



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

PASIVNĚ VYBÍJENÝ PRŮMYSLOVÝ PÍSKOVÝ AKUMULÁTOR TEPLA

PASSIVELY DISCHARGED INDUSTRIAL SAND HEAT ACCUMULATOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Štěpán Urbánek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Bc. Štěpán Urbánek**
Studijní program: Energetické a termofluidní inženýrství
Studijní obor: Energetické inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.**
Akademický rok: 2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.1111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Pasivně vybíjený průmyslový pískový akumulátor tepla

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Tématem práce je návrh pískového akumulátoru tepla s pasivním odvodem tepla. Akumulátor bude sloužit jako zdroj tepelné energie pro průmyslový prostor, ve kterém bude umístěn. V diplomové práci bude stručně uvedena problematika akumulace tepla v sytkém písečném prostředí. Posuzovány budou koncepce akumulátorů s ohledem na provedení odvodu tepla. Realizován bude návrh pro konkrétní vybraný průmyslový prostor. V rámci řešení bude realizováno výpočtové posouzení tepelných stavů v objemu akumulátoru tepla. S pomocí vytvořeného nástroje budou pro navržený akumulátor provedeny simulační výpočty předpokládaných provozních stavů a zhodnocena efektivnost akumulace. Výstupem práce bude doporučený konstrukční návrh akumulátoru pro vybraný objekt.

Cíle diplomové práce:

1. Zpracovat rešerši k problematice akumulace tepla v sytkých materiálech.
2. Pro vybraný objekt posoudit možné koncepce provedení pasivně vybíjeného akumulátoru.
3. Ve vybraném SW nástroji zpracovat výpočtový postup pro posouzení teplotních stavů v akumulátoru.
4. Realizovat potřebné návrhové výpočty a zpracovat konstrukční návrh vybraného řešení akumulátoru tepla.
5. Technicko-ekonomické zhodnocení provozu navrženého řešení akumulátoru ve vybraném objektu.

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.

Wakao N, Kaguei S. Heat and Mass Transfer in Packed Beds. Topics in chemical engineering New York, NY; Gordon and Breach Science Publishers; 1982.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá akumulací tepla v sypkých materiálech, primárně v písku. V první části je představen koncept akumulace tepla v sypkých materiálech, konstrukční provedení tohoto způsobu akumulace energie a také realizace. Následně je vytvořen koncept pasivně vybíjeného akumulátoru tepla pro prostory budovy C3 v areálu VUT FSI. Následně je na základě tohoto konceptu vytvořeno přesné konstrukční provedení, které je nakonec podrobena ověření teplotních stavů. Nakonec je provedeno technicko-ekonomické zhodnocení.

Klíčová slova

Akumulace tepelné energie, Písek jako akumulční materiál, Obnovitelná energie, Pasivně vybíjený akumulátor tepla

ABSTRACT

This thesis focuses on thermal energy storage in granular materials, primarily sand. The first part introduces the concept of thermal energy storage in granular materials, the structural design of this energy storage method, and its implementation. Subsequently, a concept of a passively discharged thermal energy storage system is developed for the premises of building C3 in the VUT FSI campus. Based on this concept, a detailed structural design is created, which is finally subjected to verification of temperature states. Finally, a technical and economic evaluation is performed.

Key words

Thermal energy storage, Sand as thermal storage material, Renewable energy, Passively discharged thermal accumulator.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

URBÁNEK, Štěpán. *Pasivně vybíjený průmyslový pískový akumulátor tepla* [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-04-29]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157866>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Jiří Pospíšil.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem Diplomovou práci na téma **Pasivně vybíjený průmyslový pískový akumulátor tepla** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce. Při úpravě textů jsem využíval technologie GPT (Generative Pre-trained Transformer)

23.05.2024

Štěpán Urbánek

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu práce doc. Ing. Jiřímu Pospíšilovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce. Také bych rád poděkoval zástupcům společnosti Provyko s.r.o. za velmi příhodné rady při vypracování konstrukčního návrhu a následného nacenění ocelových částí konstrukce. Rovněž děkuji své rodině a přátelům za psychickou podporu, kterou mi po celou dobu studia poskytovali.

OBSAH

1	ÚVOD.....	11
2	Akumulace energie v sypkých materiálech	12
2.1	Používané sypké materiály pro akumulaci tepla	13
2.1.1	Nezpevněné sedimentární horniny	14
2.1.2	Metamorfované (přeměněné) horniny	14
2.1.3	Keramické materiály.....	14
2.1.4	Vyvřeliny	14
2.1.5	Stavební materiál	15
2.2	Konstrukční provedení	15
2.2.1	Pevné lože (packed bed).....	15
2.2.2	Fluidní lože (Fluidized bed)	17
2.2.3	Další konstrukční provedení	18
2.3	Realizace.....	18
2.3.1	Polar Night Energy	18
2.3.2	GridScale – Stiesdal	20
2.3.3	Siemens Gamesa ETES (Electrical Thermal Energy Storage).....	21
2.3.4	MAGALDI (MGTES)	23
2.3.5	NREL – TES.....	24
2.3.6	KRAFTBLOCK	25
2.3.7	ETC – EcoStock	26
3	Řešený objekt	27
3.1	Tepelné ztráty objektu	28
3.2	FVE laboratoře C3	30
4	Koncepce provedení pasivně vybíjeného akumulátoru	32
4.1	Umístění akumulátoru	32
4.2	Možné způsoby nabíjení a vybíjení	32
4.3	Koncept konstrukčního provedení	33
4.4	Akumulační materiál	34
5	Experimentální část – akumulační materiál.....	35
5.1	Velikost zrn	35
5.2	Hustota a porozita písku	37
5.2.1	Výpočet hustoty a porozity	37
5.2.2	Použité přístroje a měřidla:	38
5.2.3	Postup měření	39
5.2.4	Vzorový výpočet a naměřené hodnoty	40
6	Konstrukční návrh pasivně vybíjeného akumulátoru	42
6.1	Model Basic.....	42
6.1.1	Ocelová obálka písku.....	43
6.1.2	Topné elementy	43
6.1.3	Izolace.....	44
6.1.4	Vnější obálka	45
6.1.5	Přeprava a manipulační prostředky	45

6.2	Model s membránovou stěnou	47
6.2.1	Membránová stěna	47
6.2.2	Regulační mechanismus.....	48
6.3	Možné limity a nedostatky modelů	49
7	Výpočet potřebných veličin pro posouzení teplotních stavů akumulátoru	50
7.1	Maximální možné akumulované teplo	50
7.2	Efektivní tepelná vodivost lože.....	50
7.2.1	Vzorový výpočet efektivní tepelné vodivosti	54
7.3	Výpočet součinitele přestupu tepla pláště	57
7.3.1	Vorový výpočet.....	58
7.4	Výpočet součinitele přestupu tepla membránové stěny	60
7.4.1	Vzorový výpočet	62
8	Ověření teplotních stavů akumulátoru	64
8.1	Geometrie	65
8.2	Síť.....	65
8.3	Materiály	66
8.4	Okrajové podmínky.....	66
8.5	Analýza teplotních stavů modelu Basic	67
8.5.1	Celoroční cyklus	67
8.5.2	Týdenní cyklus – den/noc	70
8.6	Analýza teplotních stavů modelu s membránovou stěnou.....	72
8.6.1	Celoroční cyklus	72
8.6.2	Týdenní cyklus – den/noc	74
8.7	Možné limity a nedostatky simulací	77
9	Technicko-ekonomické zhodnocení provozu akumulátoru	78
9.1	Model Basic	78
9.2	Model s membránovou stěnou	78
9.3	Porovnání tepelných ztrát objektu s energií dodanou akumulátorem	79
10	Závěr	80
	Seznam použitých zdrojů	82
	Seznam použitých zkratk a symbolů	86
	Seznam obrázků	89
	Seznam tabulek	91
	Seznam příloh	92

1 ÚVOD

V současnosti se celý svět potýká s nutností přechodu na udržitelné zdroje energie. To s sebou ale také nese výzvu pro nalezení co nejefektivnějších způsobů uchovávání a následným zpětným využitím energie. Mezi hlavní hnací motory výzkumu a vývoje systémů akumulace patří určitě změny klimatu či stále rostoucí spotřeba energií. Dále mezi ně jistě patří také rozvoj a implementace obnovitelných zdrojů energie (OZE), jako jsou sluneční nebo větrné elektrárny, které způsobují pro energetický sektor veliký nápor z hlediska přebytků elektrické energie. Nerovnováha mezi produkcí a spotřebou vyvolává požadavky na efektivní řešení akumulace energie, které by umožnilo vyrovnání těchto fluktuací a zajistilo by stálé a spolehlivé dodávky energie.

Existuje již celá řada různých metod akumulace energie a každá z nich má své výhody i nevýhody. Nejznámějšími jsou například bateriové systémy, vodní akumulční nádrže, přečerpávací vodní elektrárny, systém Power-to-Gas nebo ukládání energie do stlačeného či zkapalněného vzduchu. Všechny tyto systémy mají určitě své místo v oblasti akumulace. Ovšem přináší s sebou také podstatné nevýhody, jako například vysoké investiční či provozní náklady, omezená životnost, geografické podmínky a otázky recyklace a environmentálních dopadů použitých materiálů (např. u bateriových systémů).

V kontrastu uvedených metod je zde akumulace energie do sypkých materiálů, jako je například písek. Sypké materiály nabízí širokou škálu výhod, mezi které lze zařadit často nízké investiční náklady, dostupnost materiálů, téměř nulový environmentální dopad a nezávislost na geografických podmínkách. Díky poměrně dobré tepelné kapacitě a možnosti nahřát sypké materiály na vysoké teploty, lze pomocí nich ukládat energii na delší dobu, až v řádech týdnů či měsíců. Jednoduchost většiny typů této metody také nabízí vysoký rozsah výkonů. Výkony se mohou pohybovat od desítek až stovek kW, což je využitelné v sektoru domácností, kdy by si lidé mohli skladovat přímo v domě teplo, nastřádané přes léto, až do zimy. Rozsah výkonů však sahá až ke stovkám MW, kde lze uchovávat energii například pro průmyslový podnik či pro celou městskou část.

Tato diplomová práce si klade za cíl detailněji představit akumulaci tepelné energie do sypkých materiálů. Poukázat na výhody či nevýhody této metody. Představit využitelné sypké materiály, které v ní lze využít, možné konstrukční provedení těchto akumulátorů a také realizace zabývající se touto technologií

V následující části bude představen koncept pasivně vybíjeného pískového akumulátoru tepla. Na jehož základě bude vypracován přesný model takového akumulátoru a následně budou ověřeny teplotní stavy navrženého konstrukčního provedení. Nakonec bude vše technicko-ekonomicky zhodnoceno v poslední části této práce.

2 Akumulace energie v sypkých materiálech

Před tím, než bude představena technologie akumulace energie v sypkých materiálech, je nutné představit si akumulaci energie obecně. Z toho důvodu, aby bylo možné vhodně zařadit akumulaci energie v sypkých materiálech do kontextu těchto technologií. Akumulace energie je proces jejího uchování pro pozdější využití. Existuje celá řada metod akumulace energie, každá z nich nabízí své specifické výhody a nevýhody, na základě nichž, se spotřebitelé mohou rozhodnout, která je vhodnější pro jejich aplikace. Mezi tyto metody patří hlavně mechanické, chemické, elektrochemické, elektrické, biologické nebo tepelné. Výběr závisí primárně na zdroji energie, rozpočtu a infrastruktuře místa aplikace. [1]

- **Mechanické metody:** Zahrnuje uchování energie ve formě kinetické či potenciální energie, nebo také energie stlačení. Nejběžněji využívanými jsou jednoznačně přečerpávací vodní elektrárny a setrvačníky. Dále se může jednat o stlačený a zkapalněný vzduch, případně potenciální věže. [1]
- **Chemické metody:** Systémy ukládají teplo prostřednictvím fyzikální nebo chemické sorpce, interkalace, elektrochemických procesů nebo chemické transformace. V nynější době je věnována značná pozornost využití vodíku, metanu, metanolu apod. [1]
- **Elektrické metody:** Procesy ukládání energie ve formě elektrického náboje získaného z elektřiny, čehož je obvykle dosaženo pomocí kondenzátorů nebo superkondenzátorů. [1]
- **Biologické metody:** Tyto systémy obvykle uchovávají energii, která se uvolnila při rozkladu glukózy enzymy. Značnou nevýhodou je velmi nízká účinnost. [1]
- **Tepelné metody:** Jedná se o nejčastěji využívané formy skladování energie. Využívají uchování energie buď do tepla citelného, latentního nebo sorpčního. [1]
- **Elektrochemické metody:** Elektrochemické systémy lze efektivně rozdělit na akumulátorové a průtočné. Nejčastějším typem jsou jednoznačně lithium-iontové baterie. [1]

Obecně je pro posuzování jednotlivých technologií důležité mít specifikované vhodné parametry, jež jsou, pro metody akumulace energie, následující [1]:

- **Kapacita** – Popisuje, jaké množství energie lze v daném systému uchovat. Obvykle je vyčíslována v MWh.
- **Výkon** – Udává, jak rychle dokáže být systém nabit a vybit a je kvantifikován pomocí MW.
- **Čas nabíjení/vybíjení** – Kolik času je zapotřebí pro 1 cyklus nabití a vybití.
- **Účinnost** – Slouží například pro vyčíslení ztrát během nabíjení, vybíjení a během uchování.

Z hlediska akumulace energie v sypkých materiálech se jedná o akumulaci pomocí tepelné energie, přesněji pomocí citelného tepla. Akumulaci tepelné energie lze totiž efektivně rozdělit prostřednictvím mechanismů ukládání na akumulaci pomocí citelného, latentního a sorpčního tepla. A jak již bylo zmíněno, u sypkých materiálů se jedná o akumulaci pomocí citelného tepla. Ta spočívá v ukládání tepelné energie do média, které po nahrání nepodléhá fázové přeměně. Materiály pro akumulaci tepelné energie ji uchovávají ve své měrné tepelné kapacitě a celkovou akumulovanou tepelnou energii Q lze vyjádřit jako:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (2.1)$$

kde m (kg) je hmotnost, c_p (kJ/kgK) je měrná telená kapacita a ΔT je navýšení teploty během nabíjení (K). Množství akumulovaného tepla je tedy přímo úměrné hustotě, objemu, měrné tepelné kapacitě a změně teploty akumulačního materiálu. [2]

Přesto, že akumulace tepla v sypkých materiálech není žádnou novinkou ve světě uchovávání energie, nyní zřejmě přichází období, kdy toto téma bude stále více a více aktuální. Jak již bylo zmíněno v úvodní kapitole, nárůst využívání OZE, rostoucí spotřeba energie a také nutnost udržitelnosti celého energetického sektoru vedou ke stále větší potřebě dlouhodobé akumulace energie.

Nárůst zájmu o tyto technologie je zjevně způsoben specifickými vlastnostmi sypkých materiálů, jako je poměrně dobrá tepelná kapacita, dostupnost či environmentální i zdravotní nezávadnost. Také jednoduchost celého systému, nízké provozní a někdy i investiční náklady jsou něco, co je na ukládání energie do sypkých materiálů velmi zajímavé.

Velkou předností této metody je to, že většina sypkých materiálů nepodléhá žádným fázovým ani jiným změnám při velmi vysokých teplotách. Teploty tání těchto materiálů se pohybují okolo 1000 °C a výše. Takto vysoké teploty měknutí nám umožňují nahřát akumulátor na teploty okolo 600 °C. Tím získáváme zajímavou a konkurenceschopnou technologii. Neboť například akumulátor vodní lze bezpečně nahřát na teploty do 100 °C.

Využití této metody by tak teoreticky mohlo sahat již od malých aplikací pro rodinné domy až po velké průmyslové aplikace. Co se týče velkých průmyslových aplikací, by se tyto zařízení mohly využívat například jako doplňující technologie pro organický Rankinův cyklus. U menších aplikací hrozí nižší účinnost, poněvadž s klesajícím měřítkem rostou tepelné ztráty, neboť roste poměr plochy (obálky akumulátoru, kterou uniká teplo) ku celkovému objemu akumulačního materiálu.

Velkou nevýhodou této technologie je jednoznačně přestup tepla, který je oproti například již zmíněné vodě několikanásobně nižší, což této metodě jistě ubírá na konkurenceschopnosti. Jedná se o handicap, na který je nutno si dát pozor při návrhu takového akumulátoru.

2.1 Používané sypké materiály pro akumulaci tepla

Pokud se jedná o akumulaci pomocí citelného tepla, nabízí se celá řada materiálů vhodných k použití. Ovšem hlavním tématem práce jsou sypké materiály, které jsou dále rozvedeny níže v této kapitole.

Hlavní výhodou většiny používaných sypkých materiálů je jejich nízká cena a vysoká dostupnost. Ovšem jejich hlavní nevýhodou je nízký součinitel přestupu tepla. Celková výkonnost systémů akumulace tepla v sypkých materiálech velmi závisí na termofyzikálních vlastnostech zvolených materiálů, jimiž jsou [2]:

- **Hustota:** Vysoká hustota materiálu navyšuje hustotu skladované energie, což snižuje celkový objem systému TES
- **Měrná tepelná kapacita:** Vyšší měrná tepelná kapacita také navyšuje celkovou hustotu skladované energie.
- **Tepelná vodivost:** Vysoká tepelná vodivost zvyšuje rychlost nabíjení a vybíjení.
- **Cena a dostupnost:** Levnější materiál představuje nižší náklady. Tyto materiály jsou obecně velmi dostupné.
- **Tepelná stabilita:** Při vysokých teplotách by se neměly rozkládat. Tím je dán širší rozsah provozních teplot a vyšší kapacita akumulátoru. Měly by být také stabilní vlastnosti i při delších tepelných cyklech.
- **Ne-toxicita:** Neměly by být škodlivé pro lidské zdraví i pro životní prostředí.
- **Hořlavost:** Měly by splňovat nehořlavost a nevybušnost

Některé z těchto vlastností jsou pro vybrané materiály shrnuty v tabulce 1.

2.1.1 Nezpevněné sedimentární horniny

Sedimentární horniny vznikají zvětváním a erozí starších hornin, usazováním schránek a koster organismů, hromaděním organické hmoty nebo srážením z roztoků. Tyto procesy probíhají převážně na zemském povrchu a na dně moří. Po usazení nezpevněného materiálu (sedimentu) dochází k jeho postupnému zpevňování (diagenezi), čímž vzniká sedimentární hornina. [3]

Jedním z nejvíce využívaných a nejběžnějších sybkých (sedimentárních) materiálů pro akumulaci tepla je křemičitý písek. Ten se jeví, svou nízkou cenou a vysokou dostupností, jako velmi zajímavá volba pro tyto aplikace. Oproti skvělým výhodám písku ovšem přichází také značné nevýhody jeho využití, jimiž jsou nižší hustota a nižší tepelná vodivost. [4]

Dalším využitelným sedimentárním materiálem je štěrk. Jedná se o horninu obvykle složenou z křemene a dalších odolných minerálů, s často hrubými zrny (2–60 mm), oproti zmíněnému písku. Vyznačuje se vysokou tepelnou vodivostí a stabilitou, ale nižší tepelnou kapacitou než jemnější materiály.

2.1.2 Metamorfované (přeměněné) horniny

Přeměněné horniny vznikají transformací původních hornin (vyvřelých, usazených či již přeměněných) za působení vysokých teplot a tlaků v zemské kůře. Tento proces, zvaný metamorfóza, mění minerální složení a strukturu horniny, aniž by došlo k jejímu roztavení. Přeměna může být regionální (rozsáhlá oblast) nebo lokální (kontaktní, šoková, metasomatóza). Vlastnosti přeměněných hornin závisí na původním materiálu, teplotě a tlaku metamorfózy. Příklady přeměněných hornin zahrnují břidlice, fylit, svor, rulu, mramor a kvarcit. [3]

2.1.3 Keramické materiály

Další slibnou materiálovou volbou je keramika. Ta se vyznačuje vysokou tepelnou kapacitou a tepelnou i chemickou stabilitou i při velmi vysokých teplotách. Její cena také není příliš vysoká, ovšem oproti ostatním uváděným materiálům ji lze považovat spíše za nevýhodu. Dalšími nevýhodami keramiky jsou křehkost, váha a také výroba, která může být energeticky velmi náročná. [5]

Možnou alternativou by mohly být recyklované keramické materiály (obrázek 2.1), které energetickou náročnost výroby těchto materiálů převyšují udržitelností, kterou přináší díky recyklaci. [6]



Obrázek 2.1 Recyklovaná keramika využitá pro TES [6]

2.1.4 Vyvřeliny

Vyvřelé horniny neboli magmatity, vznikají ochlazením a utužením roztavené horninové hmoty, zvané magma. Magma vzniká tavením hornin v zemské kůře nebo svrchním pláští za vysokých teplot a tlaků. Vlastnosti vyvřelých hornin jsou ovlivněny rychlostí chladnutí magmatu. Rychlé chladnutí na povrchu vede k výlevným horninám s jemnozrnnou strukturou (např. čedič), zatímco pomalé chladnutí v hloubce vytváří hlubinné horniny s hrubozrnnou strukturou (např. žula). Vyvřelé horniny se liší svým minerálním složením, což ovlivňuje jejich

barvu, hustotu a další vlastnosti. Vyvřelé horniny disponují lepšími tepelnými vlastnostmi a také vyšší hustotou, což je výhodné při akumulaci tepelné energie. Ovšem jejich nižší dostupnost, spojená s vyšší cenou z nich činí méně vhodnou volbu. [3]

2.1.5 Stavební materiál

Nejvyužívanějším stavebním materiálem pro akumulaci tepla je beton, ten svými vlastnostmi představuje velice zajímavou cestu pro akumulaci tepelné energie. Ovšem beton nelze považovat za sypký materiál. Co už ale lze považovat za sypký materiál je stavební suť. Ta, dle studií, vykazuje pozitivní výsledky, neboť co se týče například akumulačních teplot, tak ty se mohou pohybovat až okolo 500 °C a výše (stavební suť vykazovala tepelnou stabilitu i při teplotách okolo 750 °C). Její jednoznačnou výhodou je dostupnost a cena, neboť stále velká část stavebního odpadu končí na skládkách. Využíváním těchto stavebních odpadů také narůstá celková udržitelnost systémů. [7]

Tabulka 1 Tepelné vlastnosti materiálů možných pro využití pro akumulaci tepla [8] [7] [9]

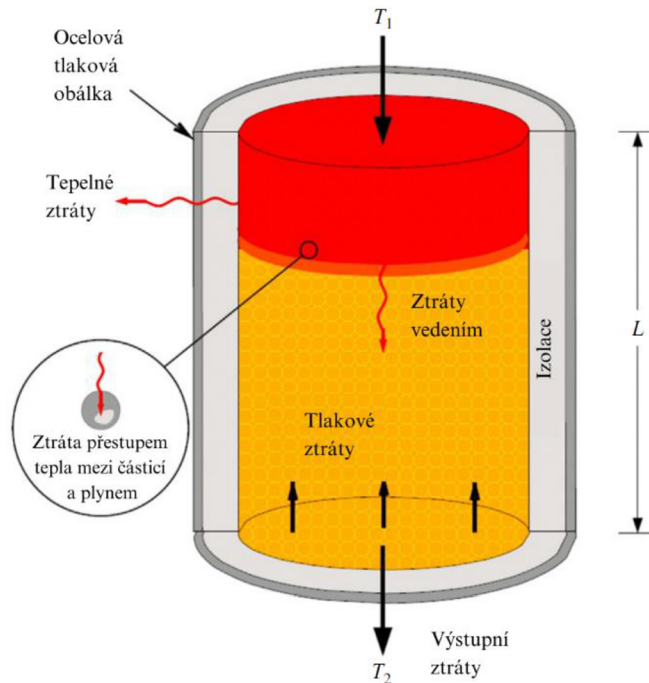
Materiál	Tepelná vodivost (W/mK)	Hustota (kg/m ³)	Měrná tepelná kapacita (J/kgK)
Křemičitý písek	2,0	1700–2200	1180–910
Žula	1,73–3,98	2640	820
Mýdlový kámen	3	2800–2900	–
Keramika	1,3	3550	900
Čedič	3,2	2610–2670	1470
Břidlice	1,8	2760	740–1110
Stavební suť	~0.6	2020–2180	1000–1450
Vápenec	1,26–1,33	2500	900
Mramor	2,07–2,94	2600	800

2.2 Konstrukční provedení

Konstrukčních provedení akumulátorů tepla v sypkých materiálech existuje celá řada. Efektivně je lze rozdělit na systémy s pevným ložem (packed bed) a s fluidním ložem (fluidized bed). Ovšem ve světě již existuje mnoho jiných provedení, jako například systém pracující na bázi svazkového výměníku. Nebo, což je i předmětem této práce, se může jednat o nějaký pasivní systém.

2.2.1 Pevné lože (packed bed)

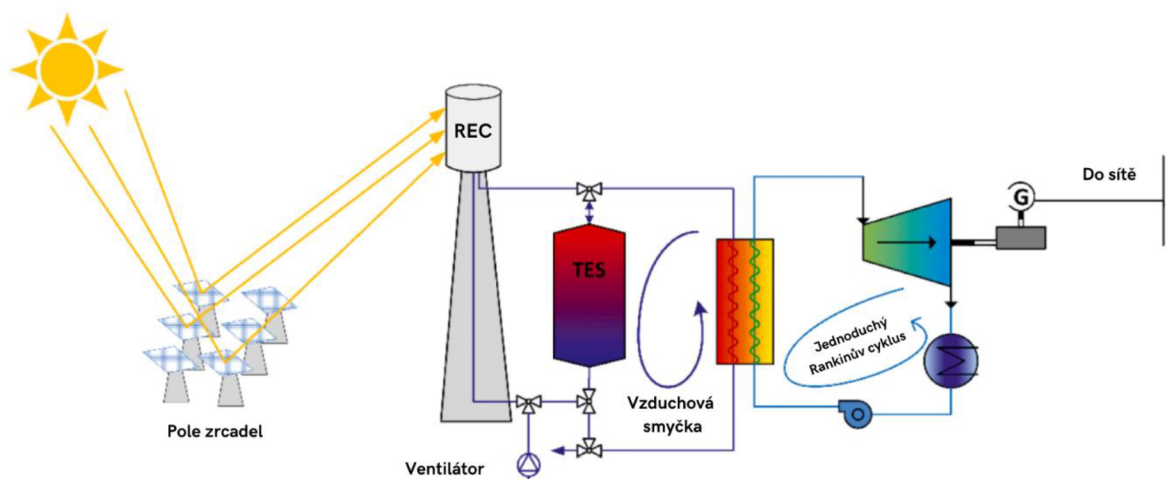
Packed bed je v zásadě jednodušší formou akumulátoru tepla, který se skládá z nádoby naplněné zrnitým materiálem s dostatečným podílem dutin, které umožňují průchod teplotonosné tekutiny (tzv. heat transfer fluid – HTF). Je tvořeno náhodně orientovanými částicemi sypkého materiálu, které zadržují a usměrňují proudění HTF. Tento typ konstrukčního provedení nabízí poměrně vysokou rychlost přenosu tepla díky velikému povrchu malých částic a také díky přímému kontaktu HTF s akumulačním materiálem. [10]



Obrázek 2.2 Schéma akumulátoru tepla využívající pevné lože [10]

Značným omezením této technologie je tlaková ztráta, která se vytváří průchodem HTF skrze akumulátor. To samozřejmě navyšuje provozní náklady a snižuje to možnou délku (resp. výšku) lože, která je nutná pro uchování potřebné energie. [10]

Aplikací je na světě již několik a jednou ze zajímavých aplikací je využití u koncentrovaných solárních elektráren (obrázek 2.3) nebo u organického Rankinova cyklu, kde slouží pro navýšení účinnosti těchto cyklů. [11]

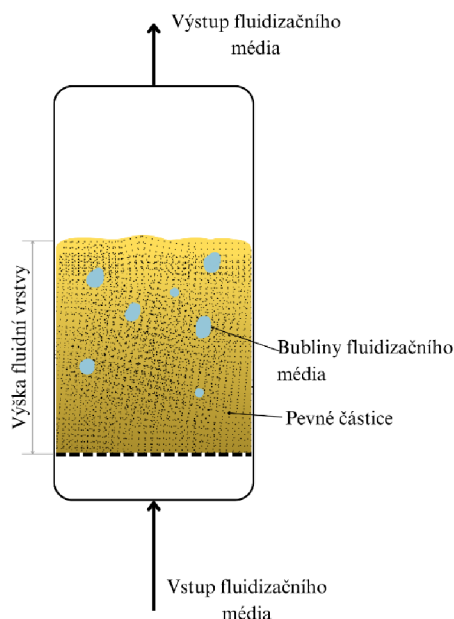


Obrázek 2.3 Zapojení TES s pevným ložem do systému koncentrované solární elektrárny [11]

2.2.2 Fluidní lože (Fluidized bed)

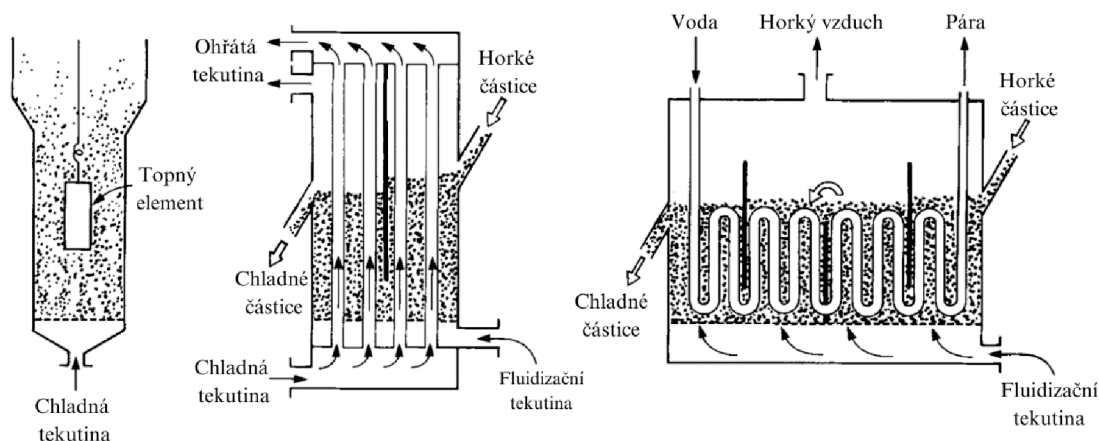
Co se týče fluidního lože, tak to pracuje na velmi podobném principu, jako lože pevné. HTF prochází také přímo mezi zrna, ovšem takovou rychlostí, kdy dochází k tzv. fluidizaci překonáním gravitační síly působící na zrna. Pracovní tekutina tedy nadnáší akumulací materiál a vytváří tak pomyslný sloup. Na spodu tohoto sloupu je distribuční systém (např. děrovaný plech), který slouží k rovnoměrné distribuci fluidizačního média (nejčastěji vzduch).

Nad fluidní vrstvou bývá často volný prostor, aby nedocházelo k úniku zrn, případně se může na výstup instalovat například cyklon k odloučení pevných částic.



