tepelné energie je využívána bilance tepla při sorpci/desorpci vlhkosti v médiu. Akumulace tepla v tomto případě nezávisí přímo na teplotě, ale na relativní vlhkosti vzduchu. Tím pádem je možné, aby proces vybíjení fungoval i při konstantní teplotě. [7]

1.4 Akumulace s využitím chemických reakcí

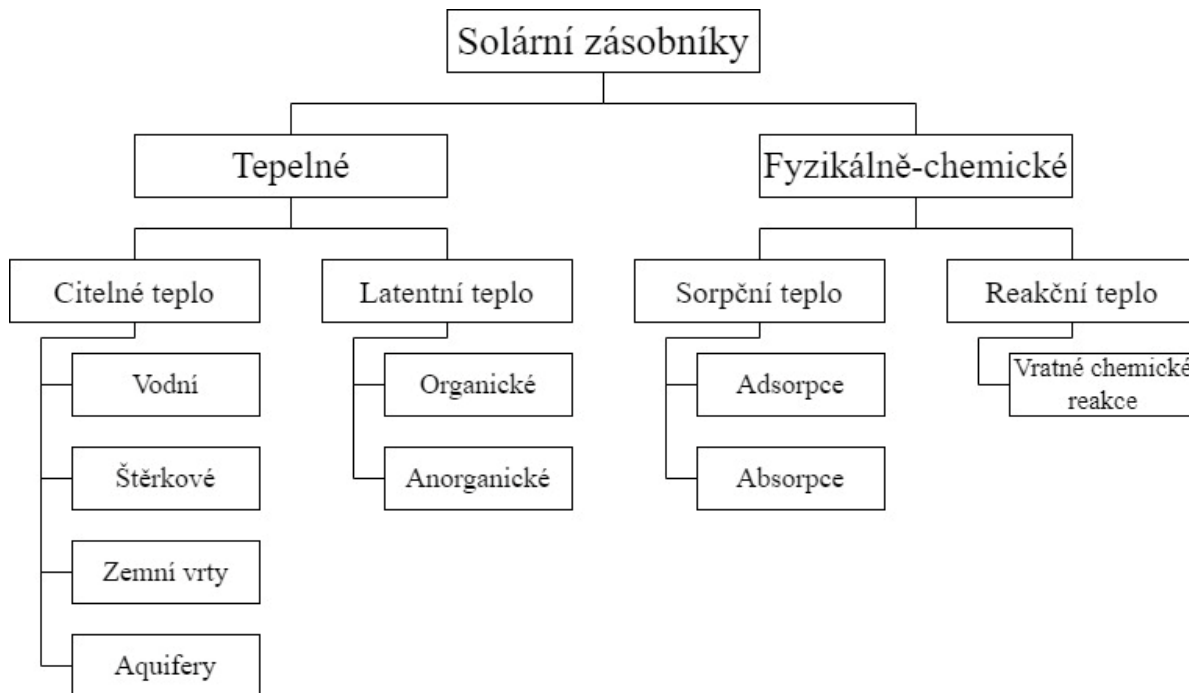
Pro uchovávání energie lze také využít vratných chemických reakcí. Konkrétně se jedná o reakce, které jsou v jednom směru endotermické a v druhém exotermické. Tento princip je jednoduše popsán rovnicí: $AB + \Delta H \leftrightarrow A + B$, kde ΔH je reakční teplo. Toto teplo je potřeba k rozložení sloučeniny AB na 2 oddělené látky A a B . Látky A a B nesmí podléhat dalším reakcím a zároveň je nutná jejich snadná separace. Látky AB a A jsou ve většině případů pevné, nebo kapalné. Látka B bývá obvykle plyn. Teplo, které je touto reakcí akumulováno, lze vypočítat dle vztahu: $Q = a_r \cdot m \cdot \Delta H$, kde ΔH je reakční teplo v [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$], m hmotnost látky [kg] a a_r reaguující podíl látky. V praxi se používá rozklad oxidů, hydridů kovů a oxidů peroxidů. Hustota akumulace se pohybuje mezi ($1\,000 \div 3\,000$) $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}$. Zatímco u zásobníků využívající latentní teplo je kolem ($300 \div 500$) $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}$, u zásobníků využívající citelné teplo je to jen $100 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$. Přesto má každý typ své preferované využití. [2]

Reakce materiálů				Hustota akumulace	Teplota reakce
AB	\leftrightarrow	A	$+ B$	[$\text{GJ}\cdot\text{m}^{-3}$]	[$^{\circ}\text{C}$]
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$		MgSO_4	H_2O	2,8	122
FeCO_3		FeO	CO_2	2,6	180
$\text{Fe}(\text{OH})_2$		FeO	H_2O	2,2	150
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$		CaSO_4	H_2O	1,4	89

Tabulka 1.1 Látky pro akumulaci s využitím reakčního tepla [2]

2 Tepelné zásobníky

Energii bohužel nelze vždy získat v období, kdy jí je nejvíce potřeba. V případě obnovitelných zdrojů energie by akumulace energie výrazně zlepšila jejich efektivitu. Například solární panely mají nejvyšší účinnost v létě, kdy není spotřeba energie tak vysoká jako v zimním období. Zásobníky jsou však schopny udržet energii nejen na kratší dobu v rámci hodin až dnů, ale i v rámci měsíců.



Obrázek 2.1 Rozdělení solárních zásobníků [2]

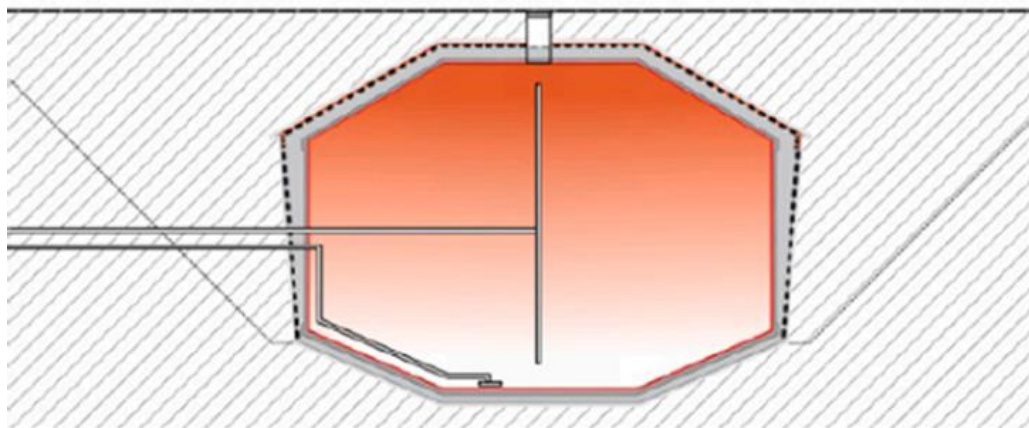
2.1 Akumulátory využívající citelné teplo

Tepelné akumulátory využívající citelného tepla jsou jedny z nejjednodušších, nejrozvinutějších a zároveň nejrozšířenějších typem zásobníků. Pro systémy solárních elektráren jsou používány roztavené soli, nebo termální oleje jako vysokoteplotní teplonosná kapalina. Jednou z nevýhod roztavených solí je relativně nízká teplota tuhnutí, a to kolem 220 °C. Druhou je relativně nízká maximální teplota do 600 °C, čímž je omezena účinnost elektrárny. Další nevýhodou je vysoká pořizovací cena, do které se promítá i nutnost použití dvou nádrží. Tyto nedostatky lze vyřešit použitím jednoho tanku s pevným materiálem, který bude ohříván a chlazen pomocí vzduchu. [3]

2.1.1 Vodou plněné zásobní tanky

Teplo je uchováno ve vodním tanku, jenž je dostatečně tepelně zaizolován. Tank může být umístěn jak pod, tak i nad povrchem. Nevýhodou zakopaných tanků jsou vyšší náklady díky pozemním pracím. Ve vykopané jámě stačí již pouze lehká konstrukce kvůli tlaku okolní zeminy. Kromě vodního tanku může být použit jako zásobník i solární rybník. Tento typ vodního tanku je specifický tím, že funguje zároveň jako solární kolektor na úkor neizolovaného povrchu. Sluneční záření je z větší části absorbováno na dně nádrže. Z tohoto důvodu zpravidla bývá naplněn slanou vodou. Zvyšující se koncentrace soli společně

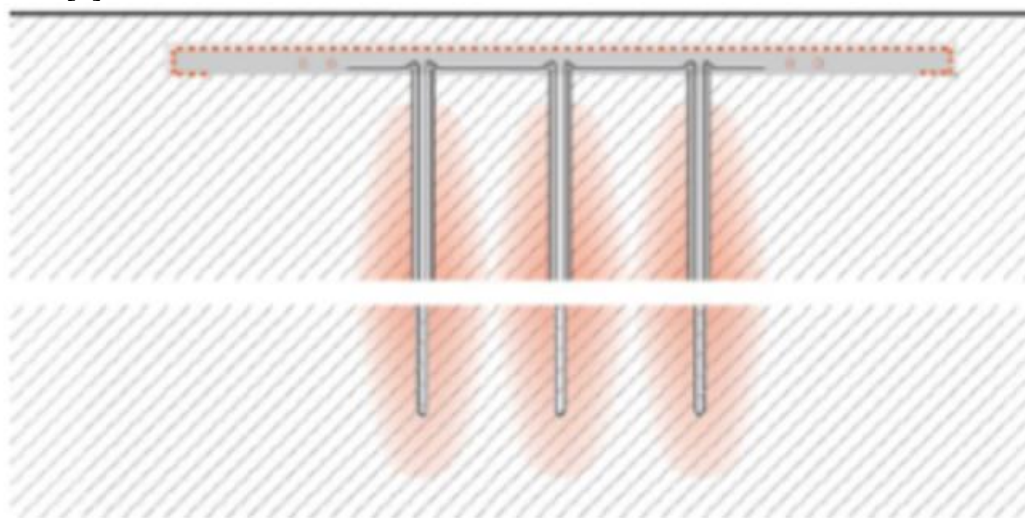
s hloubkou a teplotními rozdíly mezi hladinou a dnem zapříčiňují pokles konvekce. Proto se teplo akumuluje převážně na dně nádrže. [1]



Obrázek 2.2 Vodou plněný zásobník [5]

2.1.2 Horninové zásobníky

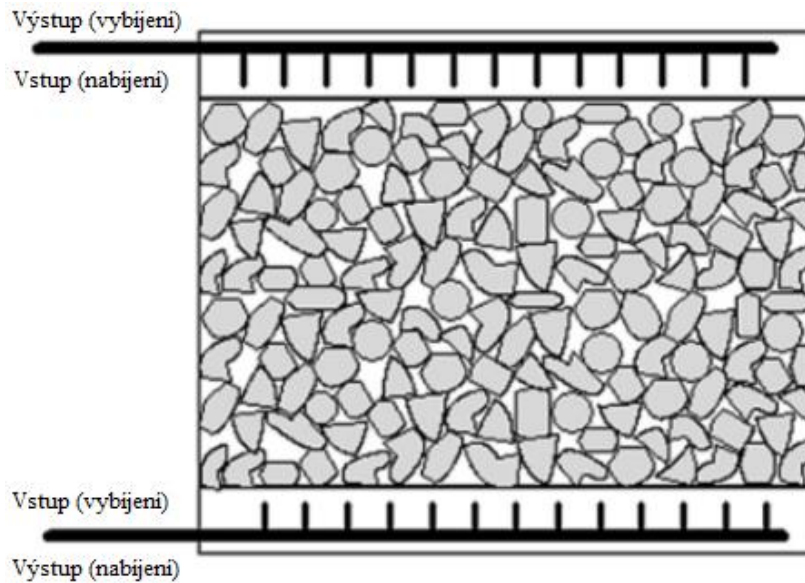
Hornina je z hlediska tepelné vodivosti a akumulací schopnosti pro aplikaci v zásobnících dobrým materiálem. Zásobník je tvořen různým počtem vrtů. Hloubka těchto vrtů bývá obvykle v rozmezí 40 až 150 metrů s průměrem 7,5 až 11 centimetrů. Rozstup vrtů se liší podle konkrétní aplikace a teplot. Podle složitosti může být výměníkem například plastová trubka, ve které proudí médium do zásobníku a okolím trubky proudí nazpět. Trubky mohou být součástí i větší soustavy. Pro zvýšení akumulacího prostoru mohou být takové sondy vrтанé jak vertikálně, tak i diagonálně. Tento typ je vhodné zkombinovat s tepelným čerpadlem. [1]



Obrázek 2.3 Horninový zásobník [5]

2.1.3 Půdní zásobníky

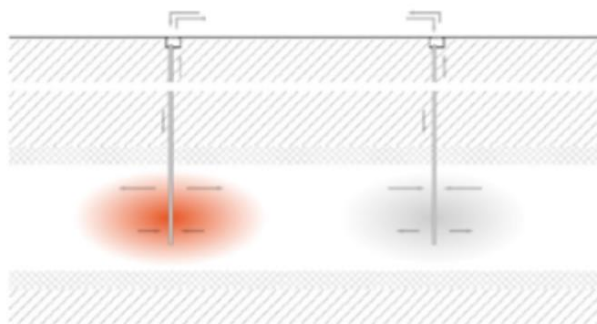
Hlavní specifikum těchto zásobníků je ukládání energie v zemině (jíly, písky, vazné půdy, štěrky, rašeliny). Teplo je odebíráno stejným způsobem jako u horninových zásobníků, pomocí sond nebo zasypaného výměníku. Poloha zásobníků není u tohoto typu natolik významná jako například u horninových, protože mohou být přizpůsobeny velikostí a tvarem svému okolí. [1]



Obrázek 2.4 Půdní zásobník s kamenivem [5]

2.1.4 Zásobníky Aquifer

U těchto typů zásobníků se voda, která je zároveň i teplonosné médium, nachází v porézní půdě mezi dvěma studnami. Teplo je akumulováno ve vodě. Tyto zásobníky lze využít jen v specifických lokalitách, kde za určitých podmínek dochází k přesunu vody v určitém směru. Jedna ze studní slouží pro přívod tepla, zatímco druhá pro odvod. U ohraničeného aquiferu může být zásobník nabíjen solárními panely, popřípadě i odpadním teplem. U neohrazeného by voda přivedené teplo přesunula mimo zásobník. Z toho důvodu se používá jen teplo z půdy. Stejně jako předchozí typy se v praxi nejčastěji vyskytuje v kombinaci s využitím tepelného čerpadla. [1]



Obrázek 2.5 Zásobník typu aquifer [5]

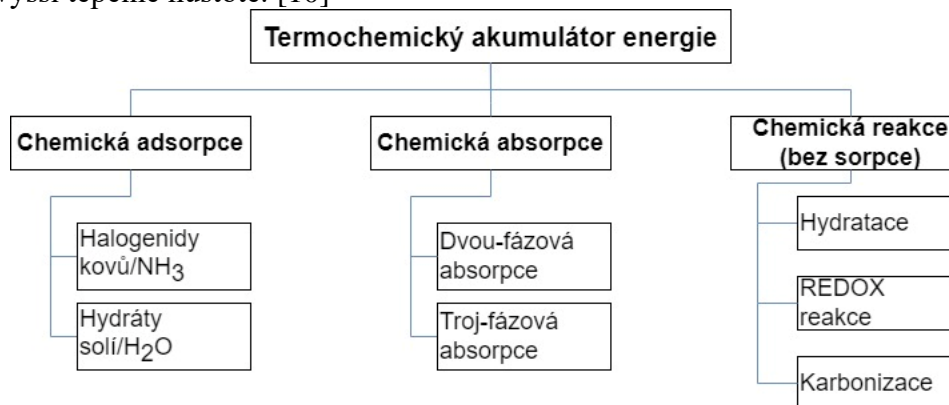
2.2 Akumulátory využívající latentní teplo

Na rozdíl od akumulátorů na citelné teplo je tento typ zásobníku založen na změně skupenství látek. Množství naakumulovaného tepla závisí především na tepelné kapacitě média, jež se označuje jako PCM (phase change material), neboli látka s fázovou přeměnou. Taková látka uvolňuje, nebo pohlcuje značné množství energie během změn skupenství, přičemž se během procesu téměř nemění teplota látky. Tyto látky mají široké spektrum použití. Mohou být využity například v solárních vařičích, chladících vozech nebo v novostavbách k aktivnímu chlazení stropů. Jak již bylo uvedeno výše, pro uchování tepla se nejvíce hodí změna mezi

pevným a kapalným skupenstvím. V porovnání se zásobníky citelného tepla je hustota akumulované energie na jednotku hmotnosti výrazně větší, tudíž i celý zásobník bude menších rozměrů. [2]

2.3 Akumulátory využívající termochemické reakce

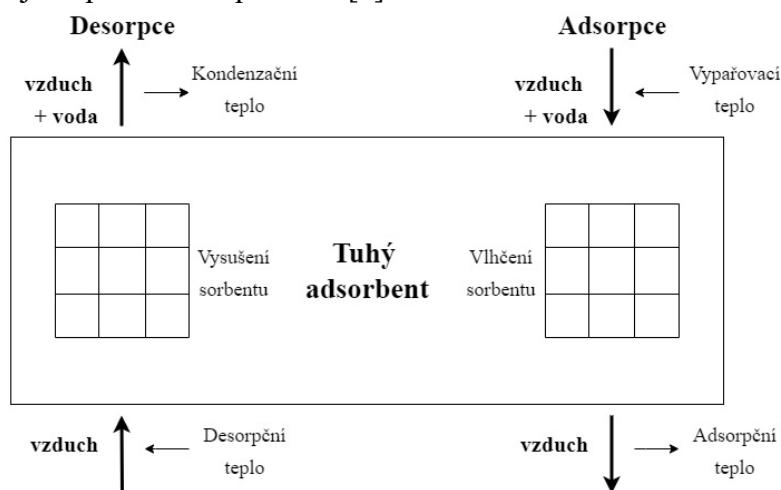
Tento typ patří do skupiny termochemických akumulátorů, stejně jako akumulátory využívající sorpční teplo. Obecně jsou považovány za účinné dlouhodobé úložiště energie zabírající menší prostor než úložiště citelného a latentního tepla. Důvod jejich kompaktnosti spočívá ve vyšší tepelné hustotě. [10]



Obrázek 2.6 Rozdělení termochemických akumulátorů energie [10]

2.3.1 Akumulátory využívající sorpční teplo

Při nabíjení tohoto akumulátoru je snižována relativní vlhkost vzduchu pomocí ohřevu na vyšší teplotu. Do sorbentu je přiváděno teplo, popřípadě odváděno pomocí výměníku. Jako adsorbenty jsou využívány silikagely a zeolity. V případě absorbentů se často používá LiCl v kombinaci s vodou jako pracovní kapalinou. [2]



Obrázek 2.7 Princip otevřeného cyklu s tuhým sorbentem [2]

3 Rozdělení tepelných zásobníků na citelné teplo

Rozdělení zásobníku se liší podle literatury. Níže jsou uvedeny příklady rozdělení z různých zdrojů.

3.1 Podle doby akumulace

Termální zásobníky se liší podle doby uchování tepla na krátkodobé a dlouhodobé. Oba typy nacházejí v energetice své využití. U krátkodobého uchování energie se předpokládá schopnost uchovávání v rámci hodin až dnů. Zásobníky určené pro dlouhodobé uchování tepla se pohybují v řádech týdnů až měsíců. V případě použití stejných materiálů a teplot dosahují tyto zásobníky mnohem větších rozměrů. [27]

3.2 Podle rozsahu pracovních teplot akumulátoru

3.2.1 Podle časopisu Energy Procedia

- Nízkoteplotní

Nízkoteplotní zásobníky pracují s teplotami do 100 °C. Může se jednat například o vodní zásobníky. [27]

- Středněteplotní

Rozsah teplot se u těchto zásobníků pohybuje mezi 100 °C až 500 °C. U těchto zásobníků se již nepoužívá voda kvůli problémům s tlakem. Pro ukládání tepla se obvykle využívají pevné látky. Jako teplosměnné médium může být použit například vzduch. [27]

- Vysokoteplotní

Tento typ využívá teplot nad 500 °C. Jako vysokoteplotní teplosměnné médium se zde uplatňuje především vzduch. [27]

3.2.2 Podle časopisu Energy

- Nízkoteplotní

Mezi nízkoteplotní tepelná úložiště se řadí úložiště do teplot 200 °C. [17]

- Vysokoteplotní

Vysokoteplotní akumulátory představují v poslední době důležitý prvek při využívání obnovitelných zdrojů energie nebo i pro využití odpadního tepla. Trendem je používání vysokoteplotních akumulátorů společně se solárním zdrojem energie. Vývoj a podoba takových zařízení je předmětem mnoha studií.

Z pohledu teploty se řadí do rozsahu přes 200 °C až do takové teploty, jež umožňuje technologie. Prosazení těchto akumulátorů vyžaduje mnoho inovací a nápadů. Jsou zajímavé především vysokou energetickou hustotou, které je dosaženo pomocí vysokých teplot. Dalším důležitým faktorem je efektivita přenosu tepla, která závisí především na dobré výměně tepla mezi teplotnosnou látkou a akumulacím

médium. Jako další významné vlastnosti je třeba zmínit mechanickou a chemickou stabilitu, bezpečnost, životnost či ztráty. [17]

Jak již bylo zmíněno, ukládání tepla ve vysokoteplotních akumulátorech je výhodné zejména díky vysoké energetické hustotě, které je dosaženo díky vysokým teplotám. Jedním z potenciálních problémů jsou vysoké ztráty. Ty je potřeba adekvátně vyřešit již při návrhu zásobníku tepla.

V dnešní době je populární využívání roztavených solí jakožto akumulacího média. Roztavené soli vydrží teploty až do 700 °C. Uplatnění nacházejí zejména v solárních elektrárnách, v nichž se sluneční energie soustřeďuje do středové věže. Zde přitom dochází k ohřevu teplotnosného média. Jako další zajímavý materiál se jeví beton, který je schopen vydržet teploty až 400 °C. Ještě lepší termální stabilitu má speciální malta z cementu smíchaného s popílkem a polypropylenovými vlákny. Tato směs je stabilní až do 600 °C. [5]

Jedním z dalších zajímavých materiálů pro ukládání tepla za vysoké teploty je písek, který je levný a hojně se vyskytující. Může být zahříván na teploty až 1000 °C a více. [11]

4 Obecný návrh akumulátoru

4.1 Teplonosná tekutina

Typicky se jako vysokoteplotní teplonosné tekutiny (VTT) používají termální oleje, vzduch, roztavené soli nebo voda. Voda může způsobovat korozi a rovněž dosahuje vysokých tlaků při vyšších teplotách. Většina termálních olejů je drahá a nebezpečná. Také mají omezené teplotní použití a zároveň dosahují vysokých tlaků, které jsou však nižší než u vody. Roztavené soli jsou vysoce korozivní a mají nízkou tepelnou vodivost. Navíc mají teplotu tání až nad 200 °C, což limituje možnosti vybíjení zásobníku.

Vzduch je v porovnání s předchozími dostupnější, netoxický, nepodléhá degradaci a je environmentálně přívětivý. Stejně tak funguje bez problémů při nízkých i vysokých teplotách.[8]

Rychlost vzduchu musí být stanovena s ohledem na Reynoldsovo číslo Re , které určuje rozdíl mezi laminárním a turbulentním prouděním.

Pro úložiště, u kterých je teplonosná tekutina (vzduch) v přímém kontaktu s akumulacním médiem platí: K plně vyvinutému laminárnímu proudění dochází při $Re_p < 10$, nelaminární při $10 < Re_p < 150$, nestabilní laminární $1500 < Re_p < 3000$, plně vyvinuté turbulentní proudění pro $Re_p > 3000$.

Vyšší akumulace energie je možné dosáhnout při laminárním proudění, kterého dosáhneme použitím optimálních parametrů částic a pracovních podmínek. Zároveň by Biotovo číslo Bi mělo být pod hodnotou jedna desetina, aby bylo zajištěno rovnoměrné rozdělení teploty uvnitř nádoby. [5]

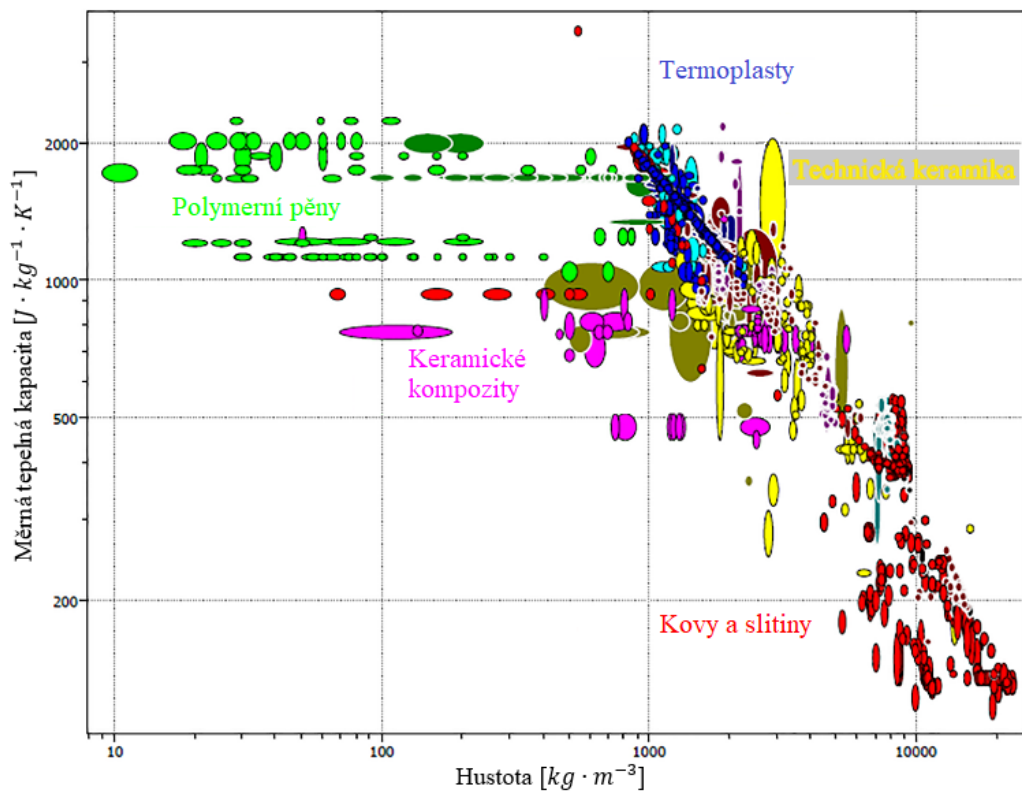
4.2 Zásobník

Průřez zásobníku může být proveden do různých tvarů. Mezi nejčastěji používané patří obdélníkový, cylindrický a průřez ve tvaru komolého kužele. Výhodou obdélníkových zásobníků je jejich nízká cena, avšak na úkor velkých tlakových ztrát v rozích při profukování vzduchem. Komolý kužel zajišťuje nízké tepelné ztráty kolem 3,5 % a také vysokou účinností až 95 % při vybíjení a nabíjení. Nejrozšířenější jsou válcové nádoby s poměrem délky a průměru větším než jedna ($L/D > 1$). Zároveň poskytují vysokou účinnost. [5]

4.3 Akumulační médium

Výkonnost výměníku se odvíjí především od fyzikálních a termických vlastností média uchovávajícího teplo. V dnešní době je možno volit mezi více než 150 tisíci komerčními materiály, ať už se jedná o materiály kapalné či pevné. Kapalné mají obecně větší měrnou tepelnou kapacitu společně s vyšší tepelnou vodivostí oproti pevným médiím, mezi které patří například kameny. Pevná média je možno rozdělit do 4 skupin: [5]

- Kovy a slitiny
- Keramika a sklo
- Polymery a elastomery
- Hybridy



Graf 4.1 Srovnání materiálů pro akumulátory citelného tepla [5]

Použití pevných materiálů k uchování tepelné energie je podmíněno mnoha vlastnostmi, mezi které patří například hustota, měrná tepelná kapacita, tepelná vodivost, koeficient tepelné roztažnosti a dále také odolnost proti cyklickému zatěžování, dostupnost i cena. Všechny tyto vlastnosti je nutno vzít v potaz, protože spolu souvisí. Například při vysoké hodnotě objemové tepelné kapacity není nutné použití velkého zásobníku. Vyšší stabilita při cyklickém namáhání je důležitá pro životnost akumulární jednotky. Dynamika nabíjení a vybíjení je ovlivněna především tepelnou vodivostí, zároveň je ale třeba počítat při návrhu i s tepelnou roztažností materiálu. Pokud zohledníme všechny tyto vlastnosti, nejsou oproti termochemickým úložištím podmínky pro ukládání citelného tepla v pevných látkách přívětivé. Nicméně je vhodné přihlídnout i k ceně, složitosti systému, náročnosti výroby a dalším aspektům. Vzhledem ke zvyšujícím se cenám lze pozorovat tendenci hledat levnější a dostupnější materiály. Mezi ty by se mohl zařadit i písek, u něhož by využití pro zásobníky citelného tepla mohlo být vhodné. [9]

Médium v akumulátoru bude muset po dlouho dobu odolávat měnícím se podmínkám. Ať už jde o ohřev média, cenu nebo o ekologické dopady.