Obrázek 2.4 Základní schéma fluidního lože

Fáze nabíjení a vybíjení může probíhat různými způsoby a z nich vyplývají možná konstrukční řešení těchto akumulátorů. Jedním ze způsobů je ten, že samotná HTF je nahřívána (resp. ochlazována) externě a jejích průchodem skrze akumulátor dochází k nabíjení (resp. vybíjení), tak jak je v podstatě znázorněné na obrázku 2.4. Další konstrukční řešení vyplývají z teorie fluidních výměníků tepla. Uvnitř fluidního lože jsou umístěny trubky, kterými proudí tekutina (pára, vzduch, termo olej apod.), která souží pro nabíjení, resp. vybíjení (obrázek 2.5). V tomto případě je HTF právě tekutina procházející trubkami, nikoliv tekutina nadnášející zrna.



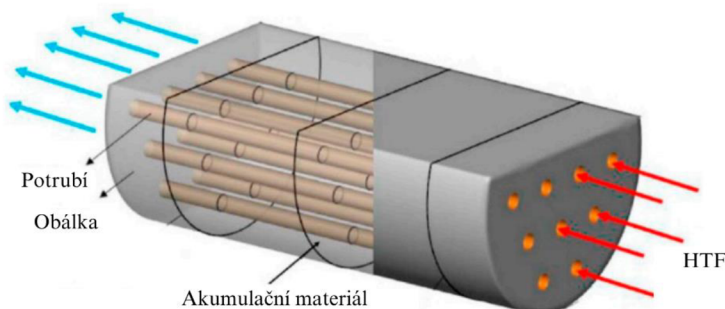
Obrázek 2.5 Fluidní výměníky tepla [12]

Díky fluidizaci dochází k intenzifikaci přestupu tepla mezi zrny a také k rovnoměrnému teplotnímu profilu jak po výšce, tak i po délce. Ovšem nese to s sebou i řadu nevýhod. Hlavními nevýhodami jsou určitě složitost celého systému a vysoká tlaková ztráta systému, která je spojena s vysokými provozními náklady.

Fluidní lože pevných částic představují atraktivní způsob ukládání energie. Obecně se již nejedná o novou technologii. Technologie fluidního lože je již dlouho využívána například u fluidních kotlů na tuhá paliva, nebo, jak již bylo zmíněno, u výměníků tepla. Obdobně jako lože pevné se také již využívá pro akumulaci tepla a také se využívá například u koncentrovaných solárních elektrárn.

2.2.3 Další konstrukční provedení

V úvodu kapitoly byly zmíněny vedle fluidního a pevného lože také jiné konstrukční provedení. Jedním z nich je provedení, které prakticky vychází ze svazkových výměníků (Shell-and-tube). Akumulační materiál je zde nehybně uložen v nádobě. V něm je uložen svazek trubek, jímž proudí HTF (vzduch, pára apod.). Výhodou tohoto provedení může být to, že HTF není v přímém kontaktu, čímž nedochází k možnému znečištění HTF. Také tlaková ztráta celého systému je nižší než u předešlých provedení. Oproti tomu Shell-and-tube provedení bude mít nerovnoměrný tepelný tok v loži a celkově bude mít méně intenzivní přestup tepla z toho důvodu, že HTF neprochází přímo mezi zrny.



Obrázek 2.6 Schéma typického provedení Shell and tube akumulátoru [13]

Dalším zmíněným konstrukčním provedením je pasivní akumulátor tepla. To je ale hlavním předmětem této práce a bude dále rozpracován v následujících kapitolách. Existují i další provedení, těmi nejvíce využívanými jsou ale 3 zmíněné výše.

2.3 Realizace

Tato kapitola se zaměřuje na již zrealizované projekty a koncepty různých společností, které se zabývají akumulací tepla v sypaných materiálech. Ve světě již existuje několik takových realizací, zde jsou vybrány ty, které jsou již postaveny nebo jsou blízko realizaci.

2.3.1 Polar Night Energy

Jedná se o první komerční zařízení pro ukládání tepla na bázi křemičitého písku, které zhruba před rokem a půl způsobilo absolutní boom napříč všemi médii, co se týče akumulace energie. Zařízení bylo realizováno ve Finském městě Kankaanpää. Je připojeno k síti zásobování teplem a slouží k vytápění rezidenčních a komerčních budov (např. plavecký bazén). [14]

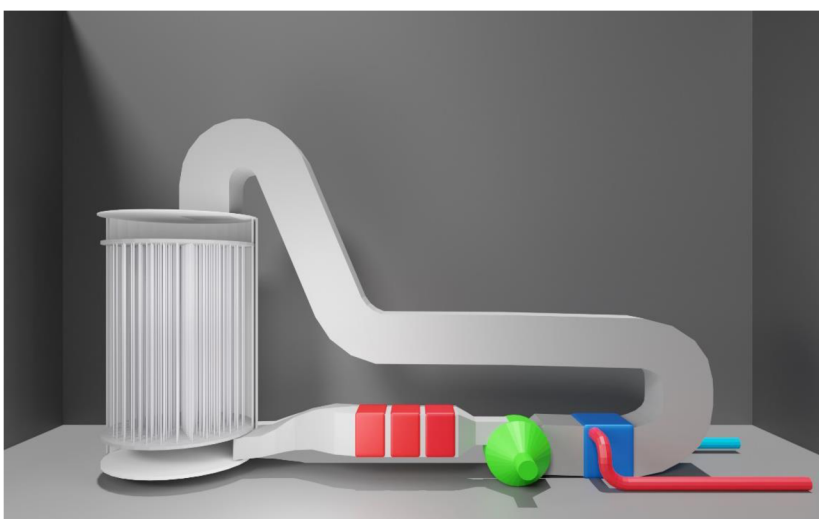
Na obrázku 2.7 je možné vidět, že se jedná v podstatě o válcovou nádobu v podobě sila, která je naplněna pískem. V písku je uložena soustava nerezových trubek sloužící pro nabíjení i vybíjení. Nabíjení se provádí formou odporového ohřevu vzduchu, který proudí soustavou trubek ze spodu nahoru a tím předává teplo písku. Vybíjení probíhá opět prouděním vzduchu trubkami, ovšem v opačném směru. Ohřátý vzduch poté proudí na výměník, kde předá teplo médiu na sekundárním okruhu. Může se jednat o horkovod městské tepelné sítě, nebo zde může být umístěn například parogenerátor pro dodávky procesní páry.



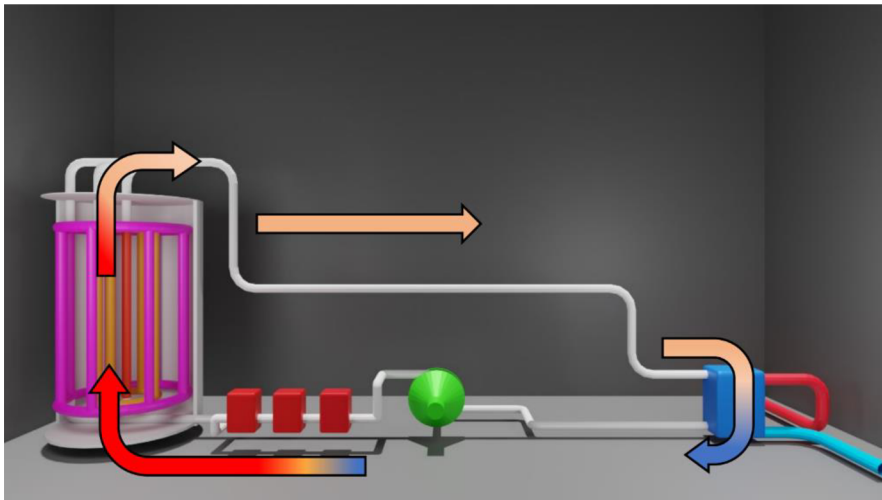
Obrázek 2.7 Polar Night Energy, Finsko, Kankaanpää [15]

Teploty písku mohou šplhat až k 1000 °C. Optimum se ale nachází okolo 300–500 °C. Společnost se nyní zaměřuje na produkci hlavně dvou velikostí zařízení. Menší s kapacitou okolo 300 MWh a tepelným výkonem 2 MW a větší s kapacitou 1000 MWh a tepelným výkonem 10 MW. Do budoucna společnost ale chystá zařízení, které budou dosahovat kapacit až okolo 20 GWh s tepelným výkonem až 10 MW. Účinnost zařízení může dosahovat až 95 %, při využití většího zařízení s kapacitou 1 GWh a 1 až 2týdenních cyklech skladování. Investiční náklady se pohybují okolo 10 € na 1 kWh kapacity ukládání. [14]

Obrázek 2.8 a 2.9 ukazují modely akumulátoru, které pocházejí z bakalářské práce, která byla vypracována ve spolupráci se společností Polar Night Energy na Finské univerzitě aplikovaných věd v Pori. Obrázek 2.8 ukazuje model se sekčním rozdělením potrubí v akumulátoru. Obrázek 2.9 znázorňuje fázi nabíjení a mírně zjednodušený model s menším počtem sekcí. [16]



Obrázek 2.8 Model akumulátoru se sekčním rozdělením [16]



Obrázek 2.9 Zjednodušený model akumulátoru [16]

2.3.2 GridScale – Stiesdal

V základu se jedná o zařízení, které obsahuje 2 vertikální nádoby (horkou a studenou), turbokompresor a turboexpandér. Jako materiál je využíván čedič, ovšem může být použit jakýkoli sypký materiál, záleží hlavně na geografických podmínkách dané aplikace. [17]



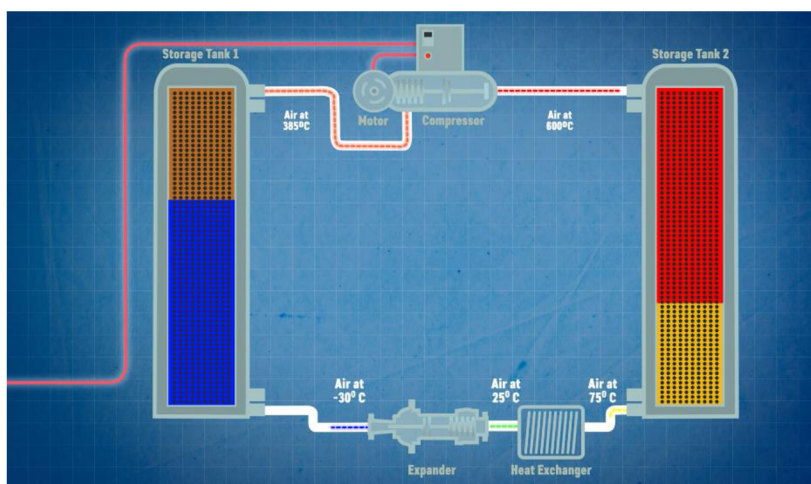
Obrázek 2.10 Ilustrační foto zařízení GridScale [17]

Při nabíjení (obrázek 2.11) se zařízení chová v podstatě jako tepelné čerpadlo. Ze studené nádoby proudí vzduch o teplotě okolo 385 °C do turbokompresoru, kde je stlačen a ohřát na teplotu 600 °C. Během toho je chladný vzduch z horké nádoby o teplotě 75 °C přečerpáván do chladné nádoby přes výměník tepla a expandér, ze kterého vystupuje o teplotě -30 °C. Po skončení nabíjecí fáze je tedy horká nádoba nabitá na 600 °C a chladná nádoba je na teplotě -30°C.

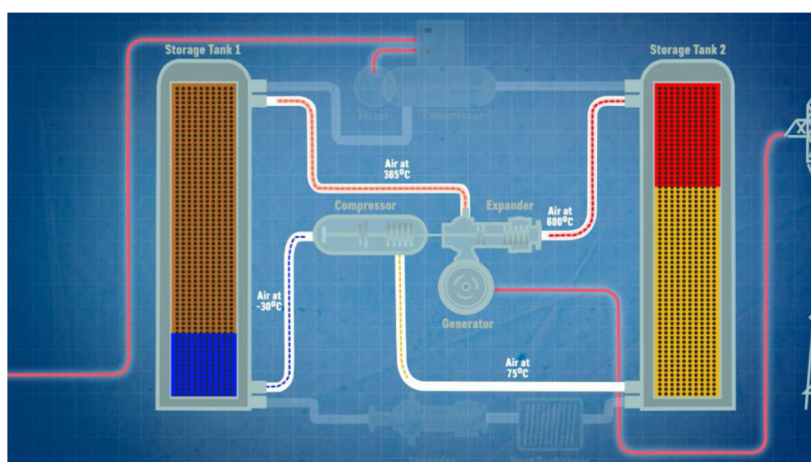
Fáze vybíjení je znázorněna na obrázek 2.12 a probíhá tak, že vzduch z horké nádoby o teplotě 600 °C proudí do chladné nádoby přes expanzní turbínu, čímž dochází k výrobě elektřiny a ochladí se na teplotu okolo 385 °C. Vzduch z chladné nádoby o teplotě -30 °C proudí do horké nádoby přes kompresor, kde dojde ke stlačení a ohřátí na zhruba 75 °C. K přenosu

tepla dochází přímým kontaktem vzduchu a sytkého materiálu, neboť vzduch vždy proudí přímo mezi zrny.

Společnost uvádí, že celková účinnost zařízení, která je produktem COP nabíjení, které je okolo 2,5 a účinnosti vybíjení (až 25 %), by mohla sahat až k 55–60 %. Předpoklad celkových nákladů systému, zahrnující sytký materiál, izolaci, nádoby atd. je stanoven u sériově vyráběných zařízení na méně než 10 eur za kWh zpětně vyprodukované elektrické energie. V porovnání s 200 € za kWh u konvenčních bateriových systémů jsou náklady GridScale velmi malé, uvádí společnost. [17]



Obrázek 2.11 GridScale – Fáze nabíjení



Obrázek 2.12 GridScale – Fáze vybíjení

2.3.3 Siemens Gamesa ETES (Electrical Thermal Energy Storage)

Siemens Gamesa popisuje své zařízení jako „tisíce tun drcených vulkanických hornin nahřátých na 600 °C a více s jakýmsi obřím fénem, který mění elektřinu – vyrobenou například z obnovitelných zdrojů energie – na teplo.“ Uvádí, že teplo je zde možno uchovávat po dobu několika týdnů. Pokud je poté potřeba elektřina, využitím nahřáté horniny se ohřeje vzduch průchodem mezi zrny, který proudí do parogenerátoru, zde se vyrobí pára, která proudí na parní turbínu, kde vykoná práci a vyrobí tak elektřinu. Náklady na vyrobenou kWh se pohybují okolo 100 €. Potenciální velikost zařízení může šplhat až k 1 GWh uchovaného tepla. [18] [19]

Společnost Siemens Gamesa spolupracuje na vývoji zařízení se společností Stiesdal (kapitola 2.3.2). Zakladatel společnosti Stiesdal, Henrik Stiesdal, je totiž bývalým CTO společnosti Siemens Gamesa. [20]

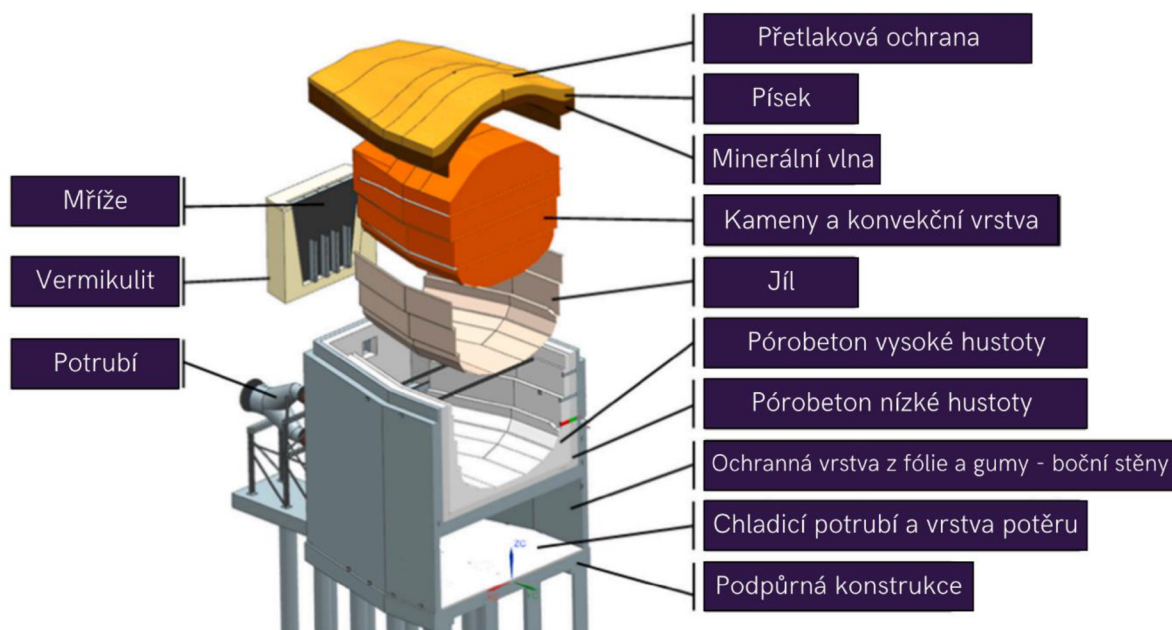
Demonstrační projekt tohoto zařízení byl vystavěn v Hamburku (Dánsko) v roce 2019 (uvedení do provozu). Projekt využívá vulkanickou horninu anortozit z oblasti Rekefjord v Norsku o středním průměru okolo 15–25 mm, viz obrázek 2.13. [19] [21]



Obrázek 2.13 Ukázka použité frakce v demonstračním projektu [21]

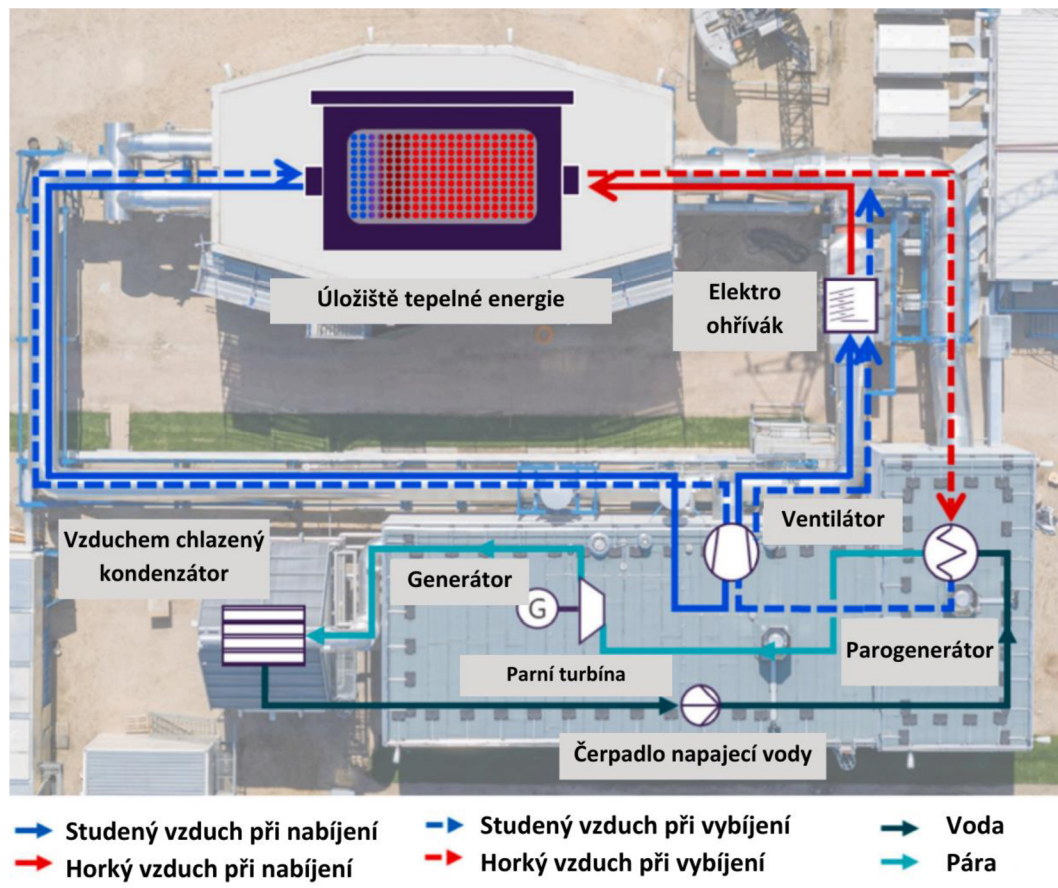
Model části úložiště tepla je znázorněn na obrázku 2.14. Lze si všimnout, že se jedná o horizontální konstrukci. Z modelu je zřejmé také to, že horní obálka je odlišná od spodní a boční. Horní obálka je tvořena minerální vlnou, pískem a ochranou proti vysokému tlaku. Písek a minerální vata jsou zde umístěny hlavně kvůli roztažnosti při nahřívání/chladnutí. [19]

Spodní a boční strany začínají vrstvou jílu, která slouží pro zmírnění namáhání dalších izolačních vrstev, a zároveň umožňuje vtačování materiálu, což zabraňuje parazitnímu proudění. Okolo jílu jsou umístěny 2 vrstvy tvořeny pórobetonem. Následuje ochranná vrstva EPDM fólie. A nakonec je zde ještě chladicí potrubí, sloužící jako aktivní ochrana proti přehřátí spodní strany akumulátoru. [19]



Obrázek 2.14 Řez modelem akumulátoru [19]

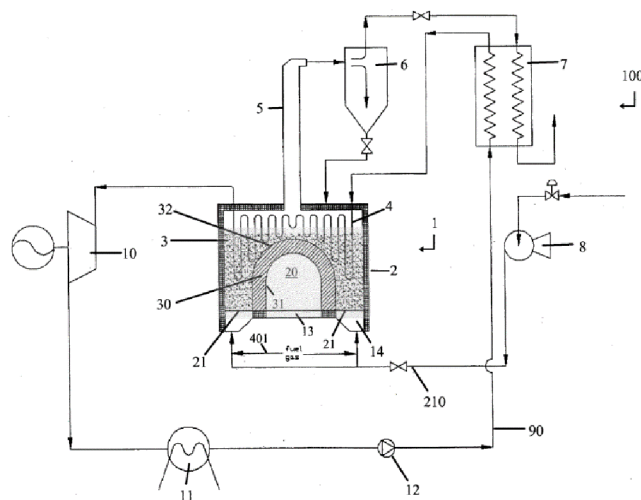
Dosažitelná kapacita baterie je cca 87,5 MWh, což stačí pro nepřetržitý provoz po dobu zhruba 23 hodin při výkonu 3,8 MWt. Teplota páry, kterou je zařízení schopno generovat, při tlaku 67 bar a průtoku 6,9 t/h, je 480 °C. Průtok vzduchu při maximálním nabíjecím výkonu 5,4 MW je 45 t/h. Schéma celého zařízení je znázorněno na obrázku 2.15. [19]



Obrázek 2.15 Schéma zapojení celého zařízení [19]

2.3.4 MAGALDI (MGTES)

Zařízení pracuje na principu nabíjení fluidní vrstvy písku pomocí slunečního záření dopadajícího na vrstvu grafitu. V okolí nahřáté vrstvy grafitu je vytvořena fluidní vrstva tvořená inertním materiálem o rozměrech ideálně 50–200 μm . Fluidizační medium je nejčastěji vzduch. Ve fluidní vrstvě je vložen svazek trubek, který je rozdělen do sekcí, jak lze vidět na obrázku níže, aby zajistil možnou regulaci nabíjení/vybíjení. [22] [23]



Obrázek 2.16 Zapojení zařízení uvedené v patentu vázaném na zařízení MGTES [22]

Písek je z fluidizačního media separován v odlučovači pracujícím na setrvačném principu (cyklon). Následně prochází přes výměník, který předehřívá medium. Proudění vzduchu je zajištěno soustavou ventilátorů. Vybíjení probíhá průchodem media nejprve přes výměník, který ho předehřívá a následně svazkem trubek ve fluidní vrstvě. Pára následně expanduje na turbíně a koná práci. Nabíjení lze provádět rovněž pomocí elektrické energie, která odporově ohřívá HTF. Po nabití na požadovanou teplotu dojde k zastavení proudění fluidizačního media a ohřátý písek padá na dno nádoby. Díky izolaci dochází k minimalizaci ztrát. Maximální teplota, na kterou lze písek nahřát je 600 °C. [22] [23]

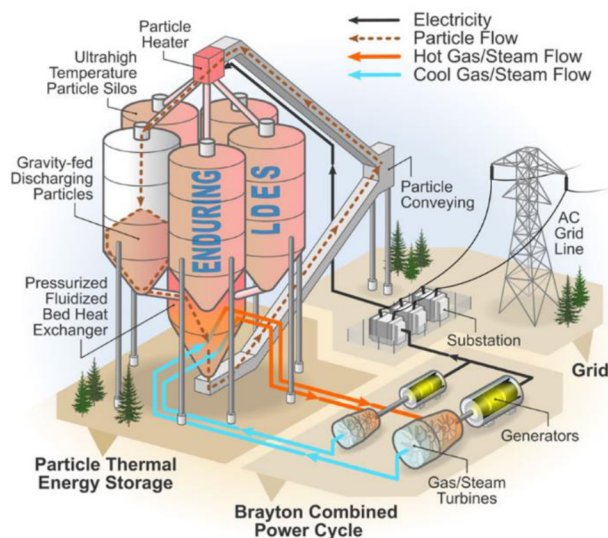
Obrázek 2.17 ukazuje modul zařízení MGTES, který se svým vzhledem dosti blíží lodnímu kontejneru. Kontejnerová koncepce je zde zvolena nejspíše hlavně z toho důvodu, protože vizi společnosti je, aby byli schopni dodávat zařízení ve velkém rozsahu výkonů. Toho by se dalo docílit, pokud by se vícero těchto kontejnerů zapojilo za sebou (sériově či paralelně). Nyní je v nabídce několik velikostí na základě hmotnosti uloženého materiálu, a to od 40 tun až do 500 tun. Maximální výkon při nabíjení/vybíjení je 11,2 MW a maximální kapacita (největšího modulu) je až 100 MWh. Celý cyklus dokáže pracovat s účinností až více jak 90 %. [23]



Obrázek 2.17 Model modulu MGTES [23]

2.3.5 NREL – TES

Jedná se o zařízení, které vyvíjí americká národní laboratoř pro obnovitelnou energii (NREL – National Renewable Energy Laboratory). V zařízení dochází při nabíjení k elektrickému ohřevu částic, které jsou přesypávány přes nahřívací elementy. Akumulační materiál je tvořen křemičitým pískem, který je nahříván až na teplotu 1200 °C. Nahřátý písek gravitačně propadává do tepelně izolovaných sil. V době potřeby je písek dopraven na fluidizační výměník, ve kterém předává teplo vzduchu nebo páře v závislosti na použitém cyklu pro konverzi tepla zpět na elektrickou energii. Ochlazené částice propadávají na soustavu dopravníků, jimiž jsou dopraveny zpět k ohřevu. K realizaci zatím nedošlo, zařízení je zatím nejspíše pouze ve vývoji. [24]



Obrázek 2.18 Schéma zapojení NREL – TES [24]

2.3.6 KRAFTBLOCK

Uskladnění tepelné energie do keramických granulí při teplotách v rozmezí 350-1300 °C. V jednom metru krychlovém může být uloženo až 1,2 MWh. Zařízení je v podobě přepravního kontejneru 10 nebo 20 stop široký. Nabíjení je možné realizovat odporově i pomocí různých médií. [25] [26]

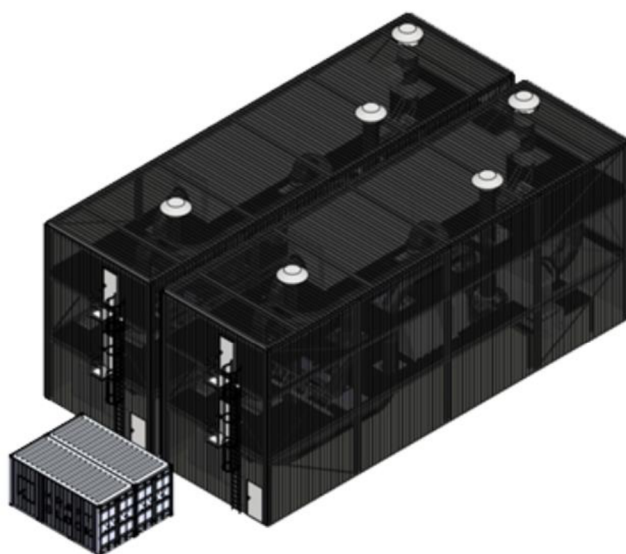
Akumulační materiál je kombinace jemně namleté ocelové strusky na velikost až 200 µm, která je smíchána s fosfátovým pojivem. Povrch granulí je také opatřen vrstvou fosfátu, která zajišťuje odolnost jednotlivých granulí proti korozi a opotřebení. Životnost materiálu až 15 000 cyklů (cca 40 let provozu). [26] [27]



Obrázek 2.19 KRAFTBLOCK – Ukázka použitého materiálu [26]

Jeden z patentů k tomuto projektu se také zabývá transportem tepla v podobě zmíněných kontejnerů naplněných granulemi. Výhodné to má být v situacích, kdy by vybudování sítě pro přenos tepla bylo příliš nákladné, a proto by mělo být výhodnější transport tepla akumulovaného v kontejneru. [28]

Realizace proběhla zatím nejspíš pouze jedna, a to v roce 2023 ve spolupráci se společností PepsiCo v Broek op Langedijk v Holandsku. Byl zde nahrazen 22 MW plynový kotel dvěma bloky Kraftblock o kapacitě 35 MWh. Společnost PepsiCo si tímto slibuje snížení emisí CO₂ o 51 % a do budoucna by ráda přidala další bloky pro snížení emisí až na 98 %. [29] [30]



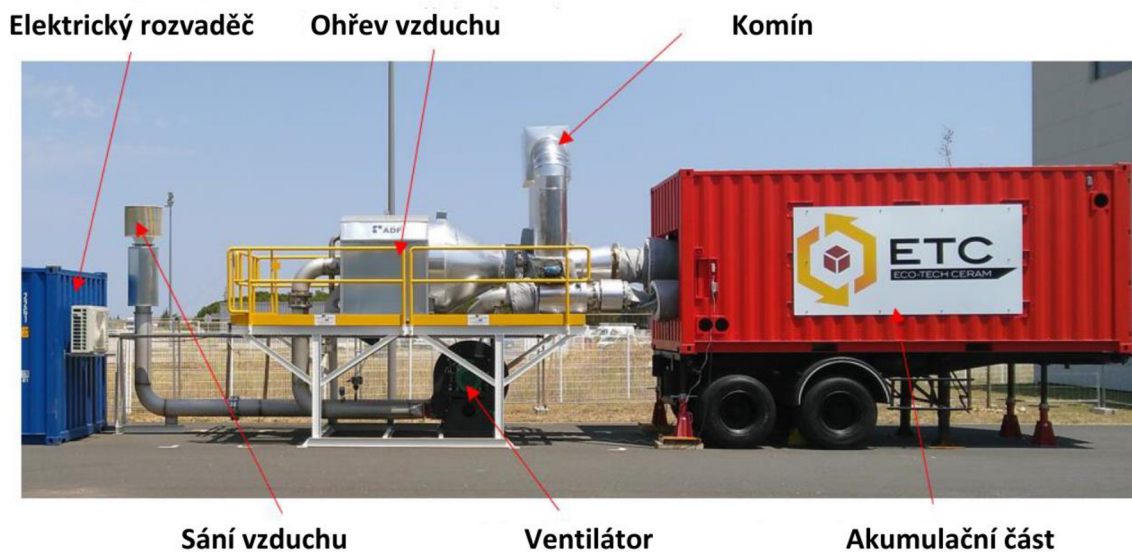
Obrázek 2.20 Model realizace KRAFTBLOCK pro PepsiCo [29]