V tabulce níže je uveden výčet vlastností akumulčních látek, které je třeba zohlednit. [5]

<i>Vlastnosti</i>	<i>Kritéria</i>
<i>Termofyzikální</i>	<i>Vysoká energetická hustota (vztažená k hmotnosti nebo objemu), vysoká tepelná vodivost, vysoká měrná tepelná kapacita, vysoká hustota, stabilita po cyklickém tepelném zatěžování</i>
<i>Chemické</i>	<i>Dlouhodobá chemická stálost, žádná toxicita a těkavost, nízká korozivita nebo reaktivita s teplonosnou tekutinou a stejně tak s materiálem akumulátoru a ostatních částí</i>
<i>Ekonomické</i>	<i>Levné a hojně se vyskytující materiály, které lze zároveň jednoduše zpracovat</i>
<i>Mechanické</i>	<i>Dobrá mechanická stálost, nízká tepelná expanze, vysoká odolnost proti vzniku trhlin, velká pevnost v tlaku</i>
<i>Environmentální</i>	<i>Nízká spotřeba energie při výrobě, nízká produkce CO₂</i>

Tabulka 4.1 Vlastnosti a žádoucí kritéria pro akumulční médium citelného tepla [5]

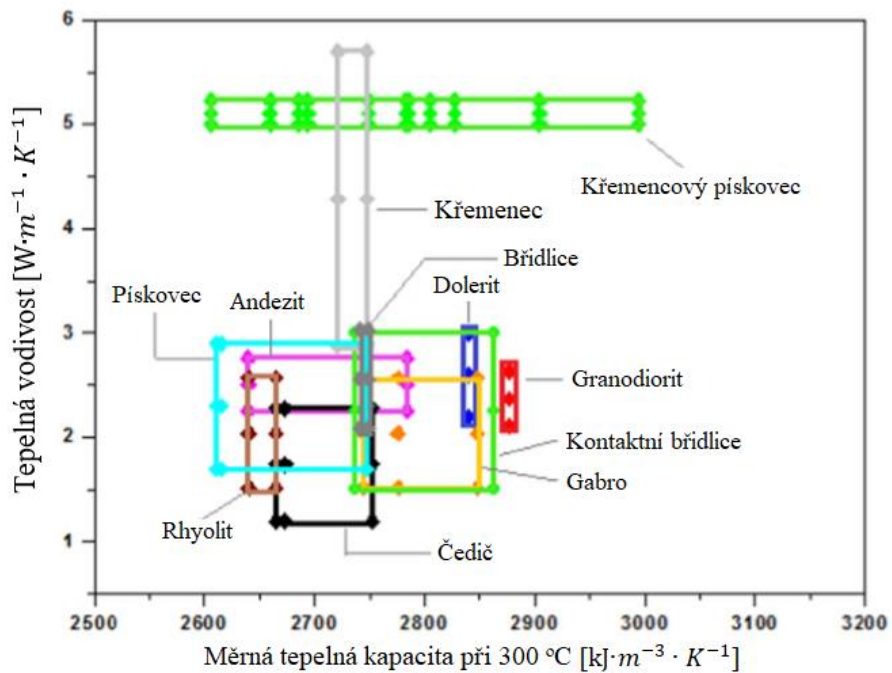
Písek je tvořen různými horninami. Naneštěstí všechny nedisponují ideálními vlastnostmi. Některé typy hornin při zahřívání na vysoké teploty mohou degradovat více, některé méně díky cyklickému termálnímu zatěžování. Horniny s rostoucím počtem cyklů mění své termo-fyzikální vlastnosti, jako je například tepelná vodivost nebo měrná tepelná kapacita. Největší tepelné kapacity dosahují horniny tvořené křemencem. Co se týče energetické hustoty, je dolerit, pískovec, břidlice, kontaktní rohovec a křemenný pískovec optimální volbou. Hlavní dopad na vlastnosti hornin má obsah křemene, a to zejména díky své vysoké tepelné vodivosti. Horniny obsahující křemen disponují oproti jiným vyšší tepelnou vodivostí. Křemen má velkou tvrdost, ale díky své vysoké anizotropní roztažnosti napomáhá degradaci hornin.

V mnoha experimentech bylo potvrzeno, že horniny a jejich profukování vzduchem je plně kompatibilní a nezpůsobuje negativní efekty při vysokých teplotách. Horniny při působení vysokých teplot mění své vlastnosti. Jednou z těchto vlastností je pevnost v tlaku. Pokud by písek dosahoval nízké hodnoty pevnosti v tlaku, mohlo by se stát, že se písek uložený ve spodní části začne drtit, a tím by způsobil ucpání při profukování. Tento problém není třeba řešit, pokud není zásobník profukován na přímo. [8]

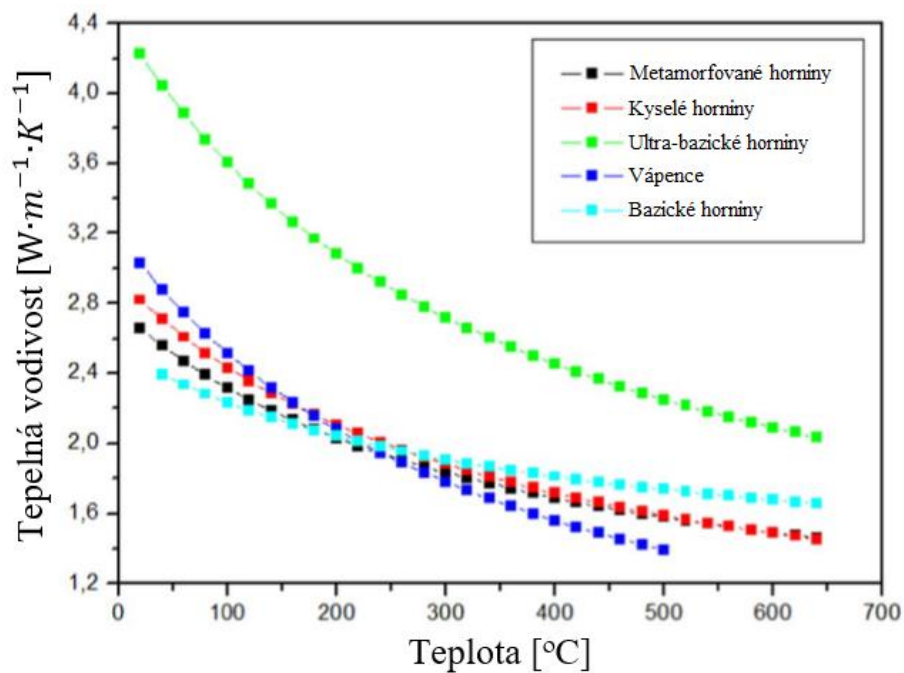
V tabulce níže jsou uvedeny vlastnosti jednotlivých hornin, ze kterých se může písek skládat. Vlastnosti byly měřeny na odebraných vzorcích při teplotě 20 °C.

Typ kamene	Hustota	Tepelná vodivost při 20 °C	Měrná tepelná kapacita při 20 °C	Tepelná kapacita	Jednoosá pevnost v tlaku
	$g \cdot cm^{-3}$	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$kJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$	MPa
Žula	2,6 ÷ 2,7	2,6 ÷ 3,1	600 ÷ 950	1560 ÷ 2517	100 ÷ 350
Vápenec	2,3 ÷ 2,8	2,0 ÷ 3,0	683 ÷ 908	1584 ÷ 2506	30 ÷ 250
Mramor	2,6 ÷ 2,7	2,3 ÷ 3,2	800 ÷ 883	2080 ÷ 2366	50 ÷ 200
Křemenec	2,5 ÷ 2,6	2,9 ÷ 5,7	623 ÷ 830	1557 ÷ 2191	150 ÷ 300
Pískovec	2,2 ÷ 2,6	1,7 ÷ 2,9	694 ÷ 950	1492 ÷ 2508	20 ÷ 260
Granodiorit	2,7	2,1 ÷ 2,6	650 ÷ 1020	1735 ÷ 2784	252,0
Gabro	2,9 ÷ 3,0	1,5 ÷ 2,6	600 ÷ 1000	1722 ÷ 3030	150 ÷ 350
Čedič	2,3 ÷ 3,0	1,2 ÷ 2,3	700 ÷ 1230	1603 ÷ 3714	67 ÷ 400
Kontaktní rohovec	2,7	1,5 ÷ 3,0	820	2246	100 ÷ 533
Svor	2,6 ÷ 2,8	2,1 ÷ 3,0	790 ÷ 1100	2085 ÷ 3080	60 ÷ 400
Křemenné pískovce	2,6	5,0 ÷ 5,2	652	1714 ÷ 1721	120,0
Ryolit	2,3 ÷ 2,6	1,6 ÷ 2,3	785	1805 ÷ 2041	120 ÷ 250
Andezit	2,6 ÷ 2,7	2,3 ÷ 2,8	815	2127 ÷ 2167	183 ÷ 400
Vápnitý pískovec	2,7	4,4	652	1734	0,1 ÷ 15,8
Mastek	2,7 ÷ 3,0	2,5	980 ÷ 1068	2626 ÷ 3182	10,1
Dolerit	2,7 ÷ 2,9	2,2 ÷ 3,0	870 ÷ 900	2305 ÷ 2610	100 ÷ 350
Struska	2,7	0,6	840	2268	–
Rula	2,7	2,7 ÷ 3,1	770 ÷ 979	2080 ÷ 2640	48 ÷ 300
Jíl	1,5 ÷ 2,3	0,7 ÷ 1,5	860 ÷ 880	1320 ÷ 1830	–
Břidlice	2,8	1,1 ÷ 2,1	820 (45 °C)	2255 (45 °C)	34 ÷ 75
Diorit	2,8 ÷ 3,0	2,5	1000	2800 ÷ 3000	170 ÷ 300
Argilit	2,3 ÷ 2,6	2,1 ÷ 2,3	838	1927 ÷ 2136	–
Dolomit	2,8	2,1	802	2205 ÷ 2269	150 ÷ 170

Tabulka 4.2 Termo-fyzikální vlastnosti konkrétních typů hornin [8]



Graf 4.2 Závislost tepelné vodivosti na měrné tepelné kapacitě [8]



Graf 4.3 Závislost tepelné vodivosti na teplotě u různých typů hornin [8]

5 Současná zařízení

5.1 Polar Night Energy

Finská firma Polar Night Energy navrhla sezónní pískový akumulátor. Akumulátor slouží k uchování tepla ze slunečných a větrných dní až do zimy. Teplo se získává průchodem elektriny přes odporové těleso.

Hlavní výhody těchto akumulátorů jsou jejich jednoduchost. Díky levnému akumulacímu médiu – písku – a možnosti výroby potřebných dílů v lokálních výrobnách jsou investiční náklady minimální.

První komerční písková baterie s topným výkonem 100 kW a kapacitou 8 MWh se nachází ve městě Kankaanpää. Je připojená k systému centrálního zásobování teplem. Písek se nahřívá na teplotu kolem 600 °C, ale počítá se s využitím i vyšších teplot. Předehřívání je zajištěno odpadním teplem z datového centra poblíž.

Zásobník je tvořen dvěma ocelovými válci, mezi kterými je umístěna izolace. V akumulátoru se nachází trubky s teplonosným médiem (vzduchem) společně s pískem. Kromě těchto částí jsou dále potřeba ventily, ventilátor, výměník tepla, popřípadě výparník.

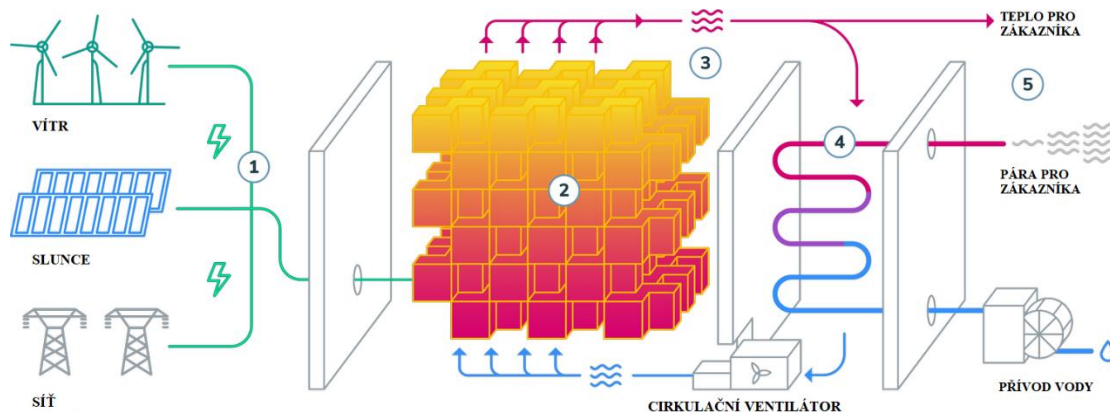
Akumulátor ve městě Kankaanpää je dobíjen během dvoutýdenních cyklů, ale může uchovávat teplo i měsíce. [11]



Obrázek 5.1 Písková baterie ve městě Kankaanpää [11]

5.2 Tepelná baterie Rondo

Firma Rondo navrhla a postavila vysokoteplotní tepelnou baterii jako náhradu za kotle spalující fosilní paliva. Jako akumulární médium je zde použito velké množství cihel, které jsou ohřívány pomocí elektrického topného tělesa. Topné těleso je umístěno uvnitř akumulátoru, jenž je ohříván na teploty až 1500 °C. Jako vysokoteplotní teplotnosné médium slouží vzduch, který je ohříván až k 1000 °C. Poté vzduch proudí buď přímo ke spotřebiteli, nebo kolem výměníku vzduch-voda, kde ohřívá vodu, popřípadě ji mění v páru. [12]



Obrázek 5.2 Tepelná baterie Rondo [12]

Průběh funkce tepelné baterie: [12]

- 1) Přeměna levné, přebytečné elektřiny na teplo
 - a. Elektřina z větrných a slunečních elektráren je v mnoha částech světa levnější, když slunce svítí a vítr fouká.
 - b. Tuto přebytečnou energii mění topné těleso na vysokoteplotní teplo, a to se 100% účinností.
- 2) Teplo je vyzařováno a následně pohlcováno cihlami
 - a. Tisíce tun cihel jsou přímo ohřívány teplem zářením.
 - b. Jsou schopny uchovat energii v řádech hodin až dní.
- 3) Teplo může být odebíráno kontinuálně, popřípadě nárazově
 - a. Vzduch je ohříván teplem z cihel na vysoké teploty
 - b. Dodávka tepla je regulována množstvím proudícího vzduchu
 - c. Vzduch v systému recirkuluje z důvodu snížení tepelných ztrát
- 4) Teplo může být dodáno v podobě horkého vzduchu nebo přehřáté páry
 - a. Teplo je dodáváno podle parametrů daných zákazníkem
 - b. Baterii je možno lehce integrovat do stávající infrastruktury
- 5) Vzduch a pára nebo obojí zároveň může být dodáváno bez přerušení
 - a. Rondo baterie jsou modulární, rozšiřitelné a dosahují vysoké energetické hustoty

5.3 MGA Thermal

Mezi hlavní technologie patří nový typ materiálu pro ukládání tepelné energie, MGA (Miscibility Gap Alloys). Volně přeloženo jde o slitiny s mísitelnou mezerou. Skládají se z malých částic kovové slitiny, které jsou rozprostřeny v materiálu matrice. Při zahřívání bloku se částice roztaví, zatímco pevná matrice drží roztavenou slitinu na místě. MGA bloky jsou schopny ukládat velké množství energie v teple, a to bezpečně a jednoduše. Výhodou této technologie je kombinace ukládání do fyzického tepla a do tepla fázového přeměny. Bloky mohou dosahovat teploty až 1410 °C [13]



Obrázek 5.3 MGA bloky [13]

V roce 2023 by měla být dokončena stavba demonstračního úložiště s výkonem 5 MWh. Má být použito přibližně 3700 MGA bloků, přičemž dosahuje rozměrů (12 x 3 x 4) metry. [14]



Obrázek 5.4 Demonstrační zařízení MGA Thermal [14]

5.4 ENERGYNEST

Jedná se o firmu z Norska, která byla založena v roce 2011. Zaměřuje se na ukládání odpadního tepla do betonu. Jejich projekt s názvem ThermalBattery (Tepelná baterie) spočívá v ukládání tepla s teplotou až 400 °C. Hlavními přednostmi jejich řešení jsou modulární provedení a široké rozpětí kapacit. Jednotlivé moduly jsou standardizované a mohou být jednoduše převáženy v lodních kontejnerech. Menší z modulů je navržen na kapacitu 1,5 MWh, větší na dvojnásobek. Kapacita sestavy spojováním modulů může být zvětšena až na 1000 MWh. [15]



Obrázek 5.5 Ukázka modulů
ThermalBattery [15]



Obrázek 5.6 Ukázka konstrukce modulu
[15]

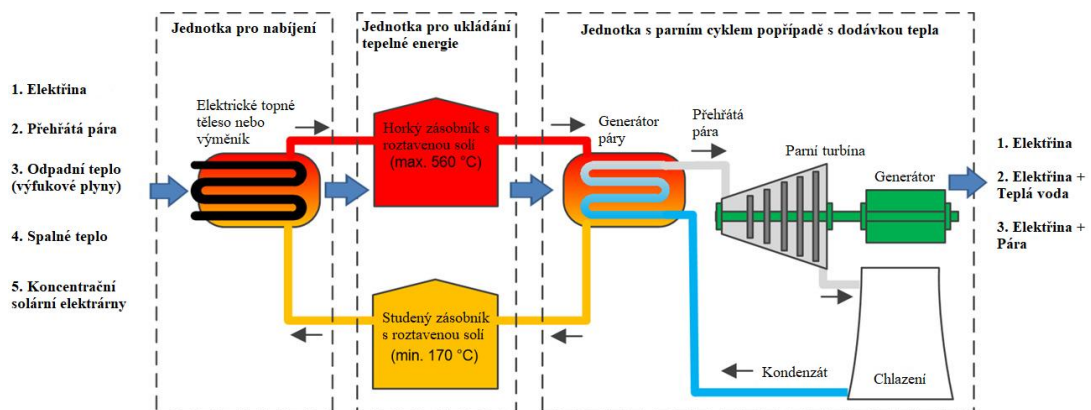
Energie je uložena ve speciálním typu betonu, v tzv. HEATCRETE. Ten má oproti obyčejnému betonu vyšší měrnou tepelnou kapacitu a vyšší tepelnou vodivost při zachování mechanické pevnosti během ohřevu. [15]

Modul je tvořen množstvím válců, které jsou zality betonem. V betonu jsou zality teplovodivé trubky s teplotnosným médiem, nejčastěji vodou či párou. Neobsahuje žádné pohyblivé části a jeho životnost je odhadována na více než 30 let provozu. [15]

5.5 Technologie roztavených solí

Tato technologie je nejvíce rozšířená u solárních elektráren. Roztavené soli se v nich používají zároveň jako vysokoteplotní teplotnosné médium i jako akumulční médium. Za pokojových teplot jsou v pevném stavu, takže se musejí přehřívat. Konkrétně se používají především nitrátové soli, protože jsou na trhu rozšířené a levné. Směsí různých typů solí vznikne takzvaná solární sůl. [16]

Solární sůl je zahřívána na 290 °C, aby byl zaručen kapalný stav. Maximální provozní teplota je až 560 °C. Díky tomuto rozdílu teplot je zapotřebí dvou tanků. V jednom je chladná sůl a v druhém ohřátá. [16]



Obrázek 5.7 Schéma technologie s roztavenou solí [16]

6 Konkrétní návrh akumulátoru

6.1 Výpočet potřebného výkonu akumulátoru

6.1.1 Potřeba tepla pro vytápění

Pro modelový příklad jsem zvolil rodinný dům, který není součástí řadové zástavby, nýbrž je postaven samostatně. Vnitřní podlahová plocha domu odpovídá $S_d = 200 \text{ m}^2$, tedy objemu kolem $V_d \approx 600 \text{ m}^3$. Venkovní výpočtová teplota je zvolena $t_e = -12 \text{ °C}$. Pro tyto parametry je tepelná ztráta domu postaveného v roce 2020 rovna: [18]

$$Q_c = 6,6 \text{ kW} \quad (6.1)$$

Předpoklady: [18]

- Dům byl postaven v souladu s v té době platnými technickými normami. Normy se týkají požadavků na tepelně izolační vlastnosti stěn a oken.
- Vypočtena je celková ztráta domu, která je součtem tepelných ztrát prostupem obálkovými konstrukcemi a větráním.
- V potaz se bere obvyklé množství a rozměry oken a dveří, přičemž prosklenou část tvoří 20 % stěn.
- Tepelná ztráta větráním nebere v úvahu využití nuceného větrání s rekuperací tepla. Při výpočtu byla předpokládána intenzita výměny vzduch $0,5 \text{ h}^{-1}$, neboli že celý objem vzduchu uvnitř budovy bude vyměněn každé 2 hodiny. Průměrná vnitřní teplota ve vytápěném domě odpovídá $t_{is} = 20 \text{ °C}$.
- Výpočet je omezen pro objekty do objemu přibližně 1000 m^3 , tedy pro rodinné domy.



Obrázek 6.1 Fotografie rodinného domu s solárními panely [38]

Modelový dům s předpokládanou lokalitou v Brně má délku otopného období $\tau = 232$ dnů. Průměrná teplota během otopného období je předpokládána $t_{es} = 4,4$ °C. Střední denní venkovní teplota pro začátek a konec otopného období je $t_{em} = 13$ °C. Střední denní venkovní teplota je vypočtena podle vzorce:

$$t_{em} = \frac{t_{e,7} + t_{e,14} + 2 \cdot t_{e,21}}{4} \quad (6.2)$$

, kde $t_{e,7}$, $t_{e,14}$, $t_{e,21}$ jsou teploty měřené ve stínu s vyloučením sálání okolních stěn v časech 7:00, 14:00 a 21:00. [19]

Na základě předchozích výpočtů a předpokladů počítám s tepelnou ztrátou objektu 6,6 kW a průměrnou vnitřní výpočtovou teplotou 20 °C. Potřeba tepla pro vytápění objektu je dána následujícím vzorcem:

$$Q_{vyt,r} = \frac{\varepsilon}{\eta_o \cdot \eta_r} \cdot \frac{24 \cdot Q_c \cdot D}{(t_{is} - t_e)} \cdot 3,6 \cdot 10^{-3} \quad (6.3)$$

Hodnota součinitele ε : [20]

$$\varepsilon = e_i \cdot e_t \cdot e_d$$

- Součinitel e_i se vypočítá jako podíl tepelné ztráty prostupem k celkové tepelné ztrátě. Běžné hodnoty odpovídají intervalu 0,6 až 0,9. Zvolím hodnotu 0,7. [19]
- Součinitel e_t zohledňuje snížení teploty v místnostech během noci. Pohybuje se mezi hodnotami 0,8 (pro školy) až 1 (pro nemocnice). Pro potřeby výpočtu jsem zvolil 0,9, neboť pro kvalitní spánek jsou obecně doporučovány nižší teploty. [19]
- Součinitel e_d se používá u budov, u kterých jsou přestávky v provozu vytápění. Na základě uvedeného jsem zvolil jedna, protože rodinný dům je vytápěn bez delších přestávek. [19]

Tím pádem je opravný součinitel roven: $\varepsilon = e_i \cdot e_t \cdot e_d = 0,7 \cdot 0,9 \cdot 1 = 0,63$

Účinnosti: [19]

- η_o se značí účinnosti obsluhy, respektive možnosti regulace soustavy. Nabývá hodnot v rozmezí 0,9 až 1 => zvoleno $\eta_o = 0,95$
- η_r se značí účinnost rozvodu vytápění a dosahuje hodnot 0,95 až 0,98 => zvoleno $\eta_r = 0,95$

Vytápěcí denostupně D:

$$D = d \cdot (t_{is} - t_{es}) = 3619 \text{ K} \cdot \text{dny}$$

Nyní už mám potřebné hodnoty pro dosažení do rovnice pro výpočet roční potřeby energie pro vytápění. [20]

$$Q_{vyt,r} = \frac{\varepsilon}{\eta_o \cdot \eta_r} \cdot \frac{24 \cdot Q_c \cdot D}{(t_{is} - t_e)} \cdot 3,6 \cdot 10^{-3} \quad (6.4)$$

$$= \frac{0,63}{0,95 \cdot 0,95} \cdot \frac{24 \cdot 6600 \cdot 3619}{(20 + 12)} \cdot 3,6 \cdot 10^{-3} = 12,5 \frac{MWh}{rok} \Rightarrow 45 GJ/rok$$

6.1.2 Potřeba pro ohřev teplé užitkové vody (TUV)

Roční potřeba tepla pro ohřev TUV: [20]

$$Q_{TUV,r} = Q_{TUV,d} \cdot d + 0,8 \cdot Q_{TUV,d} \cdot \frac{t_2 - t_{svl}}{t_2 - t_{svz}} \cdot (N - d) \quad (6.5)$$

Uvažují:

- Teplotu studené vody: $t_1 = 10 \text{ °C}$
- Teplotu ohřáté vody: $t_2 = 55 \text{ °C}$
- Celkovou potřebu teplé vody za 1 den: $V_{2p} = 0,328 \text{ m}^3 \cdot \text{den}^{-1}$
 - U staveb určených k bydlení se počítá s $0,082 \text{ m}^3$ na osobu za den [21]
- Hustotu vody: $\rho = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- Měrnou tepelnou kapacitu vody: $c = 4186 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- Koeficient energetických ztrát systému pro přípravu TUV: $z = 0,5$
 - Pro rozvody u nových staveb $z_{\max} = 0,5$ [21]

Denní potřeba tepla pro ohřev TUV: [20]

$$Q_{TUV,d} = (1 + z) \cdot \frac{\rho \cdot c \cdot V_{2p} \cdot (t_2 - t_1)}{3600} \quad (6.6)$$

$$= (1 + 0,5) \cdot \frac{1000 \cdot 4186 \cdot 0,328 \cdot (55 - 10)}{3600} = 25,744 \text{ kWh}$$

Dále počítám s:

- Teplotou studené vody v letním období: $t_{svl} = 15 \text{ °C}$
- Teplotou studené vody v zimním období: $t_{svz} = 5 \text{ °C}$
- Provozem soustavy po celý rok: $N = 365 \text{ dní}$