2.3.7 ETC – EcoStock

Tepelná baterie je ve formě ležaté horizontální nádoby. Průchod média je tedy realizován v horizontálním směru. Stejně tak vrstva teplotního gradientu se při nabíjení/vybíjení posouvá horizontálně. Jako akumulační materiál jsou použity keramické kuličky s průměrem 30 mm. [31] [32]

Nabíjení je realizováno odporovým ohřevem vzduchu, ale může být využito i jiné plynné medium vystupující jako odpadní teplo z konkrétního procesu. Po předání tepla je plyn odveden do komína. Vybíjení je realizováno nasáváním okolního vzduchu a následným průchodem skrz nahřátou vrstvu baterie. [31] [32]

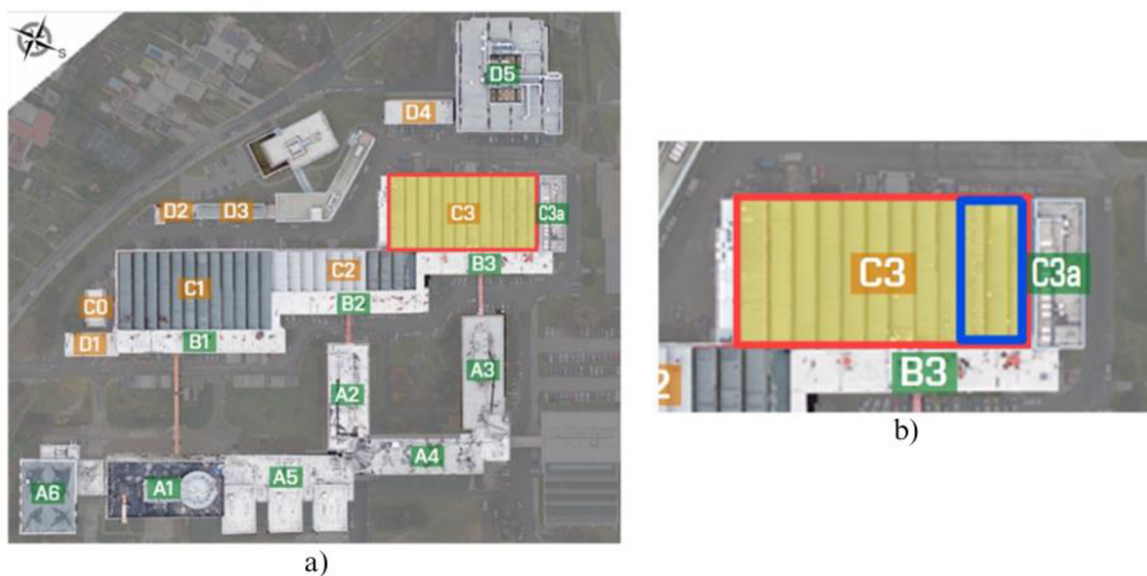
V realizovaném projektu byla instalovaná technologie s kapacitou 2 MWh při požadované výstupní teplotě 425 °C. Těto teploty je možné aktuálně dosáhnou ze 40 % celkové akumulované energie. Nabíjecí příkon 500 kW a ventilátor o příkonu 30 kW. Celková hmotnost keramických granulí je 16 tun. [31] [32]



Obrázek 2.21 ETC – Experimentální zařízení [31]

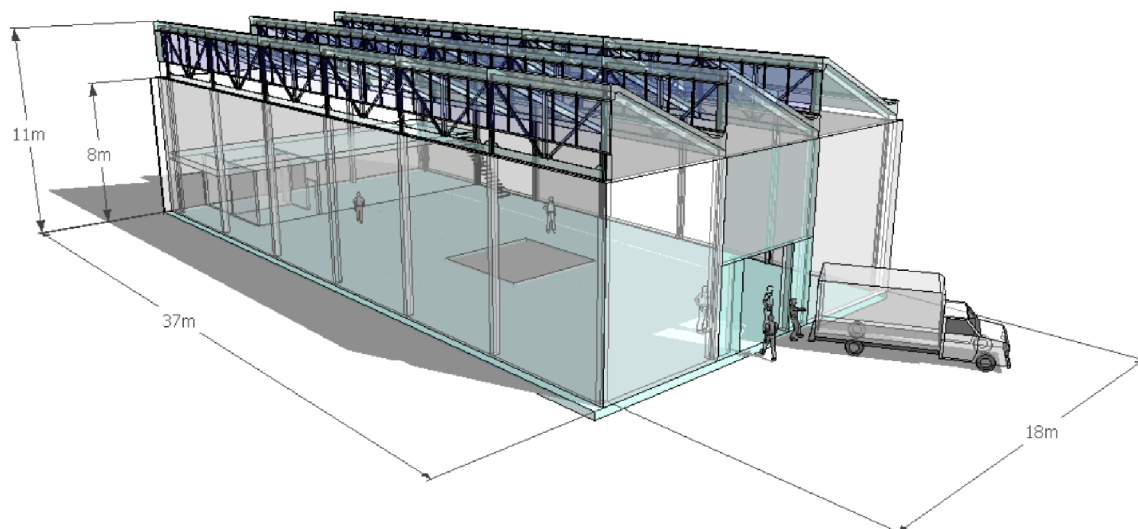
3 Řešený objekt

Hlavním cílem této práce je provést koncepční a konstrukční návrh pasivně vybíjeného akumulátoru. Pro to je nutné si nejprve představit prostor, kde by se akumulátor nacházel. Jednalo by se o průmyslovou halu budovy C3 fakulty strojního inženýrství VUT v Brně, kterou využívá energetický ústav (EÚ) pro laboratorní činnosti. Jde o část vícelodního komplexu, jak je znázorněno na obrázku 3.1b).



Obrázek 3.1 a) Plán budov FSI VUT b) Část vícelodního komplexu (modře) využívaná EÚ

Akumulátor by zde sloužil pouze pro částečné pokrytí tepelných ztrát budovy, pomocí využití elektrické energie z fotovoltaické elektrárny (FVE), která se nachází na střeše budovy (kapitola 3.2).



Obrázek 3.2 Zjednodušený model laboratoře v budově C3 [33]

3.1 Tepelné ztráty objektu

Výpočet tepelných ztrát je proveden na základě informací uvedených v diplomové práci, která se zabývala návrhem způsobu větrání a vytápění této haly. Výpočet je zde mírně zjednodušen a upraven pro potřeby této práce. [33]

Tím, že je hala součástí vícelodního objektu, lze některé tepelné ztráty zanedbat. Co se týče bočních stěn, u nich lze tepelnou ztrátu zanedbat právě proto, že v sousedních halách je možné předpokládat stejnou výpočtovou teplotu. Zadní stěna sousedí s budovou B3, kde lze očekávat také stejnou, nebo dokonce i vyšší výpočtovou teplotu, takže tepelná ztráta zde bude také zanedbána. Tepelná ztráta je tedy vypočtena pouze pro přední stěnu, kde jsou umístěna i vrata, střechu a stěnu suterénu, která míří, stejně jako stěna přední, na jihozápad. [33]

Tepelná ztráta, po těchto předpokladech, byla vyčíslena, v již zmíněné diplomové práci, dle normy ČSN 060210 - *Výpočet tepelných ztrát budov při ústředním vytápění* na 63 kW. Toto číslo ovšem odpovídá tepelné ztrátě při návrhové teplotě $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$, která odpovídá lokalitě Brno. Nicméně pro případ této práce budou využity průměrné teploty v Jihomoravském kraji v jednotlivých měsících z Českého hydrometeorologického ústavu (tabulka 2). Neboť v závěru práce je nutné porovnat uskladněné, respektive dodané teplo akumulátorem právě s tepelnou ztrátou v jednotlivých měsících. [33]

V diplomové práci, kde byla získána hodnota tepelné ztráty právě 63 kW, je zmíněno, že je uvažováno také s infiltrací venkovního vzduchu okny, která tvořila značnou část tepelných ztrát. Tento předpoklad zde není zahrnut a je počítáno s nulovou infiltrací, neboť zmíněná diplomová práce byla zhotovena již v roce 2006 a od této doby již proběhla částečná rekonstrukce haly.

Tabulka 2 Průměrné teploty v jednotlivých měsících (1991–2020) – Jihomoravský kraj [34]

Měsíc	Teplota ($^{\circ}\text{C}$)
Leden	-1,7
Únor	-0,2
Březen	3,9
Duben	9,3
Květen	14,4
Červen	17,2
Červenec	19,3
Srpen	18,8
Září	14,1
Říjen	9,0
Listopad	3,6
Prosinec	-0,6

Pro výpočet tepelných ztrát v jednotlivých měsících je ovšem nutné znát, kromě venkovní teploty, i součinitele prostupu tepla (rovnice 3.1). Ty byly opět získány ze zmíněné diplomové práce (příloha P1-S1) a jsou uvedeny v tabulce 3. Společně s nimi jsou v ní uvedeny také celkové plochy jednotlivých stěn, skrze které dochází k tepelným únikům.

Tabulka 3 Tepelné vlastnosti budovy C3 [33]

Stěna (zkratka)	součinitel prostupu tepla ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	Plocha stěny (m^2)
Západní stěna (ZS)	1,105	171,6
Střešní plášť – sklon (SPS)	0,310	691,0
Střešní plášť – vertikál (SPV)	1,765	288,8
Suterén (S)	1,640	99,6

Výpočet vychází z rovnice 3.1, která vyjadřuje, že tepelná ztráta je součtem součinů součinitele prostupu tepla, plochy stěny, a nakonec rozdílu teplot mezi vnitřním a vnějším prostředím.

$$Q_z = \sum_{i=1}^n k_i \cdot S_i \cdot \Delta T_i \quad (3.1)$$

kde je Q_z ... Tepelný tok (ztráta) (W)
 k_i ... Součinitel prostupu tepla stěnou (W/m²K)
 S_i ... Plocha stěny (m²)
 ΔT_i ... Rozdíl teplot mezi vnitřním a vnějším prostředím (°C)
 n... Počet stěn (-)

Po rozvedení rovnice 3.1 je získána následující rovnice (indexy, použity u součinitele prostupu tepla a plochy stěn, značí zkratku jednotlivých stěn).

$$Q_z = k_{ZS} \cdot S_{ZS} \cdot (t_i - t_o) + k_{SPS} \cdot S_{SPS} \cdot (t_i - t_o) + k_{SPV} \cdot S_{SPV} \cdot (t_i - t_o) + k_S \cdot S_S \cdot (t_i - t_{o,s}) \quad (3.2)$$

kde je t_i ... Výpočtová vnitřní teplota (°C)
 t_o ... teplota venkovního vzduchu (mění se dle měsíce) (°C)
 $t_{o,s}$... Výpočtová teplota okolí suterénu (°C)

Teplota okolní půdy suterénu by se samozřejmě po výšce měnila, zde je ale zaveden předpoklad stejné teploty po celé výšce stěny suterénu (tabulka 4).

Tabulka 4 Základní parametry pro výpočet tepelných ztrát

Vnitřní výpočtová teplota (°C) – t_i	18
Výpočtová teplota okolí suterénu (°C) – $t_{o,s}$	0

Za pomoci rovnice 3.2 by ovšem byla získána tepelná ztráta v aktuálním okamžiku, tedy ve wattech. Proto je zapotřebí do rovnice přidat časový údaj, aby mohla být získána hodnota celkových tepelných ztrát v kWh v jednotlivých měsících (rovnice 3.3).

$$Q_{z,měsíc} = (k_{ZS} \cdot S_{ZS} \cdot (t_i - t_o) + k_{SPS} \cdot S_{SPS} \cdot (t_i - t_o) + k_{SPV} \cdot S_{SPV} \cdot (t_i - t_o) + k_S \cdot S_S \cdot (t_i - t_{o,s})) \cdot \frac{\tau}{1000} \quad (3.3)$$

kde je τ ... Počet hodin v měsíci (Tabulka 5) (hod)
 $Q_{z,měsíc}$... Tepelné ztráty v jednotlivých měsících (kWh)

Níže je proveden vzorový výpočet pro měsíc leden. Hodnoty tepelných ztrát pro ostatní měsíce jsou uvedeny v tabulce 5.

$$Q_{z,měsíc} = \left(1,105 \cdot 171,6 \cdot (18 - (-1,7)) + 0,31 \cdot 691 \cdot (18 - (-1,7)) + 1,765 \cdot 288,8 \cdot (18 - (-1,7)) + 1,64 \cdot 99,6 \cdot (18 - 0) \right) \cdot \frac{744}{1000}$$

$$Q_{z,měsíc} = \mathbf{15577,4 \text{ kWh}}$$

Tabulka 5 Tepelné ztráty laboratoře C3 v jednotlivých měsících

Měsíc	Počet hodin v měsíci (hod)	Tepelná ztráta (kWh/měsíc)
Leden	744	15577,4
Únor	672	13149,0
Březen	744	11771,1
Duben	720	7839,5
Květen	744	4634,4
Červen	720	2643,1
Červenec	744	1303,9
Srpen	744	1643,8
Září	720	4682,2
Říjen	744	8304,7
Listopad	720	11588,7
Prosinec	744	14829,7

3.2 FVE laboratoře C3

Budova C3 disponuje FVE, z níž vyrobená elektřina by, jak již bylo zmíněno, byla využita jako zdroj tepla v navrhovaném akumulátoru. Na střeše se nachází 192 fotovoltaických (FV) panelů, jejichž celkový výkon činí 20,352 kWp. Panely jsou rozděleny do 8 samostatných polí. Pole obsahují 24 panelů, které jsou zapojené do 3 větví po 8 panelech (sériovo-paralelní zapojení 8x3 panelů). Orientace panelů je jižní. Jedná se o monokrystalické články Solartec PE 72-106 o jmenovitém výkonu 106 Wp.

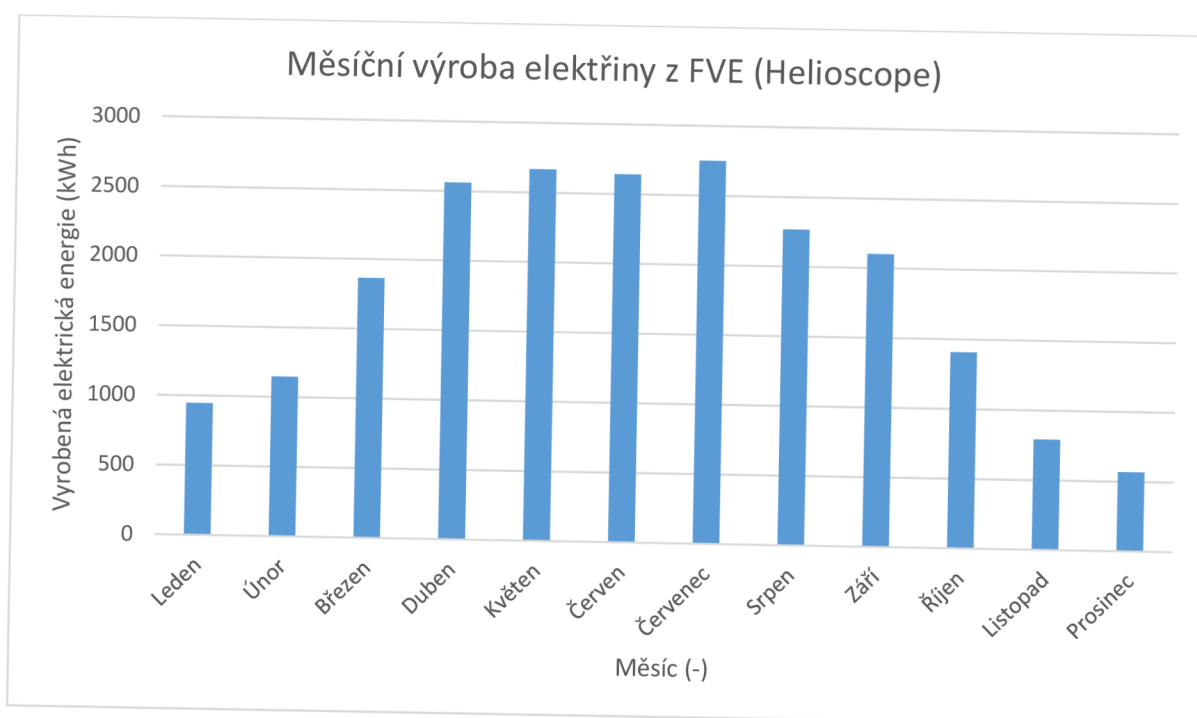


Obrázek 3.3 FVE na střeše budovy C3

Ovšem tyto panely byly na střechu nainstalovány již v roce 2006. Tím pádem jejich výkonnost (účinnost) je za dobu provozu značně menší. Tento problém byl řešen v diplomové práci, zabývající se právě zhodnocením stávajících FVE a návrhem nových FVE pro areál FSI. V ní bylo provedeno porovnání již nainstalované FVE na střeše budovy C3 s návrhem nové FVE v programu Helioscope. Z výsledků vyplývá, že pokud by byly využity panely novější, byla by výroba elektrické energie téměř dvojnásobná. V této práci bude tedy využit scénář s novějšími panely, viz tabulka 6.

Tabulka 6 Vyrobena elektrina FVE na budově C3 – program Helioscope [35]

Měsíc	Vyrobena elektrická energie (kWh)
Leden	947,17
Únor	1246,51
Březen	1865,46
Duben	2561,39
Květen	2665,94
Červen	2640,89
Červenec	2748,72
Srpen	2267,07
Září	2102,27
Říjen	1409,01
Listopad	794,25
Prosinec	568,55
Celkem	21717,23



Obrázek 3.4 Grafické znázornění vyrobené elektřiny z FVE v jednotlivých měsících

4 Koncepce provedení pasivně vybíjeného akumulátoru

Dalším cílem této diplomové práce je, na základě dohledaných informací z rešeršní části práce ohledně již probíhajících realizací, sestavit koncepci pasivně vybíjeného pískového akumulátoru. Ten by byl využit v průmyslové hale Energetického ústavu (EÚ) v budově C3 fakulty strojního inženýrství (FSI) VUT. V dalších částech kapitoly je tedy představeno přesné umístění v objektu a koncept, který bude následně rozveden v kapitole 6.

4.1 Umístění akumulátoru

Pro přesné umístění akumulátoru bylo zvoleno místo pod schody v suterénu laboratoře C3 (obrázek 4.1). Zvoleno bylo proto, že se v těchto místech žádná technika nenachází, a tak je toto místo prázdné a nevyužité. Budova navíc disponuje mostovým jeřábem, pomocí kterého by mohl být akumulátor velmi snadno dopraven přímo na místo.



Obrázek 4.1 Umístění akumulátoru v budově C3 (červená oblast)

4.2 Možné způsoby nabíjení a vybíjení

Vzhledem k tomu, že se jedná o akumulátor pasivně vybíjen, o možných způsobech vybíjení není nutné dlouze rozmýšlet. Probíhalo by čistě skrze přirozenou konvekci přes plášť akumulátoru. Co se ale týče možností nabíjení, nabízí se několik řešení, které vyplývají z kapitoly 2, zabývající se realizacemi tohoto způsobu akumulace tepla.

Jedním z nabízejících se řešení nabíjení je to, kdy je v loži akumulátoru umístěno potrubí, jímž proudí nahřátý vzduch a skrze potrubí předává teplo loži, tedy Shell-and-Tube. Toto řešení je sice vhodné, pokud je požadována přesnější regulace tepla z lože odebíraného. Ovšem je k němu zapotřebí mnoho zařízení, které slouží pro pohon a distribuci vzduchu (např. ventilátor) v akumulátoru, čímž by došlo k nárůstu investičních i provozních nákladů (zvláště, pokud by

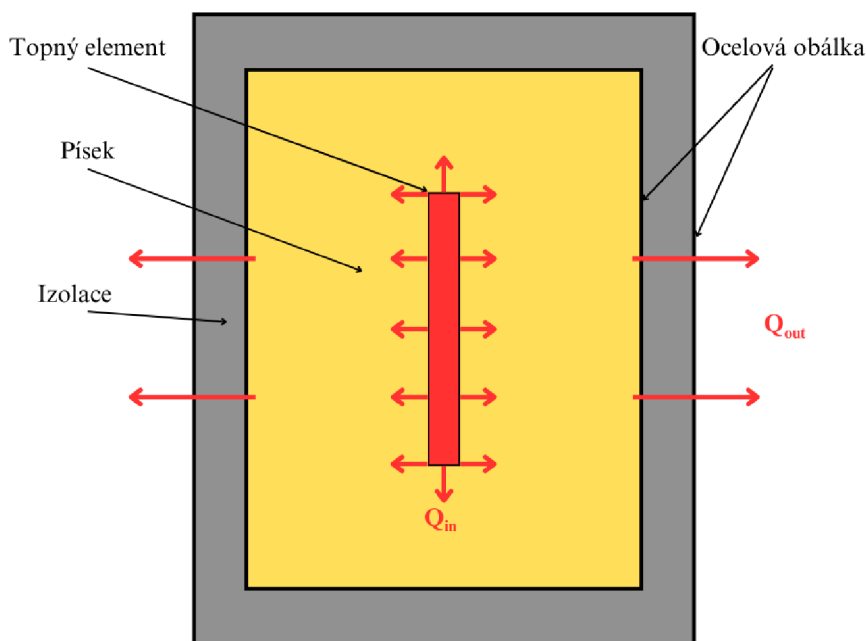
všechna tato zařízení bylo využívána pouze pro nabíjení). Z těchto důvodů se řešení s potrubím uloženým v loži akumulátoru nejeví jako to správné.

Další možností je využít balené lože (packed-bed) nebo fluidní lože (fluidized bed), kdy HTF prochází přímo mezi zrny akumulačního materiálu. Tato možnost je nejvhodnější díky své schopnosti rovnoměrné distribuce tepla napříč ložem. Ovšem přináší s sebou také značně vysoké investiční a provozní náklady, které opět plynou z nutné vybavenosti celého systému.

Z těchto poznatků vyplývá, že zajímavým způsobem nabíjení, mohou být topná tělesa. Ty se v již provedených realizacích akumulátorů tepla, využívající sypké materiály, ve světě tolik nevyužívají. Zato jsou ale hojně využívány v akumulátorech využívající principu latentního tepla. Pro konstrukční provedení budou tedy využity topná tělesa.

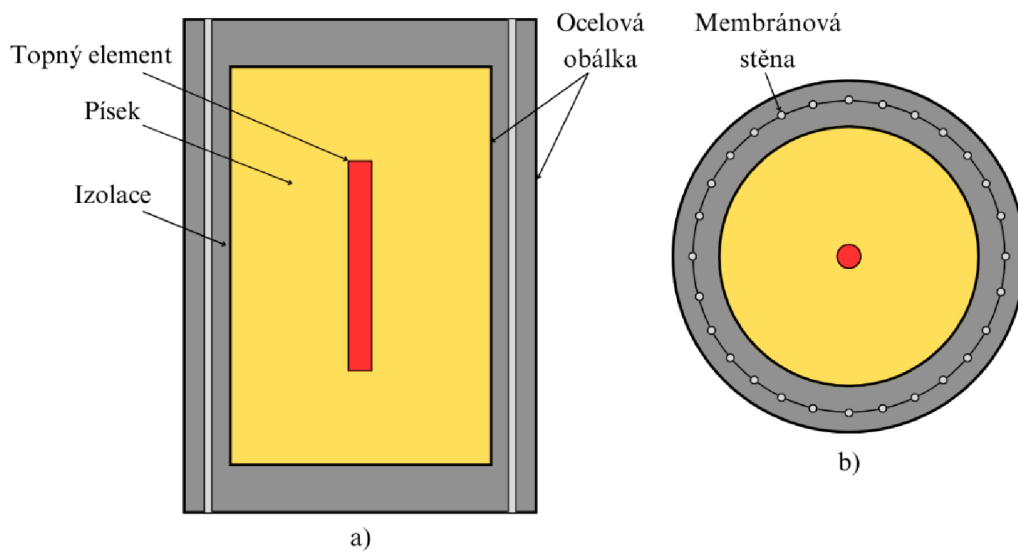
4.3 Koncept konstrukčního provedení

Dalším omezením konstrukčního provedení je také umístění akumulátoru, kterým jsou rozměry omezeny na zhruba 2 metry na šířku a 2,5 metru na výšku. Tím se výběr konstrukčních provedení, z pohledu autora, omezil pouze na izolovanou válcovou nádobu, která by byla nabíjena právě pomocí topných elementů umístěných přímo v loži akumulátoru a vybíjena pouze pasivní cestou skrze izolaci přímo do místnosti, viz obrázek 4.2.



Obrázek 4.2 Koncept pasivně vybíjeného pískového akumulátoru

Předchozí řešení nenabízí žádnou formu regulace a je to vlastně i správně, neboť by se mělo jednat právě o pasivně vybíjený akumulátor. Ovšem pokud by bylo zapotřebí vnést do tohoto konceptu možnou formu regulace dodávaného tepla do místnosti, několik řešení se nabízí. Jedním nich je vsadit do izolace průduchy, kterými by mohl samovolně proudit vzduch a tím by navýšil množství odebíraného tepla (obrázek 4.3). Těmito průduchy by mohla být například membránová stěna, která se využívá v parních kotlích jako součást výparníku. A pokud by nebylo potřeba odebírat větší množství tepla, mohl by se na akumulátor přidat mechanismus, kterým by se průtok vzduchu těmito průduchy uzavřel. Obě konstrukční řešení jsou z pohledu autora možná a zajímavá a budou dále předmětem konstrukčního řešení v kapitole 6.



Obrázek 4.3 a) Koncept akumulátoru s membránovou stěnou b) Řez akumulátorem

4.4 Akumulační materiál

Jak již z názvu napovídá mělo by se jednat o pískový akumulátor tepla. Veškeré jiné možnosti, představené v předchozí kapitole, nemohou být použity.

5 Experimentální část – akumulční materiál

Na základě rozhodnutí v minulé kapitole ohledně akumulčního materiálu byl zakoupen křemičitý písek od společnosti K-písek s.r.o. V rámci této kapitoly byly provedeny experimenty, potřebné pro ověření informací od dodavatele a následné výpočty. Technické parametry od dodavatele zakoupeného písku jsou uvedeny v tabulce 7. [36]

Tabulka 7 Technické parametry zakoupeného písku – od dodavatele

Technické parametry	
Velikost zrn	0,5 – 1,0 (mm)
d50	0,76 (mm)
Maximální vlhkost	0,2 (%)
Obsah SiO ₂	99,2 (%)

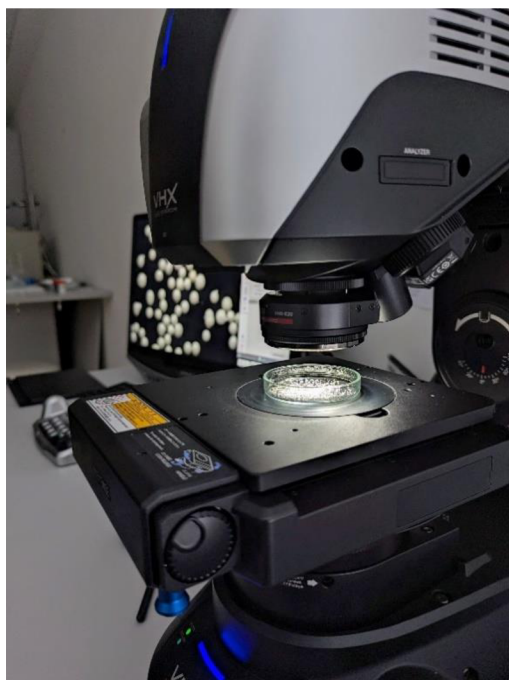
5.1 Velikost zrn

Velikost zrn byla ověřena za pomoci mikroskopu. Pro měření byl použit digitální mikroskop od společnosti KEYENCE, konkrétně model VHX-7000 (obrázek 5.1). Jedná se o velice přesný mikroskop, který je schopen zachytit obrazy v rozlišení až 4K, například pro kontrolu a analýzu vad. Eventuálně lze využít právě pro rozlišení a analýzu sypkých materiálů, což je i předmětem této kapitoly. [37]



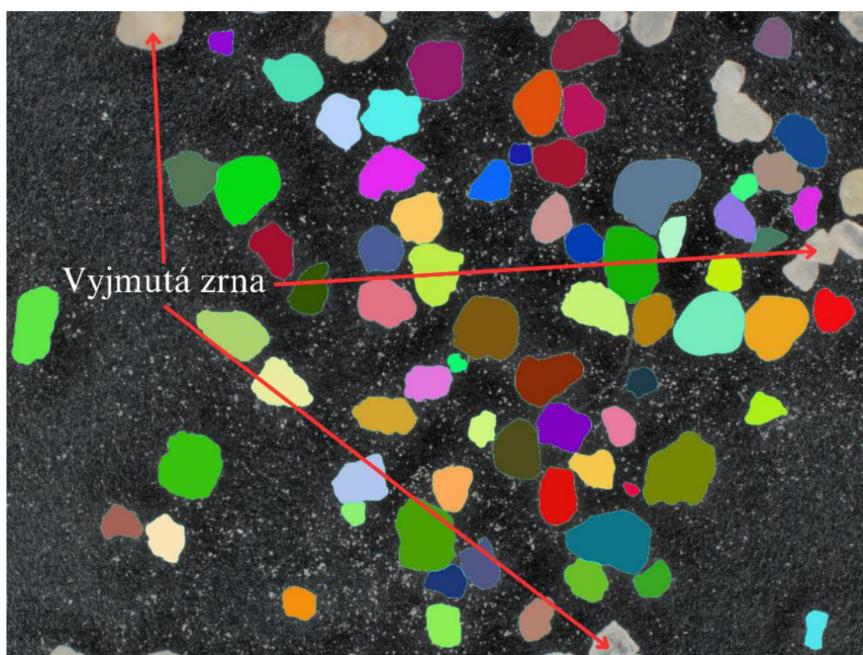
Obrázek 5.1 Digitální mikroskop KEYENCE VHX-7000 [37]

Obrázek 5.2 zachycuje část postupu měření velikosti zrn na tomto mikroskopu. Nejdříve bylo několik zrn umístěno na Petriho misku, pomocí laboratorní nerezové lžičky. Byla snaha zrna co nejideálněji rozmístit tak, aby se nedotýkala a zároveň byla dostatečně blízko sebe pro zachycení co nejvíce zrn najednou. Takto připravený vzorek byl umístěn na stůl pod objektiv mikroskopu.