Dosažení do rovnice potřeby tepla pro ohřev TUV **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**:

$$Q_{TUV,r} = Q_{TUV,d} \cdot d + 0,8 \cdot Q_{TUV,d} \cdot \frac{t_2 - t_{svl}}{t_2 - t_{svz}} \cdot (N - d)$$

$$= 25744 \cdot 232 + 0,8 \cdot 25744 \cdot \frac{55 - 15}{55 - 5} \cdot (365 - 232) = 8,2 \text{ MWh} \cdot \text{rok}^{-1} =$$

$$> 29,4 \text{ GJ} \cdot \text{rok}^{-1}$$

6.1.3 Celková roční potřeba energie na vytápění a ohřev TUV

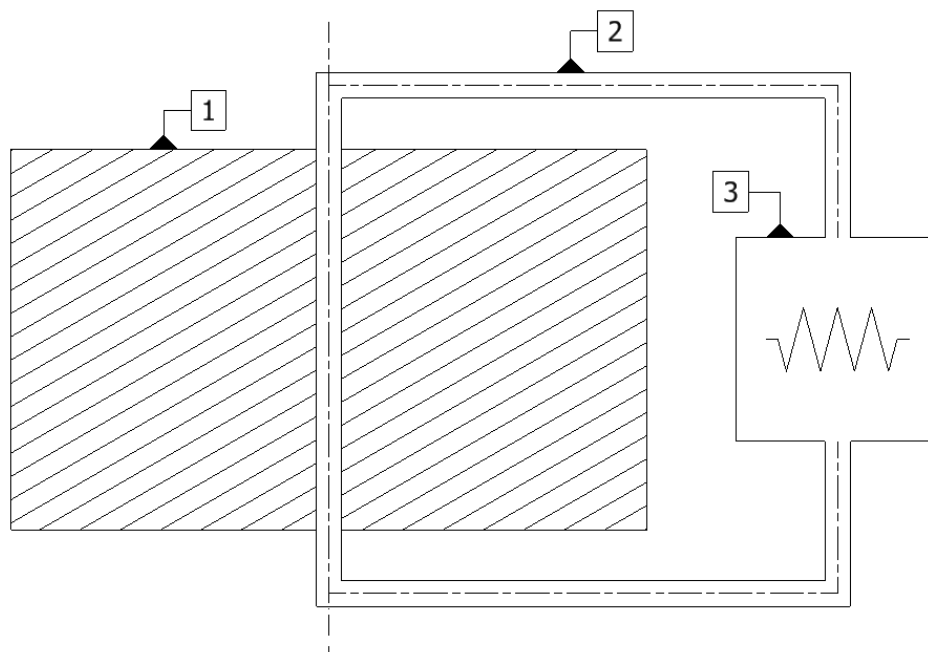
Součtem ročních potřeb tepla na vytápění a ohřev TUV získám celkové množství potřebné energie, na základě kterého bude akumulátor navržen.

$$Q_r = Q_{vyt,r} + Q_{TUV,r} \quad (6.7)$$

$$= 12,5 + 8,2 = 20,7 \text{ MWh} \cdot \text{rok}^{-1} \Rightarrow 74,5 \text{ GJ} \cdot \text{rok}^{-1}$$

6.2 Základní návrh konstrukce akumulátoru

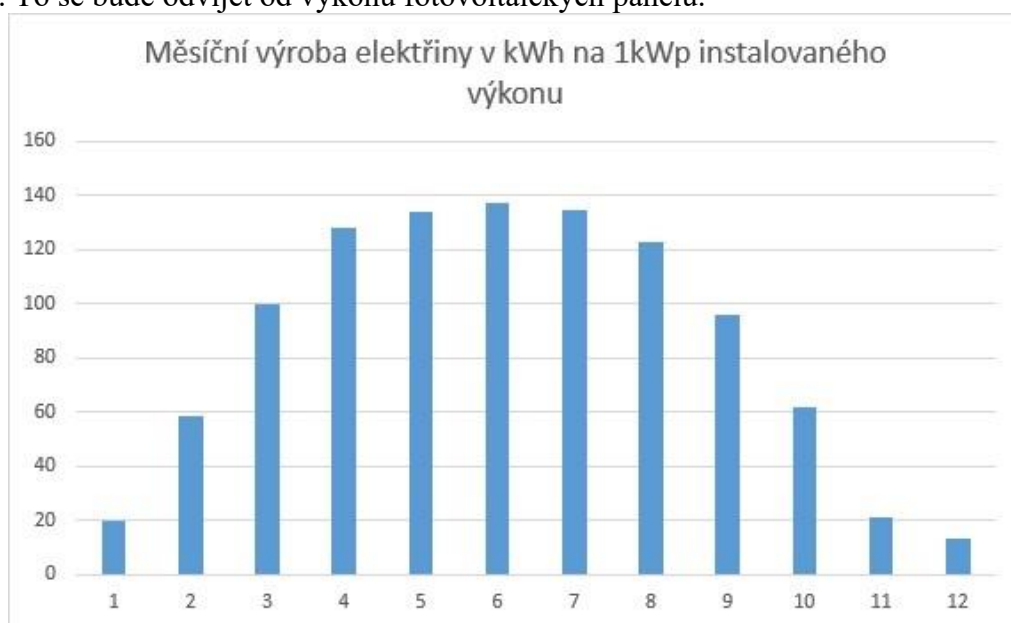
Akumulátor se bude skládat ze tří hlavních komponent. První částí je válcová akumulací nádoba naplněná pískem, jež bude akumulovat teplo. Další komponentou je potrubí s teplotním médiem a nakonec je použita komora s topným tělesem, ve které se bude ohřívat vzduch.



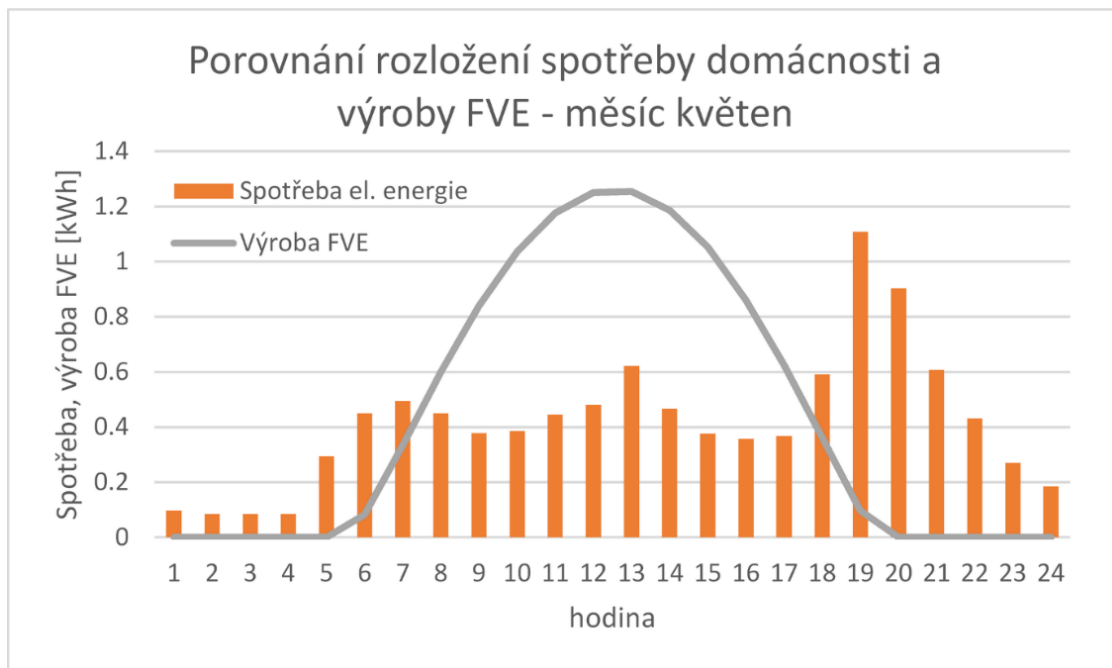
Obrázek 6.2 Schéma akumulční jednotky

6.3 Příkon ohříváče

Pro návrh zásobníku je třeba znát množství tepla, které bude do zásobníku v určitém čase dodáváno. To se bude odvíjet od výkonu fotovoltaických panelů.



Graf 6.1 Rozložení roční výroby elektřiny z FVE [25]



Graf 6.2 Porovnání rozložení spotřeby domácnosti a výroby FVE za měsíc květen [26]

V předchozí kapitole jsem došel ke zjištění, že akumulátor musí být nabit energií $74,5 \text{ GJ} \cdot \text{rok}^{-1}$ ($20,7 \text{ MWh} \cdot \text{rok}^{-1}$). Pokud by byly využity pouze fotovoltaické panely, bylo by takové množství energie příliš vysoké. S ohledem na spotřebu elektřiny v domácnosti odpovídající 5 MWh elektřiny by bylo potřeba dalších $20,7 \text{ MWh}$ pro ohřev zásobníku. To je pomocí solární energie ekonomicky nepřijatelné, a proto je třeba počítat s realističtější návrhem.

Pokud bych předpokládal ideální orientaci střechy domu směrem na jižní stranu s použitelnou plochou střechy 64 m^2 , dosahovala by roční výroba elektřiny hodnoty přibližně $9,6 \text{ MWh}$. [22]

Jestliže odečtu spotřebu elektřiny domácnosti 5 MWh , zbylých $4,6 \text{ MWh}$ lze použít pro nabíjení zásobníku.

Na základě předchozích grafů lze vyvodit, že přebytky elektřiny z fotovoltaických panelů budou hlavně v březnu, dubnu, květnu, červnu, červenci, srpnu a září. Přebytek výkonu u solárních panelů by tak nastal přibližně ve 210 dnech.

Energie v přepočtu na den:

$$\frac{4,6 \cdot 10^6}{210} = 21905 \text{ Wh} \cdot \text{den}^{-1}$$

Slunce ale nesvítí celý den, a proto přebytky budou jen v určité části dne. Na základě grafu 7.2 lze předpokládat přebytky elektřiny od 8:00 do 17:00 hodin, což se rovná 9 hodinám.

$$\frac{21905}{9} = 2434 \text{ Wh} \cdot \text{hod}^{-1} \rightarrow \dot{Q} = 2434 \text{ W} \quad (6.8)$$

Z předchozího výpočtu vyplývá, že bude potřeba topné těleso o výkonu $2,5 \text{ kW}$.

6.4 Vlastnosti materiálů

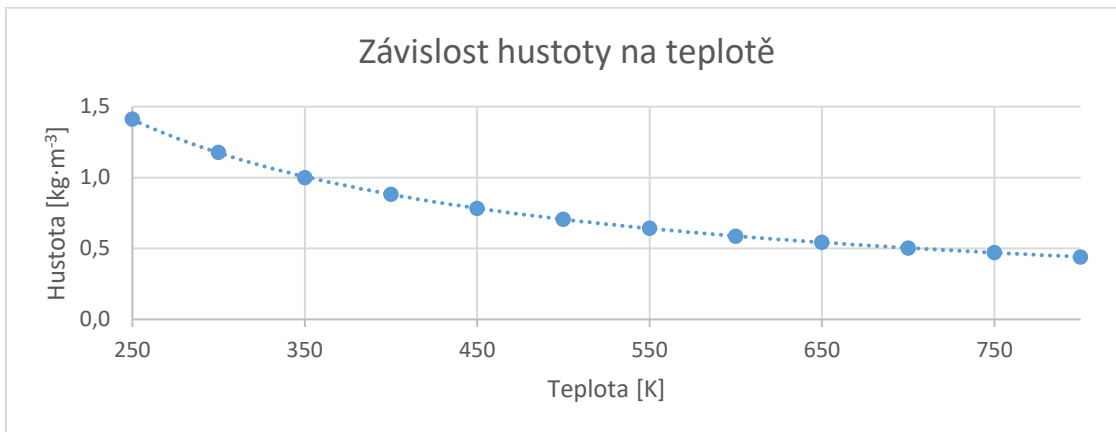
K výpočtu chování akumulátoru potřebuji znát chování použitých materiálů. Většina z materiálů výrazně mění své vlastnosti v závislosti na teplotě.

6.4.1 Vlastnosti vzduchu

$T(K)$	Vzduch						
	ρ [kg·m ⁻³]	c_p [kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	$\mu \cdot 10^5$ [Pa·s]	$\nu \cdot 10^6$ [m ² ·s ⁻¹]	λ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	$a \cdot 10^4$ [m ² ·s ⁻¹]	Pr -
100	3,6010	1,0266	0,6924	1,923	0,009246	0,02501	0,770
150	2,3675	1,0099	1,0283	4,343	0,013735	0,05745	0,753
200	1,7684	1,0061	1,3289	7,490	0,01809	0,10165	0,739
250	1,4128	1,0053	1,488	9,490	0,02227	0,13161	0,722
300	1,1774	1,0057	1,983	15,68	0,02624	0,22160	0,708
350	0,9980	1,0090	2,075	20,76	0,03003	0,2983	0,697
400	0,8826	1,0140	2,286	25,90	0,03365	0,3760	0,689
450	0,7833	1,0207	2,484	28,86	0,03707	0,4222	0,683
500	0,7048	1,0295	2,671	37,90	0,04038	0,5564	0,680
550	0,6423	1,0392	2,848	44,34	0,04360	0,6532	0,680
600	0,5870	1,0551	3,018	51,34	0,04659	0,7512	0,680
650	0,5430	1,0635	3,177	58,51	0,04953	0,8578	0,682
700	0,5030	1,0752	3,332	66,25	0,05280	0,9672	0,684
750	0,4709	1,0856	3,481	73,91	0,05509	1,0774	0,686
800	0,4405	1,0978	3,625	82,29	0,05779	1,1951	0,689
850	0,4149	1,1095	3,765	90,75	0,06028	1,3097	0,692
900	0,3925	1,1212	3,899	99,3	0,06279	1,4271	0,696
1000	0,3524	1,1417	4,152	117,8	0,06752	1,6779	0,702
1100	0,3204	1,160	4,44	138,6	0,0732	1,969	0,704
1200	0,2947	1,179	4,49	159,1	0,0782	2,251	0,707
1300	0,2707	1,197	4,93	182,1	0,0837	2,583	0,705
1400	0,2515	1,214	5,17	205,5	0,0891	2,920	0,705
1500	0,2355	1,230	5,40	229,1	0,0946	3,262	0,705
1600	0,2211	1,248	5,63	254,5	0,100	3,609	0,705
1700	0,2082	1,267	5,85	280,5	0,105	3,977	0,705
1800	0,1970	1,287	6,07	308,1	0,111	4,379	0,704
1900	0,1858	1,309	6,29	338,5	0,117	4,811	0,704
2000	0,1762	1,338	6,50	369,0	0,124	5,260	0,702
2100	0,1682	1,372	6,72	399,6	0,131	5,715	0,700
2200	0,1602	1,419	6,93	432,6	0,139	6,120	0,707
2300	0,1538	1,482	7,14	464,0	0,149	6,540	0,710
2400	0,1458	1,574	7,35	504,0	0,161	7,020	0,718
2500	0,1394	1,688	7,57	543,5	0,175	7,441	0,730

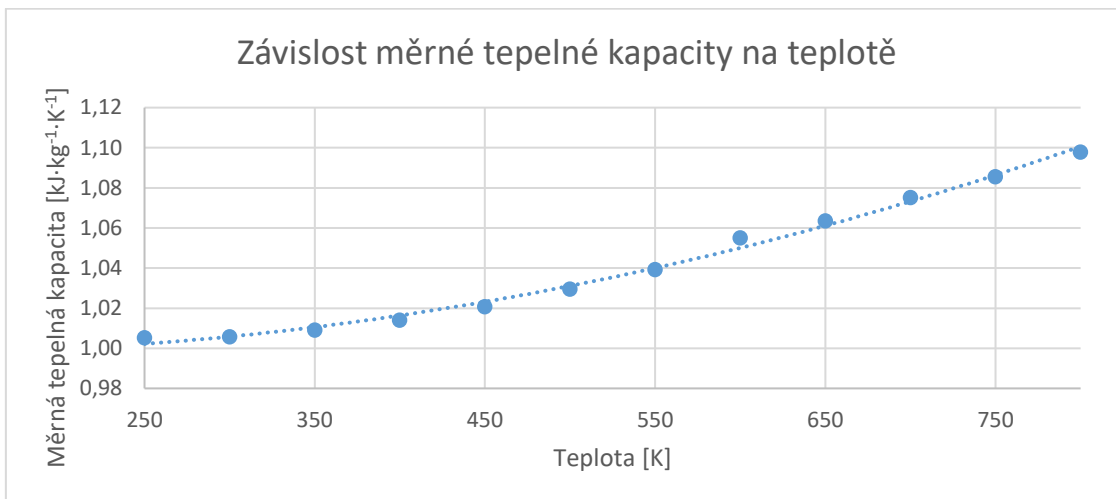
Tabulka 6.1 Vlastnosti vzduchu [23]

Na základě tabulkových hodnot je patrné, že vlastnosti vzduchu je možné po proložení křivkou popsat pomocí funkce závislé na teplotě. Grafy společně s rovnicemi proložených křivek jsou uvedeny níže. Vykresluji pouze rozsah teplot od 250 K do 800 K, neboť se jedná o rozsah, se kterým budu dále počítat.



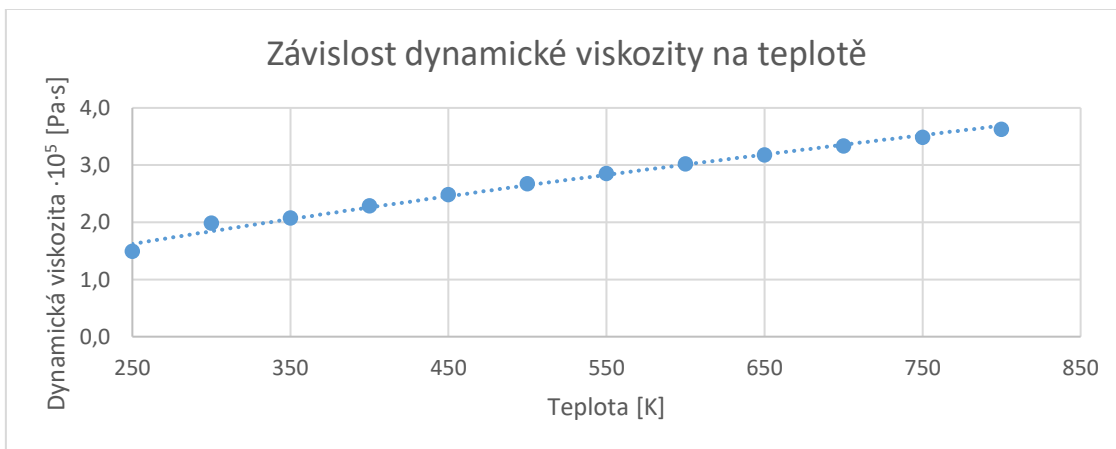
Graf 6.3 Závislost hustoty vzduchu na teplotě

$$\rho_{vzd}(T) = 350,87 \cdot T^{-0,999}$$



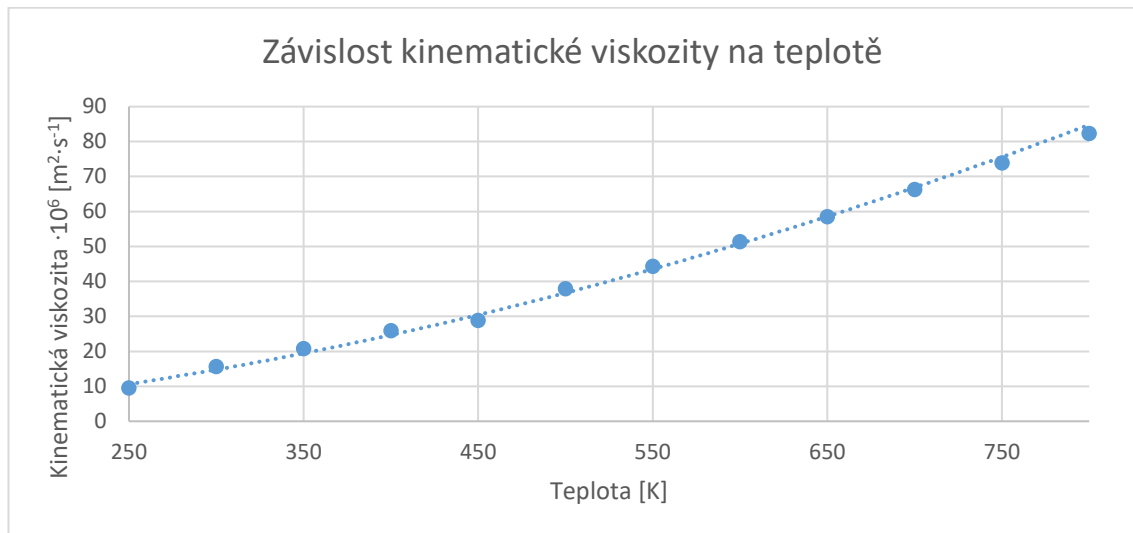
Graf 6.4 Závislosti měrné tepelné kapacity vzduchu na teplotě

$$c_{p,vzd}(T) = 2 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 - 4 \cdot 10^{-5} \cdot T + 0,9997$$



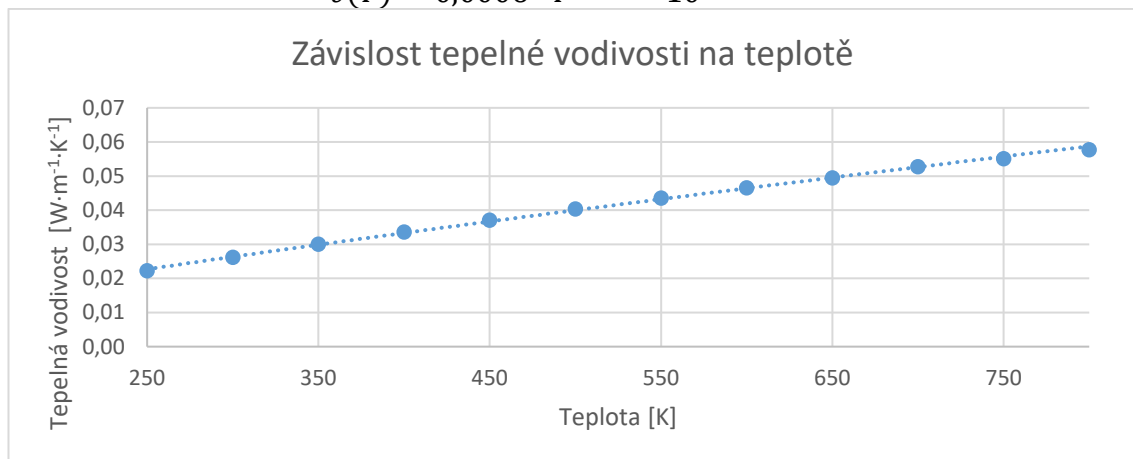
Graf 6.5 Závislost dynamické viskozity vzduchu na teplotě

$$\mu_{vzd}(T) = 0,0327 \cdot T^{0,7069}$$



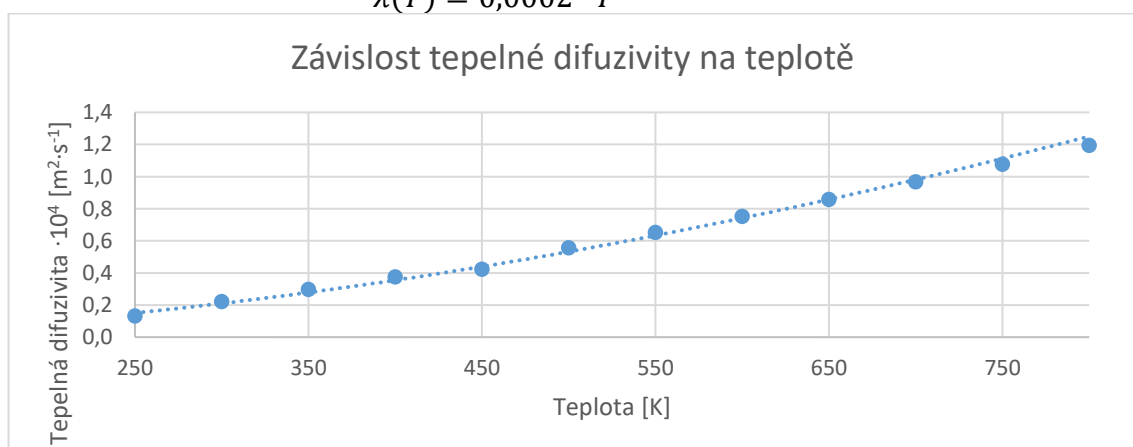
Graf 6.6 Závislost kinematické viskozity vzduchu na teplotě

$$\nu(T) = 0,0006 \cdot T^{1,7814} \cdot 10^{-6}$$



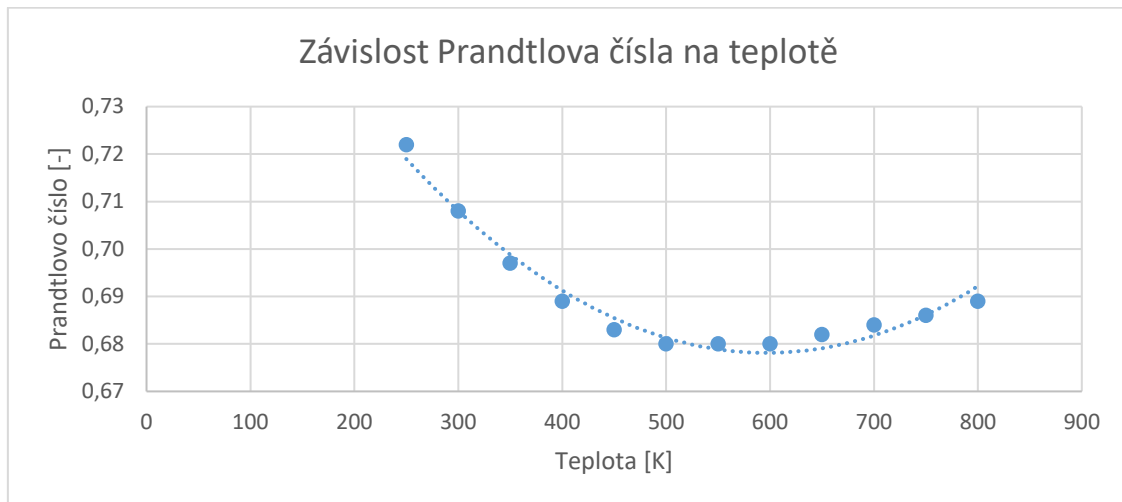
Graf 6.7 Závislost tepelné vodivosti vzduchu na teplotě

$$\lambda(T) = 0,0002 \cdot T^{0,8175}$$



Graf 6.8 Závislost tepelné difuzivity vzduchu na teplotě

$$a(T) = 7 \cdot 10^{-6} \cdot T^{1,8186} \cdot 10^{-4}$$



Graf 6.9 Závislost Prandtlova čísla na teplotě vzduchu

$$\text{Pr}(T) = 3 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 - 0,0004 \cdot T + 0,7991$$

6.4.2 Materiál trubek a stěn zásobníku

Jako materiál potrubí jsem vybral ocel 11 353. Tato jednoúčelová ocel se používá pro výrobu bezešvých trubek. Má dobrou odolnost vůči statickému namáhání a je dobře svařitelná. Používá se pro vedení olejů, nafty, vody, páry, plynů a vzduchu. [39]

Pro konstrukci zásobníku jsem zvolil ocel 1.0122 vhodnou pro plechy válcované za tepla. Ve výpočtu budu počítat s fyzikálními vlastnostmi oceli s 0,2 % uhlíku.: [40]

$$\lambda_o = 50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\rho_o = 7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

6.4.3 Vlastnosti písku

Jak již bylo zmíněno v rešerši, akumulací médium musí splňovat velké množství parametrů. Většina z těchto parametrů je nezanedbatelně ovlivněna teplotou. Ať už je řeč o tepelné vodivosti, měrné tepelné kapacitě, nebo o mechanických vlastnostech.

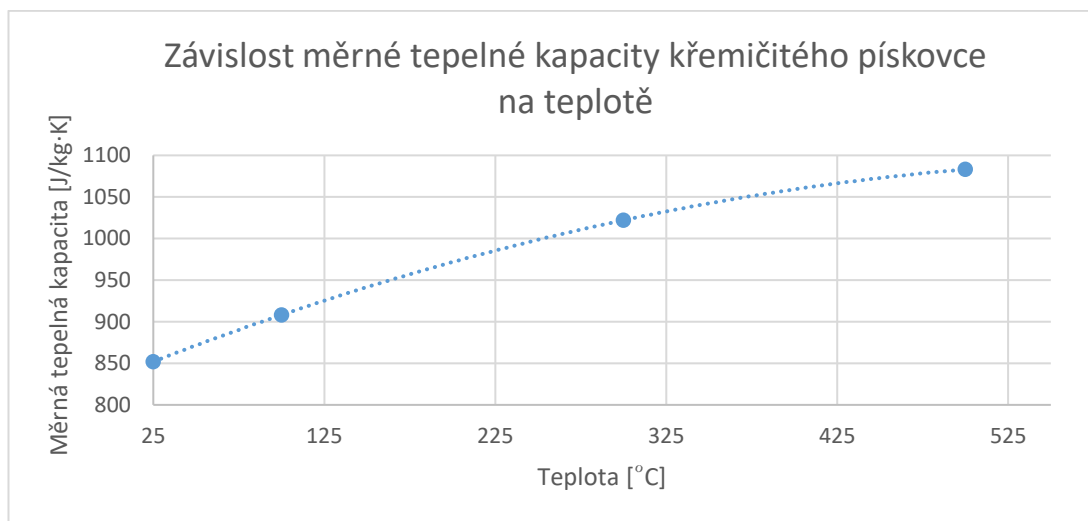
Při výpočtu budu uvažovat konstantní hustotu písku. Budu počítat s průměrnou velikostí zrn 0,3 mm. Při této zrnitosti je hustota písku $1600 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. [30]

Překládám, že písek je tvořen jedním typem horniny, a to křemičitým pískovcem. Křemičitý pískovec patří mezi neoptimálnější horniny, co se týče termo-dynamických vlastností. V následující tabulce je uvedeno měření 11 vzorků pískovce, které zahrnuje měrné tepelné kapacity pro teploty 25, 100, 300 a 500 stupňů Celsia. Tyto hodnoty následně zprůměruji a proložím vhodnou křivkou.

Rozdíl mezi měrnou tepelnou kapacitou částice a celku je způsoben pórovitostí hornin. Ta je započítána v c_p celku. Dále budu počítat s c_p částice. Předpokládám, že zrna písku jsou kulatá a bez pórů.

vzorek	$c_p [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$							
	25 °C		100 °C		300 °C		500 °C	
	částice	celek	částice	celek	částice	celek	částice	celek
KP1	915,0	915,5	968,5	968,9	1083,9	1084,5	1159,5	1161,0
KP2	877,7	878,5	929,1	929,8	1020,5	1021,5	1045,5	1047,9
KP3	858,4	859,1	918,1	918,7	1045,4	1046,1	1126,2	1127,7
KP4	871,0	874,2	915,3	918,2	1025,9	1029,7	1125,0	1132,7
KP5	883,4	887,2	923,6	927,1	1029,4	1034,2	1132,8	1142,6
KP6	823,7	826,3	882,0	884,2	991,1	993,9	1032,7	1038,6
KP7	835,0	836,4	892,9	894,1	1008,2	1009,7	1066,4	1069,6
KP8	819,8	820,9	884,8	885,7	997,4	998,5	1021,6	1024,0
KP9	835,8	839,3	890,6	893,6	999,2	1003,1	1052,8	1061,1
KP10	849,0	855,0	916,4	921,0	1045,6	1051,1	1100,7	1114,0
KP11	803,1	808,1	868,7	872,9	995,4	1000,2	1051,3	1061,4
průměr	852,0	854,6	908,2	910,4	1022,0	1024,8	1083,1	1089,1

Tabulka 6.2 Měření různých vzorků křemičitých písků při čtyřech různých teplotách [8]



Graf 6.10 Závislost měrné tepelné kapacity křemičitého pískovce na teplotě

Křivka získaná interpolací má tvar:

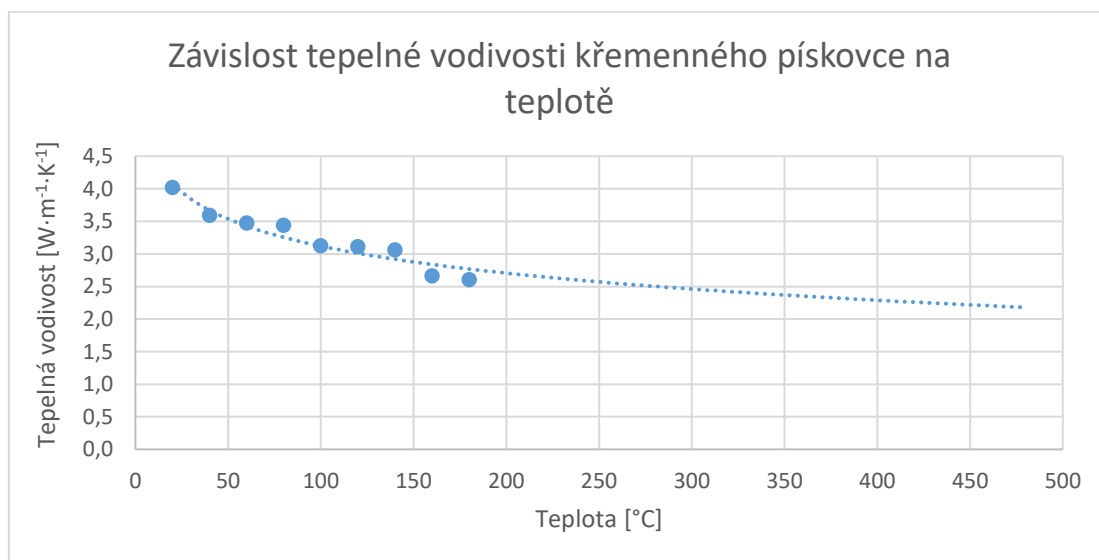
$$c_{p,p}(t) = -0,0007 \cdot t^2 + 0,832 \cdot t + 831,59$$

Z rovnice lze pro danou hodnotu teploty ve stupních Celsia spočítat odpovídající měrnou tepelnou kapacitu.

V tabulce níže jsou uvedeny hodnoty tepelné vodivosti různých typů hornin při teplotách od 20 °C do 180 °C s rozestupem 20 °C. Tepelná vodivost při 20 °C se mírně liší oproti tabulce z rešeršní části, a to kvůli různému složení každého vzorku. Vzorky byly měřeny v suchém stavu.

vzorek	Tepelná vodivost [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]								
	20 °C	40 °C	60 °C	80 °C	100 °C	120 °C	140 °C	160 °C	180 °C
Vápenec	3,057	2,710	2,553	2,453	2,396	2,276	2,187	2,023	2,021
Pískovec	2,142	1,931	1,915	1,912	1,916	1,924	1,903	1,854	1,846
Břidlice	3,939	3,182	3,123	3,120	3,102	3,091	3,057	3,011	2,913
Mramor	2,671	2,570	2,486	2,414	2,359	2,256	2,182	2,186	2,125
Kvarcit	4,078	3,304	2,914	2,857	2,809	2,695	2,663	2,533	2,514
Křemenný pískovec	4,019	3,593	3,476	3,442	3,129	3,110	3,061	2,663	2,605
Granodiorit	2,439	2,435	2,431	2,402	2,364	2,312	2,307	2,310	2,249
Žula	2,387	1,971	1,799	1,737	1,679	1,673	1,665	1,666	1,651
Andezit	3,028	2,694	2,659	2,564	2,535	2,517	2,509	2,478	2,463
Gabro	1,883	1,778	1,740	1,725	1,724	1,717	1,722	1,721	1,721
Steatit	6,530	5,351	5,211	4,898	4,392	4,326	4,303	4,324	4,302
Mikro-žula	3,778	3,045	2,946	2,913	2,825	2,830	2,624	2,504	2,434
Čedič	1,897	1,751	1,724	1,709	1,712	1,711	1,735	1,708	1,712

Tabulka 6.3 Výsledky měření tepelné vodivosti studovaných hornin při atmosférickém tlaku [28]



Graf 6.11 Závislost tepelné vodivosti křemenného pískovce na teplotě

Po proložení logaritmickou křivkou jsem získal rovnici:

$$\lambda(t) = -0,6 \cdot \ln(t) + 5,8835$$

Kde λ je tepelná vodivost a t je teplota ve stupních. Díky omezenému množství dat může dojít k nepřesnostem při výpočtu.

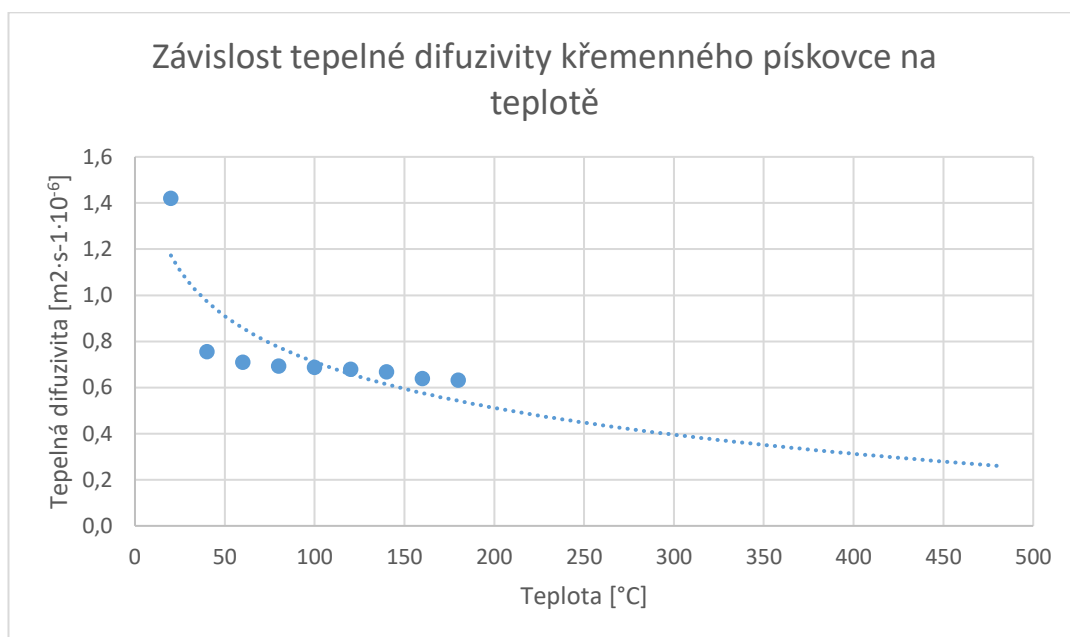
Výsledná vodivost písku je rovna součtu vodivosti horniny a vzduchu v poměru 6:4. Tento poměr je dán velikostí zrn písku, při které 60 % objemu zabírá písek a 40 % vzduch.

$$\lambda_p = 0,6 \cdot \lambda_{horniny}(t) + 0,4 \cdot \lambda_{vzd}(T)$$

V následující tabulce jsou uvedeny naměřené hodnoty tepelné difuzivity při atmosférickém tlaku na vysušeném vzorku.

vzorek	Tepelná difuzivita [$m^2 \cdot s^{-1} \cdot 10^{-6}$]								
	20 °C	40 °C	60 °C	80 °C	100 °C	120 °C	140 °C	160 °C	180 °C
Vápenec	1,310	1,118	1,179	0,882	0,853	0,802	0,750	0,698	0,679
Pískovec	1,003	0,764	0,712	0,702	0,694	0,682	0,681	0,672	0,664
Břidlice	1,434	0,790	0,736	0,718	0,716	0,707	0,702	0,679	0,668
Mramor	0,961	0,831	0,809	0,773	0,770	0,734	0,719	0,697	0,685
Kvarcit	1,362	0,698	0,641	0,621	0,598	0,583	0,574	0,557	0,540
Křemenný pískovec	1,420	0,755	0,709	0,693	0,687	0,679	0,667	0,639	0,631
Granodiorit	0,963	0,883	0,887	0,795	0,793	0,753	0,686	0,676	0,660
Žula	1,213	1,109	1,010	0,902	0,784	0,762	0,757	0,749	0,709
Andezit	1,246	1,154	1,143	0,919	0,868	0,762	0,751	0,741	0,741
Gabro	0,798	0,699	0,678	0,673	0,668	0,659	0,630	0,624	0,625
Steatit	2,704	2,045	1,959	1,735	1,704	1,671	1,639	1,586	1,579
Mikro-žula	1,646	0,887	0,820	0,799	0,765	0,732	0,691	0,667	0,659
Čedič	0,763	0,718	0,694	0,688	0,683	0,667	0,641	0,603	0,596

Tabulka 6.4 Výsledky měření tepelné difuzivity studovaných hornin při atmosférickém tlaku [28]



Graf 6.12 Závislost tepelné difuzivity křemenného pískovce na teplotě

Po proložení logaritmickou funkcí vznikla rovnice:

$$a(t) = -0,287 \cdot \ln(t) + 2,0326$$

Kde a značí tepelnou difuzivitu a t teplotu ve stupních. Křivka příliš neodpovídá naměřeným bodům, ale vzhledem k různorodosti složení hornin je to zanedbatelné.

6.4.4 Vlastnosti izolace

Na trhu je na výběr z velkého množství různých typů izolačních materiálů, z nichž každý má své uplatnění. Některé se využívají spíše ve stavebnictví, zatímco jiné zase v průmyslových aplikacích.

Mezi izolační materiály se řadí i například obecně známý polystyren. Velmi často se používá i minerální izolace či pěnové sklo.

Polystyren

Rozděluje se do 6 typů. Nejčastěji používaný je expandovaný polystyren EPS, který se vyznačuje deskami bílé barvy. Jelikož polystyren je původně hořlavý materiál, přidávají se do směsi samozhášecí složky. Tepelná vodivost tohoto typu je $\lambda = 0,040 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Objemová hmotnost EPS se pohybuje v intervalu $\rho = (15 \div 40) \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. [31]

Dalším typem je expandovaný polystyren (grafitový), jenž díky grafitovým nanočásticím významně snižuje sálavou složku přenosu tepla a dosahuje nižších hodnot tepelné vodivosti $\lambda = (0,030 \div 0,033) \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Objemová hmotnost je podobná jako u EPS, a to $\rho = (10 \div 40) \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. [31]

Expandovaný polystyren vyráběný do forem, tzv. perimetr, se vyrábí vypěňováním forem. Používá se především pro izolaci míst exponovaných vodou, jako jsou podzemní části budov. Díky drážkám může plnit i funkci drenáže. Součinitel tepelné vodivosti toho typu je $\lambda = 0,034 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a objemová hmotnost $\rho = (20 \div 40) \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. [31] Měrná tepelná kapacita v suchém stavu pěnových a vypěňovaných polystyrenů nabývá hodnoty $c = 1270 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ [37].

Zkratkou XPS se označuje extrudovaný polystyren, který se vyznačuje vysokou pevností v tlaku. Používá se do míst se statickým zatížením. Zároveň dobře odolává místům vystavených vodě. Jeho tepelná vodivost je $\lambda = (0,030 \div 0,038) \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Objemová hmotnost má vyšší hodnotu oproti ostatním typům $\rho = (30 \div 150) \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. [31] U extrudovaných neboli vytlačovaných polystyrenů je hodnota měrné tepelné kapacity $c = 2060 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ [37].

Minerální izolace

Minerální izolace se vyrábí ve dvou provedeních, a to buď jako tuhé desky, nebo měkké rohože, jež jsou následně srolovány do balíků. Jsou nehořlavé, díky čemuž mohou být použity v aplikacích pro zvýšenou požární bezpečnost. [32]

Kamenná vlna je vyráběna za vysokých teplot rozvlákněním bazaltu, popřípadě gabra.

Součinitel tepelné vodivosti u tohoto typu je roven $\lambda = (0,035 \div 0,045) \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a objemová hmotnost je v intervalu $\rho = (15 \div 35) \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. [32] Tato minerální izolace má měrnou tepelnou kapacitu $c = 880 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ [37].

Skelná vlna je vyráběna buď z nového, nebo z recyklovaného skla. To se následně rozvlákní. Oproti kamenné vlně má lepší izolační vlastnosti $\lambda = (0,030 \div 0,045) \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a vyšší objemovou hmotnost $\rho = (30 \div 100) \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. [32] U skelné vlny je měrná tepelná kapacita mírně vyšší oproti kamenné $c = 940 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ [37].

Pěnové sklo

Pěnové sklo se vyrábí ze skla. Obdobně jako u skelné vlny se využívá nového i recyklovaného materiálu s tím rozdílem, že zpěnění skelné hmoty zajišťuje uhlíkový prach. Ten se za tepla mění v oxid uhličitý. Přednostmi této izolace jsou vysoká únosnost v tlaku a také absolutní difuzní uzavřenost. Je tedy zcela parotěsná. Izolační účinky jsou horší než u předchozích $\lambda = (0,040 \div 0,060) \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. [33] Desky z pěnové skla mají měrnou tepelnou kapacitu $c = 840 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ [37].

Izolace PUR, PIR

Polyuretanová i polyisokianurátová izolace se primárně používá pro lití nebo stříkání přímo v místě aplikace, ale vyrábí se i ve formě desek. Desky mají tepelnou vodivost v rozmezí $\lambda = (0,022 \div 0,075) \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ s objemovou hmotností $\rho = (30 \div 100) \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ podle složení kompozitu. [34] Měrná tepelná kapacita odpovídá $c = 1500 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ [37].

U stříkané nebo lité PUR se tepelná vodivost pohybuje v rozmezí $\lambda = (0,033 \div 0,045) \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. V případě PIR $\lambda = (0,021 \div 0,023) \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, což je jedna z nejmenších tepelných vodivostí z izolačních materiálů. Objemová hmotnost je stejná jako u formy desek. U této struktury izolace PUR a PIR je měrná tepelná kapacita $c = 800 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ [37].

Fenolická pěna

Fenolická pěna se vyrábí napěňováním fenolformaldehydových pryskyřic do tvaru bloků. Ty se následně řežou na desky. Má velice dobré izolační vlastnosti, o čemž vypovídá součinitel vodivosti v rozmezí $\lambda = (0,021 \div 0,024) \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Objemová hmotnost tohoto typu izolace je $35 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. [34] Izolace z fenolické pěny má měrnou tepelnou kapacitu $c = 1250 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ [37].

Izolace z obnovitelných surovin

Dalšími možnostmi jsou izolace vyráběné například ze dřeva, celulózy, konopí, ovčí vlny nebo slámy. Všechny mají poměrně dobré izolační vlastnosti a velkou měrnou tepelnou kapacitu oproti například kamenné vlně. Díky tomu je prodloužen čas potřebný k prostupu tepla. Jejich nevýhodou je vysoká cena a nízká dostupnost. [35]

Pro izolaci zásobníku jsem zvolil minerální izolaci, konkrétně kamennou vlnu. Důvodem je nízká hodnota tepelné vodivosti a zaručená nehořlavost. Další výhodou minerálních izolací je jejich tvar. Jelikož se prodávají ve formě rohoží, mohou být jednoduše obloženy kolem válcového zásobníku.

6.5 Součinitel přestupu tepla uvnitř trubky

Přestup tepla konvekcí závisí na mnoha vlastnostech tekutiny jako například na dynamické viskozitě μ , tepelné vodivosti λ , hustotě ρ , měrné tepelné kapacitě c_p a také na rychlosti tekutiny w . Dále závisí na geometrii, kvalitě povrchu a v neposlední řadě na typu proudění. [24]

Pro výpočet součinitele přestupu tepla α je třeba zjistit vlastnosti vzduchu proudícího skrz trubku. Proudění by mělo být turbulentní kvůli lepšímu přenosu tepla mezi vzduchem a stěnou trubky. Při výpočtu budu počítat s plně rozvinutým prouděním. Součinitel α vypočítám s pomocí podobnostních čísel.

Jako první je potřeba zvolit rozměry trubky. Z technických důvodů by výška zásobníku neměla přesahovat tři metry. Z toho důvodu je maximální délka trubky (účastníci se přenosu) tři metry. Dále bude průměr trubky volen iteračně na základě vypočtených hodnot.

$$\begin{aligned}L_{nt} &= 3 \text{ m} \\d_{nt,i} &= 150 \text{ mm} \\t_{nt} &= 2 \text{ mm} \\d_{nt,e} &= d_{nt,i} + 2 \cdot t_{nt} = 154 \text{ mm}\end{aligned}$$

6.5.1 Kritéria podobnosti

Podle Buckinghamova principu potřebujeme pro určení součinitele přestupu tepla tři podobnostní kritéria. Prvním z nich je Reynoldsovo kritérium, které vyjadřuje poměr setrvačných a vazkých sil. Druhým je Prandtlovo, jež vyjadřuje poměr hybností a tepelné difuze. Posledním je Nusseltovo kritérium. To vyjadřuje poměr přenosu tepla konvekcí a difuzí (vedením). [23]

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda} \rightarrow \alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{L} \quad (6.9)$$

$$Re = \frac{w \cdot L}{\nu} \quad (6.10)$$

$$Pr = \frac{\nu \cdot \rho \cdot c}{\lambda} = \frac{\nu}{a} \quad (6.11)$$

Kriteriální rovnice má tvar: $Nu = f(Re, Pr)$.

U výpočtu Nusseltova čísla se α značí součinitel přestupu tepla, L je charakteristický rozměr (u válce je to jeho průměr) a λ značí tepelnou vodivost média. Pro výpočet Reynoldsova čísla je zapotřebí znát rychlost proudění média w , charakteristický rozměr L a kinematickou viskozitu média ν . Prandtlovo číslo lze spočítat na základě znalosti kinematické viskozity ν a tepelné difuzivity a . Difuzivita a je pak dána poměrem součinu hustoty ρ a měrné tepelné kapacity c k tepelné vodivosti λ .

Jelikož potřebuji zjistit hodnotu součinitele přestupu tepla, musím napřed spočítat Nusseltovo číslo. Pro výpočet Nusseltova čísla je nutné použít vztahy odvozené na základě experimentů.

Jedním z těchto vztahů je Dittus-Boelterova rovnice:

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^n \quad (6.12)$$

Platí pro: $0,7 \leq Pr \leq 160, Re > 10\,000$

Parametr n může být $n=0,4$ pro ohřev nebo $n=0,3$ pro ochlazování tekutiny proudící skrz trubku. V mém případě je tekutina v trubce ochlazována, protože předává teplo zásobníku, a proto zvolím $n=0,3$. Vlastnosti tekutiny je potřeba vyhodnotit pro střední teplotu proudu tekutiny T_{str} .

$$T_{str,vzd} = \frac{T_{vstup,vzd} - T_{výstup,vzd}}{2}$$

Kde $T_{vstup, vzd}$ je vstupní teplota a $T_{výstup, vzd}$ je výstupní teplota vzduchu. Tato rovnice je sice jednou z jednodušších na výpočet, ale zároveň dosahuje nepřesnosti až 25 %. Snížení této nepřesnosti na méně než 10 % je možno dosáhnout použitím složitějšího vztahu, a to pomocí druhé Petukhovovy rovnice. [24]

$$Nu = \frac{\frac{f}{8} \cdot Re \cdot Pr}{1,07 + 12,7 \cdot \left(\frac{f}{8}\right)^{0,5} \cdot \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \quad (6.13)$$

Platí pro: $0,5 \leq Pr \leq 2000, 10^4 < Re < 5 \cdot 10^6$

Pro nižší hodnoty Re je preferovaný upravený předchozí vztah: [24]

$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) \cdot (Re - 1000) \cdot Pr}{1 + 12,7 \cdot \left(\frac{f}{8}\right)^{0,5} \cdot \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \quad (6.14)$$

Platí pro: $0,5 \leq Pr \leq 2000, 3 \cdot 10^3 < Re < 5 \cdot 10^6$

Neznámá f je třecí faktor a pro hladké trubky se vypočítá z první Petukhovovy rovnice:

$$f = (0,790 \cdot \ln Re - 1,64)^{-2}$$

Pro: $10^4 < Re < 10^6$

Po dosazení třecího faktoru do upravené rovnice dostanu vztah:

$$Nu_{vzd} = \frac{\left(\frac{(0,790 \cdot \ln Re - 1,64)^{-2}}{8}\right) \cdot (Re - 1000) \cdot Pr}{1 + 12,7 \cdot \left(\frac{(0,790 \cdot \ln Re - 1,64)^{-2}}{8}\right)^{0,5} \cdot \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)}$$

V mých výpočtech budu používat tento vztah pro výpočet Nusseltova čísla.

Abych získal součinitel přestupu tepla, dosadím hodnotu Nusseltova čísla do rovnice:

$$\alpha = \frac{Nu_{vzd} \cdot \lambda_{vzd}}{d_{nt,i}}$$

6.6 Konvekce vně zásobníku

Zásobník může být uložen buď v zemi, nad zemí, nebo z části nad i pod zemí. Předpokládám, že akumulátor bude nad zemí, tudíž se bude ochlazovat pomocí konvekce na vzduchu.

6.6.1 Konvekce u stěn zásobníku

Jako první je potřeba spočítat Grashofovo podobnostní číslo. Na rozdíl od nucené konvekce, kde se určuje režim proudění podle Reynoldsova čísla, v případě přirozené konvekce charakterizuje režim proudění Grashofovo číslo. Vyjadřuje relativní velikost vztlakové síly a v opačném směru působící viskózní síly působící na tekutinu. [24]

$$Gr_L = \frac{g \cdot \beta(T) \cdot (T_{z,e} - T_{\infty}) \cdot L_c^3}{\nu^2(T)} \quad (6.15)$$

V uvedeném vzorci je g gravitační zrychlení a β koeficient objemové roztažnosti. Rozdíl teplot je mezi teplotou povrchu zásobníku a teplotou tekutiny v dostatečné vzdálenosti od povrchu. L_c značí charakteristický rozměr, jenž odpovídá průměru válcového akumulátoru. Ve jmenovateli je kinematická viskozita tekutiny.

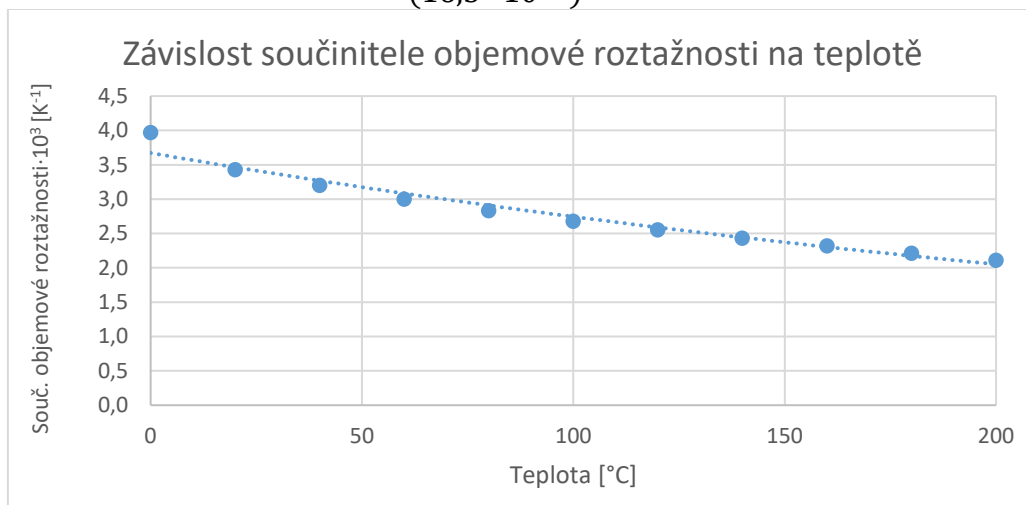
Pro výpočet Grashofova čísla je nutné zjistit koeficient objemové roztažnosti, jež je stejně jako ostatní veličiny vzduchu závislý na teplotě. Jeho hodnoty pro vzduch jsou vypsány v následující tabulce:

Teplota [°C]	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
Součinitel objemové roztažnosti ($\cdot 10^3$) [K ⁻¹]	3,97	3,43	3,20	3,00	2,83	2,68	2,55	2,43	2,32	2,21	2,11

Tabulka 6.5 Hodnoty součinitele objemové roztažnosti vzduchu při určitých teplotách [36]

Vzorový výpočet počítá s teplotou stěn zásobníku 50 °C a s teplotou okolního vzduchu 20 °C. Vlastnosti vzduchu jsou brány pro střední teplotu 35 °C.

$$Gr_L = \frac{9,81 \cdot 3,15 \cdot 10^{-3} \cdot (50 - 20) \cdot 3^3}{(16,3 \cdot 10^{-6})^2} = 1 \cdot 10^{11}$$



Graf 6.13 Závislost součinitele objemové roztažnosti na teplotě

$$\beta(t) = 3,6723 \cdot e^{-0,003 \cdot t}$$

Nicméně ve venkovním prostředí bude zásobník ovlivněn i nucenou konvekcí od větru. O tom, která z konvekcí může být zanedbána, rozhoduje poměr:

$$\frac{Gr_L}{Re_L^2} \tag{6.16}$$

Pokud je poměr: [24]

- menší jak 1, tak je zanedbatelná přirozená konvekce.
- větší jak 1, tak je zanedbatelná nucená konvekce.
- roven 1, tak jsou obě konvekce významné a nelze je zanedbat.