Obrázek 5.2 Stůl a objektiv mikroskopu s Petriho miskou se vzorkem

Použitý mikroskop také disponuje posuvným stolem ve 3 osách. Díky této schopnosti byl objektiv zaměřen na ideální místo a byl vytvořen snímek. Pomocí Softwaru (SW), kterým také disponuje mikroskop, se odstranily různé odlesky. Následně, opět za pomoci tohoto SW, byla provedena analýza počtu a velikosti zrn na daném snímku. Na obrázku 5.3 je zobrazen již vyhodnocený snímek, kde barevně jsou zobrazena zrna, která spadají do vyhodnocení. Na okrajích je možné vidět zrna, jež nejsou zbarvena. Kvůli tomu, že nejsou na snímku zobrazena celá a narušovala by tak analýzu, tím pádem z ní byly vyjmuty. Společně s nimi byla odstraněna zrna, u kterých nebylo jasné, zda se jedná o jedno zrno, nebo zda se jedná o více, blíže se dotýkajících zrn.



Obrázek 5.3 SW vyhodnocený snímek vzorku

Dohromady bylo provedeno 6 měření, na kterých bylo vyhodnoceno celkem 626 zrn křemičitého písku. Z měření vyplývá, že v dodaném křemičitém písku se nacházela zrna o průměru 0,14 – 1,53 mm. Je tedy vidět, že oproti datům uváděným výrobcem v tabulce 7 se tyto rozměry značně liší. Dalším změřeným parametrem je ekvivalentní průměr (d_{50}), jež vychází 0,63 mm. Ten se také liší oproti hodnotě od dodavatele. Odlišnosti mohou být způsobeny několika faktory, například nevhodnou manipulací, dopravou apod., při čemž se zrna mohla poškodit. Dalším faktorem ovlivňujícím výsledky může být počet zrn v měření. Provedeno bylo měření pouze pro 626 zrn, což sice zabralo mnoho času, ale v kontextu několika kilové dodávky sypkého materiálu je to poměrně málo. Ve výpočtech budou uvažovány hodnoty z měření.

5.2 Hustota a porozita písku

Neboť právě hustota je veličinou, která se na mnoha zdrojích liší a je potřebná pro další výpočty (kapitoly 7 a 8), bylo nutné provést experiment, kterým tuto hodnotu lze získat. Není totiž jisté, zda autoři uvádějí její hodnotu jako hustotu pevného bloku daného materiálu, nebo zda počítají i s porozitou sypkého materiálu. Hustotu a porozitu ale nebylo možné napřímo změřit. V rámci této práce byly laboratorně změřeny veličiny potřebné pro jejich následný výpočet.

5.2.1 Výpočet hustoty a porozity

Pro určení veličin, které je nutné naměřit pro výpočet hustoty a porozity písku, je nutné si nejprve představit tento výpočet. Vychází z rovnice 5.1, která vyjadřuje to, že objem, který zaujmají zrna společně s tekutinou, která vyplňuje mezery mezi zrny, je roven součtu objemů těchto dvou složek.

$$V_{směs} = V_{písek} + V_{tekutina} \quad (5.1)$$

kde je $V_{směs}$... Objem směsi (m^3)
 $V_{písek}$... Objem písku (m^3)
 $V_{tekutina}$... Objem tekutiny (mezi zrny písku) (m^3)

Objem je roven podílu hmotnosti a hustoty. Při této znalosti lze rovnici 5.1 upravit následovně:

$$V_{směs} = \frac{m_{písek}}{\rho_{písek}} + \frac{m_{tekutina}}{\rho_{tekutina}} \quad (5.2)$$

kde je $m_{písek}$... Hmotnost písku (kg)
 $\rho_{písek}$... Hustota písku (kg/m^3)
 $m_{tekutina}$... Hmotnost tekutiny (kg)
 $\rho_{tekutina}$... Hustota tekutiny (kg/m^3)

Potřebnou veličinou je, jak již bylo zmíněno, hustota písku, kterou lze vyjádřit z rovnice 5.2 takto:

$$\rho_{písek} = \frac{m_{písek}}{V_{směs} - \frac{m_{tekutina}}{\rho_{tekutina}}} \quad (5.3)$$

Pro výpočet porozity lze využít následující rovnici:

$$\epsilon = \frac{m_{\text{tekutina}}}{\rho_{\text{tekutina}} \cdot V_{\text{směs}}} \quad (5.4)$$

kde je ϵ ... Porozita písku (-)

Ovšem rovnice 5.3 popisuje hustotu pevného bloku písku čili nepočítá s porozitou. Pro výpočet reálné hustoty lože, kde jsou zrna písku obklopena vzduchovými kapsami, je nutné využít rovnici 5.5. Ta využívá vypočtenou porozitu. Hustota lože je potřebná pro následné určení maximálního množství tepla uchovaného v akumulátoru (kapitola 7) a také pro ověření teplotních stavů (kapitola 8).

$$\rho_{\text{lože}} = \rho_{\text{písek}} \cdot (1 - \epsilon) + \rho_{\text{vzduch}} \cdot \epsilon \quad (5.5)$$

kde je $\rho_{\text{lože}}$... Hustota lože (kg/m^3)
 ρ_{vzduch} ... Hustota vzduchu (kg/m^3)

Z rovnic 5.3 a 5.4 vyplývá to, že pro výpočet hustoty je zapotřebí změřit hodnoty následujících veličin:

- Hmotnost písku ($m_{\text{písek}}$)
- Objem směsi písku a tekutiny mezi zrny ($V_{\text{směs}}$)
- Hmotnost tekutiny, která zaujímá prostor mezi zrny ($m_{\text{směs}}$)
- Hustotu tekutiny ($\rho_{\text{směs}}$)

5.2.2 Použité přístroje a měřidla:

- Odměrný válec – Chemland – 25:0,5 ml

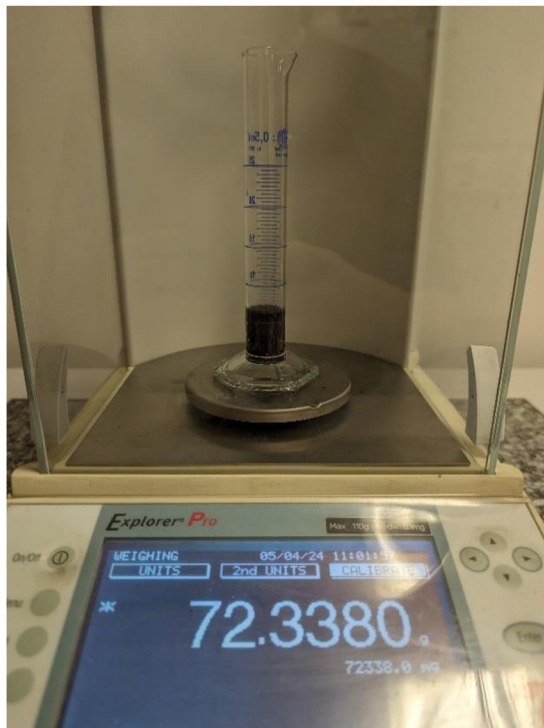


Obrázek 5.4 Odměrný válec

- Váha – Ohaus Explorer Pro – $100 \text{ g} \pm 1 \text{ mg}$ (obrázek 5.5)
- Ultrasonický čistič/dispergační zařízení – FRITSCH LABORETTE 17 (obrázek 5.6)
- Laboratorní pipeta 2 ml (obrázek 5.7)

5.2.3 Postup měření

Nejdříve bylo nutné zvážit odměrný válec, do kterého se následně nasypal vzorek křemičitého písku (na obrázcích je použit čedič, postup je ale stejný). Poté se naplněný odměrný válec znovu zvážil a vzduchové mezery se vyplnily izopropylalkoholem (IPA).



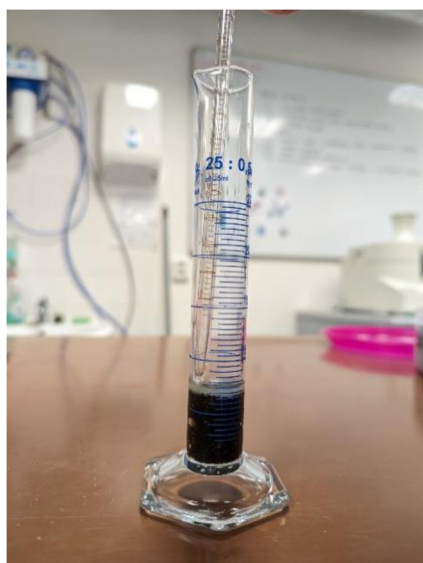
Obrázek 5.5 Váha s naplněným odměrným válcem

Pro co nejdokonalější vyplnění mezer se odměrný válec vložil do ultrasonického čističe. Zde se jemnými otřesy zrna uspořádala a vzduchové bubliny byly vytlačeny ven a vyplněny IPA.



Obrázek 5.6 Odměrný válec v ultrasonickém čističi

Po setřepání v čističi, tím, jak se zrna v odměrném válci uspořádala, bylo nutné odsát přebytečný IPA pomocí pipety (obrázek 5.7). Po odsání byl odměrný válec znovu zvážen. Tímto způsobem byly provedeny celkem 3 měření, jejichž výsledky jsou uvedeny v tabulce 8.



Obrázek 5.7 Odsávání přebytečného isopropylalkoholu

5.2.4 Vzorový výpočet a naměřené hodnoty

Vzorový výpočet je proveden pro první měření.

$$\rho_{\text{písek}} = \frac{0,01525}{9,5 \cdot 10^{-6} - \frac{0,00254}{785}}$$

$$\rho_{\text{písek}} = \mathbf{2434 \text{ kg/m}^3}$$

$$\epsilon = \frac{2,54}{785 \cdot 9,5 \cdot 10^{-6}}$$

$$\epsilon = \mathbf{0,34}$$

Pro výpočet hustoty lože je nutné znát také hustotu vzduchu. Ta byla získána pomocí doplňku CoolProp v MS Excel pro teplotu 20 °C a atmosférický tlak. [38]

$$\rho_{\text{lože}} = 2434 \cdot (1 - 0,34) + 1,205 \cdot 0,34 \quad (5.5)$$

$$\rho_{\text{lože}} = \mathbf{1607 \text{ kg/m}^3}$$

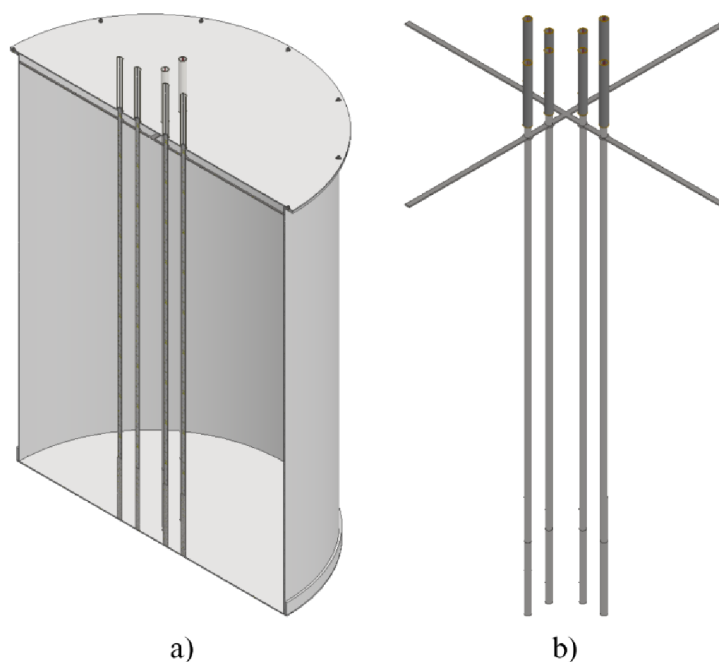
Veškeré naměřené a vypočtené hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 8 Naměřené a vypočtené hodnoty měření hustoty a porozity písku

Měření	1.	2.	3.	Průměrná hodnota	Jednotka
$m_{\text{nádoba}}$	59,53	59,53	59,53	-	(g)
$m_{\text{písek}}$	15,25	15,35	16,1	-	(g)
$V_{\text{směs}}$	9,50	9,50	10	-	(ml)
m_{IPA}	2,54	2,57	2,69	-	(g)
ρ_{IPA}	785	785	785	-	(kg/m ³)
$\rho_{\text{písek}}$	2434	2465	2449	2449	(kg/m³)
ϵ	0,34	0,34	0,34	0,34	(-)
$\rho_{\text{lože}}$	1607	1627	1617	1617	(kg/m³)

6.1.1 Ocelová obálka písku

Písek je uložen ve válcové ocelové obálce (obrázek 6.2a). Obálka je tvořena spodním kruhovým plechem, na jehož okraji je silné lemování. Lemování slouží pro volné uložení stočeného válce. Volné uložení bylo použito proto, že v akumulátoru budou teploty až 400 °C a docházelo by tak, z důvodu teplotní roztažnosti, k velkému namáhání, pokud by byl válec a spodní plech spojen napevno (např. přivařen). Na vrchním okraji ocelového válce je příruba, která slouží pro uchycení vrchního kruhového plechu (víka). Ten je k přírubě přichycen pomocí šroubového spoje, pro něž byly použity oválné otvory, opět z důvodu volného uložení.



Obrázek 6.2 a) Ocelová obálka písku b) uložení topných patron

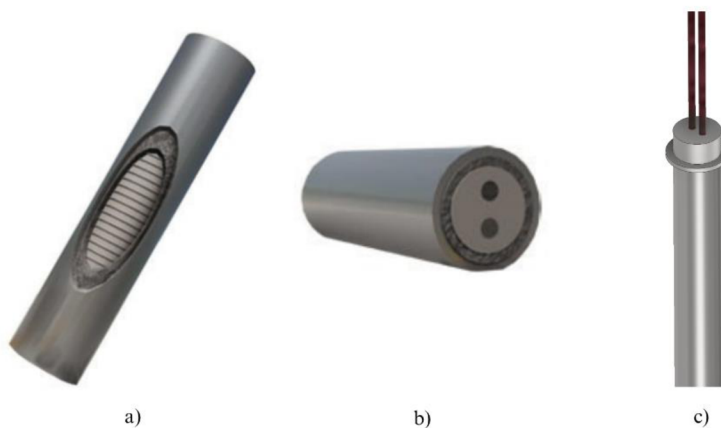
6.1.2 Topné elementy

Pro ohřev akumulátoru bylo v modelu použito 8 topných patron v křížovém uspořádání. Patrony jsou vloženy ve vodících tyčích, které jsou pevně spojeny ocelovou obálkou písku (obrázek 6.2b) a pro zpevnění je použit centrovací plech. Počet patron byl pouze odhad a jeho správnost bude ověřena v kapitole 8 v závěru práce bude okomentována. Pro následné cenové ohodnocení (kapitola 9) bylo nutné zvolit výrobce. Tím je společnost easytherm s.r.o. specializující se na dodávky zařízení pro průmyslové tepelné procesy. Specifikace topných patron jsou uvedeny v tabulce 9.

Délka topných patron 1700 mm byla zvolena s ohledem na výšku ocelové obálky písku (2 metry), aby se zabránilo přehřátí písku na dně akumulátoru. A rovněž nahoře akumulátoru, je 300 mm neaktivní zóna patron. Topná délka patron tak činí 1400 mm. Výkon topných patron byl volen tak, aby odpovídal výkonu FVE na střeše budovy C3, který činí cca 20 kWp. Z tohoto výkonu a počtu patron se pak odvíjí jejich individuální výkon.

Tabulka 9 Parametry topných patron

Parametr	Hodnota
Typová řada	DW
Objednací kód	NW20D1700L230V2500W400SL
Průměr (mm)	20
Délka (mm)	1700
Výkon (W)	2500 (230 V)
Maximální teplota pláště (°C)	500
Délka el. vývodů (mm)	400 (izolace – sklovlákno)



Obrázek 6.3 a), b) Topné patrony easytherm [39] c) Model patrony

6.1.3 Izolace

Ocelová obálka písku je obalena izolačním materiálem o tloušťce 250 mm z každé strany. Tloušťka byla zvolena na základě odhadu, jehož správnost bude ověřena v kapitole 8 a v závěru práce bude okomentována. Pro cenové ohodnocení modelu v kapitole 9 bylo opět nutné zvolit konkrétní výrobce a typy izolačních materiálů.

Pro izolaci dna a vrchní části akumulátoru byl zvolen typ *PROMASIL-1000* od společnosti Promat (obrázek 6.4a). Materiál se vyznačuje nízkou tepelnou vodivostí a vynikající mechanickou pevností, čímž zajišťuje optimální izolační vlastnosti a odolnost proti zatížení. Na boční stěny akumulátoru byla použita izolační rohož z keramických vláken *Durablanket S* od společnosti Fiberfrax (viz obrázek 6.4b). Tato rohož disponuje vysokou pevností, houževnatostí a nízkou tepelnou vodivostí, čímž zajišťuje efektivní izolaci. [40] [41]



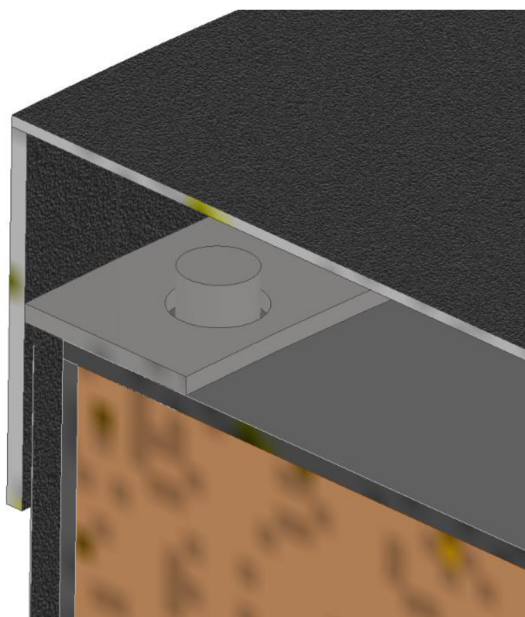
Obrázek 6.4 a) Promat PROMASIL–1000 b) Fiberfrax® Durablanket® S [40] [41]

6.1.4 Vnější obálka

Vnější obálka sehrává převážně roli ochrannou a stabilizační celého akumulátoru. Její konstrukce sdílí podobnosti s obálkou písku, ale s podstatnými odlišnostmi v uložení jednotlivých komponent.

Obálka se tedy skládá ze spodního plechu, který je opatřen U profily (obrázek 6.7a). Ty fungují jako podpěry akumulátoru a zajišťují jeho stabilitu. Ke spodnímu plechu je napevno připevněn svinutý plechový válec, tvořící plášť akumulátoru. Na tento plášť je nýty uchycen trapézový děrovaný plech, který plní funkci estetickou a ochrannou. Jeho primárním účelem je dotvořit celkový vzhled akumulátoru, ale zároveň slouží i jako ochrana v případě nadměrného nárůstu teploty venkovní stěny. Na trapézový plech je připevněn plech s logem VUT, který má čistě estetickou funkci. Válcová plocha vnější obálky akumulátoru je dále opatřena manipulačními čepy, které budou podrobněji rozebrány v následující kapitole.

Vrchní kryt akumulátoru se skládá ze dvou hlavních částí, a to kruhového plechového dílu a vnějšího víka. Kruhový plechový díl plní primárně funkci zakrytí a ochrany izolační vrstvy. Je volně uložen a vystředěn pomocí vodících trubek topných patron. Celou vrchní část akumulátoru pak uzavírá víko, které je rovněž tvořeno kruhovým plechovým dílem s lemováním po obvodu. I víko je uloženo volně a je fixováno pomocí středících čepů (obrázek 6.5). Jeho hlavní funkcí je zakrytí kabeláže a estetické dotvoření vzhledu akumulátoru.



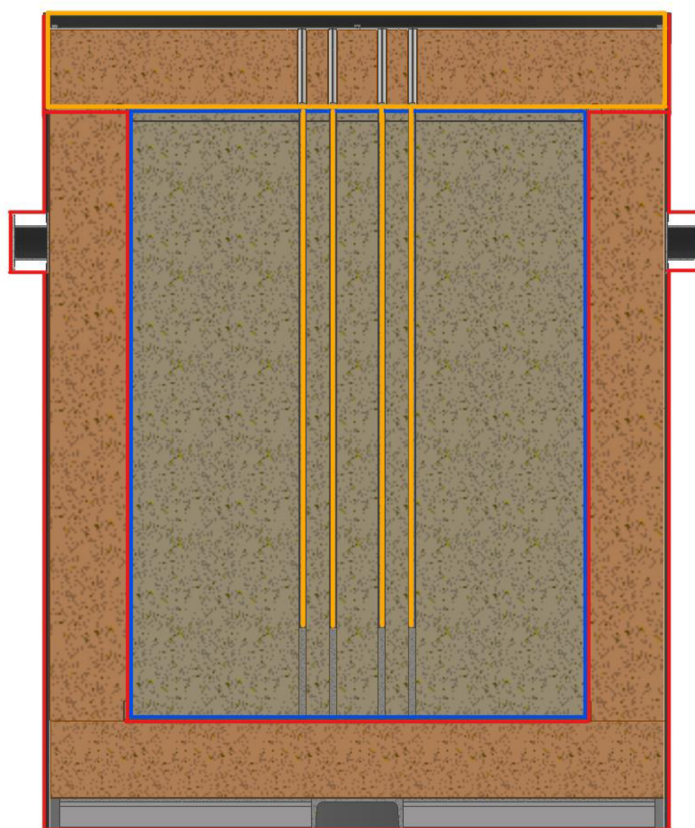
Obrázek 6.5 Detail uchycení vnějšího víka

6.1.5 Přeprava a manipulační prostředky

Přeprava akumulátoru by se realizovala v rozloženém stavu. Na místo určení by se dopravila pouze červená část na obrázku 6.6, která zahrnuje ocelovou obálku písku (bez vrchního plechu), izolaci dna, boční izolaci a vnější obálku (bez vrchního víka).

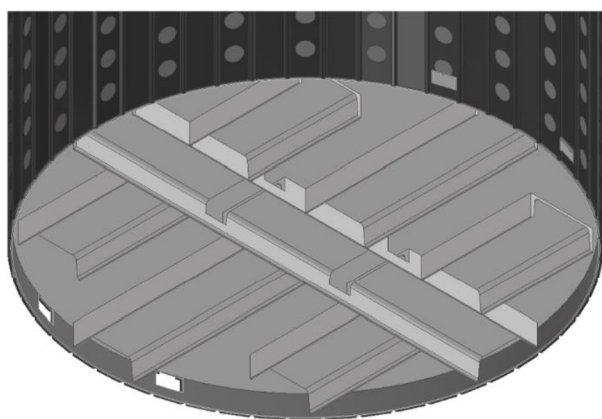
Po usazení a přípravě této části na místě se do ní vloží písek (modře značeno). Následně se ocelová obálka písku uzavře vrchním plechem, na který se položí vrchní izolace. Pomocí vodících tyčí se do akumulátoru vloží topné patrony, a nakonec se celý akumulátor uzavře vrchním víkem.

Tato metoda přepravy umožňuje snadnou manipulaci s akumulátorem a minimalizuje riziko poškození během přepravy.



Obrázek 6.6 Zóny pro přepravu akumulátoru

Prostředky pro manipulaci zahrnují otvory ve spodní části akumulátoru (obrázek 6.7a) a čepy na bocích venkovní ocelové obálky (obrázek 6.7b). Otvory slouží k prostrčení lan pro zvedání jeřábem nebo jiným zdvihacím zařízením. Čepy zajišťují stabilitu akumulátoru během manipulace a zabraňují jeho naklonění či převrácení.



a)

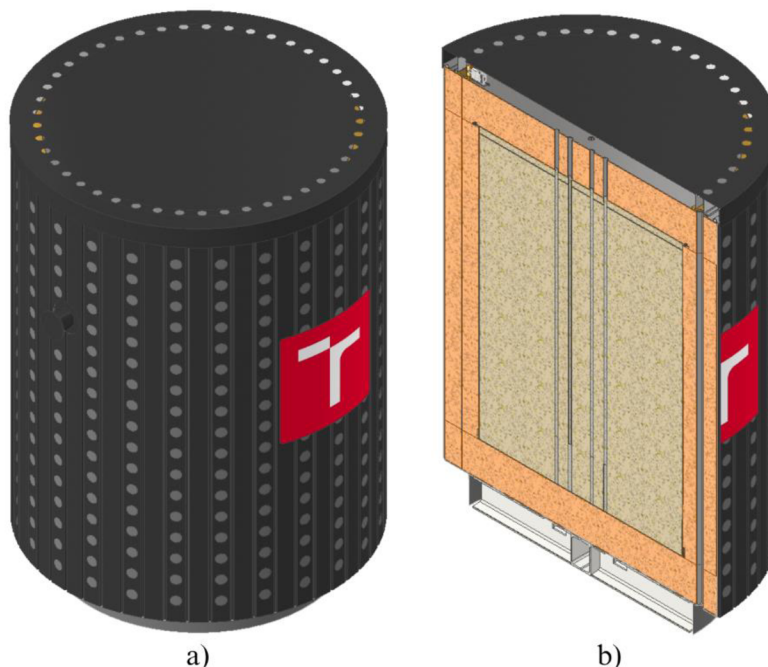


b)

Obrázek 6.7 Manipulační prostředky a) Otvory pro manipulační lana b) Manipulační čepy

6.2 Model s membránovou stěnou

Tento model je v základu stejný, jako model Basic. Hlavní odlišností, jak název napovídá, je membránová stěna. Ta je zde primárně pro možnost navýšení tepelného toku z akumulátoru do místností. Přináší s sebou ale také výzvy z hlediska konstrukce, které budou blíže rozebrány v následujících kapitolách.



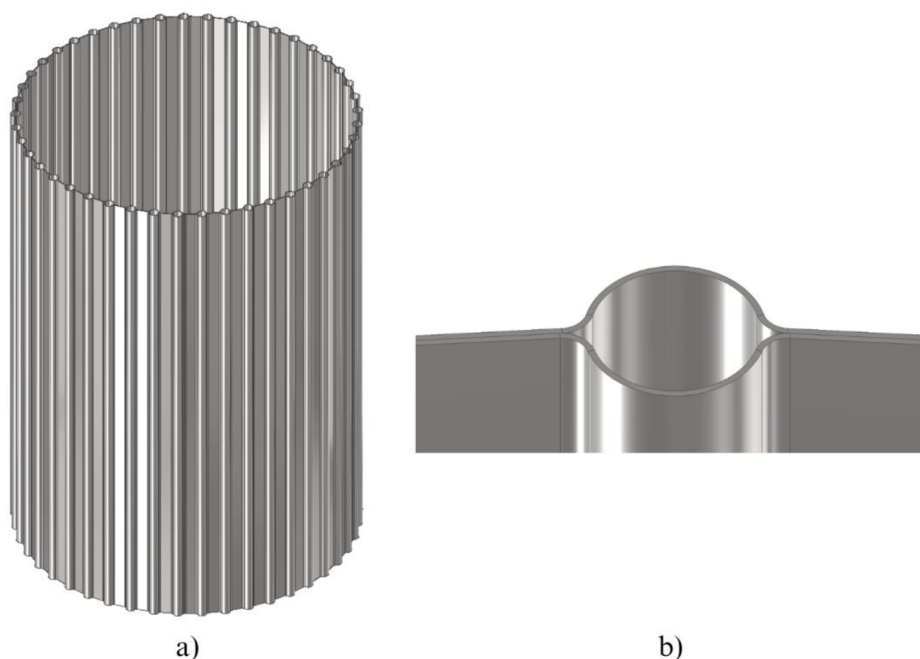
Obrázek 6.8 a) Model s membránovou stěnou b) Podélný řez modelem

6.2.1 Membránová stěna

Membránová stěna je zde umístěna primárně, jak již bylo dříve zmíněno, pro možnost navýšení tepelného výkonu dodávaného do objektu. V modelu je umístěna uprostřed boční izolace.

Název „Membránová stěna“ v tomto případě odkazuje spíše na princip, než že by se jednalo o membránovou stěnu používanou v parních kotlích. Vzhledem k vysokým nákladům na reálnou membránovou stěnu, je zde použito méně nákladné řešení. Skládá se ze dvou vlnitých plechů umístěných naproti sobě a spojených například několika bodovými svary (obrázek 6.9). Toto řešení umožňuje dosáhnout podobného efektu jako u membránové stěny, ale za nižší cenu.

Další alternativou membránové stěny by mohly být jakékoli průduchy, které by se daly uzavřít (regulovat) v případě potřeby.



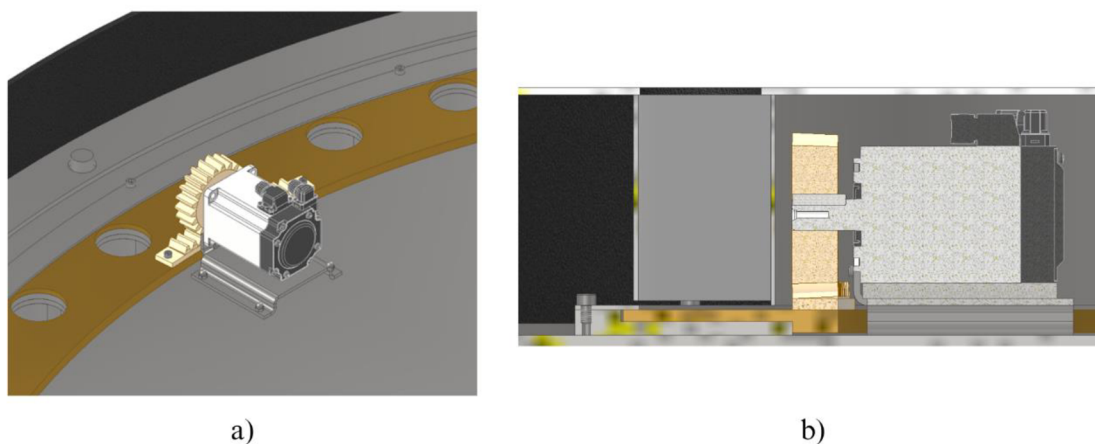
Obrázek 6.9 a) Membránová stěna b) Detail membránové stěny

6.2.2 Regulační mechanismus

Pro regulaci průchodu vzduchu membránovou stěnou (resp. tepelného toku do místnosti) je v modelu použit regulační mechanismus znázorněn na obrázku 6.10.

Princip fungování mechanismu je založen na natáčení mosazného děrovaného plechu, který je vložen mezi dva ocelové plechy tvořící kolejnici. Natáčení plechu zajišťuje ozubené soukolí poháněné servomotorem.

Pro natáčení plechu by se daly použít i jiné mechanismy, například pneumatický pohon, používaný běžně pro pohon ventilů. V tomto případě byl zvolen ozubený převod z důvodu jeho spolehlivosti a nízké údržby.



Obrázek 6.10 Regulační mechanismus

6.3 Možné limity a nedostatky modelů

Je nutné zdůraznit, že cílem této práce nebylo provést detailní pevnostní výpočet navrženého modelu pískového akumulátoru tepla. Z tohoto důvodu je možné, že některá použitá řešení nemusí být z hlediska pevnosti optimální a nemusí odpovídat reálným požadavkům na konstrukci takovýchto zařízení.