Pro porovnání je třeba vypočítat Reynoldsovo číslo. Ve výpočtu jsem zvolil hodnotu rychlosti větru $u_v = 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. [29]

$$Re = \frac{u_v \cdot D_{z,e}}{\nu} = \frac{3 \cdot 3}{16,3 \cdot 10^{-6}} = 5,5 \cdot 10^5 \tag{6.17}$$

Kritická hodnota Reynoldsova čísla pro obtékaný válec:

$$Re_{krit} \approx 2 \cdot 10^5$$

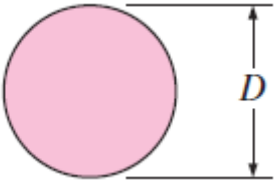
Výsledný poměr podobnostních čísel je:

$$\frac{Gr_L}{Re_L^2} = \frac{1 \cdot 10^{11}}{(6 \cdot 10^5)^2} = 0,32 < 1$$

Nucená konvekce je v mém případě dominantní, a proto použiji následující vzorec:

$$Nu_{válec} = \frac{\alpha \cdot D_e}{\lambda} = C \cdot Re^m \cdot Pr^n \quad (6.18)$$

Ve kterém je $n = \frac{1}{3}$ a konstanty C a m jsou experimentálně získané konstanty uvedené v následující tabulce.

Průřez válce	Typ tekutiny	Rozsah Re	Nusseltovo číslo
	Plyn nebo kapalina	0,4 až 4	$Nu = 0,989 \cdot Re^{0,330} \cdot Pr^{\frac{1}{3}}$
		4 až 40	$Nu = 0,911 \cdot Re^{0,385} \cdot Pr^{\frac{1}{3}}$
		40 až 4000	$Nu = 0,683 \cdot Re^{0,466} \cdot Pr^{\frac{1}{3}}$
		4000 až 40 000	$Nu = 0,193 \cdot Re^{0,618} \cdot Pr^{\frac{1}{3}}$
		40 000 až 400 000	$Nu = 0,027 \cdot Re^{0,805} \cdot Pr^{\frac{1}{3}}$

Tabulka 6.6 Empirická data pro průměrné Nusseltovo číslo pro nucenou konvekci [24]

Pro vypočtenou hodnotu Reynoldsova čísla je Nusseltovo číslo u stěn zásobníku:

$$Nu_{válec} = 0,027 \cdot Re^{0,805} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} = 994$$

Součinitel přestupu tepla na okraji zásobníku poté jednoduše spočítám jako:

$$\alpha_{vzd,s} = \frac{Nu_{válec} \cdot \lambda_{vzd}}{D_{z,e}} = \frac{1074 \cdot 0,02}{3} = 7,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

6.6.2 Konvekce z vrchní části zásobníku

Hodnoty Reynoldsova čísla a vlastnosti vzduchu jsou totožné i pro konvekci z horní části zásobníku. Změní se pouze Nusseltovo číslo. Kritická hodnota Reynoldsova čísla, pro které se proudění chová jako turbulentní, je pro ploché povrchy $Re_{krit} = 5 \cdot 10^5$.

Průměrná hodnota Nusseltova čísla se spočítá podle vztahu:

$$Nu_{hč} = 0,0296 \cdot Re^{\frac{4}{5}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} = 1020 \quad (6.19)$$

Tento vztah platí pro turbulentní proudění s hodnotou $Re \leq 10^8$ a velikost Prandtlova čísla v mezích $0,6 \leq Pr \leq 60$.

$$\alpha_{vzd,hč} = \frac{Nu_{hč} \cdot \lambda_{vzd}}{D_{z,e}} = 7,4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

6.7 Odhad hmotnosti písku

Při odhadu hmotnosti neuvažují ztráty. Rovněž zanedbávám hmotnost a měrnou tepelnou kapacitu vzduchu mezi zrny písku. Na druhou stranu počítám se změnou měrné tepelné kapacity s teplotou. Díky tomu mohu získat prvotní odhad rozměrů zásobníku.

$$\begin{aligned} Q_{z,dám} &= m_p \cdot c_{p,p} \cdot \Delta T & (6.20) \\ &= \rho_p \cdot V_p \cdot c_{p,p} \cdot \Delta T = \rho_p \cdot \pi \cdot r_{z,i}^2 \cdot L \cdot c_{p,p}(T) \cdot \Delta T \end{aligned}$$

Rozdíl teplot uvažují mezi teplotami 20 °C a 500 °C, což je 480 °C. ρ_p odpovídá hodnotě 1600 kg · m⁻³ pro křemičitý pískovec. Výšku zásobníku L_z zvolím tři metry. Hodnota tepla, jež je potřeba uložit, je rovna 4,6 MWh. Měrnou tepelnou kapacitu je třeba integrovat podle odpovídající funkce. Stupnice v grafu je ve stupních Celsia, a proto i meze integrálu volím ve stupních Celsia.

$$\begin{aligned} \int c_{p,p}(t) dt &= \int_{20}^{500} (-0,0007 \cdot t^2 + 0,832 \cdot t + 831,59) dt & (6.21) \\ &= \left(-0,0007 \cdot \frac{500^3}{3} + 0,832 \cdot \frac{500^2}{2} + 831,59 \cdot 500 \right) \\ &\quad - \left(-0,0007 \cdot \frac{20^3}{3} + 0,832 \cdot \frac{20^2}{2} + 831,59 \cdot 20 \right) = 473\,832 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \end{aligned}$$

Integraci c_p byl již započítán rozdíl teplot, tím pádem je jednotka J · kg⁻¹. Poloměr zásobníku získám jeho vyjádřením z rovnice (6.20).

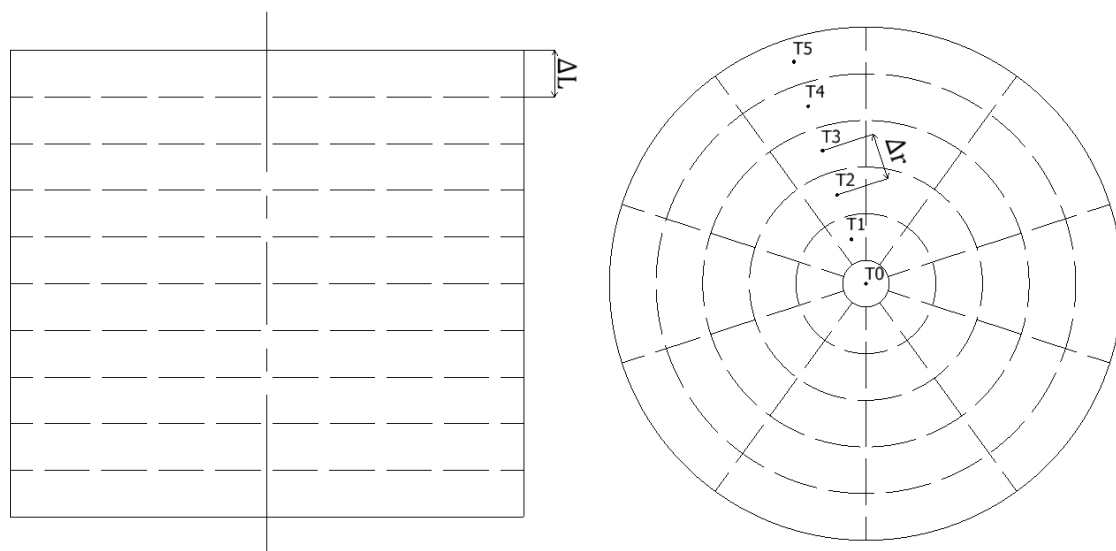
$$r_{z,i} = \sqrt{\frac{Q_z}{\rho_p \cdot \pi \cdot \int c_{p,p}(t) dt \cdot L_z}} \cong 1,52 \text{ m}$$

Celková hmotnost potřebného písku odpovídá:

$$\begin{aligned} m_p &= \rho_p \cdot V_p = \rho_p \cdot \pi \cdot r_{z,i}^2 \cdot L_z = 1600 \cdot \pi \cdot 1,52^2 \cdot 3 & (6.22) \\ &\cong 34840 \text{ kg} \end{aligned}$$

6.8 Metoda výpočtu

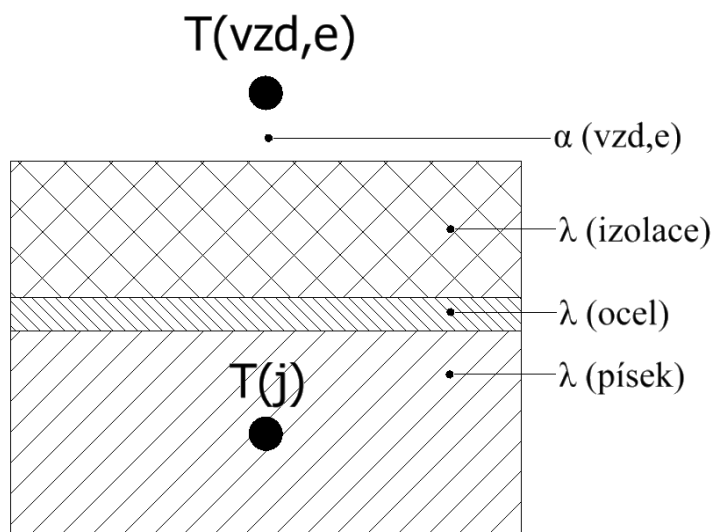
Za prvé je nutné určit, jakou metodou budu prostup tepla v zásobníku reprezentovat. Pro výpočet jsem zvolil numerickou metodu konečných diferencí, která je podobná metodě konečných prvků. U této metody je Δr vzdáleností mezi středy jednotlivých elementů. Zároveň se u krajů počítá s polovinou této vzdálenosti. Zásobník jsem rozdělil do jednotlivých kruhových průřezů po celé délce, přičemž každý kruh je rozdělen do výsečí a ty jsou dále rozděleny do menší částí. V objemu každého elementu předpokládám konstantní teplotu.



Obrázek 6.3 Popis rozdělení zásobníku do konečného počtu prvků

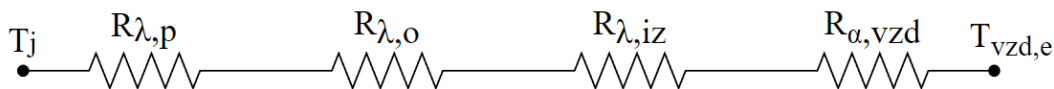
6.9 Ztráty z horní části zásobníku

Ve vrchní části zásobníku bude docházet ke ztrátám v důsledku prostupu tepla ze zásobníku do okolí. Velikost ztrát bude záviset na rozdílu teplot mezi zásobníkem a okolím, na odporu oceli, izolace a také na velikosti konvekce vně zásobníku.



Obrázek 6.4 Schéma elementu v horní části zásobníku

$$Q_{c,hč} = \frac{T_j - T_{vzd,e}}{R_{j-vzd,e}} \quad (6.23)$$



Obrázek 6.5 Odporové schéma mezi teplotami T_j a $T_{vzd,e}$

$$R_{j-vzd,e} = R_{\lambda,p} + R_{\lambda,o} + R_{\lambda,iz} + R_{\alpha,vzd,e}$$

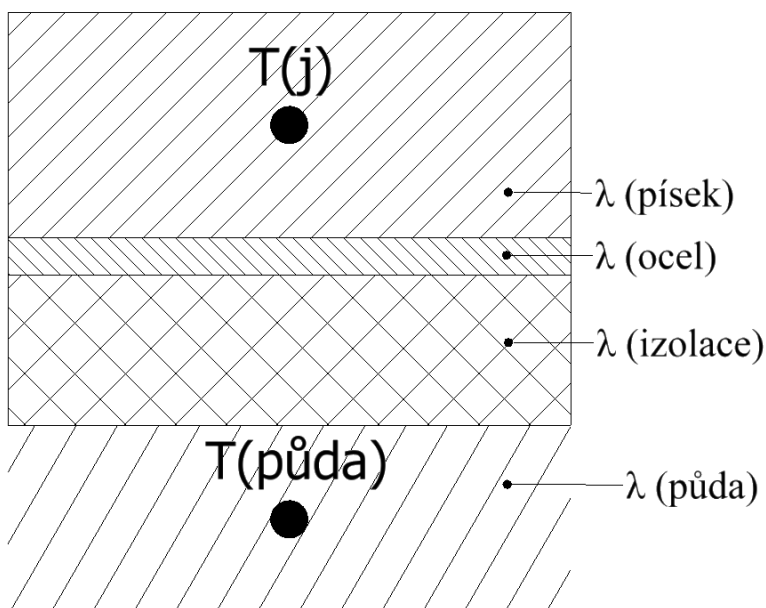
$$R_{j-vzd,e} = \frac{1}{S_j} \cdot \left(\frac{\Delta L}{2} \cdot \frac{1}{\lambda_p} + \frac{t_{l_o}}{\lambda_o} + \frac{t_{l_{iz}}}{\lambda_{iz}} + \frac{1}{\alpha_{vzd,e}} \right)$$

Tloušťka ocelové stěny zásobníku je značena t_{l_o} , tloušťka izolace $t_{l_{iz}}$ a α je součinitel přestupu tepla okolního vzduchu. S_j je plocha elementu. Vzorec je uveden pro první element a další elementy mají poloměr vždy o Δr větší. n_v značí počet výsečí, do kterých jsou mezikruží rozdělena.

$$S_1 = \frac{\pi \cdot \left((r_{nt,e} + \Delta r)^2 - r_{nt,e}^2 \right)}{n_v}$$

6.10 Ztráty ve spodní části zásobníku

Zásobník bude zesponu zaizolován stejně jako z ostatních stran. Postup výpočtu bude podobný jako u ztrát z horní části zásobníku s tím rozdílem, že na místo konvekce vzduchu bude teplo odebíráno do půdy. Předpokládám přenos tepla do jednoho metru hloubky půdy s teplotou půdy 5°C . U tepelné vodivosti půdy budu počítat s $\lambda_{p\u00fada} = 0,7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, což je vodivost suché hlíny [41].



Obrázek 6.6 Schéma elementu ve spodní části zásobníku

$$Q_{c,dě} = \frac{T_j - T_{p\u00fcd\u00e1}}{R_{j-p\u00fcd\u00e1}} \quad (6.24)$$



Obr\u00e1zek 6.7 Odporov\u00e9 sch\u00e9ma mezi teplotami T_j a $T_{p\u00fcd\u00e1}$

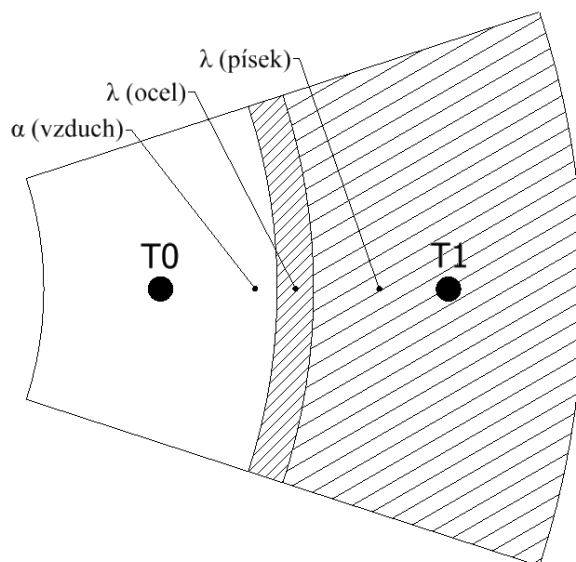
$$R_{j-p\u00fcd\u00e1} = R_{\lambda,o} + R_{\lambda,o} + R_{\lambda,iz} + R_{\lambda,p\u00fcd\u00e1}$$

$$R_{j-p\u00fcd\u00e1} = \frac{1}{S_j} \cdot \left(\frac{\Delta L}{\lambda_p} + \frac{tl_o}{\lambda_o} + \frac{tl_{iz}}{\lambda_{iz}} + \frac{tl_{p\u00fcd\u00e1}}{\lambda_{p\u00fcd\u00e1}} \right)$$

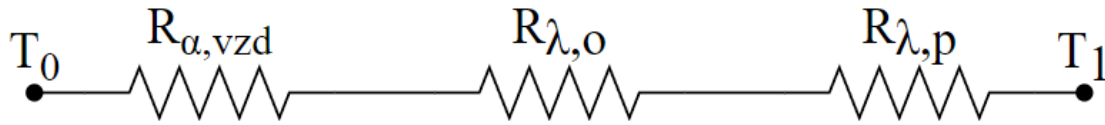
6.11 Nab\u00edjec\u00ed f\u00e1ze

V akumul\u00e1toru budou prob\u00edhat celkem se t\u0159i re\u017eimy provozu. Prvn\u00edm z nich je nab\u00edjen\u00ed, b\u011bh\u00e9m kter\u00e9ho je do akumul\u00e1toru dod\u00e1v\u00e1no teplo a roste jeho teplota. Dal\u0161\u00edm je vyrovn\u00e1v\u00e1n\u00ed. V t\u00e9to f\u00e1zi se p\u0159est\u00e1v\u00e1 do z\u00e1sobn\u00edku dod\u00e1vat teplo. Teploty v z\u00e1sobn\u00edku se postupn\u011b srovn\u00e1v\u00e1j\u00ed. Posledn\u00ed z f\u00e1zi je vyb\u00edjen\u00ed, b\u011bh\u00e9m n\u00ed\u017e bude teplo ze z\u00e1sobn\u00edku odeb\u00edr\u00e1no, a tud\u00ed\u017e bude v\u00fdrazn\u011b klesat teplota p\u00edsku v okolí odb\u011br\u00fa.

Po\u00e1te\u00e7n\u00edm krokem je v\u00fdpo\u00e7et tepeln\u00fdch odpor\u00fa v jednotliv\u00fdch elementech. V elementech kolem topn\u00e9 trubky je celkov\u00fd odpor slo\u017een ze t\u0159\u00ed s\u00e9riov\u011b \u0159azen\u00fdch odpor\u00fa, odporem vznikl\u00fdm konvekci v trubce, vodivitost\u00ed v trubce a vodivitost\u00ed v p\u00edsku. Z\u00e1rove\u0148 sou\u00e7initel p\u0159estupu tepla na stran\u011b vzduchu a vodivost p\u00edsku jsou parametry z\u00e1visl\u00e9 na teplot\u011b. Δr a ΔL vyjad\u0159uj\u00ed velikosti jednotliv\u00fdch element\u00fa.



Obr\u00e1zek 6.8 Sch\u00e9ma element\u00fa mezi teplotami T_0 a T_1



Obrázek 6.9 Odporové schéma mezi teplotami T_0 a T_1

$$R_{cel} = R_{\alpha, vzd} + R_{\lambda, o} + R_{\lambda, p} \quad (6.25)$$

Po dosazení za jednotlivé odpory do rovnice (6.25):

$$R_{0-1} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_{nt,i} \cdot \alpha_{nt,i}(T) \cdot \Delta L} + \frac{\ln \frac{r_{nt,e}}{r_{nt,i}}}{2 \cdot \pi \cdot \Delta L \cdot \lambda_o} + \frac{\ln \frac{r_{nt,e} + \frac{\Delta r}{2}}{r_{nt,e}}}{2 \cdot \pi \cdot \Delta L \cdot \lambda_p(T)}$$

Úprava rovnice (6.25) po dosazení vytknutím:

$$R_{0-1} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \Delta L} \cdot \left[\frac{1}{r_{nt,i} \cdot \alpha_{nt,i}(T)} + \frac{\ln \frac{r_{nt,e}}{r_{nt,i}}}{\lambda_o} + \frac{\ln \frac{r_{nt,e} + \frac{\Delta r}{2}}{r_{nt,e}}}{\lambda_p(T)} \right]$$

Poté můžu spočítat tepelný tok z trubky do středu prvního elementu. Délkový rozměr je započítán již v odporu. Jednotka odporu je $K \cdot W^{-1}$.

$$Q_{0-1} = \frac{T_0 - T_1}{R_{0-1}} \quad (6.26)$$

Z přeneseného tepla Q_{0-1} lze spočítat nárůst teploty v prvním elementu za čas τ , přičemž počítám se změnou tepelné kapacity písku na teplotě. U hmotnosti elementů nepočítám s hmotností vzduchu, protože je zanedbatelná. Parametr n_v určuje počet výsečí, na které jsou mezikruží rozděleny. Teplota uvnitř trubky T_0 je v první vrstvě rovna $500 \text{ }^\circ\text{C}$.

Ještě je potřeba započítat teplo Q_{1-2} , jež je z elementu s teplotou T_1 odebíráno.

$$Q_{1-2} = \frac{T_1 - T_2}{R_{1-2}} \quad (6.27)$$

Pro teplo dodané do elementu E_1 platí rovnost:

$$Q_{E1} = m_1 \cdot c_{p,p}(T) \cdot \Delta T_1 = (Q_{0-1} - Q_{1-2}) \cdot \frac{\tau}{n_v} \quad (6.28)$$

Vyjádřením ΔT_1 z rovnice (6.28) zjistím o jakou teplotu se element E_1 ohřál.

$$\Delta T_1 = \frac{(Q_{0-1} - Q_{1-2}) \cdot \frac{\tau}{n_v}}{c_{p,p}(T) \cdot m_1}$$

$$m_1 = \rho_p \cdot V_1 = \frac{\rho_p \cdot \Delta L \cdot \pi}{n_v} \cdot \left[(r_{nt,e} + \Delta r)^2 - (r_{nt,e})^2 \right]$$

Teplota prvního elementu se spočítá jako součet teploty elementu E_1 v předchozím čase a rozdílu teploty.

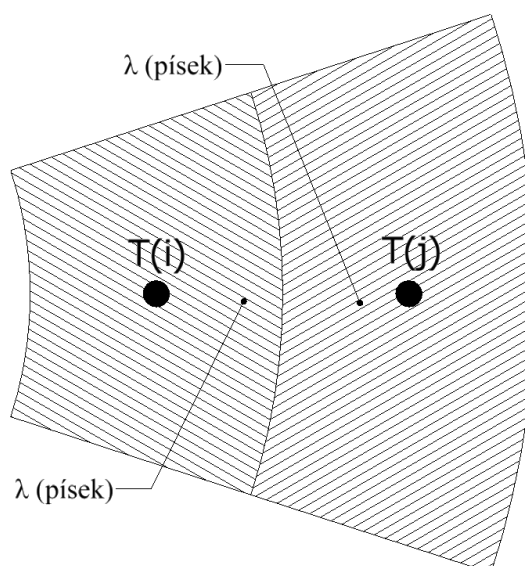
$$T_1 = T_{1,0} + \Delta T_1$$

Jelikož teplo Q_{0-1} odebíráme ze vzduchu v trubce, musí se podle zákona o zachování energie tento vzduch ochladit. Předpokládám, že v každé vrstvě akumulátoru je teplota vzduchu konstantní.

Teplota vzduchu v navazující vrstvě se spočítá jako:

$$T_{vzd,2} = T_{vzd,1} - \frac{Q_{0-1} \cdot \frac{\tau}{n_v}}{c_{p,p}(T) \cdot m_1} \quad (6.29)$$

Další elementy mají odpor ovlivněný pouze vodivostí písku. Odpory R_{i-j} a $R_{j-(j+1)}$ se liší pouze v poloměrech elementů. Index j nabývá hodnot od dvou až po určený počet. Index i je roven $j-1$.



Obrázek 6.10 Schéma elementů mezi teplotami T_i a T_j

$$R_{i-j} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \Delta L \cdot \lambda_p(T)} \cdot \ln \left(\frac{r_{nt,e} + \frac{\Delta r}{2} + j \cdot \Delta r}{r_{nt,e} + \frac{\Delta r}{2} + i \cdot \Delta r} \right) \quad (6.30)$$

Následující postup je analogický s předchozím.

$$Q_{i-j} = \frac{T_i - T_j}{R_{i-j}} \quad (6.31)$$

$$Q_{j-(j+1)} = \frac{T_j - T_{j+1}}{R_{j-(j+1)}} \quad (6.32)$$

Obdobně jako z rovnosti pro element E_1 z rovnice (6.28) dostanu změnu teploty v elementu E_j .

$$\Delta T_j = \frac{(Q_{i-j} - Q_{j-(j+1)}) \cdot \frac{\tau}{n_v}}{c_{p,p}(T) \cdot m_j} \quad (6.33)$$

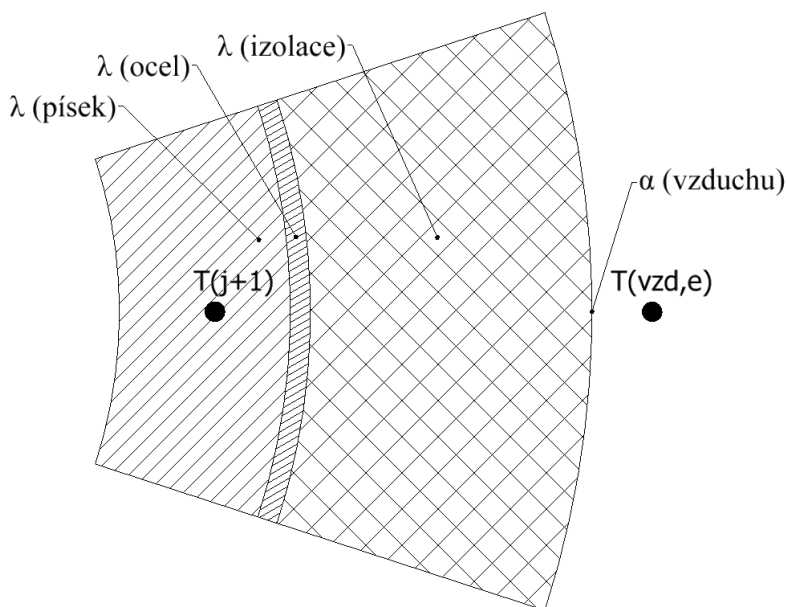
$$m_j = \rho_p \cdot V_j = \frac{\rho_p \cdot \Delta L \cdot \pi}{n_v} \cdot \left[(r_{nt,e} + (j+1) \cdot \Delta r)^2 - (r_{nt,e} + j \cdot \Delta r)^2 \right]$$

Opět je nutno zohlednit zákon zachování energie, takže teplo Q_{i-j} dodané do elementu j musí být odebráno elementu i . Stejně tak teplo dodané do elementu $j+1$ musí být odebráno elementu j a tak dále.

Teplota v T_j je poté rovna součtu ΔT_j a teploty v předešlém čase $T_{j,0}$:

$$T_j = T_{j,0} + \Delta T_j$$

Za parametry závislé na teplotě dosadím funkce vzniklé proložení křivek, kde za vztažnou teplotu dosazuji teplotu elementu v předešlém čase. Dochází tím sice k určité chybě, nicméně ji lze redukovat snížením časových intervalů.



Obrázek 6.11 Schéma elementů mezi teplotami T_{j+1} a $T_{vzd,e}$

Z krajních elementů bude odebíráno teplo do okolí v důsledku rozdílu teploty oproti okolnímu vzduchu. Ztráty v těchto elementech závisí kromě rozdílu teplot na tloušťce pláště zásobníku, na tloušťce izolace a na součiniteli přestupu tepla, jež je funkcí venkovní teploty.

$$Q_{c,s} = \frac{T_{(j+1)} - T_{vzd,e}}{R_{(j+1)-okolí}} \quad (6.34)$$



Obrázek 6.12 Odporové schéma u vnějšího kraje

$$R_{(j+1)-okolí} = R_{λ,p} + R_{λ,o} + R_{λ,iz} + R_{α,vzd,e} \quad (6.35)$$

$$R_{(j+1)\text{-okolí}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \Delta L} \cdot \left[\frac{\ln \frac{r_{nt,e} + (j+2) \cdot \Delta r - tl_{pl}}{r_{nt,e} + (j+1) \cdot \Delta r + \frac{\Delta r}{2}}}{\lambda_p(T)} + \frac{\ln \frac{r_{nt,e} + (j+2) \cdot \Delta r}{r_{nt,e} + (j+1) \cdot \Delta r - tl_{pl}}}{\lambda_o} \right. \\ \left. + \frac{\ln \frac{r_{nt,e} + (j+2) \cdot \Delta r + tl_{iz}}{r_{nt,e} + (j+2) \cdot \Delta r}}{\lambda_{iz}} + \frac{1}{\alpha_{vzd,e}(T) \cdot (r_{nt,e} + (j+2) \cdot \Delta r + tl_{iz})} \right] \\ \Delta T_{j+1} = \frac{(Q_{j-(j+1)} - Q_{c,s}) \cdot \frac{\tau}{n_v}}{c_{p,p}(T) \cdot m_{(j+1)}} \quad (6.36)$$

Výsledná teplota v dalším čase v krajním elementu tím pádem je:

$$T_{j+1} = T_{(j+1),0} + \Delta T_{j+1}$$

Těmito rovnicemi je popsán matematický model nabíjení zásobníku, který zahrnuje odpory mezi jednotlivými elementy, proměnné závislé na teplotě a další veličiny související s prostorem tepla. Do elementů v dolní a horní vrstvě zásobníku je třeba započítat i adekvátní ztráty.

6.11.1 Teplota povrchu zásobníku

Teplota povrchu zásobníku závisí především na tloušťce a kvalitě použité izolace a také na teplotě písku.

$$T_{iz} = T_p - Q_{c,s} \cdot (R_{(j+1)\text{-okolí}} - R_{\alpha,vzd,e})$$

V následující tabulce je vypočítána teplota povrchu zásobníku pro různé tloušťky izolace. Počítám s konstantní tepelnou vodivostí $\lambda = 0,035 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

T_{j+1}	$T_{iz} (tl_{iz}=0,3 \text{ m})$	$T_{iz} (tl_{iz}=0,2 \text{ m})$	$T_{iz} (tl_{iz}=0,1 \text{ m})$
[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
50	20,5	20,7	21,4
100	21,3	21,9	23,9
150	22,2	23,3	26,6
200	23,2	24,8	29,6
250	24,2	26,4	32,7
300	25,3	28,1	36,1
350	26,6	30,0	39,7
400	27,8	31,9	43,5
450	29,2	33,9	47,5
500	30,6	36,1	51,7

Tabulka 6.7 Závislost teploty povrchu zásobníku na tloušťce izolace

6.11.2 Výpočet rozměrů a množství nabíjecích trubek

Podle orientačních výpočtů by byla jedna trubka nepraktická, neboť by musela mít průměr přes dva metry a rychlost vzduchu by musela být přes $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Proto bude muset být zásobník nabíjen množstvím trubek, jejichž počet závisí jak na jejich rozměrech, tak i na vlastnostech vzduchu v daných teplotách. Každé vrstvě zásobníku předají trubky jiné množství tepla. Při vstupu horkého vzduchu do nabíjecích trubek bude

předáno největší množství tepla, zatímco na konci trubek, kde už je teplota vzduchu nižší, bude předáno méně tepla.

Počet a rozměry trubek jsou dány rychlostí přenosu tepla z potrubí do písku. Potřebuji zajistit, aby byl tepelný výkon $\dot{Q} = 2434 \text{ W}$ do zásobníku dodáván i při vysokých teplotách. Pro zachování dostatečné symetričnosti volím počet trubek $n_{nt} = 10$. Tepelný výkon dodáváný do zásobníku bude rozdělen rovnoměrně mezi těchto 10 trubek. Jako vztahnou teplotu, při které chci zachovat dodáváný výkon, volím teplotu písku $T_p = 490 \text{ }^\circ\text{C}$. Pro vyšší hodnoty dosahuje geometrie potrubí příliš velkých rozměrů. Vlastnosti vzduchu jsou brány pro jeho nejvyšší teplotu, a to $T_{vzd,vstup} = 500 \text{ }^\circ\text{C}$.

$$\dot{Q} = \frac{T_{vzd,vstup} - T_p}{R_{0-1}} \quad (6.37)$$

$$R_{0-1} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \Delta L} \cdot \left[\frac{1}{r_{nt,i} \cdot \alpha_{vzd,nt}(T)} + \frac{\ln \frac{r_{nt,e}}{r_{nt,i}}}{\lambda_o} + \frac{\ln \frac{r_{nt,e} + \frac{\Delta r}{2}}{r_{nt,e}}}{\lambda_p(T)} \right]$$

Za ΔL dosazují tři metry neboli celou délku jedné trubky. Ze vzorce je vidět, že odpor je závislý jak na rychlosti vzduchu, tak i na vnitřním poloměru trubky. Vnější poloměr vyjádřím jako funkci vnitřního poloměru. Δr je vypočteno na základě rozměrů zásobníku, počtu elementů, velikosti a rozestavení nabíjecích trubek.

Iteračně volím rychlost a poloměr trubky tak, aby se hodnota dodávaného tepla blížila požadované. Pro rychlost vzduchu $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a vnitřní průměr trubky $206,4 \text{ mm}$ vychází hodnota $\dot{Q}_{vstup} = 243,2 \text{ W}$. Pro tuto hodnotu tepla bude teplota písku, při které bude zachován dostatečný předávaný výkon, rovna $489,99 \text{ }^\circ\text{C}$. To je zanedbatelná odchylka od původní požadované teploty písku. Vnější průměr použité trubky je 219 mm s tloušťkou stěny $6,3 \text{ mm}$.

Tímto výpočtem jsem zajistil, aby tepelný výkon byl dodáván při teplotě vzduchu $500 \text{ }^\circ\text{C}$. Zároveň bude vzduch při průchodu potrubím snižovat svou teplotu, a tím se bude snižovat i množství předávaného tepla. Zvýšením rychlosti proudění, jež zvýší přestup tepla lze dosáhnout požadovaného dodávaného výkonu.

$$\dot{Q}_{vstup} = \Delta T \cdot c_{p,vzd}(T) \cdot \dot{m}_{vzd}$$

\dot{Q}_{vstup} je tepelný výkon dodáváný do zásobníku. ΔT je rozdíl mezi vstupní a výstupní teplotou vzduchu.

$$\Delta T = T_{vzd,vstup} - T_{vzd,výstup}$$

$$\text{Vlastnosti vzduchu jsou brány pro střední teplotu vzduchu } T_{str} = \frac{T_{vzd,vstup} + T_{vzd,výstup}}{2}$$

$$\dot{m}_{vzd} = \rho_{vzd}(T_{str}) \cdot \dot{V} = \rho_{vzd}(T_{str}) \cdot S \cdot v_{vzd} = \rho_{vzd}(T_{str}) \cdot w_{vzd,nt} \cdot \pi \cdot r_{nt,i}^2 \cdot n_{nt}$$

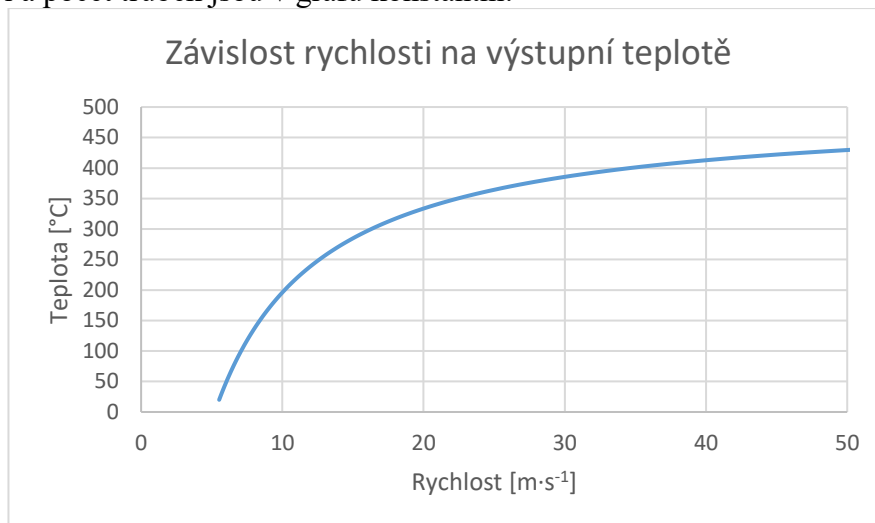
Po dosazení:

$$\dot{Q}_{vstup} = (T_{vzd,vstup} - T_{vzd,výstup}) \cdot c_{p,vzd}(T_{str}) \cdot \rho_{vzd}(T_{str}) \cdot w_{vzd,nt} \cdot \pi \cdot r_{nt,i}^2 \cdot n_{nt}$$

Vyjádření potřebné rychlosti vzduchu:

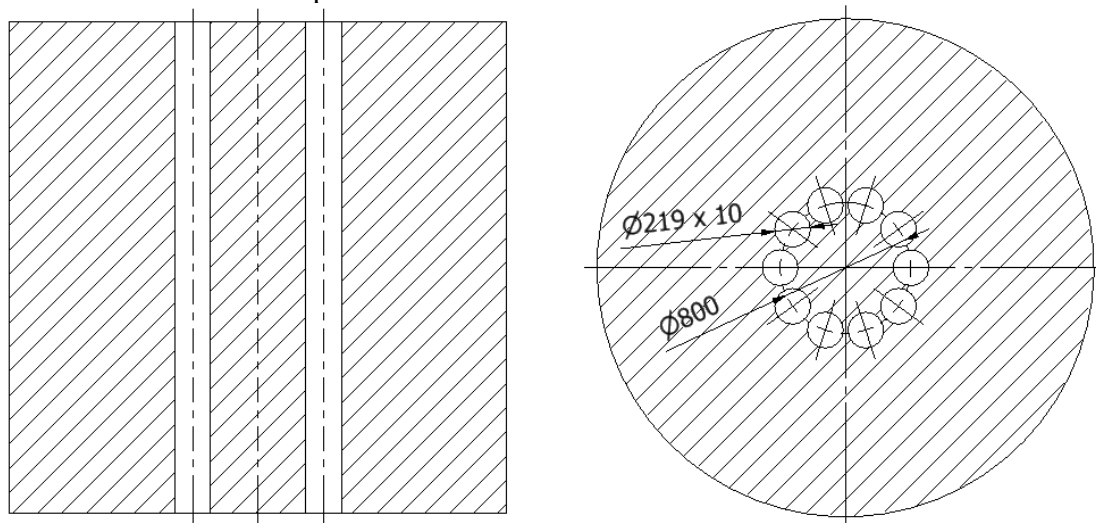
$$w_{vzd,nt} = \frac{\dot{Q}_{vstup}}{(T_{vzd,vstup} - T_{vzd,výstup}) \cdot c_{p,vzd}(T_{str}) \cdot \rho_{vzd}(T_{str}) \cdot \pi \cdot r_{nt,i}^2 \cdot n_{nt}}$$

Rychlost vzduchu je závislá na rozdílu teplot mezi vstupem a výstupem z nabíjecího potrubí, což souvisí i s vlastnostmi vzduchu závislých na teplotě. Veličiny jako výkon, vnitřní poloměr potrubí a počet trubek jsou v grafu konstantní.



Graf 6.3 Závislost rychlost vzduchu na výstupní teplotě

Z grafu je možné vypožorovat, že s rostoucí výstupní teplotou je potřeba zvyšovat rychlost proudění, aby byl zachován přenášený tepelný výkon do zásobníku. Důvodem je klesající teplotní rozdíl mezi vstupním a výstupním vzduchem. Díky regulaci rychlosti pomocí ventilátoru bude zachováno teplo dodávané do zásobníku.



Obrázek 6.13 Rozložení nabíjecích trubek v zásobníku

6.12 Vyrovnávací fáze

Předchozí část shrnuje vše potřebné pro nabíjení zásobníku. Dále budu řešit druhou fázi, kterou je srovnávání teploty při nulové dodávce tepla. Budu předpokládat, že nabíjecí potrubí jsou v této fázi dokonale zaizolovány, takže nevznikají ztráty.

Největší změnou ve porovnání s nabíjením je, že teplo nebude dodáváno od trubky, takže $Q_{0-1} = 0$ J. Zároveň se ale stále bude odebírat teplo z elementu s teplotou T_1 do elementu s teplotou T_2 a tak dále. Tímto se teploty v zásobníkům srovnávají. Po dostatečně dlouhé době by nastal rovnovážný stav.

Rovnice pro nabíjení platí i pro následné srovnání teplot v zásobníku až na rovnici mezi nabíjecími trubkami a elementem jedna.

$$Q_{0-1} = 0 J \quad (6.38)$$

$$\Delta T_1 = \frac{(Q_{0-1} - Q_{1-2}) \cdot \frac{\tau}{n_v}}{c_{p,p}(T) \cdot m_1} < 0 \quad (6.39)$$

$$T_1 = T_{1,0} + \Delta T_1$$

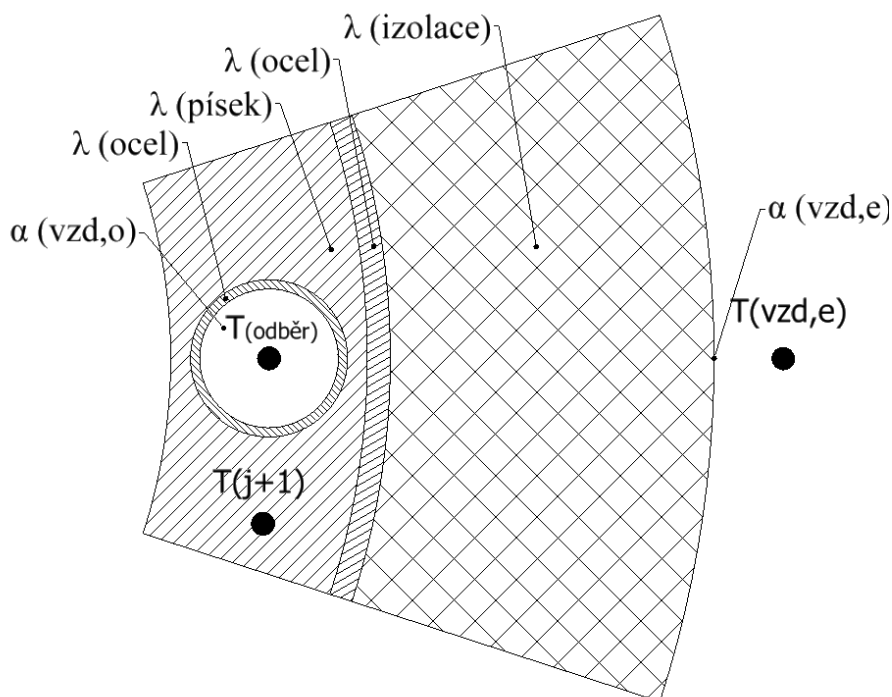
6.13 Vybíjecí fáze

Teplo bude kvůli snížení tepelné ztráty do okolí odebíráno z okrajových oblastí. Množství vybíjecího tepla, které je třeba předat do rodinného domu, je určeno v rovnici **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**

$$\dot{Q}_{c,dům} = \dot{Q}_{vybíjecí} = 6,6 kW$$

Pokud by se měla ohřívat i TUV, bylo by nutné zvýšit výkon minimálně o 2 kW vyšší. Tato hodnota je brána jako přibližná hodnota příkonu bojleru pro čtyři lidi. Tím pádem by $Q_{vyb} = 8,6 kW$. Parametry budu navrhovat na pravidelnou dodávku 6,6 kW.

6.13.1 Výpočet rozměrů a množství vybíjecích trubek



Obrázek 6.14 Schéma elementů u vybíjecího potrubí

Množství tepla, které je potřeba pro ohřev vzduchu.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{vybíjecí} &= \dot{m}_{vzd,vt} \cdot c_{p,vzd}(T_{str}) \cdot \Delta T \\ \dot{m}_{vzd,vt} &= \rho_{vzd}(T_{str}) \cdot w_{vzd,vt} \cdot \pi \cdot r_{vt,i}^2 \cdot n_{vt} \end{aligned} \quad (6.40)$$

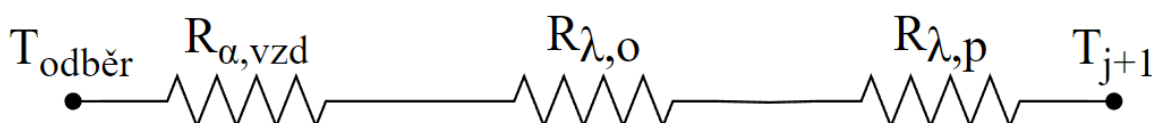
$$\Delta T = T_{vzd,výstup} - T_{vzd,vstup}$$

Dosazení do rovnice (6.40)

$$\dot{Q}_{vybíjecí} = \rho_{vzd}(T_{str}) \cdot w_{vzd,vt} \cdot \pi \cdot r_{vt,i}^2 \cdot n_{vt} \cdot c_{p,vzd}(T_{str}) \cdot (T_{vzd,výstup} - T_{vzd,vstup})$$

Teplotu vycházející z odběrového potrubí je problematické regulovat vzhledem k rozdílným teplotám v zásobníku během času. Proto je třeba na výstupu umístit směšovací výměník, ve kterém se bude míchat vzduch ze zásobníku se vzduchem z okolí na potřebnou teplotu.

Odpor prostupu tepla je tvořen odporem písku, materiálu potrubí a odporem daným součinitelem přestupu tepla na straně proudícího vzduchu.



Obrázek 6.15 Odporové schéma pro prostup tepla do odběrového potrubí

$$R_{odběr-(j+1)} = R_{\alpha,vzd} + R_{\lambda,o} + R_{\lambda,p} \quad (6.41)$$

$$R_{odběr-(j+1)} = \frac{\ln \frac{r_{vt,e}}{r_{vt,i}}}{2 \cdot \pi \cdot \Delta L \cdot \lambda_o} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_{vt,i} \cdot \Delta L \cdot \alpha_{vzd,vt}} + \frac{\ln \frac{r_{nt,e} + \frac{\Delta r}{2}}{r_{nt,e}}}{2 \cdot \pi \cdot \Delta L \cdot \lambda_p(T)}$$

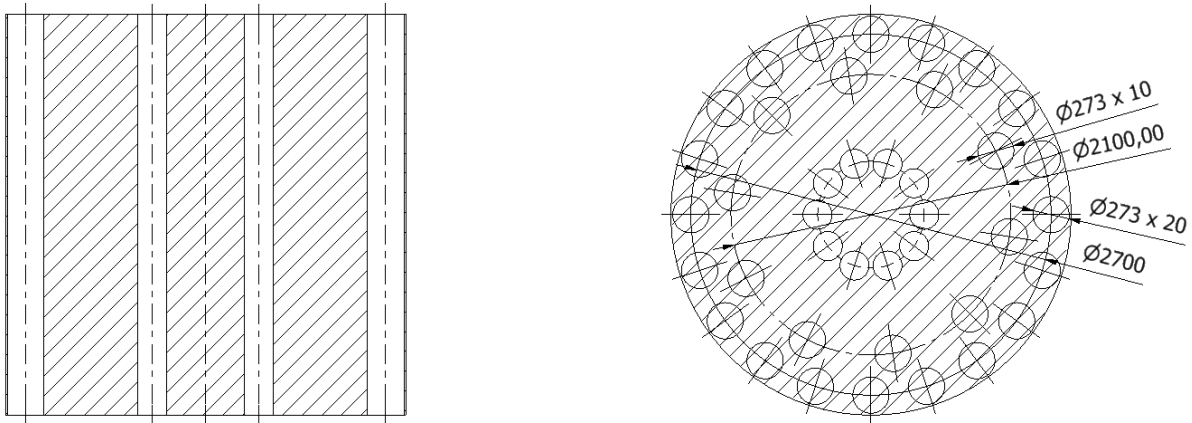
$$\dot{Q}_{vybíjecí} = \frac{T_{j+1} - T_{vzd,výstup}}{R_{odběr-(j+1)}} \quad (6.42)$$

Návrh počtu trubek a jejich geometrie závisí především na množství vzduchu, jenž dokáže pojmout dostatečné množství tepla. Pro zvýšení množství tepla je nutné vzduch ohřívat na vyšší teploty. Pokud by byl vzduch nahříván na nižší teploty než například 50 °C, hmotnostní tok vzduchu by byl příliš velký, než aby mohl být přenášen vhodnými rozměry trubek a jejich množstvím.

Návrh je proveden tak, aby počet trubek a jejich geometrie byly co nejmenší a zároveň byly zachovány odpovídající parametry. ΔL je v tomto případě brána jako délka celého zásobníku, neboť předpokládám stejnou teplotu po celé výšce. Počítám s tím, že teplota písku musí být o 5 °C vyšší než výstupní teplota vzduchu, aby bylo zaručeno ohřátí vzduchu na danou teplotu. Parametry vzduchu jsou brány pro střední teplotu mezi výstupní a vstupní teplotou.

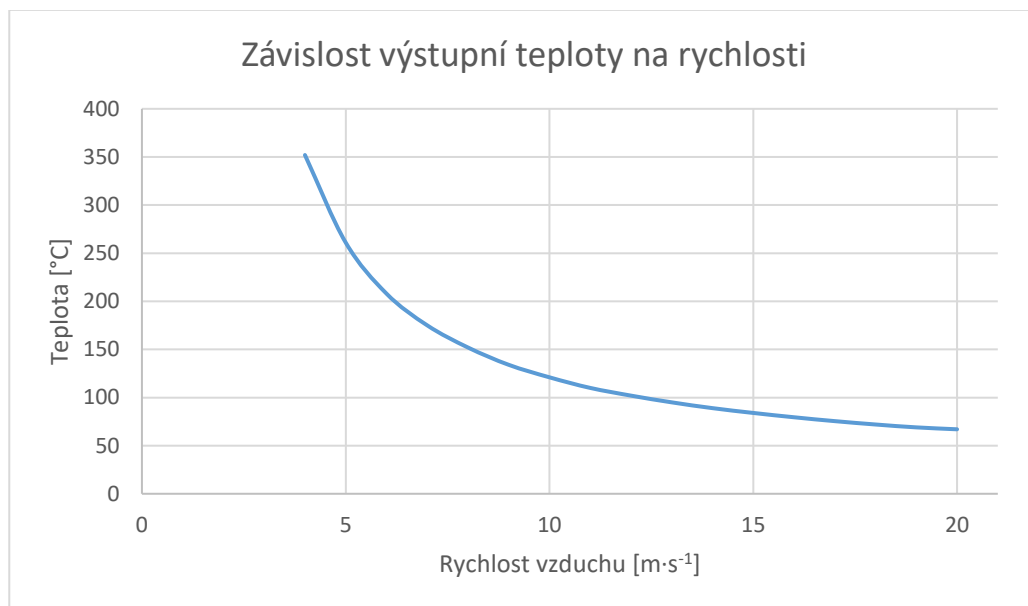
Při zvolené rychlosti proudění 20 m·s⁻¹ a počtu trubek 30 kusů s vnitřním průměrem 260,4 mm je dosažen výkon $\dot{Q}_{vybíjecí} = 6670 W$ při teplotě výstupního vzduchu 67 °C. Potřebná teplota písku tím pádem musí být 72 °C.

Kvůli snaze zachovat symetričnost akumulátoru jsou trubky uloženy podle následujícího schématu.



Obrázek 6.16 Rozložení vyhřívacích trubek v zásobníku

Závislost změny rychlosti na výstupní teplotě vzduchu je znázorněna v následujícím grafu. Pokud chceme zachovat odebíraný výkon ze zásobníku i při nižších teplotách výstupního vzduchu, je třeba zvýšit rychlost proudění. Při rychlostech nižších než $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ je zapotřebí počítat s vyšším rozdílem teplot mezi pískem a výstupní teplotou, aby byl zachován dostatečný teplotní spád.



Graf 6.4 Závislost výstupní teploty na rychlosti vzduchu

Předpokládám, že maximální možná rychlost proudění ve vybíjecím potrubí je $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Se snižující se teplotou písku v okrajové vrstvě klesá maximální dostupný výkon, jenž lze ze zásobníku odebrat při rychlosti vzduchu $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Závislost dostupného výkonu na teplotě písku při této rychlosti je zobrazena v grafu níže.



Graf 6.5 Závislost dostupného výkonu na teplotě písku

6.13.2 Směšovací výměník

Výstupní vzduch bude mít různou teplotu v závislosti na aktuální teplotě písku, a proto je třeba ji regulovat podle potřeby. Pro regulaci teploty je třeba připojit směšovací výměník, ve kterém se bude míchat vzduch z akumulátoru s venkovním vzduchem. Výsledná teplota bude záviset na teplotách obou vzduchů a na jejich průtocích.

$$\dot{Q}_{\text{žádané}} = \dot{Q}_{\text{vybíjecí}} + \dot{Q}_{\text{vzd,okolí}} \quad (6.43)$$

$$\dot{m}_{\text{vzd,ž}} \cdot c_{p,\text{vzd}}(T_{\text{ž}}) \cdot T_{\text{ž}} = \dot{m}_{\text{vzd,vyb}} \cdot c_{p,\text{vzd}}(T_{\text{vyb}}) \cdot T_{\text{vyb}} + \dot{m}_{\text{vzd,ok}} \cdot c_{p,\text{vzd}}(T_{\text{ok}}) \cdot T_{\text{ok}}$$

$$\dot{m}_{\text{vzd,ž}} = \dot{m}_{\text{vzd,vyb}} + \dot{m}_{\text{vzd,ok}}$$

Množství přidávaného vzduchu se vyjádří jako:

$$\dot{m}_{\text{vzd,ok}} = \frac{\dot{m}_{\text{vzd,vyb}} \cdot c_{p,\text{vzd}}(T_{\text{vyb}}) \cdot T_{\text{vyb}} - \dot{m}_{\text{vzd,vyb}} \cdot c_{p,\text{vzd}}(T_{\text{ž}}) \cdot T_{\text{ž}}}{c_{p,\text{vzd}}(T_{\text{ž}}) \cdot T_{\text{ž}} - c_{p,\text{vzd}}(T_{\text{ok}}) \cdot T_{\text{ok}}}$$

6.14 Upravení velikosti zásobníku

V původním odhadu velikosti zásobníku nebylo započítáno nabíjecí a vybíjecí potrubí. Pro zachování kapacity zásobníku je potřeba upravit velikost zásobníku při zachování hmotnosti potřebného písku. Z rovnice (6.22) je možné dovodit, že celková hmotnost písku v akumulátoru je 34 840 kg. Nový objem zjistím tak, že na místo původního objemu zásobníku dosadím objem s odečteným objemem potrubí. Výšku akumulátoru chci zachovat, proto budu počítat nový poloměr.

$$m_p = \rho_p \cdot V_{p,\text{nový}}$$

$$m_p = \rho_p \cdot (\pi \cdot r_{z,i}^2 \cdot L - \pi \cdot n_{nt} \cdot r_{nt,e}^2 \cdot L - \pi \cdot n_{vt} \cdot r_{vt,e}^2 \cdot L) \quad (6.44)$$

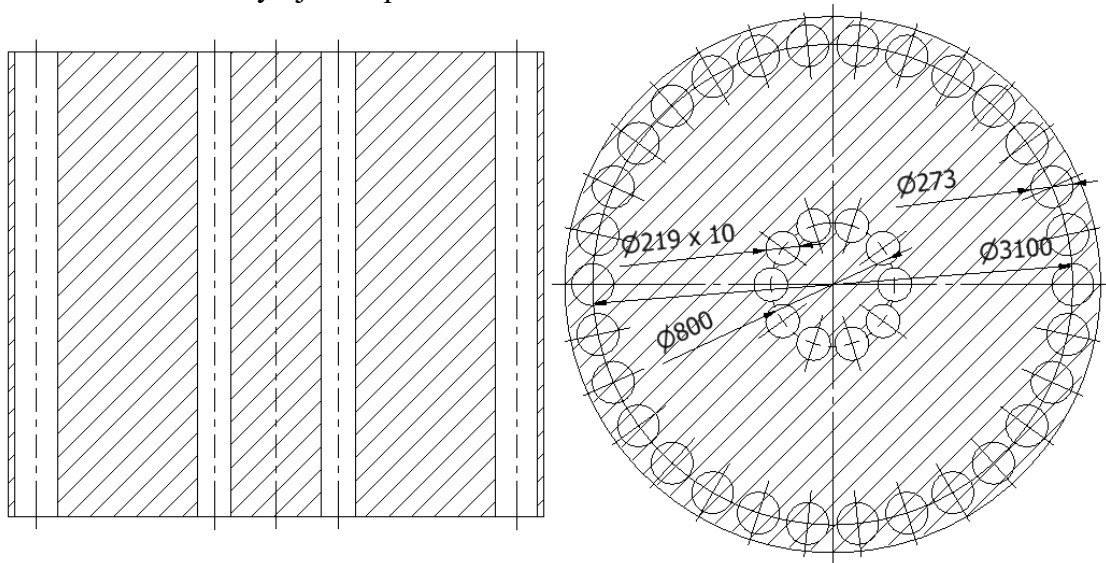
$$\frac{m_p}{\rho_p \cdot \pi \cdot L} = r_{z,i}^2 - n_{nt} \cdot r_{nt,e}^2 - n_{vt} \cdot r_{vt,e}^2 \rightarrow$$

$$r_{z,i} = \sqrt{\frac{m_p}{\rho_p \cdot \pi \cdot L} + n_{nt} \cdot r_{nt,e}^2 + n_{vt} \cdot r_{vt,e}^2} = 1,73 \text{ m} \rightarrow d_{z,i} = 3,46 \text{ m}$$

Vnitřní průměr zásobníku se díky vložení trubek musí zvětšit o 42 cm pro zachování hmotnosti akumulčního média.