Dalším limitem by mohla být ta skutečnost, že při možných nutných opravách by nejspíš musel být písek z akumulátoru vyjmut. Což by u aktuálního konstrukčního řešení bylo obtížné. Proto by do něj musel být implementován speciální otvor pro jeho snazší vyjmutí.

Závěrem je nutné zdůraznit, že prezentovaný model pískového akumulátoru tepla slouží spíše jako inspirace a základ pro další výzkum v této oblasti.

7 Výpočet potřebných veličin pro posouzení teplotních stavů akumulátoru

Před tím, než budou provedeny simulace pro ověření teplotních stavů akumulátoru, je nutné provést výpočet potřebných veličin pro tyto simulace. V této kapitole bude vypočteno maximální množství tepla, které je možné v akumulátoru uložit. Následně bude vypočtena efektivní tepelná vodivost lože. A nakonec bude určen součinitel přestupu tepla pláště akumulátoru do místnosti a také součinitel přestupu tepla membránové stěny.

7.1 Maximální možné akumulované teplo

Pro tento výpočet lze využít rovnici 2.1, která vyjadřuje množství tepla uloženého v daném objemu při uvažované změně teplot (ohřátí). V tomto případě je nutné upravit rovnici 2.1, kde bude nahrazena hmotnost za součin hustoty a objemu.

$$Q = \rho \cdot V \cdot c_p \cdot \Delta T$$

Pro výpočet bude využita hustota lože získána v kapitole 5. Za objem je dosazen pouze objem písku, tedy 3,534 m³. A dále je zaveden předpoklad maximálního teoretického nabití akumulátoru, tedy písek by byl nahřátý na 400 °C v celém svém objemu. Počáteční teplota je volena na návrhovou teplotu objektu (18 °C). Hodnota c_p v tomto případě činí 1150 J/kgK. Níže je vyobrazen vzorový výpočet maximálního možného akumulovaného tepla.

$$Q = 1617 \cdot 3,534 \cdot 1150 \cdot (400 - 18)$$

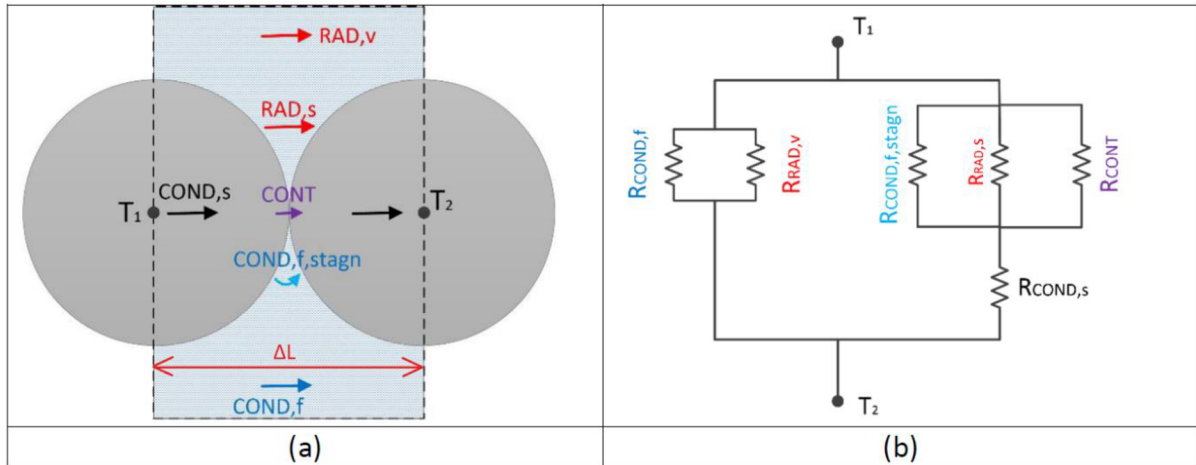
$$Q = 2,51 \text{ GJ} = 697,3 \text{ kWh}$$

7.2 Efektivní tepelná vodivost lože

Lože akumulátoru je tvořeno zrný písku, mezi kterými jsou vzduchové mezery. Pro výpočet tepelné vodivosti lože je nutné provést výpočet tzv. efektivní tepelné vodivosti, která bere v potaz jak pevné částice, tak i tekutinu mezi nimi. Podrobný popis výpočtu a jednotlivých členů rovnic efektivní tepelné vodivosti je uveden v [42], v této kapitole jsou využity převážně finální rovnice získané ve studii.

Na obrázku 7.1 jsou znázorněny mechanismy přenosu tepla, které by se daly rozdělit následovně [42]:

1. Přenos tepla skrze tekutinu v dutém prostoru vedením a sáláním mezi sousedními dutinami (za předpokladu neabsorbujícího plynu)
2. Přenos tepla skrze pevnou část
 - a. Přenos tepla kontaktem povrchů částic
 - b. Vedení stagnující vrstvou tekutiny blízko kontaktní oblasti
 - c. Sáláním mezi povrchy částic
 - d. Vedením skrze pevné částice



Obrázek 7.1 a) Model přestupu tepla mezi zrny b) Tepelé odpory přestupu tepla mezi zrny [43]

Z obrázku 7.1b) je zřetelné zapojení tepelných odporů jednotlivých mechanismů přestupu tepla. Mechanismy 1 a 2 jsou zapojeny paralelně vůči sobě. Mechanismus d je v sérii s výsledným paralelním zapojením mechanismů a, b a c.

Dle modelu na obrázku 7.1a) je efektivní tepelná vodivost dána vztahem [42]:

$$-k_e^0 \cdot \frac{\Delta t}{\Delta L} = -k_g \cdot \epsilon \cdot \frac{\Delta t}{\Delta L} + h_{rv} \cdot \epsilon \cdot (-\Delta t) + q_s \quad (7.1)$$

- kde je
- k_e^0 ...Efektivní tepelná vodivost porézního prostředí naplněného nehybnou tekutinou (W/mK)
 - Δt ... Teplotní spád mezi částicemi (K)
 - ΔL ...Efektivní délka mezi (m)
 - k_g ... Tepelná vodivost tekutiny (W/mK)
 - ϵ ... Porozita lože (-)
 - h_{rv} ... Koefficient přestupu tepla radiací (mezi prázdnými objemy) (W/m²K)
 - q_s ...Měrný tepelný tok pevnou fází (W/m²)

Teplotní spád mezi částicemi lze vyjádřit jako součet teplotního spádu v pevné části a teplotního spádu v blízkosti oblasti kontaktu částic, tedy [42]:

$$\Delta t = \Delta t_s + \Delta t_{gs} \quad (7.2)$$

- kde je
- Δt_s ... Teplotní spád v pevné části (K)
 - Δt_{gs} ... Teplotní spád v blízkosti kontaktu částic (K)

Jednotlivé teplotní spády mohou být vyjádřeny v závislosti na tepelném toku v pevné části následovně [42]:

$$\Delta t_s = -\frac{q_s}{k_s} \cdot \frac{1}{1 - \epsilon} \quad (7.3)$$

$$\Delta t_{gs} = - \frac{q_s}{\frac{k_g}{l_v} + h_p + h_{rs}} \cdot \frac{1}{1 - \epsilon} \quad (7.4)$$

kde je k_s ... Tepelná vodivost pevné části (W/mK)
 l_s ...Efektivní délka pevné částice (m)
 l_v ...Efektivní tloušťka filmu tekutiny přiléhající k povrchu dvou pevných částic (m)
 h_p ...Součinitel přestupu tepla vyjadřující rychlost přestupu tepla kontaktní plochou mezi pevnými částicemi v loži (W/m²K)

Přesněji řečeno je l_s tloušťka desky daného pevného materiálu, která by kladla stejný odpor přestupu tepla, jako částice sférického tvaru. l_v je poté tloušťka desky stacionární tekutiny, která by kladla stejný odpor přestupu tepla jako vlákna tekutiny v blízkosti kontaktního bodu mezi částicemi [42].

Kombinací rovnic 7.1 až 7.4 a následných úprav uvedených v [42] byl získán výsledný vztah (rovnice 7.5) pro efektivní tepelnou vodivost lože

$$k_{eff} = \frac{k_e^0}{k_g} = \epsilon \cdot \left[1 + B \cdot \frac{h_{rv} \cdot D_p}{k_g} \right] + \frac{B \cdot (1 - \epsilon)}{\frac{1}{\frac{1}{\phi} + \frac{D_p \cdot h_{rs}}{k_g}} + \gamma \cdot \frac{k_g}{k_s}} \quad (7.5)$$

kde je B ...Hustota lože (-)
 D_p ...Průměr částic (m)
 ϕ ...Koefficient vyjadřující efektivní tloušťku filmu tekutiny přiléhající ke kontaktu částic (-)
 h_{rs} ...Koefficient přestupu tepla radiací (mezi plochami částic) (W/m²K)
 γ ...Konstanta velikosti částic (-)

Pro výpočet konstant B a γ lze použít následující rovnice 7.6 a 7.7 [42].

$$B = \frac{1}{D_p} \cdot \frac{1}{3} \cdot \left[\left(\frac{2}{3} \right)^{\frac{1}{2}} + 1 + \left(\frac{3}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \cdot D_p \quad (7.6)$$

$$\gamma = \frac{2}{3} \quad (7.7)$$

Dalšími neznámými jsou koeficienty přestupu tepla h_{rs} a h_{rv} , pro jejichž výpočet byly využity rovnice 7.8 a 7.9 [43].

$$h_{rv} = \left[4 \cdot \sigma \cdot T_l^3 \cdot \frac{\epsilon}{2 \cdot (1 - \epsilon)} \cdot \frac{1 - \epsilon_r}{\epsilon_r} \right] \quad (7.8)$$

$$h_{rs} = 4 \cdot \sigma \cdot T_l^3 \cdot \left(\frac{\epsilon_r}{2 - \epsilon_r} \right) \quad (7.9)$$

kde je σ ... Stefan-Boltzmannova konstanta ($\text{W/m}^2\text{K}^4$)
 T_l ... Teplota lože v místě výpočtu (K)
 ϵ_r ... Emisivita částic (-)

Poslední neznámou v rovnici 7.5 je koeficient zohledňující tloušťku filmu tekutiny přiléhající ke kontaktu dvou částic, tedy ϕ , jehož výpočet lze provést pomocí rovnice 7.10.

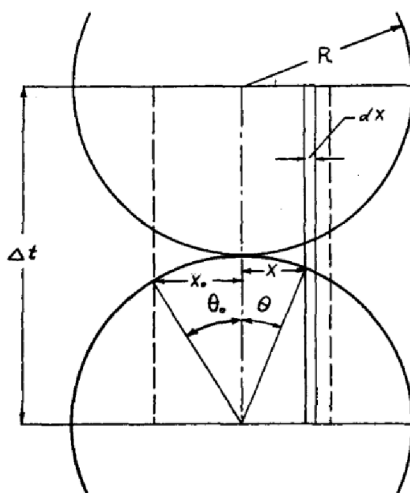
$$\phi = \phi_2 + (\phi_1 - \phi_2) \frac{\epsilon - \epsilon_2}{\epsilon_1 - \epsilon_2} \quad (7.10)$$

kde je ϕ_2 ... Hodnota ϕ při minimální porozitě lože (-)
 ϕ_1 ... Hodnota ϕ při maximální porozitě lože (-)
 ϵ_2 ... Minimální porozita lože (-)
 ϵ_1 ... Maximální porozita lože (-)

Hodnoty maximální a minimální porozity lože jsou dle [42] 0,26 (-) pro minimální porozitu a 0,476 (-) pro maximální porozitu. Pro výpočet hodnot ϕ_1 a ϕ_2 lze použít rovnici 7.11 [43].

$$\phi_i = \frac{1}{2} \cdot \frac{\left(\frac{\kappa - 1}{\kappa}\right)^2 \sin^2 \theta_{0,i}}{\ln[\kappa - (\kappa - 1) \cos \theta_{0,i}] - \frac{\kappa - 1}{\kappa} (1 - \cos \theta_{0,i})} - \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{\kappa} \quad (7.11)$$

kde je κ ... Podíl koeficientů tepelné vodivosti částic a tekutiny (k_s/k_g) (-)
 θ_0 ... Úhel odpovídající hranici oblasti tepelného toku pro jeden kontaktní bod (obrázek 7.2) (rad)



Obrázek 7.2 Model přenosu tepla v blízkosti kontaktních bodů částic [42]

Pro výpočet θ_0 byla použita rovnice 7.13, v níž vystupuje neznámá n_p , která značí počet kontaktních bodů částice a nabývá hodnot 1,5 pro maximální porozitu lože ($n_{p,1}$) a $\sqrt[4]{3}$ pro minimální porozitu lože ($n_{p,2}$). [42]

$$\sin^2 \theta_{0,i} = \frac{1}{n_{p,i}} \quad (7.12)$$

$$\theta_{0,i} = \arcsin \left(\frac{1}{n_{p,i}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7.13)$$

Nyní lze, pro usnadnění výpočtu, dosadit rovnici 7.12 do rovnice 7.11, z čehož lze získat finální rovnici pro výpočet ϕ_i .

$$\phi_i = \frac{1}{2} \cdot \frac{\left(\frac{\kappa-1}{\kappa}\right)^2 \cdot \frac{1}{n_{p,i}}}{\ln[\kappa - (\kappa-1) \cos \theta_{0,i}] - \frac{\kappa-1}{\kappa} (1 - \cos \theta_{0,i})} - \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{\kappa} \quad (7.14)$$

A nakonec je ještě nutná znalost hodnot tepelných vodivostí pevného materiálu (písku) a tekutiny mezi zrny (vzduchu). Hodnota součinitele tepelné vodivosti vzduchu pro dané teploty byla získána pomocí doplňku CoolProp v MS Excel a pro následný vzorový výpočet je uvedena v tabulce 10. [38]

Pro výpočet součinitele tepelné vodivosti písku v závislosti na teplotě byl získán následující polynom 3. řádu na základě informací uvedených v [44].

$$k_s = -4 \cdot 10^{-9} \cdot t^3 + 4 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 - 0,0025 \cdot t + 2,309 \quad (7.15)$$

7.2.1 Vzorový výpočet efektivní tepelné vodivosti

Vzorový výpočet k_{eff} je níže proveden pro maximální nabití akumulátoru, tedy 400 °C. Konstanty potřebné pro výpočet jsou uvedeny v tabulce 10.

Tabulka 10 Konstanty potřebné pro výpočet k_{eff} [44]

Veličina	Hodnota	Jednotka	Zdroj
ϵ	0,34	(-)	Viz kap. 5.
D_p	0,6325	(mm)	Viz kap. 5.
γ	0,67	(-)	[42]
σ	5,67e-8	(W/m ² K ⁴)	[45]
ϵ_r	0,9	(-)	[46]
ϵ_1	0,476	(-)	[42]
ϵ_2	0,26	(-)	[42]
$n_{p,1}$	1,5	(-)	[42]
$n_{p,2}$	1,316	(-)	[42]
k_g	0,0502	(W/mK)	[38]

Z předchozí kapitoly je tedy zřejmé, že pro výpočet k_{eff} je nutné nejdříve provést výpočet veličin vystupujících v rovnici 7.5. Nejprve je zapotřebí provést výpočet hustoty lože B:

$$B = \frac{1}{0,6325} \cdot \frac{1}{3} \left[\left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{1}{2}} + 1 + \left(\frac{3}{2}\right)^{\frac{1}{2}} \right] \cdot 0,6325$$

$$B = 1,014$$

Následně v rovnici 7.5 vystupují 2 koeficienty přestupu tepla h_{rv} a h_{rs} , jež výpočet vypadá následovně:

$$h_{rv} = \left[4 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} (400 + 273,15)^3 \cdot \frac{0,34}{2 \cdot (1 - 0,34)} \cdot \frac{1 - 0,9}{0,9} \right]$$

$$h_{rv} = 1,98 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$h_{rs} = 4 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} (400 + 273,15)^3 \cdot \left(\frac{0,9}{2 - 0,9} \right)$$

$$h_{rs} = 56,6 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Dále je zapotřebí spočítat hodnotu ϕ , pro jejíž výpočet je ale nutné znát hodnoty ϕ_1 , ϕ_2 , $\theta_{0,1}$, $\theta_{0,2}$ a κ .

$$\theta_{0,1} = \arcsin \left(\frac{1}{1,5} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\theta_{0,1} = 0,9553 \text{ rad}$$

$$\theta_{0,2} = \arcsin \left(\frac{1}{1,316} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\theta_{0,2} = 1,057 \text{ rad}$$

$$\kappa = \frac{k_s}{k_g}$$

$$\kappa = 33,7$$

$$\phi_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\left(\frac{33,7 - 1}{33,7} \right)^2 \cdot \frac{1}{1,5}}{\ln[33,7 - (33,7 - 1) \cos(0,9533)] - \frac{33,7 - 1}{33,7} (1 - \cos(0,9533))} - \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{33,7}$$

$$\phi_1 = 0,1175$$

$$\phi_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\left(\frac{33,7 - 1}{33,7} \right)^2 \cdot \frac{1}{1,316}}{\ln[33,7 - (33,7 - 1) \cos(1,057)] - \frac{33,7 - 1}{33,7} (1 - \cos(1,057))} - \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{33,7}$$

$$\phi_2 = 0,1427$$

Nyní jsou získány veškeré veličiny potřebné pro výpočet ϕ .

$$\phi = 0,1427 + (0,1175 - 0,1427) \frac{0,34 - 0,26}{0,476 - 0,26}$$

$$\phi = \mathbf{0,1333}$$

Pro finální výpočet součinitele efektivní tepelné vodivosti je ještě nutné získat hodnotu součinitele tepelné vodivosti písku:

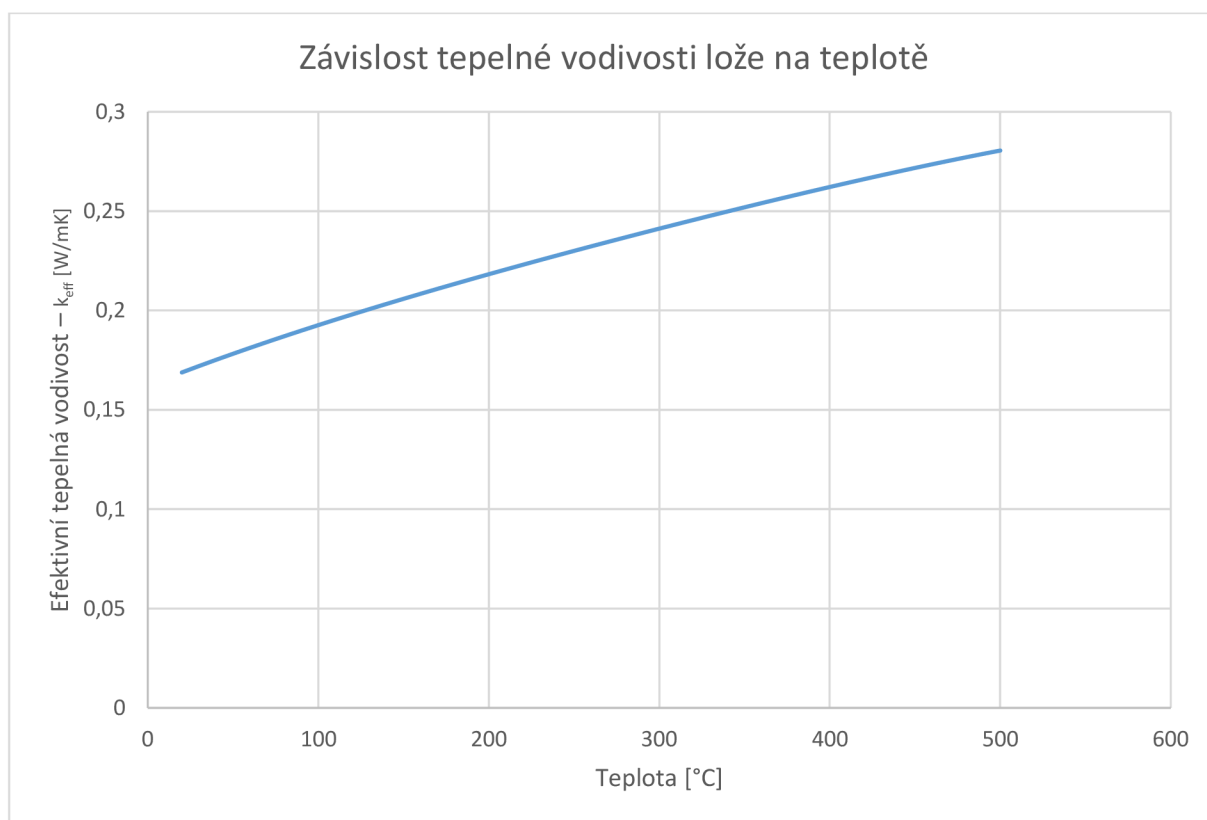
$$k_s = -4 \cdot 10^{-9} \cdot 400^3 + 4 \cdot 10^{-6} \cdot 400^2 - 0,0025 \cdot 400 + 2,309$$

$$k_s = \mathbf{1,693 \text{ W/mK}}$$

A nakonec již nezbývá nic jiného než výpočet součinitele efektivní tepelné vodivosti sypkého lože k_{eff} . Výsledná závislost součinitele je znázorněna grafem na obrázku 7.3.

$$k_{eff} = 0,34 \left[1 + 1,014 \frac{1,98 \cdot 0,6325}{0,05} \right] + \frac{1,014 \cdot (1 - 0,34)}{\frac{1}{0,1333} + \frac{1}{\frac{0,6325 \cdot 56,6}{0,05} + 0,67 \cdot \frac{0,05}{1,693}}}$$

$$k_{eff} = \mathbf{0,262 \text{ W/mK}}$$



Obrázek 7.3 Závislost efektivní tepelné vodivosti lože na teplotě

7.3 Výpočet součinitele přestupu tepla pláště

Další potřebnou veličinou pro následné ověření teplotních stavů je součinitel přestupu tepla z pláště do místnosti (přirozenou konvekcí). Ten lze získat z následující rovnice.

$$h_{plášť} = \frac{Nu_L \cdot k_v}{L_{char}} \quad (7.16)$$

kde je $h_{plášť}$... Součinitel přestupu tepla pláště akumulátoru (W/m²K)
 Nu_L ... Nusseltovo číslo (-)
 k_v ... Součinitel tepelné vodivosti vzduchu (W/mK)
 L_{char} ... Charakteristický rozměr (m)

Z předchozí kapitoly o konstrukčním řešení akumulátoru vyplynul jeho válcovitý tvar. Pro následnou simulaci by tedy bylo zapotřebí provést výpočet součinitelů přestupu tepla pro válcovou plochu a pro vrchní a spodní kruhovou (rovinnou) plochu. Ovšem zde jsou zavedeny určité předpoklady pro následnou simulaci, které jsou dále rozvedeny v kapitole 8. Za těchto předpokladů je nutná znalost pouze součinitele přestupu tepla skrze válcovou plochu.

Při výpočtu přirozené konvekce je potřeba znalost Rayleighova čísla, ze kterého se následně určí číslo Nusseltovo. K jeho výpočtu lze použít následující rovnici 7.17. [47]

$$Ra_L = Gr_L \cdot Pr \quad (7.17)$$

kde je Ra_L ... Rayleighovo číslo (-)
 Gr_L ... Grashofovo číslo (-)
 Pr ... Prandtlovo číslo vzduchu (-)

Z rovnice 7.17 tedy vyplývá, že pro znalost Rayleighova čísla je nutná znalost také čísla Grashofova a Prandtlova. Grashofovo číslo lze získat z rovnice 7.18. Prandtlovo číslo bylo ve výpočtu získáno opět pomocí doplňku CoolProp v MS Excel. [47]

$$Gr_L = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_S - T_\infty) \cdot L^3}{\nu^2} \quad (7.18)$$

kde je g ... Gravitační zrychlení (m/s²)
 β ... Součinitel teplotní objemové roztažnosti (1/K)
 T_S ... Teplota stěny (°C)
 T_∞ ... Teplota okolí (°C)
 L ... Délka (charakteristický rozměr) (m)
 ν ... Kinematická viskozita vzduchu (m²/s)

Následně je nutné, na základě rovnice 7.18 určit několik dalších neznámých. Nejprve tedy součinitel teplotní objemové roztažnosti. Pro ten je zaveden předpoklad ideálního plynu, neboť při takto nízkých teplotách, které se v tomto případě vyskytují, lze vzduch za ideální plyn považovat. [47]

$$\beta = \frac{1}{T_\infty} \quad (7.19)$$

Dalšími neznámými jsou teplota stěny a teplota okolí. Teplota okolí v tomto případě vyjadřuje teplotu v hale laboratoře budovy C3. Ta byla uvažována jako návrhová teplota v hale, která činí 18 °C. Teplota stěny bude dále okomentována ve vzorovém výpočtu. V rovnici se také vyskytuje charakteristický rozměr, tím je výška akumulátoru. A nakonec je ve jmenovateli kinematická viskozita, která je ve vzorovém výpočtu opět získána pomocí doplňku CoolProp.

Nyní jsou k dispozici veškeré rovnice potřebné pro získání hodnoty Rayleighova čísla. Rovnici Nusseltova čísla lze určit až po získání Rayleighova čísla.

7.3.1 Vorový výpočet

V této kapitole je proveden vzorový výpočet součinitele přestupu tepla pláště akumulátoru pro případ roční simulace modelu Basic (kapitola 8.5.1). Výpočet vychází z postupu a rovnic z kapitoly minulé. Veškeré konstanty a vlastnosti materiálů jsou uvedeny v tabulce 11.

Teplota stěny akumulátoru byla pro každý případ simulace získána iteračním postupem, kdy bylo provedeno několik simulací v programu Ansys, na základě kterých, se získala průměrná teplota pláště po dobu dané simulace. Vlastnosti vzduchu, jako je Prandtlovo číslo apod. jsou uvažovány pro teplotu okolí.

Tabulka 11 Konstanty potřebné pro výpočet součinitele přestupu tepla pláště [38]

Veličina	Hodnota	Jednotka
g	9,81	(m/s ²)
T	30	(°C)
T_{∞}	18	(°C)
L	2,5	(m)
ν	1,811e-5	(m ² /s)
Pr_{vzd}	0,7082	(-)
k_{vzd}	0,02572	(W/mK)
D	2	(m)

Nejdříve je pro výpočet Grashofova čísla zapotřebí vypočítat součinitel teplotní objemové roztažnosti.

$$\beta = \frac{1}{(273,15 + 18)}$$

$$\beta = \mathbf{0,003435\ K^{-1}}$$

Nyní jsou dostupné veškeré hodnoty pro výpočet Grashofova čísla.

$$Gr_L = \frac{9,81 \cdot 0,003435 \cdot (30 - 18) \cdot 2,5^3}{(1,811 \cdot 10^{-5})^2}$$

$$Gr_L = \mathbf{1,927 \cdot 10^{10}}$$

Přímá rovnice pro výpočet přirozené konvekce válcové plochy se v dostupných zdrojích nevyskytuje. Ale za podmínky uvedené v rovnici 7.20 lze válcovou plochu považovat za plochu rovinnou. [47]

$$\frac{D}{L} \geq \frac{35}{Gr_L^{\frac{1}{4}}} \quad (7.20)$$

kde je D ...Průměr válcové plochy (m)

Dosazením do této rovnice lze ověřit, zda je možné zavést již zmíněný předpoklad.

$$\frac{2}{2,5} \geq \frac{35}{(1,927 \cdot 10^{10})^{\frac{1}{4}}}$$

$$\mathbf{0,8 \geq 0,094}$$

Z ověření je zřejmé, že předpoklad rovinné stěny pro válcovou stěnu je možné zavést. Následně je zapotřebí určení hodnoty Rayleighova čísla, za pomoci které, je možné volit správnou rovnici pro určení Nusseltova čísla.

$$Ra_L = 1,927 \cdot 10^{10} \cdot 0,7082$$

$$Ra_L = \mathbf{1,365 \cdot 10^{10}}$$

Tato hodnota Rayleighova čísla je v rozmezí možného použití následující rovnice 7.21. [47]

$$Nu_L = 0,1 \cdot Ra_L^{\frac{1}{3}} \quad (7.21)$$

A nyní jsou dostupné veškeré rovnice pro určení Nusseltova čísla a následně i součinitele přestupu tepla pláště akumulátoru.

$$Nu_L = 0,1 \cdot (1,365 \cdot 10^{10})^{\frac{1}{3}}$$

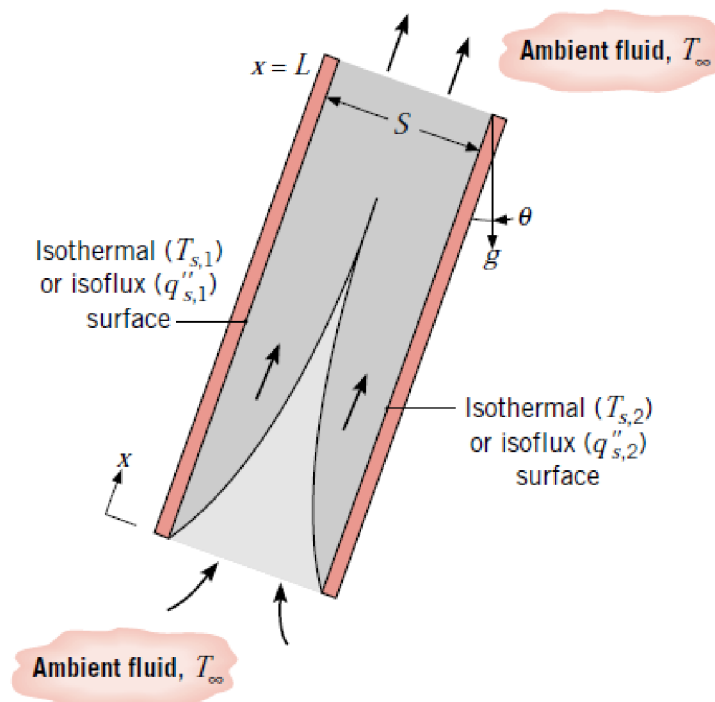
$$Nu_L = \mathbf{238,96}$$

$$h_{plášť} = \frac{238,96 \cdot 0,02572}{2,5}$$

$$h_{plášť} = \mathbf{2,46 \text{ W/m}^2\text{K}}$$

7.4 Výpočet součinitele přestupu tepla membránové stěny

Membránová stěna je v podstatě soubor vertikálně uložených trubek. Avšak pro výpočet Nusseltova čísla tohoto případu se v dostupných zdrojích nevyskytuje žádný vztah. Nusseltovo číslo by tak bylo v tomto případě složité získat přímo, a proto byla provedena aproximace membránové stěny jako dvou vertikálních ploch. (obrázek 7.4).