6.14.1 Nové rozestavení potrubí

Kvůli zvětšení zásobníku v důsledku vložení nabíjecích a vybíjecích trubek je možno poupravit i rozestavení vybíjecího potrubí.



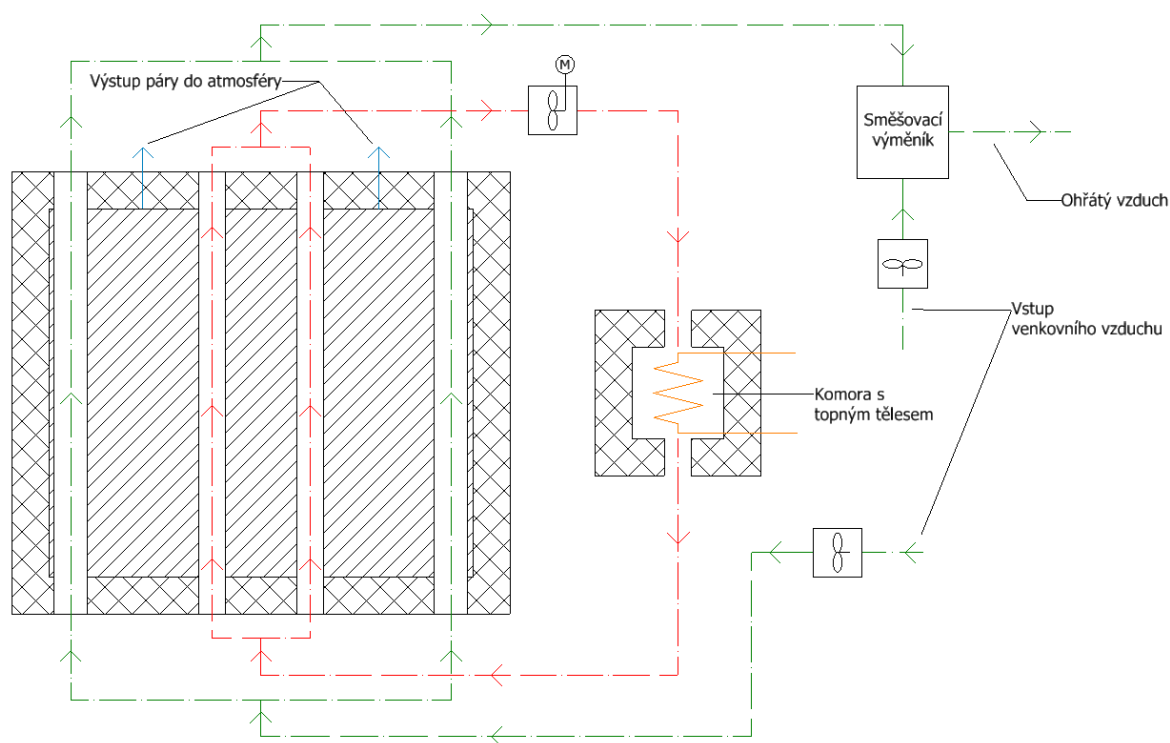
Obrázek 6.17 Upravené schéma nabíjecího a vybíjecího potrubí

6.15 Přidružené komponenty zásobníku

Zásobník potřebuje ke své správné a bezpečné funkci několik komponent. Podstatné součásti jsou zobrazeny ve Obrázek 6.18 Finální schéma zásobníku a souvisejících komponent. V rámci zásobníku musí být umístěny výpusti pro odcházející páru vypařenou z vlhkého písku. Jinak by rostl v zásobníku tlak a mohlo by tak dojít k poškození akumulátoru a jeho okolí.

Dalšími komponentami jsou ventilátory, které zajišťují dopravu vzduchu. Ve nabíjecím okruhu je třeba použít ventilátor odolný vůči vysokým teplotám. Ve vybíjecím okruhu není nutné řešit odolnost vůči vysokým teplotám, v případě že bude ventilátor umístěn před vstupem do zásobníku. Třetí ventilátor slouží pro přísun venkovního vzduchu a regulaci teploty ve směšovací výměníku.

Dále je potřeba topné těleso, které zajistí dostatečný výkon předávaný vzduchu v nabíjecím okruhu. V neposlední řadě musí akumulátor obsahovat i směšovací výměník, ve kterém se bude směšovat okolní vzduch se vzduchem z vybíjecího okruhu.

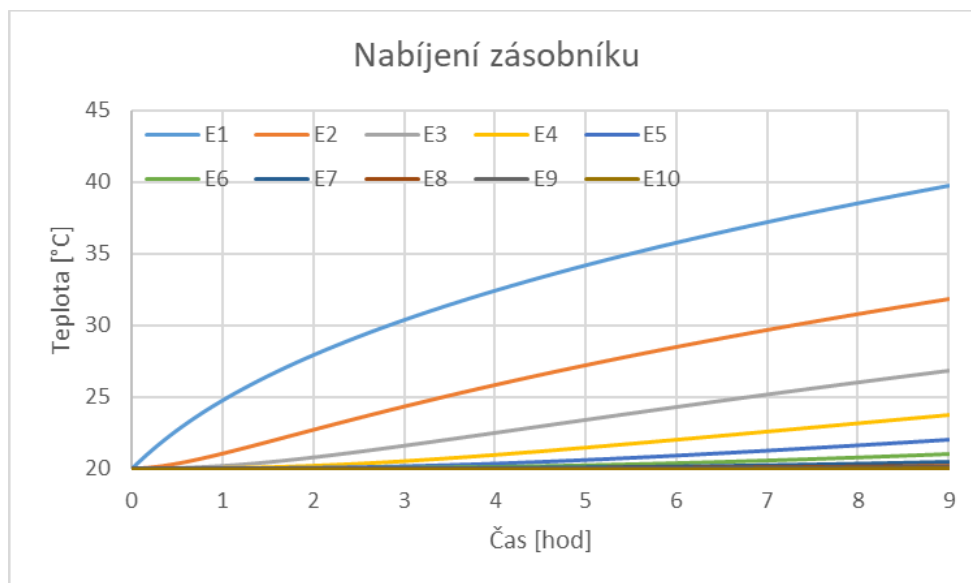


Obrázek 6.18 Finální schéma zásobníku a souvisejících komponent

6.16 Numerické řešení chování akumulátoru

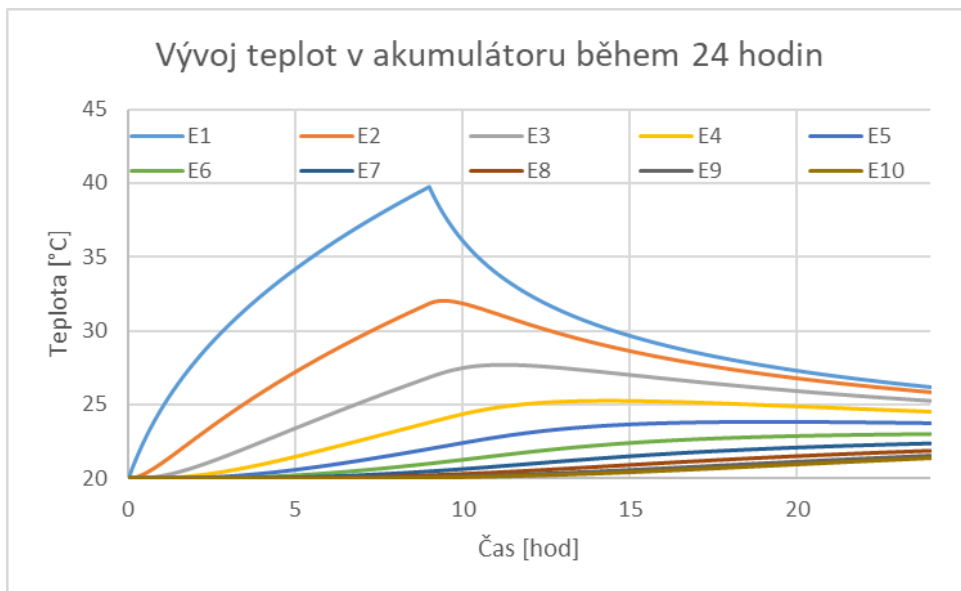
Jako nástroj pro numerické řešení jsem zvolil tabulkový software Microsoft Excel. V tomto softwaru jsem pomocí iteračního výpočtu sestavil numerický model akumulátoru. Jeho přesnost je možné zvýšit rozdělením zásobníku na více elementů a počítat změny v menších časových intervalech. Můj model je rozdělen na 10 elementů po časovém intervalu 0,1 hodiny.

V následujících grafech jsou započítány ztráty od ze všech stran zásobníku. Počítám s tloušťkou izolace 30 cm s vodivostí $\lambda = 0,035 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. V grafu níže je vidět průběh prvního 9 hodinového nabíjení z původní teploty akumulátoru 20 °C. Jednotlivé křivky E₁ až E₁₀ značí vývoj teploty elementů ve vrstvě. E₁ je element nejbližší nabíjecím trubkám a E₁₀ je krajní element u izolace.



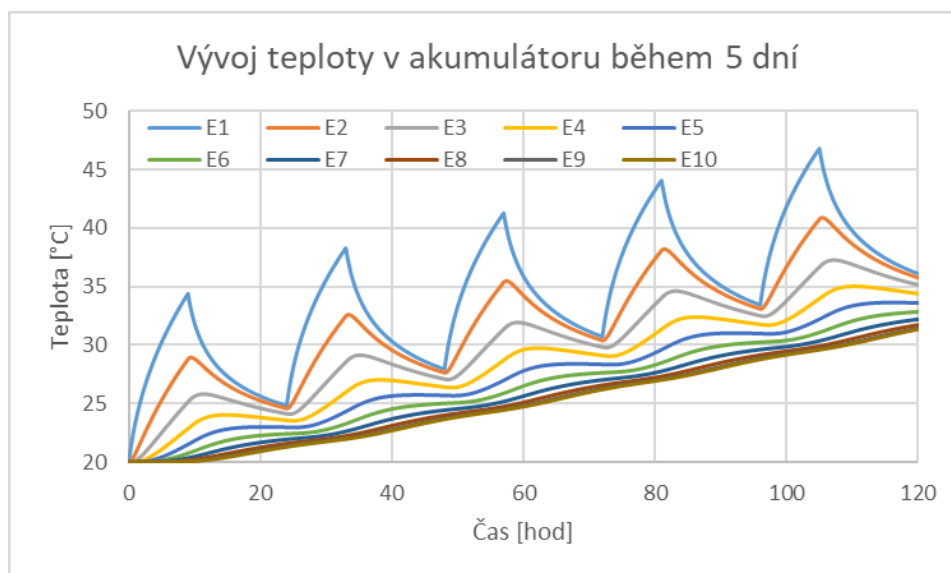
Graf 6.6 Průběh prvního 9 hodinového nabíjení

Průběh denního cyklu zahrnujícího 9 hodin nabíjení a 15 hodin srovnávání je zobrazen v Graf 6.7. Velmi dobře lze pozorovat zlom v čase 9 hodin. To je způsobeno zastavením dodávky tepla a následným rychlým poklesem teploty v okolí nabíjecího potrubí. Teplota v zásobníku se postupně během následujících 15 hodin vyrovnává.



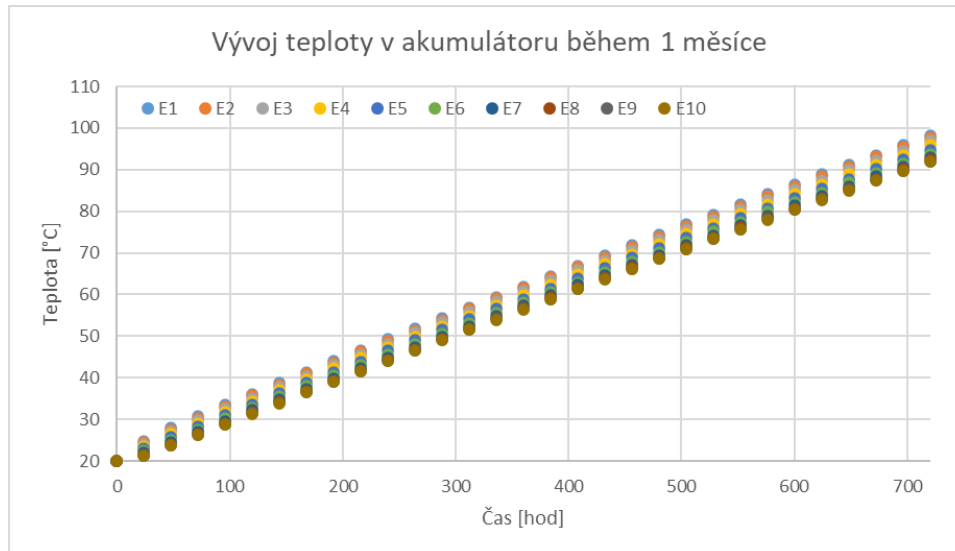
Graf 6.7 Vývoj teploty akumulátoru během 24 hodin

Při stejném způsobu nabíjení a vyrovnávání během 5 dní vypadá průběh tak, jak je zobrazen v Graf 6.8. Během 5 denního cyklu proběhlo 5 devítihodinových nabíjení a následně 5 cyklů srovnávání teplot. Průměrná teplota napříč akumulátorem postupně roste. Rozmezí teplot na konci cyklu je (31÷36) °C.



Graf 6.8 Vývoj teploty akumulátoru během 6 dní

Graf 6.9 zobrazuje stav akumulátoru po měsíčním nabíjení. Teplota roste téměř lineárně. Téměř, protože s rostoucí teplotou postupně narůstají ztráty, takže teplotní gradient bude s časem klesat. Směrnice přímký proložená body se bude postupně zmenšovat. Body jsou brány vždy po 24 hodinách, po fázi vyrovnávání.



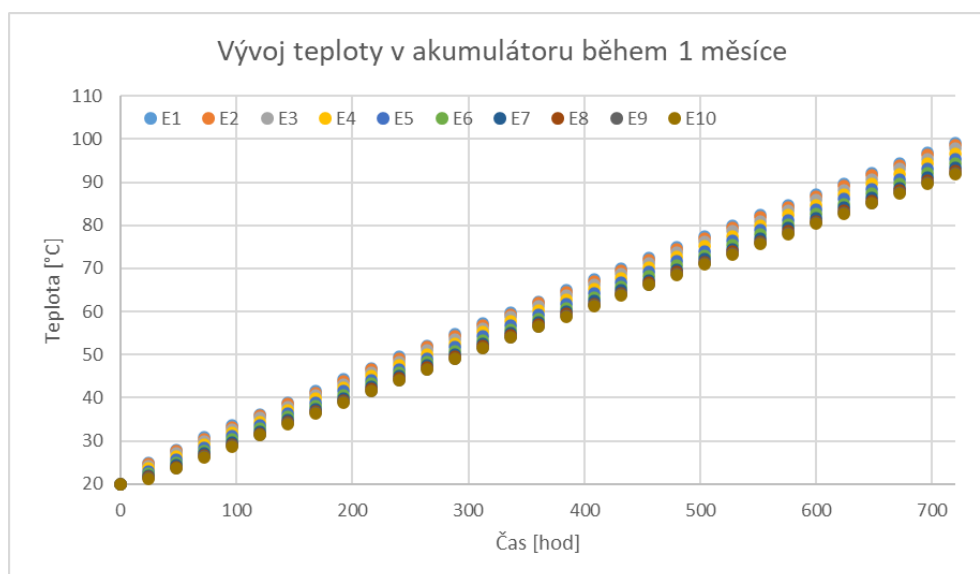
Graf 6.9 Charakteristika nabíjení zásobníku v průběhu měsíce

Konečné teploty po jednom měsíci nabíjení jsou v Tabulka 6.8.

Element	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9	E_{10}
Teplota [°C]	98,3	97,8	96,9	95,9	94,8	93,8	93,0	92,4	92,1	92,0

Tabulka 6.8 Teploty v zásobníku po měsíci

Pokud bych počítal s dokonalou izolací v horní a dolní části zásobníku, bude průběh díky velké vrstvě izolace nejspíše podobný.



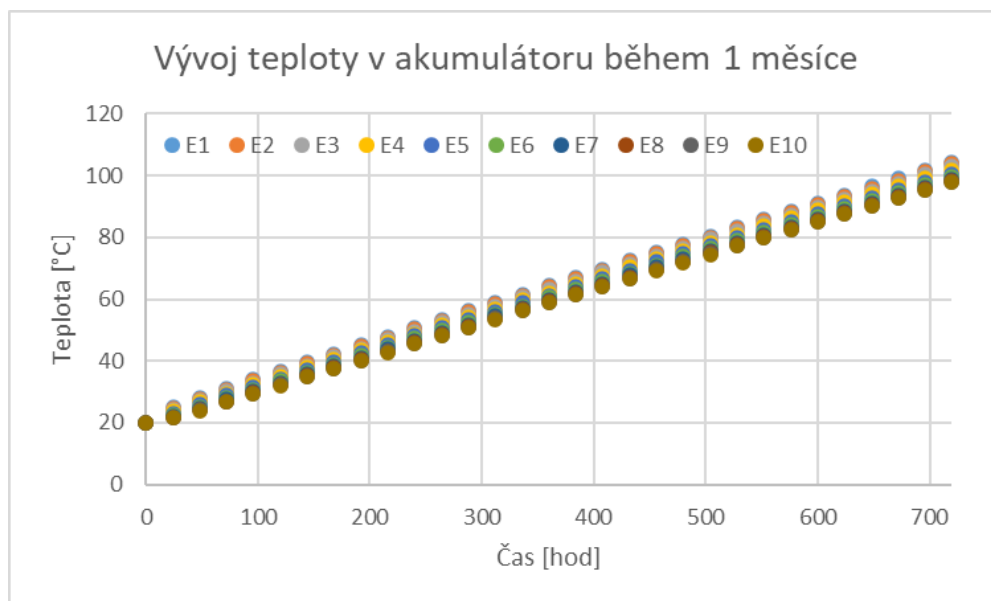
Graf 6.10 Charakteristika nabíjení zásobníku v průběhu měsíce beze ztráty z vrchu a spodu

Element	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9	E_{10}
Teplota [$^{\circ}\text{C}$]	99,2	98,7	97,8	96,6	95,5	94,4	93,4	92,7	92,2	92,0

Tabulka 6.9 Teploty v zásobníku po měsíci bez ztrát z horní a dolní části

Při porovnání Tabulka 6.8 a Tabulka 6.9 je vidět nárůst teploty v okolí nabíjecích trubek přibližně o jeden stupeň Celsia. V krajních oblastech už vliv není výrazný.

Další graf znázorňuje chování akumulátoru naprosto beze ztrát. Jedná se o dokonale zaizolovaný případ zásobníku.



Graf 6.11 Charakteristika nabíjení dokonale izolovaného zásobníku v průběhu měsíce

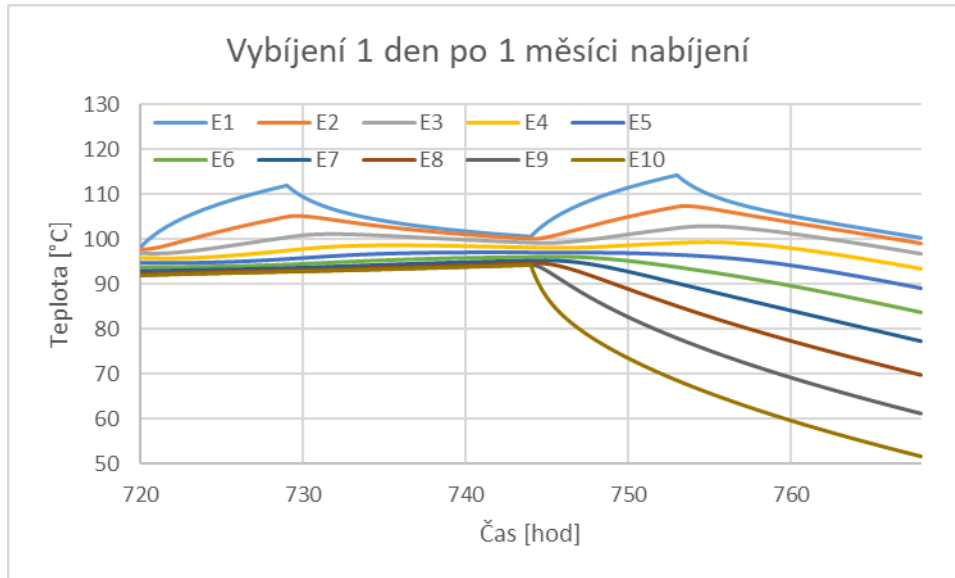
Teploty na konci nabíjení jsou uvedeny v následující tabulce.

Element	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9	E_{10}
Teplota [$^{\circ}\text{C}$]	104,3	103,7	102,9	101,8	100,7	99,7	98,8	98,2	97,8	97,7

Tabulka 6.10 Teploty v dokonale zaizolovaném zásobníku po 1 měsíci

Při porovnání s předchozím tabulkami je vidět zvýšení teploty ve všech element o více než 5°C .

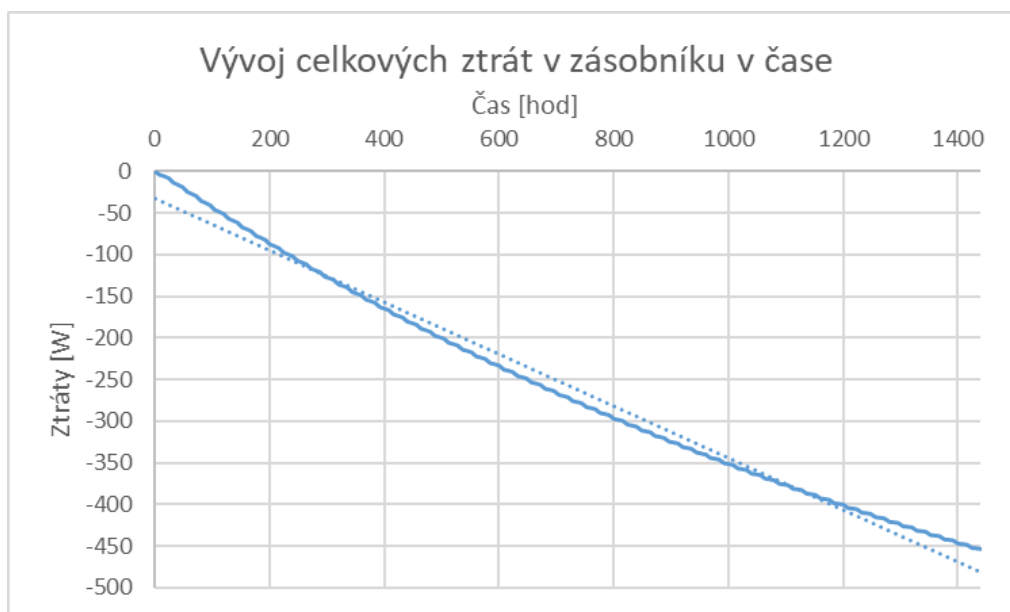
Pro vybíjení budu počítat s teplotami z Tabulka 6.8. Po jednom měsíci by měl být akumulátor dostatečně nabitý a připravený k vybíjení. Při vybíjení mohou nastat dva stavy. Buď se bude akumulátor vybíjet, aniž by do něj bylo dodáváno teplo, nebo se může zároveň vybíjet i nabíjet.



Graf 6.12 Jednodenní vybíjení výkonem 6600 W po 1 měsíci nabíjení

Z Graf 6.12 je vidět, že vybíjení akumulátoru výkonem 6600 W rychle snižuje teplotu v okrajové části. Jedním z důvodů výrazného snižování teploty je malá hmotnost písku díky velkým vybíjecím potrubím, tedy díky malé tepelné kapacitě v okrajovém elementu.

Během 7 měsíčního nabíjecího cyklu se budou ztráty s rostoucí teplotou zvyšovat.



Graf 6.13 Vývoj celkové ztráty ze zásobníku během nabíjecí fáze

Po proložení lineární křivkou dostanu rovnici ve tvaru $Q_c = -0,3127 \cdot \tau - 31,915$. Díky integraci rovnice dostanu množství tepla odvedeného ztrátami.

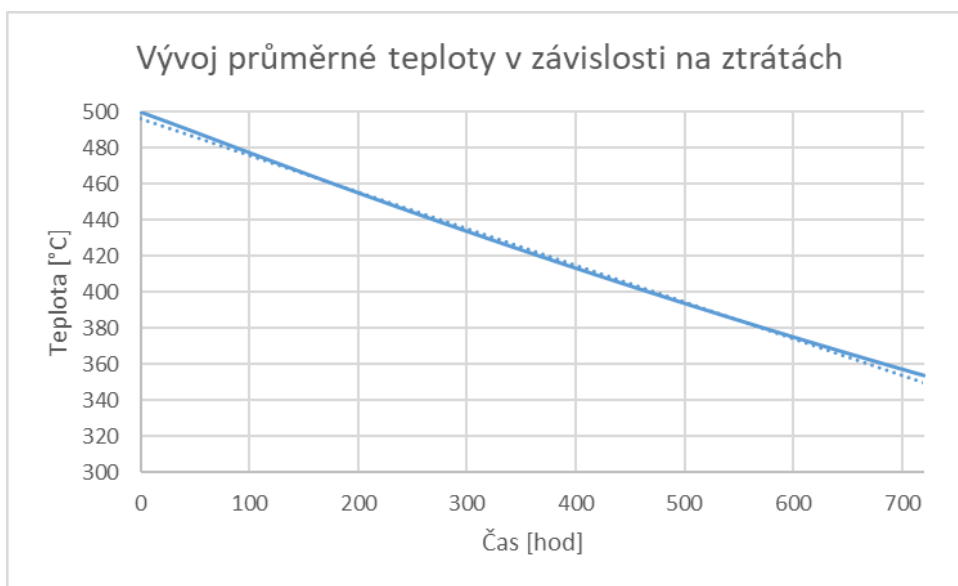
$$\int_0^{\tau} (-0,3127 \cdot \tau - 31,915) d\tau$$

$$\int_0^{720} (-0,3127 \cdot \tau - 31,915) d\tau = -347 \text{ kWh}$$

Z výpočtu vyplývá, že se za 2 měsíce nabíjení zásobníku ztratí 347 kWh. Za stejnou dobu se do zásobníku dodá teplo $Q_{dodané} = 2434 \cdot \frac{9}{24} \cdot 1440 = 1314 \text{ kWh}$. Ve vzorci je uveden zlomek $\frac{9}{24}$ z důvodu nabíjení po dobu 9 hodin z celého dne. Z poměru ztrátového a dodaného tepla vyplývá, že se ztratí 26,5 % dodané energie.

Jednou z možností snížení ztrát je průběžný odběr tepla, například pro ohřev teplé užitkové vody. Pro ohřev vody by měly stačit 2 kW výkonu. Z kapitoly 6.1.2 lze určit, že denní potřeba užitkové vody je rovna $Q_{TUV.d} = 25,744 \text{ kWh}$. Z toho vyplývá, že pro pokrytí potřeb by se mělo denně vybíjet po dobu 13 hodin

Dále by bylo vhodné si ukázat vývoj teploty po plném nabití zásobníku. Pokud budu předpokládat teplotu v celém zásobníku rovnu 500 °C, tak se průměrná teplota v akumulátoru bude vyvíjet následovně.