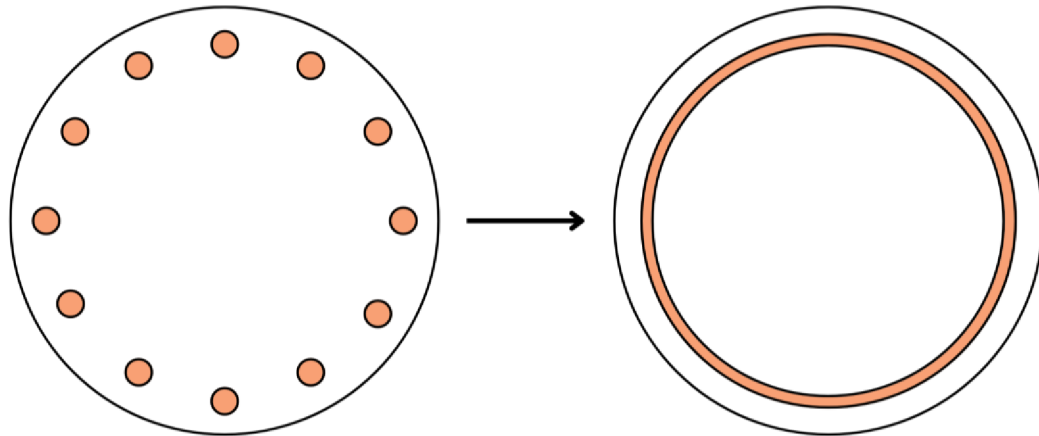
Obrázek 7.4 Proudění přirozenou konvekcí mezi vyhříványými rovnoběžnými deskami [47]

Jelikož se, stejně jako v předchozí kapitole, jedná o přirozenou konvekci je pro výpočet Nusseltova čísla potřebné nejdříve získat hodnotu Rayleighova čísla. Pro případ 2 rovnoběžných desek lze pro výpočet Rayleighova čísla použít rovnici 7.22. [47]

$$Ra_S = \frac{g \cdot \beta (T_S - T_\infty) \cdot S^3}{a \cdot \nu} \quad (7.22)$$

kde je S ... Vzdálenost desek (m)
 a ... Součinitel teplotní vodivosti (difuzivita) (m^2/s)

Součinitel teplotní objemové roztažnosti lze určit opět pomocí rovnice 7.20, za stejného předpokladu vzduchu jako ideálního plynu. Vzdálenost desek představuje pravděpodobně největší slabinu zmíněné aproximace. Neboť, se v rovnici 7.22 vyskytuje se třetí mocninou, bude výsledné Rayleighovo číslo velmi ovlivňovat. Pokud by byla uvažována vzdálenost desek jako průměr otvorů membránové stěny, došlo by k značnému nadhodnocení výsledného součinitele přestupu tepla. Pro přesnější výpočet lze proto použít rovnici 7.23, která říká, že obsah kružnic (otvorů membránové stěny) je roven obsahu mezikruží, které by v aproximaci nahradilo právě tyto kružnice (obrázek 7.5). Tímto způsobem lze dosáhnout přesnějšího a spolehlivějšího výsledku, který lépe odráží skutečnou fyzikální situaci.



Obrázek 7.5 Znárodnění nahrazení membránové stěny

$$N \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot (D_{out}^2 - D_{in}^2)}{4} \quad (7.23)$$

kde je N ... Počet trubek (-)
 d ... Vnitřní průměr trubek (m)
 D_{out} ... Vnější průměr mezikruží (m)
 D_{in} ... Vnitřní průměr mezikruží (m)

Rovnici 7.23 lze upravit tak, aby byla získána rovnice 7.24, která vyjadřuje výpočet vnějšího průměru mezikruží. V této rovnici se také nachází vnitřní průměr mezikruží, jež je nutno vhodně zvolit. Volba bude provedena ve vzorovém výpočtu.

$$D_{out} = \sqrt{N \cdot d^2 + D_{in}^2} \quad (7.24)$$

Následně je možné z rozdílu hodnot vnitřního a vnějšího průměru mezikruží určit, pomocí rovnice 7.25, vzdálenost desek.

$$S = \frac{D_{out} - D_{in}}{2} \quad (7.25)$$

Poslední neznámou v rovnici 7.23 je součinitel teplotní vodivosti (difuzivita), který lze vypočítat z následující rovnice. [47]

$$a = \frac{k_v}{\rho \cdot c_p} \quad (7.26)$$

Pro výpočet Nusseltova čísla byla zvolena rovnice 7.27. [47]

$$Nu_S = \frac{Ra_S \cdot \frac{S}{L}}{24} \quad (7.27)$$

7.4.1 Vzorový výpočet

V této kapitole je uveden vzorový výpočet součinitele přestupu tepla membránové stěny, opět pro případ roční simulace v modelu s membránovou stěnou (kapitola 8.6.1). Všechny konstanty a vlastnosti materiálů naleznete v tabulce 12.

Teplota membránové stěny byla pro každý případ určena iteračním postupem, zahrnujícím několik simulací v programu Ansys. Na základě těchto simulací se dopočítala průměrná teplota membránové stěny po dobu dané simulace. Vlastnosti vzduchu (kinematická viskozita apod.) jsou uvedeny pro aritmetický průměr teploty okolí a teploty membránové stěny, v tomto případě 56,5 °C.

Tabulka 12 Konstanty potřebné pro výpočet součinitele přestupu tepla membránové stěny [38]

Veličina	Hodnota	Jednotka
g	9,81	(m/s ²)
T	33	(°C)
T_{∞}	18	(°C)
N	46	(-)
k_v	0,02628	(W/mK)
ρ	1,182	(kg/m ³)
c_p	1006	(J/kgK)
ν	1,847e-5	(m ² /s)
L	2,5	(m)

První veličinou, kterou je potřeba vypočítat je součinitel objemové roztažnosti.

$$\beta = \frac{1}{(273,15 + 18)}$$

$$\beta = \mathbf{0,003435\ K^{-1}}$$

Následně je nutné provést výpočet vzdálenosti desek, pro níž je zapotřebí nejdříve vypočítat vnější průměr mezikruží. Ovšem v rovnici pro jeho výpočet se vyskytuje také vnitřní průměr mezikruží, jež je potřeba zvolit. Ten byl zvolen 1745 mm iteračním postupem tak, aby střed výsledného mezikruží byl zhruba v ose membránové stěny.

$$D_{out} = \sqrt{46 \cdot 0,05 + 1,745^2}$$

$$D_{out} = \mathbf{1,7776\ m}$$

$$S = \frac{1,7776 - 1,745}{2}$$

$$S = \mathbf{0,0163\ m}$$

Další potřebnou hodnotou, potřebnou pro výpočet Rayleighova čísla, je součinitel teplotní vodivosti.

$$a = \frac{0,02628}{1,182 \cdot 1006}$$

$$a = 2,209 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

Nyní jsou k dispozici hodnoty všech potřebných veličin pro výsledný výpočet Rayleighova čísla.

$$Ra_s = \frac{9,81 \cdot 0,003435 \cdot (33 - 18) \cdot 0,0163^3}{2,209 \cdot 10^{-5} \cdot 1,847 \cdot 10^{-5}}$$

$$Ra_s = 5363,8$$

Za pomoci hodnoty Rayleighova čísla je možné vypočítat číslo Nusseltovo.

$$Nu_s = \frac{5363,8 \cdot \frac{0,0163}{2,5}}{24}$$

$$Nu_s = 1,457$$

A nakonec lze vypočítat hodnotu součinitele přestupu tepla membránové stěny (h_{MS}). Jako charakteristický rozměr byla zvolena vzdálenost desek.

$$h_{MS} = \frac{1,457 \cdot 0,02628}{0,0163}$$

$$h_{MS} = 2,35 \text{ W/m}^2\text{K}$$

8 Ověření teplotních stavů akumulátoru

Po dokončení konstrukčního návrhu a získání všech potřebných veličin bylo provedeno ověření teplotních stavů akumulátoru. Toto ověření se zaměřilo na funkčnost akumulátoru, tedy jeho schopnost akumulace a vybíjení tepla. Pro simulaci byl použit software Ansys. Vzhledem k náročnosti 3D simulace byla provedena simulace pouze pro 2D případ. Přesná geometrie modelu bude detailně popsána v následující kapitole.

Simulace pomůže ověřit, zda akumulátor splňuje požadované tepelné parametry, a zda je schopen dosáhnout požadovaných akumulčních schopností a vybíjení tepla. Výsledky simulace budou analyzovány a diskutovány, s důrazem na identifikaci případných problematických oblastí a návrhy na optimalizaci konstrukce akumulátoru.

Před představením provedených simulací je ovšem také důležité zde uvést, jakým způsobem program Ansys, konkrétně modul „Transient Thermal“, pracuje. Základní energetickou bilanci pokrývá rovnice 8.1, která říká, že součet, respektive rozdíl energie vstupní, výstupní a generované, je roven energii akumulované. Jednotlivé děje (detailnější popis) systému poté pokrývají rovnice 8.2 a 8.3, které vyjadřují přestup tepla vedením a konvekcí. [47] [48]

$$\Delta \dot{E}_{st} = \dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} + \dot{E}_g \quad (8.1)$$

kde je $\Delta \dot{E}_{st}$... Akumulovaná energie v systému (W)
 \dot{E}_{in} ... Energie vstupující do systému (W)
 \dot{E}_{out} ... Energie vystupující ze systému (W)
 \dot{E}_g ... Energie generovaná v systému (W)

$$k \cdot \nabla^2 \cdot T + \dot{q} = \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (8.2)$$

kde je k ... Tepelná vodivost (W/mK)
 ∇ ... Laplaceův operátor (-)
 T ... Teplota (K)
 \dot{q} ... Měrný tepelný tok (W/m³)
 ρ ... Hustota (kg/m³)
 c ... Měrná tepelná kapacita (J/kgK)
 t ... Čas (s)

$$-h \cdot (T - T_{\infty}) = k \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (8.3)$$

kde je h ... Součinitel přestupu tepla (W/m²K)
 T_{∞} ... Teplota okolí (K)

8.1 Geometrie

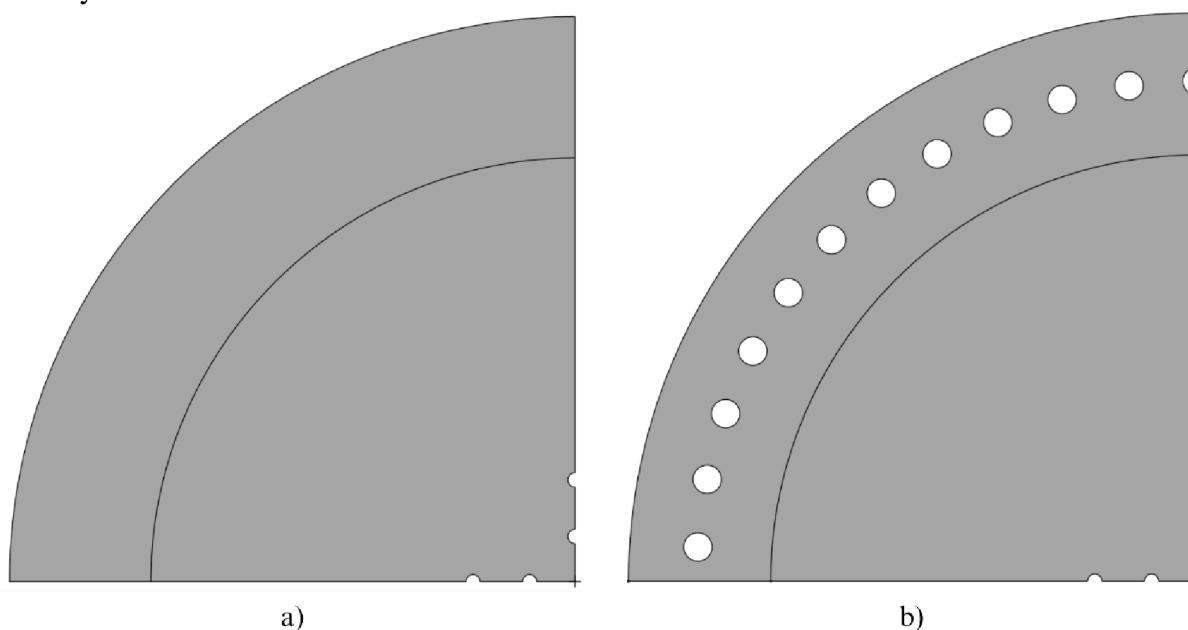
Vzhledem k omezením dostupné techniky byla pro analýzu v programu Ansys zvolena 2D simulace akumulátoru. I když tato volba vnáší do simulace určitou míru nepřesnosti, která bude dále zkoumána, umožňuje použití jemnější sítě a tím i dosažení přesnějších výsledků.

Pro simulaci byl zvolen příčný řez akumulátorem. Využitím symetrie byla z řezu vybrána pouze čtvrtina pro simulaci obou variant konstrukčního řešení (viz obrázek 8.1). Tato volba umožňuje efektivnější využití výpočetních zdrojů a zároveň zachovává relevantní informace o tepelném chování akumulátoru.

Použití 2D simulace a symetrie představuje kompromis mezi přesností a náročností výpočtu. Vzhledem k cílům diplomové práce a dostupným zdrojům je toto řešení považováno za optimální.

Na obrázku 8.1a) je znázorněna geometrie modelu Basic, kde je možné vidět plochu písku, okolo které je izolace. Ve středu modelu jsou vyobrazeny půlkruhy, které představují topné patrony. Obrázek 8.1b) ukazuje model s membránovou stěnou, u kterého jsou hlavním rozdílem trubky umístěné uprostřed izolace.

Model byl dále zjednodušen zanedbáním ocelových stěn akumulátoru. Toto zjednodušení vychází z předpokladu, že ocel má vysokou tepelnou vodivost a její zahrnutí by výsledky simulace významně neovlivnilo. V modelu tedy izolace přímo navazuje na písek a na prostor budovy.



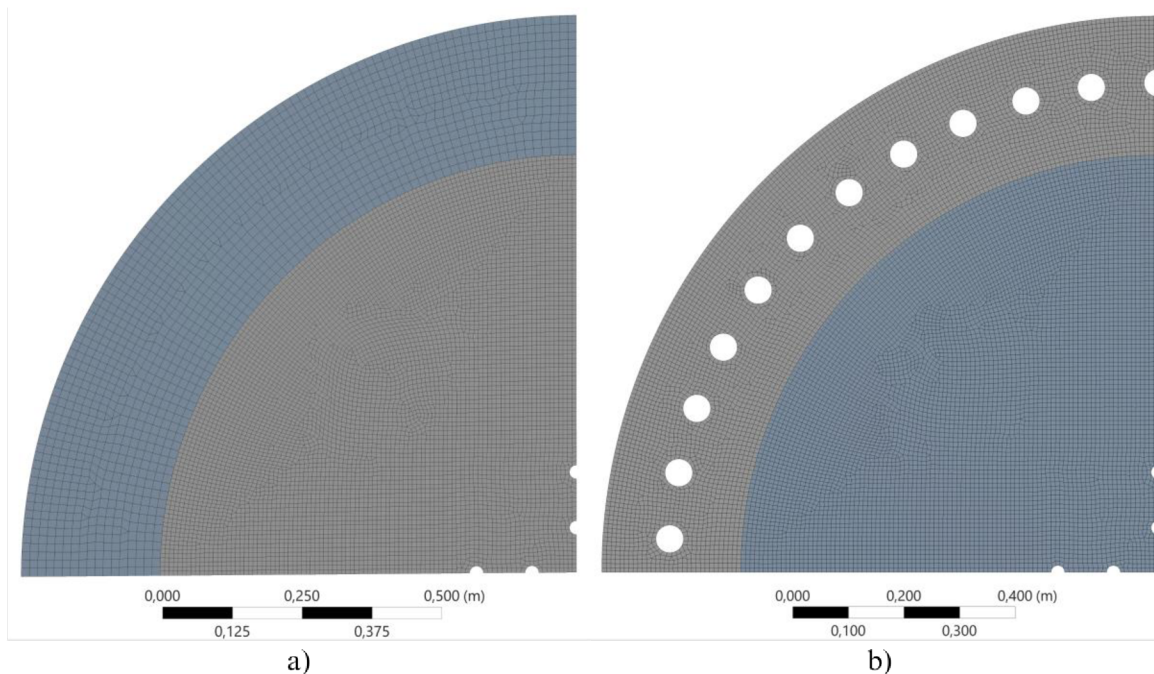
Obrázek 8.1 Geometrie použita v programu Ansys a) model Basic b) model s membránovou stěnou

8.2 Síť

Síť obou modelů akumulátoru byla vygenerována přímo v programu Ansys, přesněji v programu Ansys Mechanical. Pro tvorbu bylo použito nastavení „Program Controlled“, což znamená, že sám program Ansys určil základní konfiguraci při vytváření sítě. Hlavním parametrem, který právě díky tomuto nastavení sám program určil, je tvar jednotlivých prvků sítě. Síť se může skládat buď z troj či čtyřúhelníků. Zmíněné nastavení volí vhodnou kombinaci těchto dvou útvarů pro zajištění optimálního poměru mezi jednoduchostí a přesností výpočtů.

Dále bylo nutné definovat velikosti prvků jednotlivých ploch. K tomu byla použita metoda „Sizing“, kterou program disponuje, pomocí níž jde právě velikost prvků nastavit.

U modelu Basic byla velikost prvků nastavena na 8 mm pro plochu písku a 15 mm pro izolaci (obrázek 8.2a). U modelu s membránovou stěnou byla pro obě plochy zvolena velikost prvků 8 mm (obrázek 8.2b). Takto vytvořená síť sloužila jako základ pro následné simulace a analýzy.



Obrázek 8.2 a) Síť modelu Basic b) Síť modelu s membránovou stěnou

8.3 Materiály

Před simulacemi bylo také nutné definovat vlastnosti materiálů. V použité geometrii se nachází pouze písek a izolace bočních stěn. Byly tedy, pro oba tyto materiály, definovány potřebné materiálové vlastnosti. Pro písek byly použity vlastnosti získané v předchozích kapitolách, a to hustota, součinitel tepelné vodivosti a měrná tepelná kapacita, získaná ze studie [49]. Pro izolaci Fiberfrax Durablanket S byly definovány obdobné vlastnosti, vycházející z dostupného datasheetu. [41]

8.4 Okrajové podmínky

V rámci simulací v programu Ansys pro pískový akumulátor tepla bylo ověřeno několik scénářů s různými okrajovými podmínkami (OP), které budou detailně popsány v příslušných kapitolách. Proces hledání optimálních OP zahrnoval několik iterací. Pro venkovní válcovou plochu a membránovou stěnu byly použity součinitele přestupu tepla vypočtené v předchozí kapitole. Hrany reprezentující symetrii byly nastaveny vždy jako dokonale izolované.

Klíčovým aspektem bylo určení správného tepelného toku do topných patron. V kapitole o konstrukčním návrhu akumulátoru byl zvolen výkon topných patron tak, aby odpovídal výkonu FVE na střeše budovy C3. V prvotních simulacích bylo ověřeno, zda by takto vysoký výkon mohl být využit pro náhřev akumulátoru. Ukázalo se, že tyto výkony jsou příliš vysoké a písek je není schopen efektivně odebírat. Tím docházelo ke značnému přehřívání středu akumulátoru, až k teplotám okolo 4000 °C. Tento přístup byl proto zavrhnut. Po několika iteracích byla zvolena metoda, kdy byla na hranu patron nastavena konstantní teplota 400 °C,

což odpovídá konstrukčnímu návrhu. Program Ansys následně vypočítal průměrný tepelný tok dodávaný do akumulátoru skrze patrony. To se ukázalo jako nejvhodnější nastavení pro dlouhodobější simulace, které budou v následujících kapitolách představeny.

8.5 Analýza teplotních stavů modelu Basic

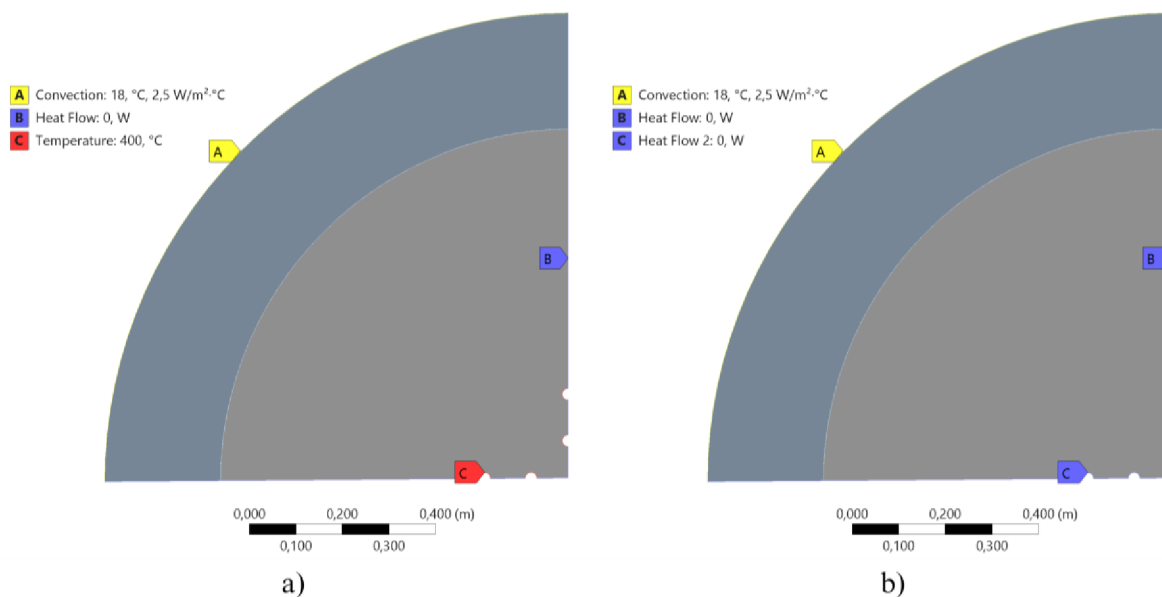
Pro model Basic pískového akumulátoru tepla v programu Ansys byla provedena simulace zahrnující dva scénáře. Prvním z nich je roční průběh teplot a tepelných toků a druhým týdenní cyklus střídání dne a noci (nabíjení a chladnutí). Cílem této kapitoly je ověření těchto scénářů a vyhodnocení jejich vlivu na výkon akumulátoru.

8.5.1 Celoroční cyklus

Nejprve byla provedena roční simulace v programu Ansys, začínající v červnu. Začátek byl zvolen s ohledem na končící topnou sezónu v oblasti města Brno. Simulace zahrnovala vyvážení nabíjení a vybíjení akumulátoru s ohledem na využití energie z FVE a spotřebu budovy C3. Předpokládalo se, že každý měsíc bude z FVE odebráno 1000 kWh pro budovu a zbytek přebytků bude využit k nabíjení akumulátoru. Výjimkou byly měsíce listopad, prosinec a leden, kdy výroba FVE nedosahovala ani 1000 kWh.

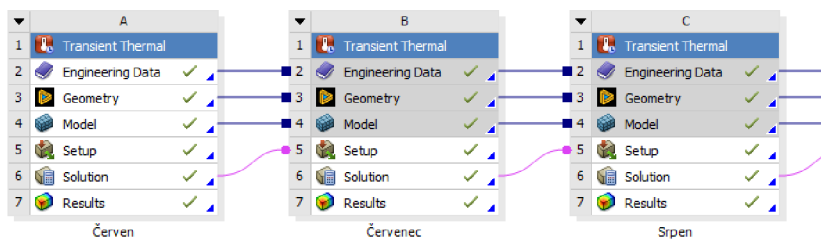
Simulace ukázaly, že s OP 400 °C na topných patronách lze akumulátor nabíjet celý měsíc bez využití veškerých přebytků FVE, s výjimkou února. V únoru byla simulace rozdělena na dvě části – nabíjení a chladnutí – aby nedošlo k překročení dostupných přebytků energie z FVE.

Je nutné si představit použité OP. Ty jsou znázorněny na obrázku 8.3. Konkrétně část obrázku a) ukazuje OP při měsících dobíjení. Kdy na hrany patron je nastavena konstantní teplota 400 °C, na venkovní válcovou plochu je nastavena konvekce, respektive součinitel přestupu tepla 2,5 W/m²K. Hodnota součinitele odpovídá průměrné teplotě povrchu 30 °C, což je nejčastější hodnota vyskytující se v průběhu simulace. Pro jednoduchost byl součinitel zvolen jako konstanta, i když se teplota povrchu v čase samozřejmě mění. Hrany symetrie jsou nastaveny jako dokonale izolované. Na části b) jsou vyobrazeny OP pro měsíce, kdy probíhá chladnutí (resp. vybíjení) akumulátoru. Jediným rozdílem mezi těmito dvěma stavy je OP u topných patron, u kterých zde bylo nastaveno také dokonalé zaizolování, stejně jako u hran symetrie. Počáteční teplota simulace byla zvolena 18 °C.

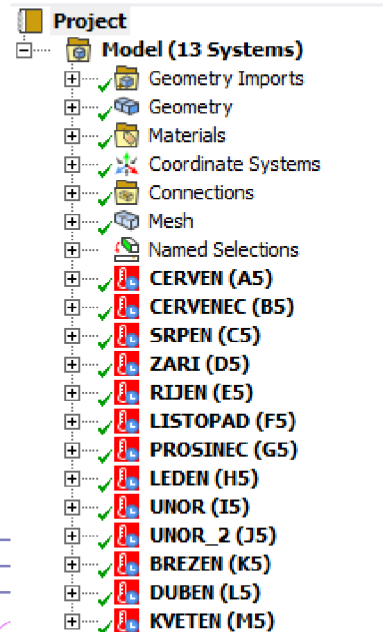


Obrázek 8.3 OP – roční cyklus a) Nabíjení b) Chladnutí

Dále bylo nutné zajistit návaznost jednotlivých měsíců v simulaci. V programu Ansys tohoto lze dosáhnout napojením jednotlivých modulů „Transient Thermal“ na sebe. Pro každý měsíc byl tedy vytvořen zvlášť modul a všechny byly navázány na výsledky předešlého měsíce, jak je znázorněno na obrázku 8.5. Pro jednotlivé měsíce bylo také nutné zvolit časové kroky simulace. Ty se lišily dle délky jednotlivých měsíců. Pro měsíce se sudým počtem dní (30) byl zvolen krok 7500 sekund. Pro liché měsíce (31 dní) byl zvolen krok 7800 sekund a pro únor, který je rozdělen byl pro obě části zvolen krok 3600 sekund. Časové kroky byly voleny s ohledem na dostupnou techniku.



Obrázek 8.5 Napojení modulů v programu Ansys



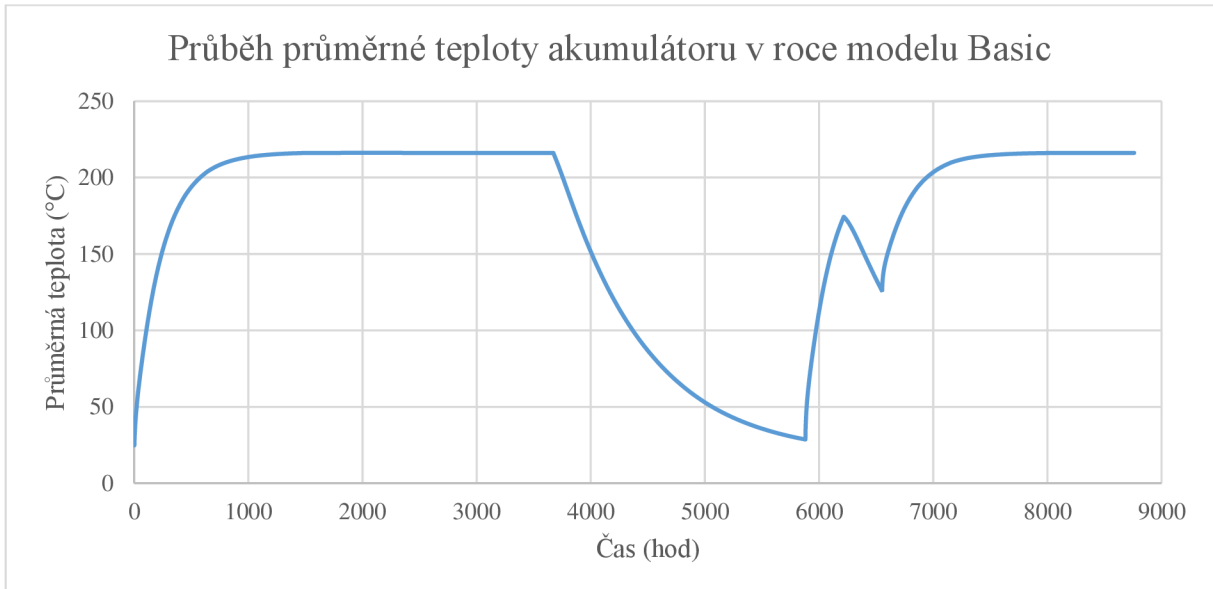
Obrázek 8.4 Moduly v programu Ansys Mechanical

Po tom, co byla provedena výsledná simulace, se získané výsledky zpracovávají v programu MS Excel. V tabulce 13 jsou uvedeny energetické bilance v jednotlivých měsících. Energie dodaná do topných patron odpovídá celkové energii dodané do všech 8 patron v modelu. Energie dodaná do C3 značí celkovou energii, která byla, během daného měsíce, dodána do budovy C3. A disponibilní energie odpovídá zbývající akumulované energii v akumulátoru.