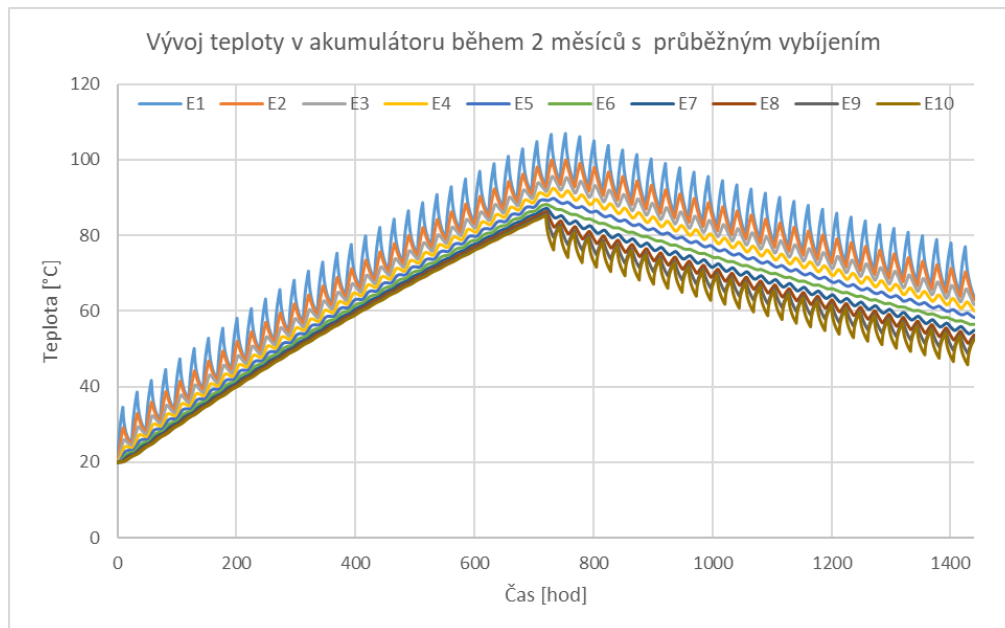


Graf 6.14 Vývoj průměrné teploty v nabitém akumulátoru při ztrátách tepla do okolí

Graf 6.14 znázorňuje vývoj během jednoho měsíce ochlazování. Pokud body proložíme lineární křivkou, dostaneme rovnici: $t = -0,2034 \cdot \tau + 496,49$. Jestliže chci zjistit, za jakou dobu se průměrná teplota dostane například na 50 °C, tak je třeba vyjádřit čas τ .

$$\tau = \frac{t - 496,49}{-0,2034} = \frac{50 - 496,49}{-0,2034} \cong 2195 \text{ hod} \rightarrow 91,5 \text{ dne}$$

Zásobník se ochladí na teplotu 50 °C přibližně za tři měsíce.

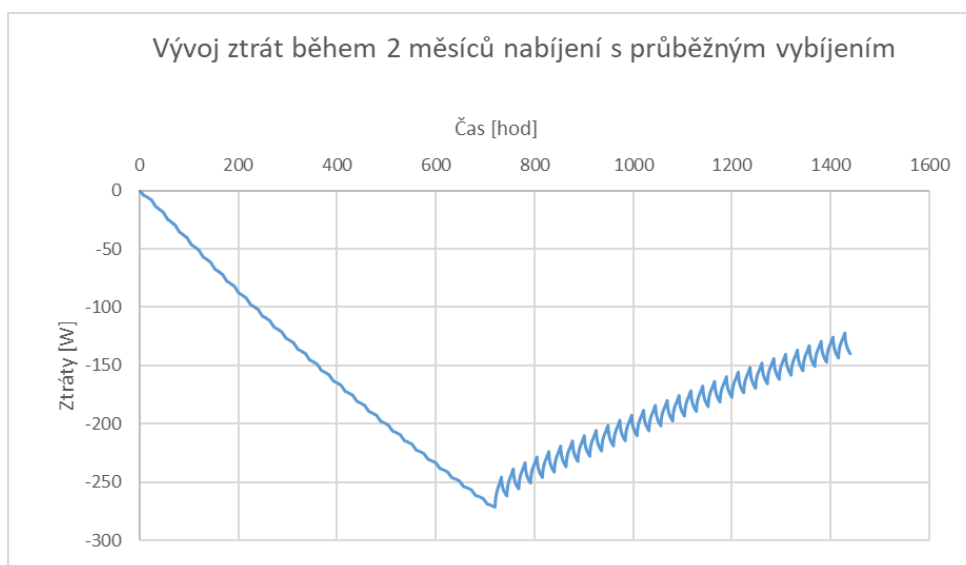


Graf 6.15 Vývoj teploty v akumulátoru během 2 měsíců s průběžným vybíjením výkonem 2 kW
Teploty na konci tohoto dvouměsíčního cyklu vypadají následovně.

Element	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9	E_{10}
Teplota [°C]	63,7	62,9	61,7	60,0	58,3	56,5	54,9	53,6	52,8	52,4

Tabulka 6.11 Teploty po 2 měsících nabíjení s průběžným vybíjením

Díky nižším teplotám v zásobníku budou nižší i ztráty oproti případům bez průběžného vybíjení.



Graf 6.16 Vývoj ztrát v zásobníku během 2 měsíců nabíjení s průběžným vybíjením

Výslednou ztrátu v teple zjistím integrací proložených lineárních křivek. Pro tento případ musím proložit dvě různé lineární křivky.

Po proložení mi vyšly tyto rovnice:

$$\dot{Q}_{c1} = -0,3798 \cdot \tau - 8,1732$$

$$\dot{Q}_{c2} = 0,174 \cdot \tau - 377,29$$

$$Q_{c1} = \int_0^{720} (-0,3798 \cdot \tau - 8,1732) d\tau = -104 \text{ kWh}$$

$$Q_{c2} = \int_{720}^{1440} (0,174 \cdot \tau - 377,29) d\tau = -136 \text{ kWh}$$

$$Q_c = Q_{c1} + Q_{c2} = -240 \text{ kWh}$$

Při průběžném vybíjení se ztráty zásobníku snížily o 104 kWh. Zároveň ze zásobníku bylo odebráno 540 kWh využitého tepla.

$$Q_{odebrané} = 2000 \cdot \frac{13}{24} \cdot 720 = 540 \text{ kWh}$$

7 Ekonomické zhodnocení

Pro ekonomické zhodnocení vysokoteplotního akumulátor je třeba vzít v potaz především prvotní investici. Je nutné započítat náklady na písek, potrubí, akumulární nádobu, ohřívač a další nezbytné komponenty související s bezpečným provozem. Výhodnost porřízení akumulátoru budu porovnávat s množstvím ušetřeného zemního plynu.

7.1 Investice

Zásobník je potřeba naplnit zhruba 35 tunami písku. Pro své řešení jsem použil křemičitý písek průměrné zrnitost 0,3 mm. Cena jedné tuny betonářského křemičitého písku je 920 korun za tunu. Celková cena za písek činí 32 200 korun.

Další položkou je potrubí. Pro návrh jsem použil ocelové bezešvé trubky kruhového průřezu. Deset trubek s vnějším průměrem 219 mm a třicet trubek s vnějším průměrem 273 mm. V zásobníkové části má každá z trubek délku 3 metry. Cena bezešvé hladké trubky 219x6,3 mm je 1950 Kč za metr. U trubek 273x6,3 mm je cena 2450 Kč za metr. Ceny trubek jsou bez DPH. Celková cena s daní vychází 337 600 Kč. V ceně trubek nejsou započítány trubky mimo zásobník.

Trubky nacházející se mimo zásobník mohou mít tenčí stěny, ale musejí být zaizolované. V této ceně budou i všechny napojovací prvky. Odhadová cena je poloviční oproti potrubí do zásobníku, tedy 168 800 Kč.

Zásobník bude tvořen svařovanými plechy. Na zásobník bude potřeba přibližně 12 kusů plechu válcovaného za tepla s rozměry 2,5x1500x3000 mm. Cena za kus je 2830 Kč bez DPH. Celková cena s DPH pak vychází na 41 100 Kč.

Cena izolace kolem zásobníku závisí na její tloušťce. Počítám s 30 centimetry kamenné minerální vlny. Celkem bude potřeba 19 m³ izolace, přičemž cena za 1 m³ odpovídá 4650 Kč. Celková cena za izolaci zásobníku je 88 350 Kč.

Cena topného tělesa se pohybuje kolem 10 000 Kč. Vzduch do zásobníku bude vháněn dvěma ventilátory, kdy jeden bude využit pro uzavřený nabíjecí okruh a druhý pro vybíjecí. Další ventilátor bude potřeba pro nasávání okolního vzduchu do směšovacího výměníku. Cena všech ventilátorů se bude dohromady pohybovat do 20 000 Kč.

<i>Položka</i>	<i>Cena [Kč]</i>
<i>Písek</i>	<i>32 200</i>
<i>Potrubí</i>	<i>506 400</i>
<i>Plechy</i>	<i>41 100</i>
<i>Izolace</i>	<i>88 350</i>
<i>Topné těleso</i>	<i>10 000</i>
<i>Ventilátory</i>	<i>20 000</i>
<i>Celkem</i>	<i>698 050</i>

Tabulka 7.1 Souhrn položek a jejich cen na stavbu zásobníku

Po sečtení všech položek vychází cena zásobníku na 698 050 Kč. Hlavní podíl na této ceně má velké množství potrubí, které zajišťuje přenos tepla do a ze zásobníku.

7.2 Úspora

Úspora stavbou zásobníku bude počítána v porovnání s úsporami na zemním plynu jinak spalovaného v plynovém kotli. Jedna kilowatthodina tepla vzniklého spálením plynu stojí průměrně 3 Kč.

Během dvou měsíců se do zásobníků dodá 1314 kWh tepla. Z předchozí kapitoly se dá vyvodit, že za dva měsíce se ve ztrátách zmaří 347 kWh tepla. Po dvou měsících bude v zásobníku uloženo teplo odpovídající 967 kWh. Bohužel celé množství tepla nelze využít. Pokud bude teplota v odběrové části zásobníku pod 40 °C, není odebírané teplo dobře využitelné. Teploty pro odebírání se dosáhne po 216 hodinách nabíjecího cyklu. Během této doby se do zásobníku dodá 197 kWh.

$$Q_{\text{dodané}}(\tau = 216 \text{ hod}) = 2434 \cdot \frac{9}{24} \cdot 216 = 197 \text{ kWh}$$

Celkem od 1314 kWh dodaného tepla je nutné odečíst 347 kWh ve ztrátách a 197 kWh kvůli nevyužitelnosti. Po odečtení vychází 770 kWh využitelného tepla za dva měsíce. Úspora tak v přepočtu za cenu plynu vychází na 2310 Kč.

Využití tepla lze zvýšit například použitím ztrátového tepla ze zásobníku. Výhodné by bylo i průběžné vybíjení zásobníku, aby teploty nedosahovaly velkých hodnot a nezvyšovaly tak ztráty. Průběžné vybíjení může být využito k ohřevu teplé užitkové vody. Pro ohřev vody by měly stačit 2 kW výkonu. Z kapitoly 6.1.2 lze určit, že denní potřeba užitkové vody je rovna $Q_{TUV,d} = 25,744 \text{ kWh}$. Při tomto výkonu nebude třeba tak vysokých teploty písku a zároveň hmotnostní průtok vzduchu vybíjecími trubkami může být menší.

Při dvou měsících nabíjení s průběžným jednoměsíčním vybíjením 2 kW je odebráno teplo 540 kWh. Díky nižším teplotám zásobníku se snížily ztráty na 240 kWh. Pokud od celkového dodaného tepla odečtu teplo, které nelze využít, získám množství uložené využitelné energie.

$$Q_{\text{uložené}} = 1314 - 540 - 240 - 197 = 337 \text{ kWh}$$

Celkové množství ušetřené energie je dáno součtem uloženého tepla a odebraného tepla pro TUV. Celkem je to 877 kWh. To je o 107 kWh více než bez průběžného vybíjení. Cena za ušetřený plyn je 2631 Kč.

Poslední položkou, kterou je třeba brát v potaz, je elektrický příkon ventilátorů. Při nabíjení je ventilátor v nabíjecím okruhu v provozu po dobu devíti hodin. Ostatní ventilátory jsou v provozu podle aktuálních potřeb odebíraného tepla.

Návratnost zařízení za těchto podmínek není příliš optimistická. Hlavní problém tkví ve velkém množství potřebných trubek, na kterých závisí přenos tepla. Při snížení nákladů na potřebné potrubí by se i výrazně zlepšily výhledy na uspokojivou návratnost zařízení.

V úvahu také připadá varianta zásobníku uloženého v budově, čímž by se snížily ztráty konvekcí. Při umístění do budovy by převažovala přirozená konvekce oproti nucené. V tomto případě by zároveň bylo možné teoreticky využít i ztráty ze zásobníku, čímž by se výrazně zlepšila celková účinnost ukládání tepla.

ZÁVĚR

V této diplomové práci je řešen návrh vysokoteplotního akumulátoru tepelné energie pro rodinný dům. Jednou z hlavních předností tohoto typu akumulátoru je vysoká energetická hustota díky vysokým teplotám. V rešerši byly vysvětleny a rozděleny možné způsoby akumulace podle fyzikálních principů a detailněji rozděleny akumulátory citelného tepla, mezi které patří i výše uvedený zásobník. Na vysokoteplotní akumulaci je specificky zaměřena kapitola o obecném návrhu akumulátoru, v níž jsou řešeny například vhodné vlastnosti teponosné tekutiny a akumulčního média.

V další části jsou ukázány současné realizace, jež fungují na principu vysokoteplotní akumulace. Do této kapitoly jsou zařazeny i technologie roztavených solí, které se dnes hojně využívají. Uvedeny jsou i nové zajímavé projekty dosahujících teplot až 1500 °C.

Pro návrh akumulátoru bylo nejdříve třeba zjistit jeho kapacitu, od které se následně odvíjí velikost zásobníku. Následné řešení se týkalo dodávaného výkonu, který musel být rozdělen tak, aby co nejlépe odpovídal obdobím přebytku elektřiny získávané ze solárních panelů. Přebytečná elektřina bude prostřednictvím topného tělesa ohřívat vzduch proudící do zásobníku. Poté byly zjištěny vlastnosti materiálů v intervalech pracovních teplot a jednotlivě proloženy funkcemi pro využití v numerických metodách. Jako akumulční médium byl zvolen písek na bázi křemíku kvůli jeho dobrým termodynamickým vlastnostem a stálosti při vysokých teplotách. Jako teponosné médium je zvolen vzduch. Vzduch odolává vysokým teplotám a nezpůsobuje korozivní prostředí, které by mohlo poškodit systém dopravy tepla.

Se znalostí vlastností použitých materiálů bylo možno zjistit tepelné odpory mezi jednotlivými částmi zásobníku. Od toho výpočtu se pak odvíjí výpočet ztrát od stěn a také z horní a dolní části zásobníku. S těmito znalostmi mohli být provedeny další výpočty. V nabíjecí fázi je popsán prostup tepla od nabíjecího potrubí až po okraj zásobníku. V této části je také vypočteno potřebné množství a průměry nabíjecích trubek. Ve vyrovnávací fázi dochází k odstavce dodávek tepla, a tím k postupnému vyrovnávání teplot skrze zásobník. Ve fázi vybíjení je znázorněn prostup tepla mezi pískem v okrajové části zásobníku a vybíjecím potrubím. Je také stanoven potřebný počet a velikost vybíjecích trubek. Díky vložení potrubí do zásobníku musela být pro zachování kapacity upravena jeho velikost. Poté je znázorněno konečné schéma zásobníku i s přidruženými komponentami.

V rámci numerického řešení jsou ukázány závislosti teploty na čase v různých provozních režimech. Demonstrováno je porovnání vývoje teploty v případě dokonale izolovaného zásobníku se zásobníkem se ztrátami společně s výslednými teplotami po jednom měsíci. Z numerického modelu je také vypočteno množství ztrát během dvou měsíců nabíjení a z toho vyvozené výsledné množství uloženého tepla.

Na závěr je provedeno ekonomické zhodnocení aplikace navrženého akumulátoru. Při výpočtu potřebné investice bylo zjištěno, že nejdražší položkou je potrubí, které tvoří 70 % celkové ceny. Při nastínění provozu po dobu dvou měsíců bylo vypočteno množství využitelného tepla, jež bylo bráno s ohledem na ztráty i na prvotní nabití po teplotu vhodnou k vybíjení. Z výpočtu vyplývá, že z tepla dodaného za dva měsíce lze využít pouze 59 %. Lepší využití dodávaného tepla bylo dosaženo při průběžném vybíjení zásobníku. V období nabíjení, které probíhalo po dobu dvou měsíců, bylo po měsíci pravidelně odebíráno teplo pro ohřev teplé užitkové vody, čímž se zmenšily ztráty a došlo k lepšímu využití dodávaného tepla až na 67 % oproti původním 59 %.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] SCHULZ, Heinz. *Teplo ze slunce a země*. Ostrava-Plesná: HEL, 1999. ISBN 80-86167-09-7.
- [2] MATUŠKA, Tomáš. *Solární zařízení v příkladech*. Praha: Grada Publishing, 2013. ISBN 978-80-247-3525-2.
- [3] BECATTINI, Viola a kol., 2017. Experimental investigation of the thermal and mechanical stability of rocks for high-temperature thermal-energy storage. *Applied Energy* [online]. ELSEVIER, **2017**(203), 373-389 [cit. 2023-03-08]. ISSN 0306-2619. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917307687>
- [4] CRESPO, Alicia a kol., 2019. Latent thermal energy storage for solar process heat applications at medium-high temperatures – A review. *Solar Energy* [online]. ELSEVIER, **2019**(192), 3-34 [cit. 2023-03-08]. ISSN 0038-092X. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X18306534>
- [5] KOÇAK, Burcu a kol., 2020. Review on sensible thermal energy storage for industrial solar applications and sustainability aspects. *Solar Energy* [online]. ELSEVIER, **2020**(209), 135-169 [cit. 2023-03-08]. ISSN 0038-092X. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X20309208>
- [6] BASTIDA, Hector a kol., 2023. Effective estimation of the state-of-charge of latent heat thermal energy storage for heating and cooling systems using non-linear state observers. *Applied Energy* [online]. ELSEVIER, **2023**(331) [cit. 2023-01-17]. ISSN 0306-2619. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261922017056>
- [7] BECHNÍK, Bronislav. Akumulace tepelné energie – fyzikální principy. *Tzb-info* [online]. Praha: Topinfo, 14.5.2003, [cit. 2023-01-17]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-tepla/1482-akumulace-tepelne-energie-fyzikalni-principy>
- [8] TISKATINE, R. a kol., 2017. Suitability and characteristics of rocks for sensible heat storage in CSP plants. *Solar Energy Materials and Solar Cells* [online]. ELSEVIER, **2017**(169), 245-257 [cit. 2023-01-19]. ISSN 0927-0248. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024817302520>
- [9] NAVARRO, M. E. a kol., 2012. Selection and characterization of recycled materials for sensible thermal energy storage. *Solar Energy Materials & Solar Cells* [online]. ELSEVIER, **2012**(107), 131-135 [cit. 2023-01-31]. ISSN 0927-0248. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024812003960>
- [10] BAO, Huashan a Zhiwei MA, LETCHER, Trevor M., ed., 2022. Thermochemical energy storage. In: *Storing Energy* [online]. 2nd edition. Elsevier, s. 651-683 [cit. 2023-01-31]. ISBN 9780128245101. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128245101000283>
- [11] ERONEN, Tommi a kol., 2022. Sand battery. *Polarnightenergy* [online]. [cit. 2023-02-03]. Dostupné z: <https://polarnightenergy.fi/sand-battery>

- [12] The Rondo Heat Battery: how it works, 2023. *Rondo* [online]. Oakland, California [cit. 2023-02-12]. Dostupné z: <https://rondo.com/how-it-works>
- [13] Tech. *MGA Thermal* [online]. 39 Laverick Ave, Tomago NSW 2322, Austrálie [cit. 2023-02-18]. Dostupné z: <https://www.mgathermal.com/tech>
- [14] Demonstration Plant. *MGA Thermal* [online]. 39 Laverick Ave, Tomago NSW 2322, Austrálie [cit. 2023-02-18]. Dostupné z: <https://www.mgathermal.com/pilot>
- [15] Thermal Battery, 2023. *Energy Nest* [online]. Billingstad, Norway [cit. 2023-02-23]. Dostupné z: <https://energy-nest.com/thermal-battery/#batterythermal>
- [16] BAUER, T., C. ODENTHAL a A. BONK, 2021. Molten Salt Storage for Power Generation. *Chemie Ingenieur Technik* [online]. **2021**(93), 534-546 [cit. 2023-02-24]. ISSN 1613-6829. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/cite.202000137>
- [17] FERNANDES, D. a a KOL., 2012. Thermal energy storage: "How previous findings determine current research priorities". *Energy* [online]. Elsevier, **2012**(39), 246-257 [cit. 2023-03-08]. ISSN 0360-5442. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544212000291>
- [18] REINBERK, Zdeněk. Odhad tepelné ztráty rodinného domu dle období výstavby. *Tzbinfo* [online]. Topinfo, (207) [cit. 2023-03-14]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/207-odhad-tepelne-zraty-rodinneho-domu-dle-obdobi-vystavby>
- [19] REINBERK, Zdeněk, © 2001-2023. TEPELNÁ BILANCE – NÁPOVĚDA: VYTÁPĚNÍ. *Tzb-info* [online]. Praha: Topinfo [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: https://vytapeni.tzb-info.cz/docu/tabulky/0000/000047_vythelp.html#_tem
- [20] REINBERK, Zdeněk. Výpočet potřeby tepla pro vytápění, větrání a přípravu teplé vody. *Tzbinfo* [online]. Praha: Topinfo, (47) [cit. 2023-03-15]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/47-vypocet-potreby-tepla-pro-vytapeni-vetrani-a-pripravu-teple-vody>
- [21] REINBERK, Zdeněk, © 2001-2023. TEPELNÁ BILANCE - NÁPOVĚDA: Ohřev teplé vody. *Tzbinfo* [online]. Praha: Topinfo [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: https://vytapeni.tzb-info.cz/docu/tabulky/0000/000047_tuvhelp.html#_t1
- [22] Solarní energie: Kolik elektřiny vyrobí solární panel. *EON* [online]. České Budějovice [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: <https://www.eon.cz/radce/zelena-energie/solarni-energie/kolik-elektriny-vyrobi-solarni-panel/>
- [23] JÍCHA, Miroslav, 2001. *Přenos tepla a látky*. Brno: CERM. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-2029-4.
- [24] CENGEL, Yunus, 2002. *Heat Transfer: A Practical Approach* [online]. 2nd Edition. Reno. ISBN 978-0072458930.

- [25] ZILVAR, Jiří, 2022. Kolik elektřiny reálně vyrobí fotovoltaická elektrárna? Co ovlivní výkon elektrárny?. *ESTAV* [online]. Topinfo, **2022** [cit. 2023-04-05]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <https://www.estav.cz/cz/10774.kolik-elektriny-realne-vyrobi-fotovoltaicka-elektrarna-co-ovlivni-vykon-vasi-elektrarny>
- [26] VČELÁK, Jan a kol., 2019. Využití obnovitelné energie z fotovoltaického zdroje v rodinných domech. *Vytápění, větrání, instalace* [online]. Topinfo, **2019** [cit. 2023-04-05]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/19060-vyuziti-obnovitelne-energie-z-fotovoltaickeho-zdroje-v-rodinnych-domech>
- [27] KRONHARDT, Valentina a kol. High-temperature Thermal Storage System for Solar Tower Power Plants with Open-volumetric Air Receiver Simulation and Energy Balancing of a Discretized Model. *Energy Procedia* [online]. ELSEVIER, **2014**(49), 870-877 [cit. 2023-04-06]. ISSN 1876-6102. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610214005487?via%3Dihub>
- [28] TISKATINE, R. a kol. Experimental investigation on rock thermal properties under the influence of temperature. *Thermochimica Acta* [online]. ELSEVIER, **2023**(720) [cit. 2023-04-15]. ISSN 0040-6031. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040603122002775>
- [29] HANSLIAN, David a kol. Větrné podmínky v České republice ve výšce 10 m nad povrchem I. *Větrná energie* [online]. Topinfo, **2013** [cit. 2023-04-18]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/vetrna-energie/9770-vetrne-podminky-v-ceske-republice-ve-vysce-10-m-nad-povrchem-i>
- [30] HUDÁK, H. a L. VARGA. *Effect of the Changes in Bulk Density and Granulometric Properties on the Strength Properties of the Moulding Sand Mixtures* [online]. **2020**(5) [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: <https://ojs.lib.unideb.hu/IJEMS/article/download/5570/5229/10314>
- [31] Polystyrenové izolace. *Tzb-info* [online]. Topinfo [cit. 2023-04-28]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/tepelne-izolace/297-polystyrenove-izolace>
- [32] Minerální izolace. *Tzb-info* [online]. Topinfo [cit. 2023-04-28]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/tepelne-izolace/298-mineralni-izolace>
- [33] Pěnové sklo. *Tzb-info* [online]. Topinfo [cit. 2023-04-28]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/tepelne-izolace/300-penove-sklo>
- [34] Izolace PUR, PIR a fenolická pěna. *Tzb-info* [online]. Topinfo [cit. 2023-04-28]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/tepelne-izolace/299-izolace-pur-pir-a-fenolicka-pena>
- [35] Izolace z obnovitelných surovin (dřevo, celulóza, konopí, ovčí vlna, sláma). *Tzb-info* [online]. Topinfo [cit. 2023-04-28]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/tepelne-izolace/301-izolace-z-obnovitelnych-surovin-drevo-celuloza-konopi-ovci-vlna-slama>
- [36] *Vlastnosti vzduchu*, 2016. <https://e-konstrukter.cz/> [online]. Brno: Nová média s. r. o [cit. 2023-05-01]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/vlastnosti-vzduchu>

- [37] Hodnoty fyzikálních veličin vybraných stavebních materiálů. *Tzb-info* [online]. Topinfo [cit. 2023-05-01]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/58-hodnoty-fyzikalnich-velicin-vybranych-stavebnich-materialu#t08>
- [38] Střechu rodinného domu pokrývají solární fotovoltaické panely, které vyrábějí elektrickou energii. *Ekologické bydlení* [online]. **2023** [cit. 2023-05-10]. ISSN 1803-0211. Dostupné z: <https://www.ekobydleni.eu/nizkoenergeticke-bydleni/moderni-energeticky-usporny-rodinny-dum-s-dokonalym-vyhledem-jak-z-vyhliDKove-veze/attachment/converted-pnm-file>
- [39] Oceli třídy 11, 2016. In: SVOBODA, Pavel a Jan BRANDEJS. *Výběry z norem pro konstrukční cvičení*. Vydání 5., doplněné. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s. 213. ISBN 978-80-7204-838-0.
- [40] Hodnoty fyzikálních veličin vybraných kovů. *Tzb-info* [online]. [cit. 2023-05-17]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/37-hodnoty-fyzikalnich-velicin-vybranych-kovu>
- [41] Katalog stavebních materiálů. *Tzb-info* [online]. Topinfo, **2023** [cit. 2023-05-23]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: https://stavba.tzb-info.cz/docu/tabulky/0000/000086_katalog.html

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
\dot{Q}	Výkon	$J \cdot s^{-1}$
Q	Teplo	J
T	Termodynamická teplota	K
t	Celsiova teplota	$^{\circ}C$
τ	Čas	s
μ	Dynamická viskozita	$Pa \cdot s^{-1}$
ν	Kinematická viskozita	$m^2 \cdot s^{-1}$
a	Tepelná difuzivita	$m^2 \cdot s^{-1}$
c_p	Měrná tepelná kapacita	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
λ	Tepelná vodivost	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
α	Součinitel přestupu tepla	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
β	Součinitel objemové roztažnosti	K^{-1}
R	Tepelný odpor	$K \cdot W^{-1}$
m	Hmotnost	kg
\dot{m}	Hmotnostní průtok	$kg \cdot s^{-1}$
r	Poloměr	m
L	Délka	m
d	Průměr	m
n	Počet	-
S	Plocha	m^2
V	Objem	m^3
tl	Tloušťka	m
\dot{V}	Objemový průtok	$m^3 \cdot s^{-1}$
ρ	Hustota	$kg \cdot m^{-3}$
w	Rychlost	$m \cdot s^{-1}$

Index	Význam
<i>nt</i>	Nabíjecí trubka
<i>vt</i>	Vybíjecí trubka
<i>z</i>	Zásobník
<i>s</i>	Stěna
<i>hč</i>	Horní část
<i>dč</i>	Dolní část
<i>pl</i>	Plášť
<i>o</i>	Ocel
<i>vzd</i>	Vzduch
<i>iz</i>	Izolace
<i>p</i>	Písek
<i>c</i>	Ztráty
<i>i</i>	Interní
<i>e</i>	Externí