Tabulka 13 Roční průběh energetických stavů modelu Basic

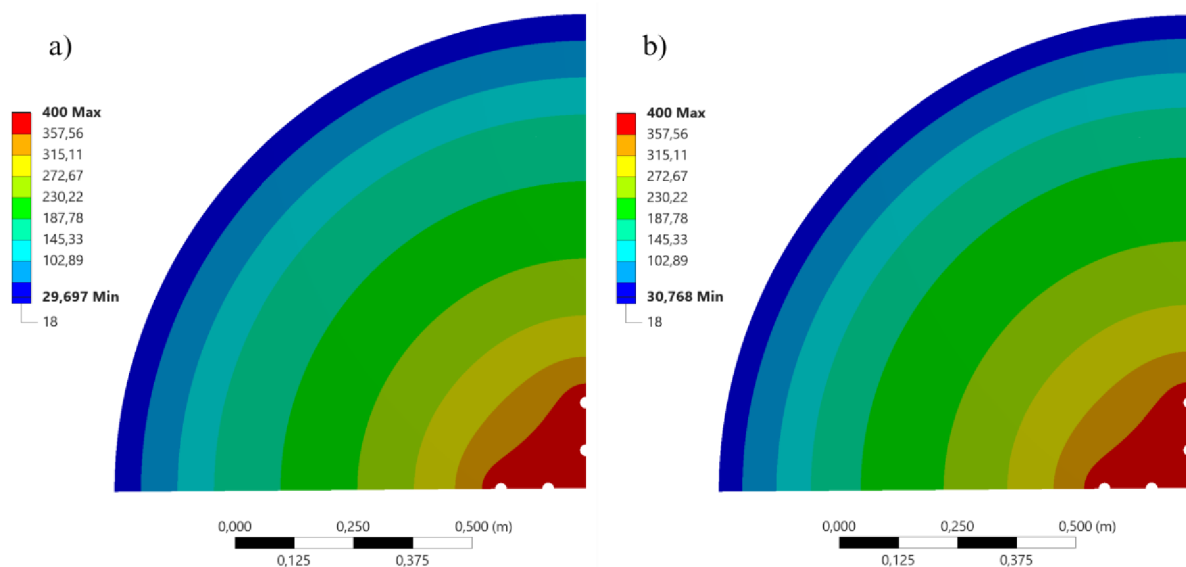
	Energie dodaná do topných patron (kWh)	Energie dodaná do C3 (kWh)	Disponibilní energie akumulátoru (kWh)
Červen	354,4	112,9	241,5
Červenec	213,6	202,9	252,2
Srpen	209,1	209,0	252,3
Září	202,3	202,4	252,3
Říjen	209,1	209,1	252,3
Listopad	0	144,5	100,5
Prosinec	0	53,22	36,70
Leden	0	18,68	13,46
Únor – nabíjení	217,3	29,67	201,1
Únor – chlazení	0	63,99	136,4
Březen	278,2	166,5	248,0
Duben	204,1	199,9	252,2
Květen	209,1	209,0	252,3

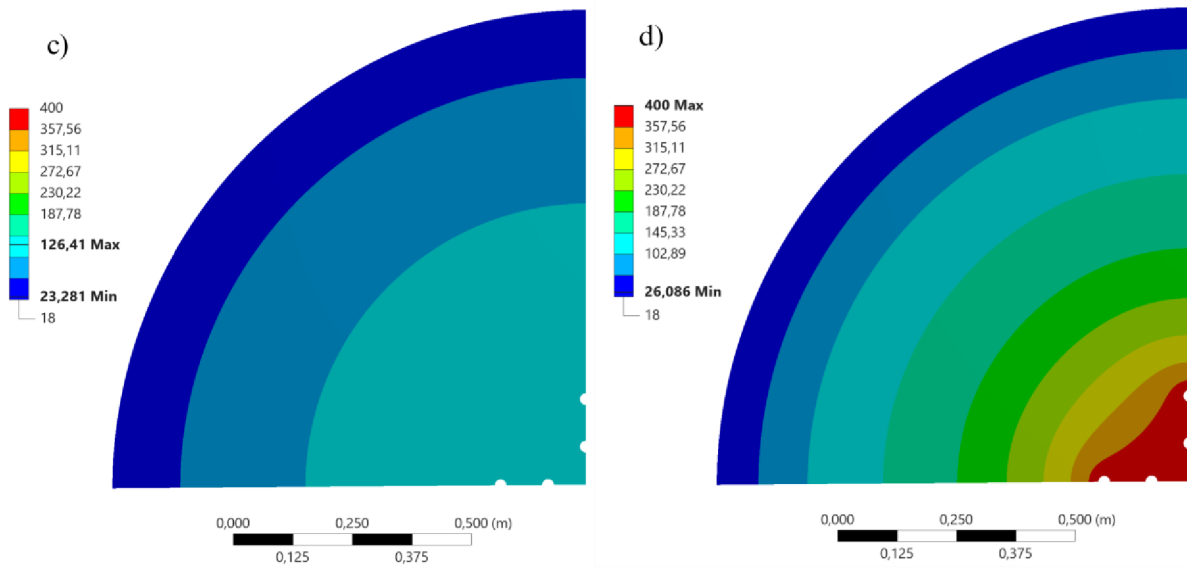
Na obrázku 8.6 je znázorněn průběh průměrné teploty v akumulátoru v roce, jež byla také získána ze simulace. Z obrázku je patrné, že teplota se při zmíněných OP, po velmi krátkém časovém období, ustálí na hodnotě cca 216 °C. Takto ustálená teplota se udrží až do zimních měsíců, kdy začíná klesat.



Obrázek 8.6 Grafické znázornění průběhu průměrné teploty akumulátoru v roce modelu Basic

V reálném scénáři by roční simulace musela zohlednit střídání dne a noci, kdy by se akumulátor nabíjel pouze přes den díky energii z FVE. Toto střídání by významně ovlivnilo dobu nárůstu, která je znázorněna na obrázku 8.6. Zahrnutí tohoto faktoru by však výrazně zvýšilo výpočetní náročnost simulace. Pro účely tohoto druhu simulace je to ale dostačující, neboť jejím hlavním cílem bylo získat energetické toky, které by zhruba reálnému případu odpovídaly. Obrázek 8.7 slouží pouze pro ukázkou vybraných teplotních polí v akumulátoru během roku. Z něj je patrné, že se v průběhu roku teplotní pole, při zmíněných OP, příliš nemění, pouze v měsících, kdy není dostatek energie z FVE, což znázorňuje část obrázku c).



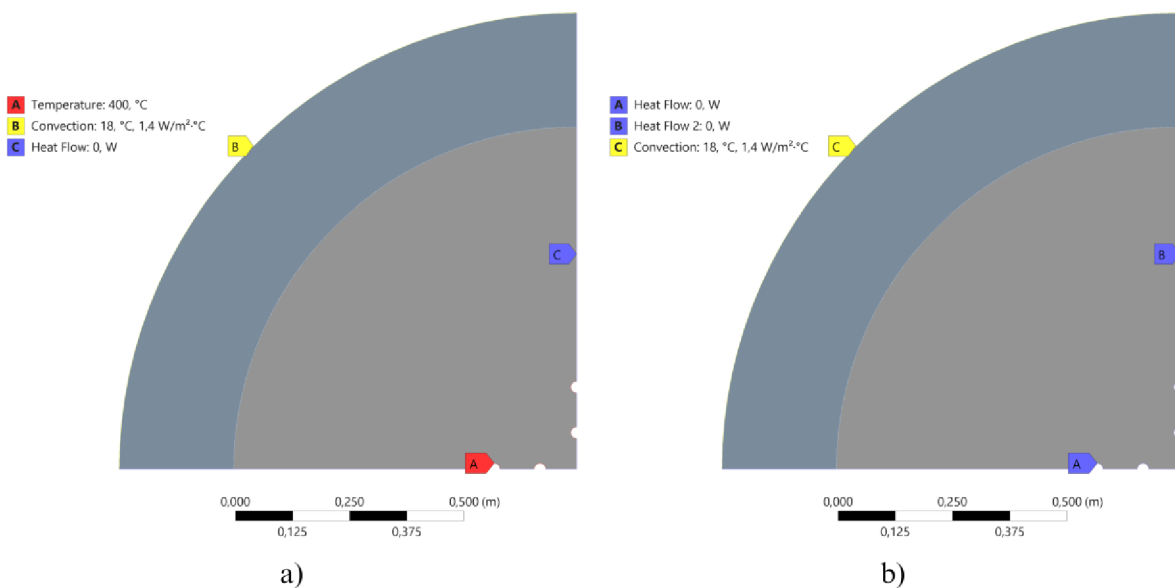


Obrázek 8.7 Teplotní pole v průběhu celoroční simulace modelu Basic a) Červen b) Říjen
c) Listopad d) První polovina února

8.5.2 Týdenní cyklus – den/noc

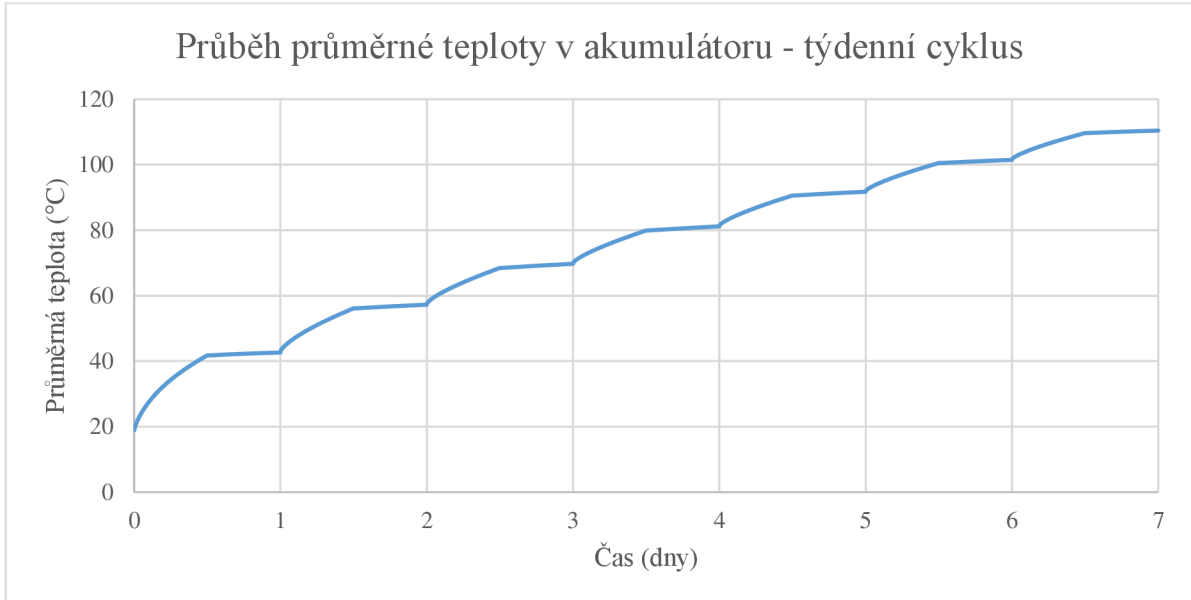
Pro realistické znázornění náhřevu akumulátoru byla provedena týdenní simulace střídání dne a noci. Za předpokladu velmi slunných dnů s 12hodinovým provozem FVE tato simulace lépe odráží skutečnou dobu potřebnou k dosažení požadované teploty akumulátoru.

OP pro den a noc jsou zobrazeny na obrázku 8.8. Během dne byla na patроны nastavena konstantní teplota 400 °C, součinitel přestupu tepla na venkovním okraji byl upraven na 1,4 W/m²K pro nižší teplotu povrchu a hrany symetrie zůstaly dokonale izolované. V noci byly pouze patроны nastaveny jako dokonale izolované. Časové úseky na sebe byly navázány obdobně jako v předchozí simulaci. Časový krok byl zvolen 120 sekund, s ohledem na dostupnou techniku.

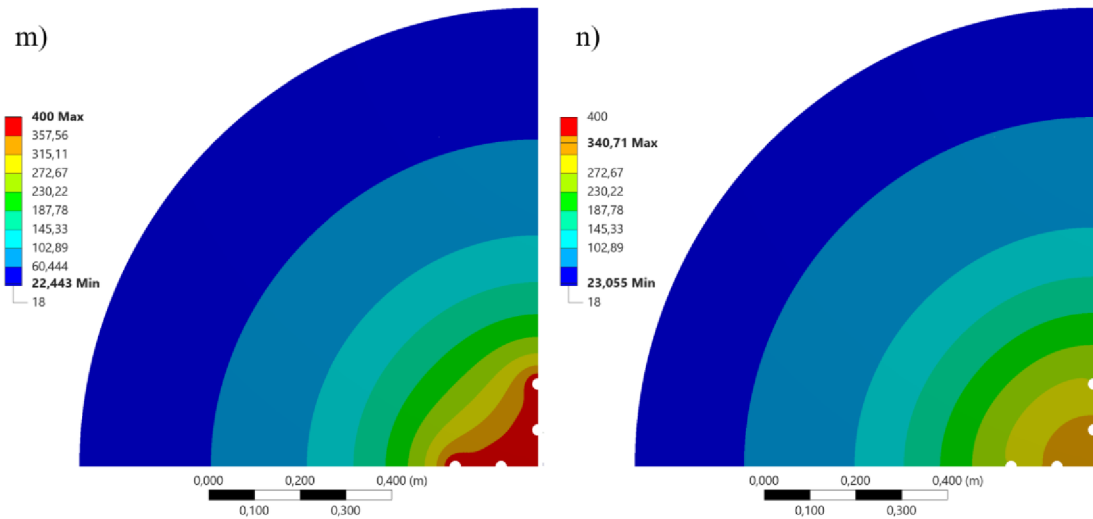


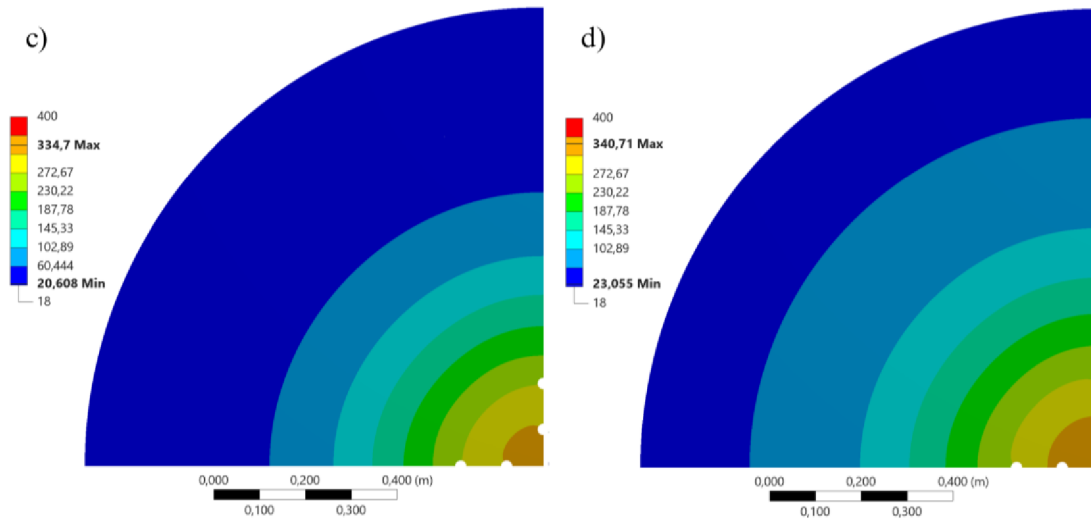
Obrázek 8.8 OP – týdenní cyklus a) Den b) Noc

Obrázek 8.9 ukazuje vývoj průměrné teploty v akumulátoru během týdenní simulace. Z tohoto průběhu je patrné, že náhřev akumulátoru z celoroční simulace by neodpovídal reálnému ději a probíhal by značně pomaleji. Na obrázku 8.10 jsou poté znázorněna teplotní pole uvnitř akumulátoru v průběhu simulace.



Obrázek 8.9 Grafické znázornění týdenního průběhu průměrné teploty akumulátoru modelu Basic





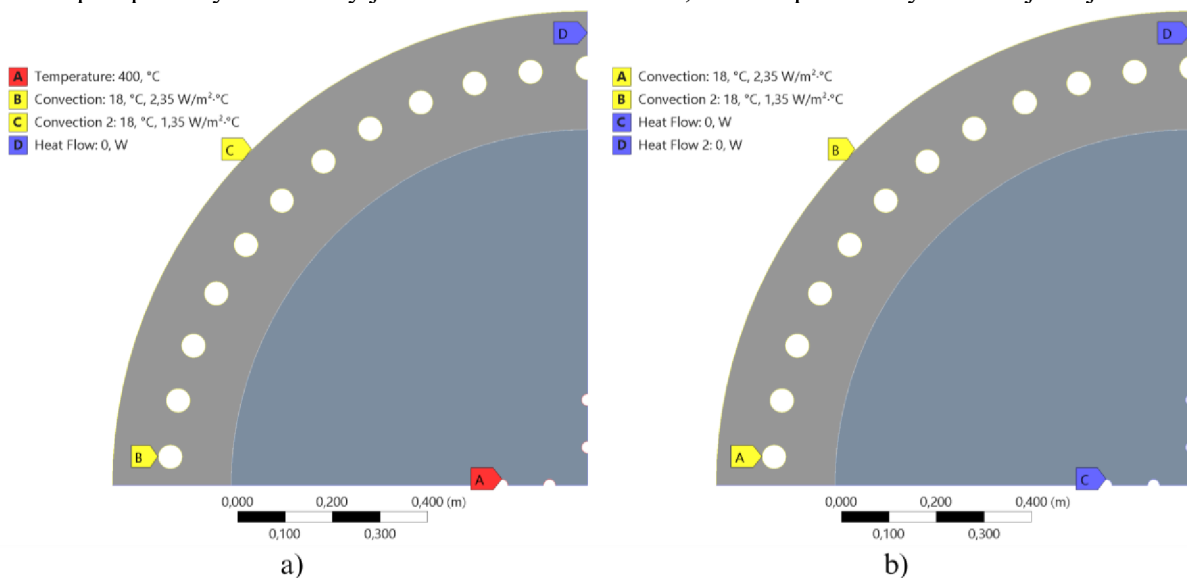
Obrázek 8.10 Teplotní pole týdenní simulace a) Po 12 hodinách b) Na konci 3. dne c) Na konci 5. noci d) Na konci 7. noci

8.6 Analýza teplotních stavů modelu s membránovou stěnou

U modelu s membránovou stěnou byly provedeny stejné simulace jako u modelu Basic, s tím rozdílem, že v použité geometrii jsou zahrnuty otvory v izolaci reprezentující membránovou stěnu. V reálném případě by tuto stěnu bylo možné, dle potřeby otevírat a zavírat, avšak pro zjednodušení simulace a výpočtů byl ověřen pouze scénář s plně otevřenou stěnou. A to z toho důvodu, aby bylo možné ilustrovat rozdíl v energetických tocích.

8.6.1 Celoroční cyklus

Celoroční simulace modelu s membránovou stěnou vychází ze stejného scénáře jako u modelu Basic, s obdobnými OP, které jsou zobrazeny na obrázku 8.11. V části a) pro měsíce s nabíjením je na patrony nastavena konstantní teplota 400 °C, hrany symetrie jsou dokonale izolované a na membránovou stěnu a venkovní hranu je aplikována konvekce se součiniteli přestupu tepla 2,35 W/m²K a 1,35 W/m²K. V části b) pro zimní měsíce bez dodávky energie jsou topné patrony nastaveny jako dokonale izolované, ostatní podmínky zůstávají stejné.



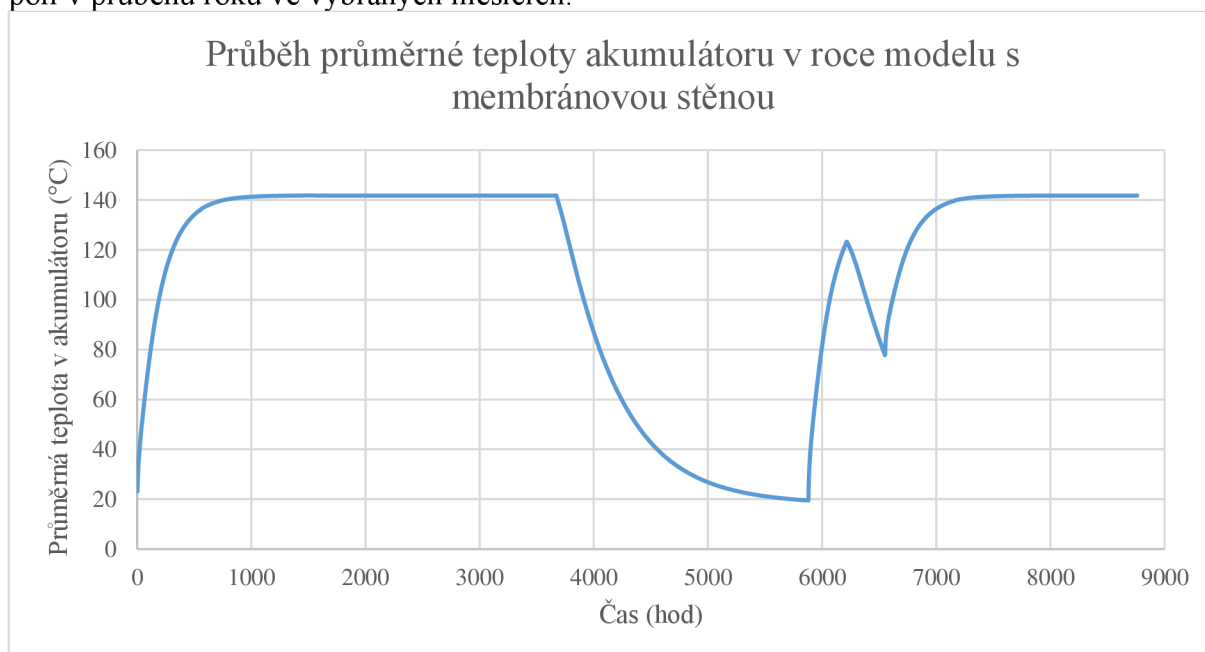
Obrázek 8.11 OP (membránová stěna) – roční cyklus a) Nabíjení b) Chladnutí

Z výsledné simulace byly opět výsledky zpracovány v programu MS Excel. V tabulce 14 jsou uvedeny energetické bilance v průběhu roku, stejně jako u modelu Basic.

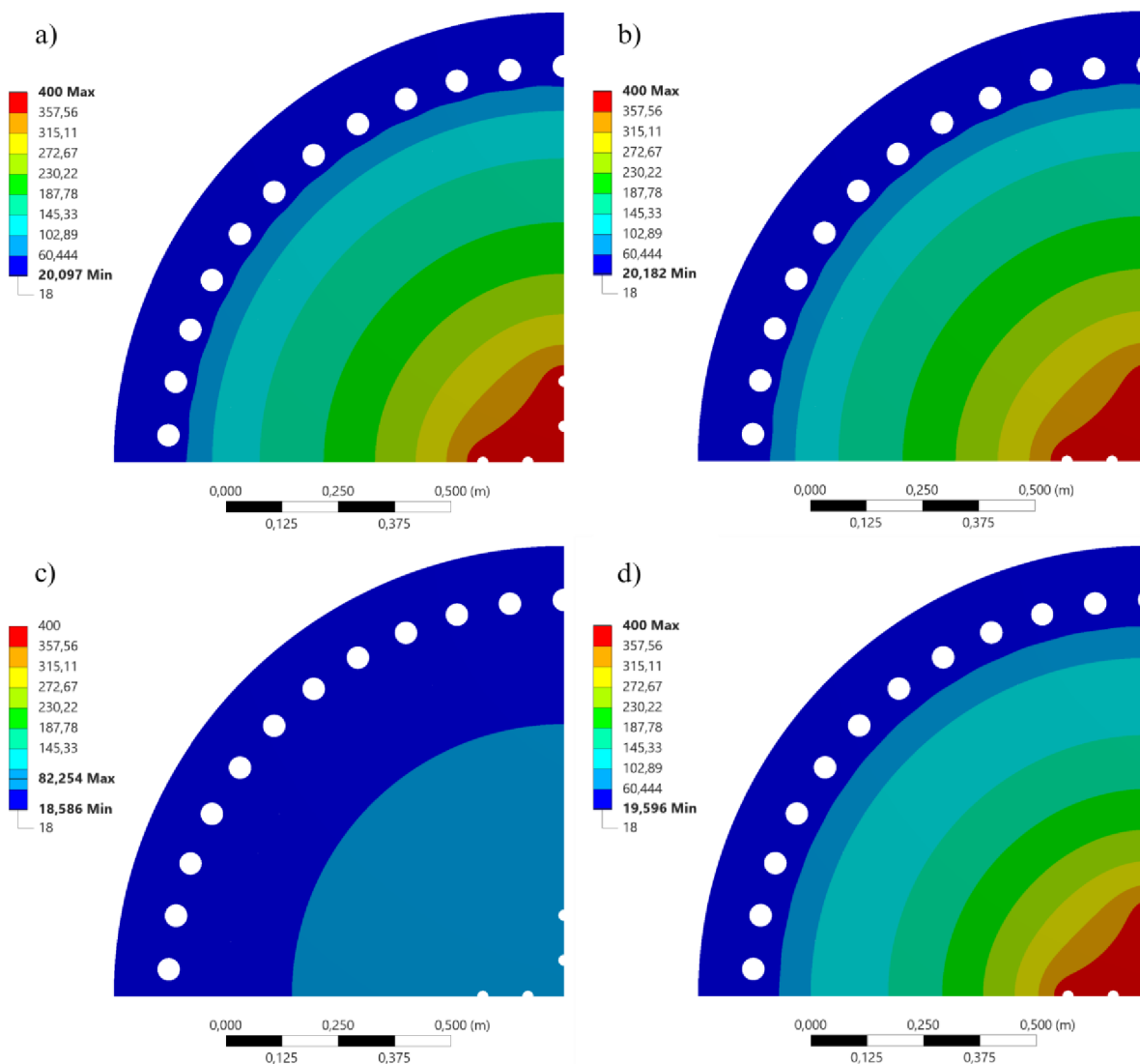
Tabulka 14 Roční průběh energetických stavů modelu s membránovou stěnou

	Energie dodaná do topných patron (kWh)	Energie dodaná do C3 (kWh)	Disponibilní energie akumulátoru (kWh)
Červen	358,6	158,3	200,3
Červenec	259,7	255,5	204,4
Srpen	266,8	258,2	213,0
Září	249,9	249,9	213,0
Říjen	245,9	245,9	213,0
Listopad	0	154,5	52,48
Prosinec	0	34,64	11,37
Leden	0	7,415	2,54
Únor – nabíjení	222,8	41,77	183,58
Únor – chladnutí	0	82,96	100,96
Březen	319,7	209,1	211,5
Duben	250,3	248,8	213,0
Květen	258,2	258,2	213,0

Opět byl ze simulace získán také průběh průměrné teploty akumulátoru v roce (obrázek 8.12). Na něm je možné vidět, že průběh se tvarem velmi podobá modelu Basic. Ovšem v tomto případě teplota nedosáhne tak vysoké hodnoty a ustálí se již na hodnotě zhruba 142 °C. To značí, že membránová stěna působí velmi kladně na odběr tepla z akumulátoru do místností, což se projevuje také v energetických bilancích. Obrázek 8.13 opět znázorňuje vývoj teplotních polí v průběhu roku ve vybraných měsících.



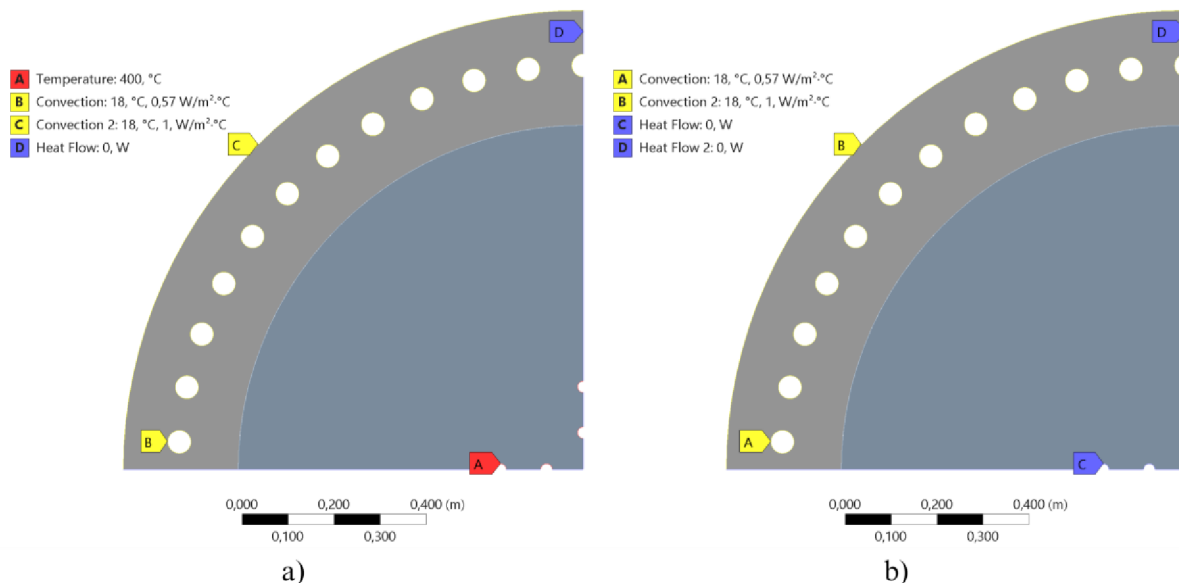
Obrázek 8.12 Grafické znázornění průběhu průměrné teploty akumulátoru v roce modelu s membránovou stěnou



Obrázek 8.13 Teplotní plole v průběhu celoroční simulace modelu s membránovou stěnou a) Červen b) Říjen c) Listopad d) První polovina února

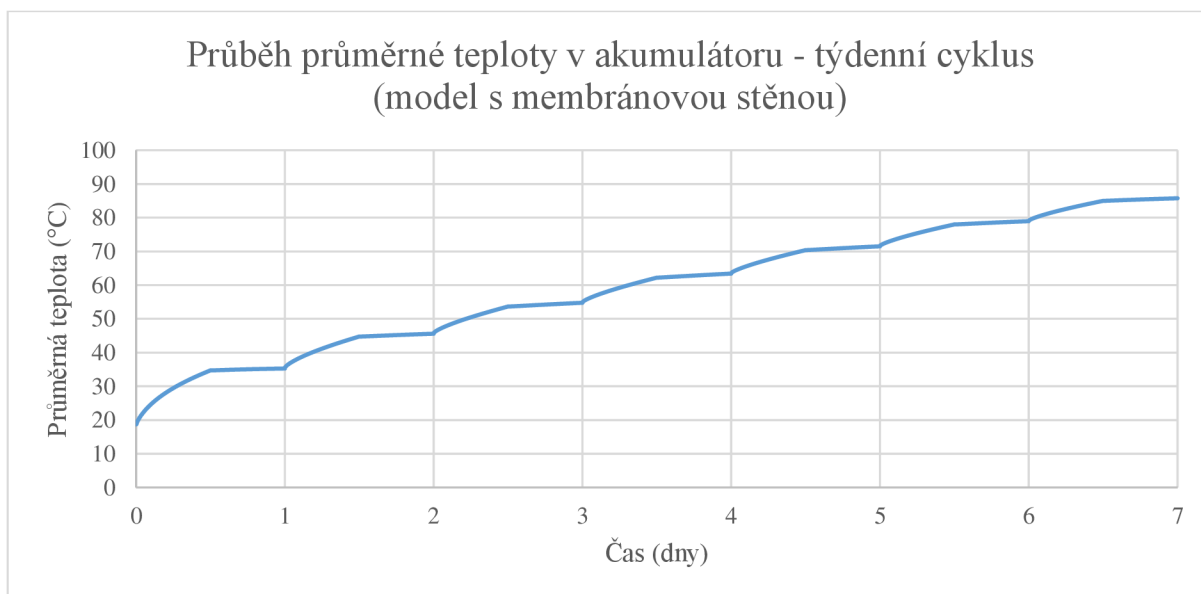
8.6.2 Týdenní cyklus – den/noc

Týdenní simulace modelu s membránovou stěnou byla provedena opět obdobně jako u modelu Basic. S využitím stejných OP jako v celoroční simulaci, avšak s upravenými hodnotami součinitelů přestupu tepla pro lepší shodu s teplotami v akumulátoru. Obrázek 8.14 zobrazuje tyto podmínky, kde pro den byla použita konstantní teplota topných patron 400 °C a konvekce s hodnotami 0,57 W/m²K pro membránovou stěnu a 1 W/m²K pro venkovní stěnu. V noční simulaci byly patrony nastaveny jako dokonale izolované.

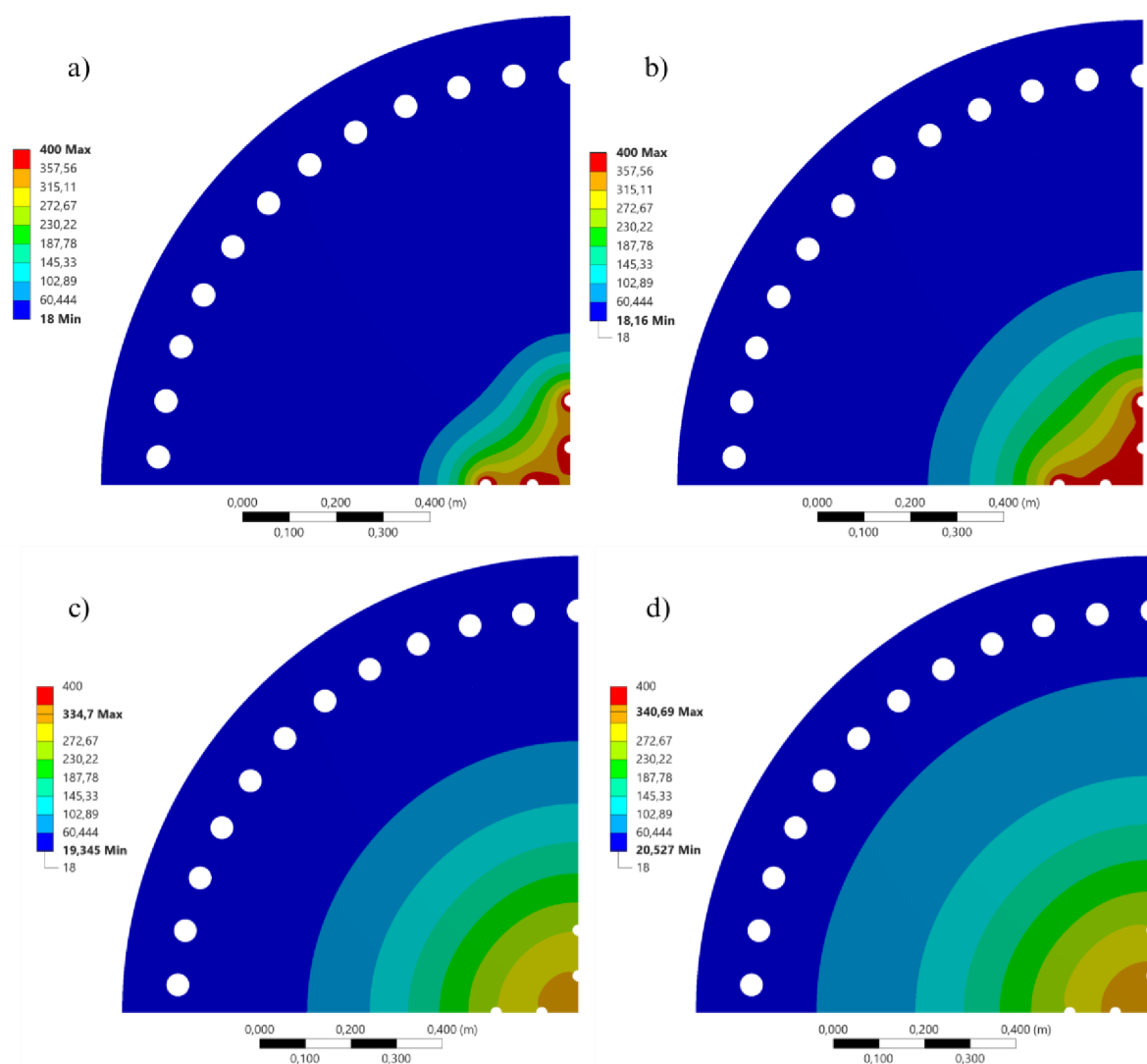


Obrázek 8.14 OP (membránová stěna) – týdenní cyklus a) Den b) Noc

Ze simulace byly získány průměrné teploty v čase a následně vyneseny do grafu na obrázku 8.15. Stejně jako u roční simulace modelu s membránovou stěnou, teploty nedosahují takových hodnot jako u modelu Basic, což je opět způsobeno přidáním membránové stěny. Obrázek 8.16 ilustruje teplotní pole v průběhu simulace.



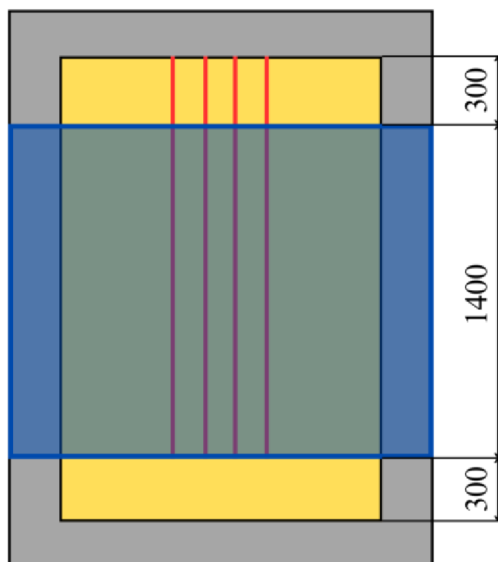
Obrázek 8.15 Grafické znázornění týdenního průběhu průměrné teploty akumulátoru modelu s membránovou stěnou



Obrázek 8.16 Teplotní pole týdenní simulace a) Po 12 hodinách b) Na konci 3. dne c) Na konci 5. noci d) Na konci 7. noci

8.7 Možné limity a nedostatky simulací

Hlavním omezením simulace je její provedení ve 2D, což může ovlivnit přesnost vypočtených energetických bilancí ve srovnání s reálným 3D případem. Obrázek 8.17 znázorňuje oblast simulace (modře), která zahrnuje pouze úsek o výšce 1,4 metru odpovídající délce, po kterou topné patrony vytápí. Přestože se dá předpokládat, že průměrná teplota ve 3D modelu by byla nižší, větší objem by mohl kompenzovat tento rozdíl a vést k podobným energetickým bilancím.



Obrázek 8.17 Oblast akumulátoru, pro kterou odpovídají provedené simulace (modře)

Další potenciální zdroj nepřesnosti představuje zvolený velký časový krok. Nicméně, simulace s desetinásobně nižším časovým krokem ukázaly téměř totožné výsledky. Vliv by mohla mít také zvolená síť, která by ideálně měla být jemnější v blízkosti topných patron a membránové stěny. To by však mohlo ovlivnit výpočet průměrné teploty akumulátoru, která je klíčová pro stanovení disponibilní energie.

OP 400 °C u topných patron je sice reálně dosažitelná, nicméně v simulaci způsobuje v počáteční fázi náhřevu vysoké tepelné toky na hranách patron. Tyto toky by pravděpodobně překročily i maximální výkon FVE 20 kWp. Pro přesnější simulaci reálného provozu by bylo vhodné implementovat regulátor (např. PID), který by řídil náběh výkonu. Tento problém se však vyskytuje pouze v úvodní fázi náhřevu, poté se tepelný tok stabilizuje.

9 Technicko-ekonomické zhodnocení provozu akumulátoru

Posledním cílem této diplomové práce je provést technicko-ekonomické zhodnocení navržených konstrukčních řešení pískového akumulátoru tepla. Zhodnocení bylo provedeno pro obě varianty samostatně, s ohledem na jejich pasivní charakter, který znemožňuje použití typických ekonomických ukazatelů. Pro obě provedení bylo provedeno nacenění jednotlivých komponent, porovnání dodané energie z předchozí kapitoly s tepelnými ztrátami objektu (tabulka 15) a následné srovnání s alternativními zdroji energie. Cílem bylo určit potenciální úspory, které by akumulátor přinesl oproti jiným zdrojům vytápění, a vypočítat dobu návratnosti investice.

9.1 Model Basic

Model Basic zahrnuje písek, ocelové části, izolaci a topné patrony. Nacenění těchto komponent bylo provedeno přímo u vybraných dodavatelů kapitoly o konstrukčních provedeních. Celková cena modelu Basic bez DPH činí 384 890 Kč (tabulka 16). Při porovnání s vytápěním elektrokotlem (elektro ohřevem) a cenou elektřiny 6,32 Kč/kWh (bez DPH) (rok 2024) by akumulátor ročně ušetřil 11 514 Kč, což vede k době návratnosti 33 let.

Tabulka 15 Nacenění modelu Basic

Název součásti	Cena (Kč bez DPH)	Zdroj
Písek	20000	[36]
Ocel	320642	[50]
Izolace	21000	[51]
Topné patrony	23248	[52]
Celkem	384890	

9.2 Model s membránovou stěnou

Model s membránovou stěnou pískového akumulátoru tepla zahrnuje písek, ocelové části, izolaci, topné patrony a mechanismus pro ovládání membránové stěny. Nacenění komponent bylo provedeno u vybraných dodavatelů, s výjimkou pohonu, kde byla cena odhadnuta. Celková cena modelu bez DPH činí 536 466 Kč (tabulka 17). Při porovnání s vytápěním elektrokotlem (elektro ohřevem) a cenou elektřiny 6,32 Kč/kWh (bez DPH) (rok 2024) by akumulátor ročně ušetřil 13 937 Kč, což vede k době návratnosti 38,5 let.

Tabulka 16 Nacenění modelu s membránovou stěnou

Název součásti	Cena (Kč bez DPH)	Zdroje
Písek	20000	[36]
Ocel	422218	[50]
Izolace	21000	[51]
Topné patrony	23248	[52]
Mechanismus (pohon + převod)	50000	
Celkem	536466	

9.3 Porovnání tepelných ztrát objektu s energií dodanou akumulátorem

Porovnání energií dodaných akumulátorem do budovy C3 se ztrátami této budovy ukazují, že akumulátor je na danou aplikaci příliš malý. Toto naznačila již kapitola 7.1 ohledně maximální možné kapacity akumulátoru, která činí 697,3 kWh. A ani v letních měsících, kdy jsou tepelné ztráty objektu nejmenší, akumulátor nestačí dodávat potřebnou energii do budovy.

Tabulka 17 Porovnání tepelných ztrát objektu s dodanou energií do C3 jednotlivými modely

Měsíc	Tepelná ztráta (kWh)	Dodaná energie do C3 (Basic) (kWh)	Dodaná energie do C3 (model s membránovou stěnou) (kWh)
Leden	15577	18,68	7,415
Únor	13149	93,65	124,7
Březen	11771	166,5	209,1
Duben	7839	199,9	248,8
Květen	4634	209,0	258,2
Červen	2643	112,9	158,3
Červenec	1304	202,9	255,5
Srpen	1644	209,0	258,2
Září	4682	202,4	249,9
Říjen	8305	209,1	245,9
Listopad	11589	144,5	154,5
Prosinec	14830	53,22	34,64

10 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo prozkoumat a zhodnotit potenciál pasivně vybíjeného pískového akumulátoru tepla jako inovativní a udržitelné řešení pro ukládání tepelné energie. Práce se zaměřila na návrh, tepelné výpočty a technicko-ekonomické zhodnocení dvou konceptů akumulátoru pro konkrétní objekt – výrobní halu budovy C3 FSI VUT v Brně.

První část práce byla věnována rešerši na téma akumulace tepelné energie v sypkých materiálech. Byly představeny základní principy akumulace energie, různé materiály vhodné pro tuto technologii, konstrukční typy akumulátorů a příklady realizovaných projektů. Rešerše ukázala, že akumulace tepla v sypkých materiálech představuje slibnou alternativu k tradičním technologiím a má potenciál stát se konkurenceschopným řešením v oblasti ukládání tepelné energie.

Následně byly navrženy dva koncepty pasivně vybíjeného pískového akumulátoru tepla. První koncept představoval jednoduchou izolovanou válcovou nádobu naplněnou pískem, zatímco druhý koncept zahrnoval navíc membránovou stěnu pro regulaci výkonu dodávaného do budovy. Oba koncepty byly navrženy s ohledem na specifické požadavky a omezení dané objektem.

Pro získání potřebných dat pro následné výpočty a simulace byly provedeny experimenty se zakoupeným pískem. Byla změřena velikost zrn písku, která se pohybovala v rozmezí 0,14 až 1,53 mm, což se částečně lišilo od údajů dodavatele (0,5 až 1 mm). Z experimentu také vyplynul ekvivalentní průměr zrn 0,63 mm, který se opět mírně lišil oproti údajů dodavatele (0,76 mm). Tyto experimentální hodnoty byly následně využity pro výpočet efektivní tepelné vodivosti písku, která je dalším důležitým parametrem pro simulaci. Dále byla experimentálně stanovena hustota písku, která odpovídala hodnotě zrn obklopených vzduchovými kapsami (1617 kg/m^3), což je klíčový parametr pro přesné modelování teplotního chování akumulátoru.

Na základě konceptů byly vytvořeny detailní konstrukční návrhy obou akumulátorů v programu Autodesk Inventor. Tyto návrhy zahrnovaly všechny důležité komponenty, jako jsou ocelové pláště, izolace, topné patrony a v případě druhého konceptu i mechanismus pro ovládání membránové stěny a samotnou membránovou stěnu. Konstrukce byly navrženy s ohledem na teplotní roztažnost materiálů a zohledňovaly reálné podmínky instalace v budově C3. Přestože nebyly provedeny pevnostní výpočty, použité konstrukční prvky a uložení by měly být dostatečně robustní i pro reálné použití.

Pro ověření teplotních stavů akumulátoru byly nejdříve vypočteny klíčové tepelně-fyzikální vlastnosti písku, jako je efektivní tepelná vodivost v závislosti na teplotě. Dále byly stanoveny součinitele přestupu tepla pro venkovní stěnu a membránovou stěnu, které se lišily pro jednotlivé simulace v závislosti na konkrétních podmínkách. Byla také určena maximální tepelná kapacita akumulátoru, která při maximálním možném nahřátí na $400 \text{ }^\circ\text{C}$ (což ovšem není proveditelné) činí $697,3 \text{ kWh}$.

Samotné simulace teplotních stavů akumulátoru byly provedeny v programu Ansys s využitím modulu "Thermal Transient". Pro oba modely byly provedeny dva typy simulací. Prvním je celoroční simulace průběhu teplot a tepelných toků a druhým je týdenní simulace střídání dne a noci. Celoroční simulace poskytla informace o celkové energetické bilanci akumulátoru a jeho schopnosti pokrýt tepelné ztráty budovy v průběhu roku. Týdenní simulace naopak umožnila detailnější pohled na dynamiku náhřevu a vybíjení akumulátoru v reálných podmínkách s ohledem na střídání dne a noci.

Výsledky simulací ukázaly, že navržené akumulátory mají potenciál pro ukládání tepelné energie, ale jejich kapacita je pro pokrytí tepelných ztrát budovy C3 nedostatečná. Tuto skutečnost naznačil již výpočet maximální možné akumulované energie. To je způsobeno především omezením maximálních rozměrů akumulátoru, které jsou dány prostorem pro jeho

umístění v budově. Přesto simulace poskytly cenné informace o teplotním chování akumulátoru a umožnily provést technicko-ekonomické zhodnocení navržených řešení.

V rámci konstrukčního návrhu pískového akumulátoru tepla byla zvolena tloušťka izolace 250 mm. Simulace ukázaly, že výsledná teplota na povrchu akumulátoru dosahuje maximálně 30 až 35 °C. Pro účely vytápění by bylo možné uvažovat o snížení tloušťky izolace, což by vedlo ke zvýšení povrchové teploty. Nicméně, tenčí izolace by zároveň urychlila vybíjení akumulátoru. Simulace naznačují, že již při stávající tloušťce izolace je akumulátor schopen efektivně dodávat teplo pouze po dobu jednoho měsíce (listopad). Snížení tloušťky by tedy pravděpodobně vedlo k příliš rychlému vybití akumulátoru. Na základě těchto zjištění lze konstatovat, že zvolená tloušťka izolace 250 mm je pro dané konstrukční řešení a zamýšlenou aplikaci vhodná. V souvislosti s konstrukčním návrhem byl také zvolen počet topných patron, jež činil 8 topných patron. Ve skutečnosti by mohlo být v akumulátoru umístěno více topných patron, čímž by se pouze navýšily energetické bilance.

Technicko-ekonomické zhodnocení zahrnovalo nacenění jednotlivých komponent akumulátoru a porovnání nákladů s potenciálními úsporami energie oproti tradičním zdrojům vytápění, jako je elektro ohřev. Z nacenění vyplývá výsledná cena obou navržených modelů. U modelu Basic cena činí 384890 Kč bez DPH a u modelu s membránovou stěnou cena činí 536466 Kč bez DPH. Z tohoto porovnání byla vypočtena doba návratnosti obou modelů, kdy doba návratnosti modelu Basic činí 33 let a u modelu s membránovou stěnou činí 38,5 let. Ukazuje se, že doba návratnosti investice do akumulátoru je poměrně dlouhá, což je dáno především vysokými pořizovacími náklady. Nicméně, je třeba vzít v úvahu, že se jedná o pasivní technologii s dlouhou životností a minimálními provozními náklady, což může dlouhodobě přinést významné úspory. Stejně tak, co se týče konstrukčního návrhu, je možné provést optimalizaci, například úspor na materiálu a tato hodnota by se mohla ještě snížit. Je pouze otázkou o kolik by se reálně snížila.

Závěrem lze konstatovat, že pasivně vybíjený pískový akumulátor tepla představuje zajímavou a perspektivní technologii pro ukládání tepelné energie. Přestože navržené koncepty nejsou pro danou aplikaci optimální, získané poznatky a zkušenosti mohou sloužit jako základ pro další vývoj a optimalizaci této technologie. Pro dosažení lepších výsledků by bylo vhodné uvažovat například o větším akumulátoru umístěném externě a využití HTF pro přenos tepla do budovy.

Seznam použitých zdrojů

- [1] TAWALBEH, Muhammad; KHAN, Hafsah A.; AL-OTHMAN, Amani; ALMOMANI, Fares a AJITH, Saniha. A comprehensive review on the recent advances in materials for thermal energy storage applications. online. *International Journal of Thermofluids*. 2023, roč. 18, s. 100326. ISSN 2666-2027. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100326>. [cit. 2024-02-17].
- [2] ALVA, Guruprasad; LIU, Lingkun; HUANG, Xiang a FANG, Guiyin. Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications. s. 693-706. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.021>.
- [3] ULRICH, S.; ŠPIČÁK, A.; ŠPIČÁKOVÁ, L.; ULIČNÝ, D.; ŤUPOVÁ, M. et al. *GEOLOGICKÉ PROCESY ZAPSANÉ V HORNINÁCH*. online. 4. Praha: Geofyzikální ústav AV ČR, 2021. ISBN 978-80-907882-2-0. Dostupné z: <https://www.ig.cas.cz/wp-content/uploads/2021/10/geologicke-procesy-zapsane-v-horninach-2021.pdf>. [cit. 2024-05-22].
- [4] RIZEIQI, Nasser Al; JEDDA, Mariam a LIEW, Peng Yen. Silica Sand as Thermal Energy Storage for Renewable-based Hydrogen and Ammonia Production Plants. online. *Chemical engineering transactions*. 2023, roč. 106, s. 1111-1116. ISSN 2283-9216. Dostupné z: <https://doi.org/10.3303/CET23106186>. [cit. 2024-04-18].
- [5] LAIO, . Revolutionizing energy storage: the ceramic era. online. In: *Innovation Origins*. 2023. Dostupné z: <https://innovationorigins.com/en/revolutionizing-energy-storage-the-ceramic-era/>. [cit. 2024-04-18].
- [6] AL-AZAWII, Mohammad M.S.; ALHAMDI, Sabah F.H.; BRAUN, Sasha; HOFFMANN, Jean-francois; CALVET, Nicolas et al. Experimental study on packed-bed thermal energy storage using recycled ceramic as filler materials. s. 103375. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103375>.
- [7] KOÇAK, Burcu a PAKSOY, Halime. Using demolition wastes from urban regeneration as sensible thermal energy storage material. online. *International journal of energy research*. 2019, roč. 43, č. 12, s. 6454-6460. ISSN 0363-907X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/er.4471>. [cit. 2024-04-17].
- [8] GAUTAM, Abhishek a SAINI, R.P. A review on sensible heat based packed bed solar thermal energy storage system for low temperature applications. online. *Solar energy*. 2020, roč. 207, s. 937-956. ISSN 0038-092X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.07.027>. [cit. 2024-04-18].
- [9] TECHNICAL DATA OF SOAPSTONE. online. In: *Greenstone Soapstone Masonry Heaters*. Dostupné z: <https://www.greenstoneheat.com/technical-data-of-soapstone/>. [cit. 2024-04-18].
- [10] FREUND, Sebastian; ABARR, Miles; MCTIGUE, Josh D.; FRICK, Konor L.; MATHUR, Anoop et al. Chapter 3 - Thermal energy storage. In: . s. 65-137. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819892-6.00003-4>.
- [11] TREVISAN, Silvia; JEMMAL, Yousra; GUEDEZ, Rafael a LAUMERT, Björn. Packed bed thermal energy storage: A novel design methodology including quasi-dynamic boundary conditions and techno-economic optimization. s. 102441. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102441>.

- [12] KUNII, Daizo a LEVENSPIEL, Octave. *Fluidization Engineering*. online. 2nd edition. Butterworth-Heinemann, 1991. ISBN 978-0-08-050664-7. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/C2009-0-24190-0>. [cit. 2024-04-15].
- [13] KANG, Zhangyang; ZHOU, Wu; QIU, Kaijie; WANG, Chaojie; QIN, Zhaolong et al. Numerical Simulation of an Indirect Contact Mobilized Thermal Energy Storage Container with Different Tube Bundle Layout and Fin Structure. online. *Sustainability (Basel, Switzerland)*. 2023, roč. 15, č. 6, s. 5511. ISSN 2071-1050. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/su15065511>. [cit. 2024-04-15].
- [14] *Polar Night Energy*. online. In: . 2022. Dostupné z: <https://polarnightenergy.fi/>. [cit. 2024-02-01].
- [15] MCGRATH, Matt. Climate change: 'Sand battery' could solve green energy's big problem. online. *BBC*. 2022. Dostupné z: <https://www.bbc.com/news/science-environment-61996520>. [cit. 2024-02-01].
- [16] HURTTILA, Eino. *Technology and use of sand thermal storage*. Bakalářská práce. Satakunnankatu 23, 28130 Pori, Finsko: Satakunta University of Applied Sciences, 2022. Dostupné také z: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/754940/Hurttila_Eino.pdf?sequence=2&isAllowed=y.
- [17] *Stiesdal Storage*. online. In: . 2023. Dostupné z: <https://www.stiesdal.com/storage/>. [cit. 2024-02-02].
- [18] Siemens Gamesa Renewable Energy: Energy storage on the rise. online. In: . Dostupné z: <https://www.siemensgamesa.com/explore/innovations/energy-storage-on-the-rise>. [cit. 2024-02-02].
- [19] EGGERS, Jan Rudolf; VON DER HEYDE, Michael; THAELE, Sören Hendrik; NIEMEYER, Helen a BOROWITZ, Tobias. Design and performance of a long duration electric thermal energy storage demonstration plant at megawatt-scale. online. *Journal of energy storage*. 2022, roč. 55, s. 105780. ISSN 2352-152X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105780>. [cit. 2024-02-02].
- [20] COLLINS, Leigh. Wind and solar can become dispatchable within three years. online. *Recharge*. 2018. Dostupné z: <https://www.rechargenews.com/transition/wind-and-solar-can-become-dispatchable-within-three-years/2-1-293044>. [cit. 2024-02-02].
- [21] Leading the Charge: Storing and restoring. online. In: *Eurelectric*. Dostupné z: <https://www.eurelectric.org/leadingthecharge/siemens-gamesa>. [cit. 2024-02-02].
- [22] DE MICHELE, GENNARO; SALATINO, PIERO a MAGALDI, MARIO. *Device and method for storage and transfer of thermal energy*. 2011.
- [23] MGTES: Magaldi Green Thermal Energy Storage. online. In: *MAGALDI*. 2022. Dostupné z: <https://www.magaldigreenenergy.com/en/download>. [cit. 2024-02-03].
- [24] NREL Options a Modular, Cost-Effective, Build-Anywhere Particle Thermal Energy Storage Technology. online. In: *National Renewable Energy Laboratory*. 2021. Dostupné z: <https://www.nrel.gov/news/program/2021/nrel-options-a-modular-cost-effective-build-anywhere-particle-thermal-energy-storage-technology.html>. [cit. 2024-02-03].
- [25] *Thermal Energy Storage*. online. In: *KRAFTBLOCK*. Dostupné z: <https://kraftblock.com/en/insights/thermal-energy-storage.html>. [cit. 2024-02-03].
- [26] Sustainability in industry: Embracing new particles, materials, and systems. online. In: *The American Ceramic Society*. 2023. Dostupné z: <https://ceramics.org/ceramic->

- tech-today/acers-news/sustainability-in-industry-plus-more-inside-march-2023-acers-bulletin/. [cit. 2024-02-03].
- [27] The decarbonisation of a snack with PepsiCo, Eneco, and Koolen Industries group company Kraftblock. online. In: *Koolen Industries*. Dostupné z: <https://www.koolenindustries.com/post/the-decarbonisation-of-a-snack>. [cit. 2024-02-03].
- [28] SCHICHTEL, Martin (Německo). *Energy supply system*. Přihl.: 13.10.2022. Uděl.: 01.04.2020. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/DE102019108392A1/en?inventor=schichtel+Martin&oq=schichtel+Martin>. [cit. 03.02.2024].
- [29] *Net-Zero Heat System*. online. In: KRAFTBLOCK. Dostupné z: <https://kraftblock.com/en/applications/net-zero-heat.html>. [cit. 2024-02-03].
- [30] SOUTHEY, Flora. Electrifying crisp production: PepsiCo overcomes green energy storage issue with thermal battery tech. online. *FoodNavigator*. 2023. Dostupné z: <https://www.foodnavigator.com/Article/2023/05/23/pepsico-electrifies-crisp-plant-with-renewable-energy-storage-tech>. [cit. 2024-02-03].
- [31] TOUZO, Aubin; OLIVÈS, Régis; DEJEAN, Guilhem; MINH, Doan Pham; EL-HAFI, Mouna et al. *Eco-Stock® - Competitive heat storage solution : robustness analysis*. online. 2020. Dostupné z: <https://imt-mines-albi.hal.science/hal-02928623>. [cit. 2024-02-03].
- [32] *Energy storage*. online. In: Eco-Tech Ceramics. 2021. Dostupné z: <https://ecotechceram.com/en/energy-storage/>. [cit. 2024-02-03].
- [33] ŠVÁBENSKÝ, Jiří. *Větrání a vytápění průmyslové haly*. Diplomová práce, vedoucí Ing. Vladimír Krejčí, Ph.D. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2008.
- [34] Územní teploty v roce 2023. online. In: *Český hydrometeorologický ústav*. Dostupné z: <https://www.chmi.cz/historicka-data/pocasi/uzemni-teploty#>. [cit. 2024-04-25].
- [35] ŠIMKOVÁ, Nikola. *Energetické zásobování areálu Technická 2*. Diplomová práce, vedoucí Marian Brázdil. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/140221>.
- [36] *Křemičitý písek na tryskání (pískování) - frakce 0,5 - 1,0 mm*. online. In: K-Písek s.r.o. Dostupné z: <http://www.k-pisek.cz/kremicity-pisek-na-tryskani-piskovani-frakce-0-5-1-0-mm>. [cit. 2024-04-20].
- [37] *Digitální mikroskop - Řada VHX-7000*. online. In: KEYENCE. Dostupné z: <https://www.keyence.eu/cscz/products/microscope/digital-microscope/vhx-7000/>. [cit. 2024-04-20].
- [38] BELL, Ian H.; WRONSKI, Jorrit; QUOILIN, Sylvain a LEMORT, Vincent. Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp. online. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2014, roč. 53, č. 6, s. 2498-2508. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/ie4033999>. [cit. 2024-04-22].
- [39] Topné patrony. online. In: *Easytherm.cz*. 2022. Dostupné z: https://easytherm.cz/index.php?topne_patrony. [cit. 2024-05-04].
- [40] PROMASIL®: Kalicumsilikátové desky s nízkou objemovou hmotností. online. In: *Promat*. Dostupné z: <https://www.promat.com/cs-cz/industry/vyrobky-reseni/vysokoteplotni-izolacni/desky-hti/promasil/>. [cit. 2024-05-16].

- [41] Fiberfrax® Durablanket® S. online. In: *InHeat spol. s.r.o.* Dostupné z: <http://www.inheat.cz/doc/td/cz/39/fiberfrax-durablanket-s-cz.pdf>. [cit. 2024-05-16].
- [42] KUNII, Daizo a SMITH, J. M. Heat transfer characteristics of porous rocks. online. *AICHE journal*. 1960, roč. 6, č. 1, s. 71-78. ISSN 0001-1541. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/aic.690060115>. [cit. 2024-03-28].
- [43] TREVISAN, Silvia. *Literature Survey - High-Temperature Packed Bed Thermal Energy Storage*. 2021. ISBN 9789180401296.
- [44] SUN, Qiang; LÜ, Chao; CAO, Liwen; LI, Weichao; GENG, Jishi et al. Thermal properties of sandstone after treatment at high temperature. online. *International journal of rock mechanics and mining sciences (Oxford, England: 1997)*. 2016, roč. 85, s. 60-66. ISSN 1365-1609. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2016.03.006>. [cit. 2024-04-22].
- [45] Stefanova–Boltzmannova konstanta. online. In: *Wikipedia: the free encyclopedia*. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Stefanova–Boltzmannova_konstanta. [cit. 2024-04-07].
- [46] Surface Emissivity Coefficients. online. In: *The Engineering Toolbox (2003)*. 2003. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d_447.html. [cit. 2024-03-29].
- [47] INCROPERA, Frank P. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 6th ed. New York: John Wiley & Sons, 2007. ISBN 0-471-45728-0.
- [48] Intro to Transient Thermal Analysis - Lesson 1. online. In: *Ansys Innovation Courses*. Dostupné z: https://courses.ansys.com/index.php/courses/thermal-capacitance-in-heat-transfer/lessons/lesson-1-introduction-to-transient-analyses/#dfliip-df_19117/6/. [cit. 2024-05-16].
- [49] BAUMANN, T. a ZUNFT, S. Properties of granular materials as heat transfer and storage medium in CSP application. online. *Solar energy materials and solar cells*. 2015, roč. 143, s. 38-47. ISSN 0927-0248. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.06.037>. [cit. 2024-05-16].
- [50] *PROVYKO s.r.o. – Nacenění ocelových částí*. online. e-mail, 2024.
- [51] *Promat s.r.o. – Nabídka topných izolací*. online. PDF, 2024.
- [52] *Easytherm.cz s.r.o. – Nabídka topných patron*. Online. e-mail, 2024.

Seznam použitých zkratk a symbolů

Zkratka/ Symbol	Význam	Jednotka
EÚ	Energetický ústav	
FVE	Fotovoltaická elektrárna	
HTF	Heat transfer fluid – teplotonosná látka	
IPA	Isopropylalkohol	
OP	Okrajová podmínka	
OZE	Obnovitelné zdroje energie	
SW	Software	
Q_z	Tepelný tok (ztráta)	(W)
k	Součinitel prostupu tepla stěnou	(W/m ² K)
S	Plocha stěny	(m ²)
ΔT	Rozdíl teplot mezi vnitřním a vnějším prostředím	(°C)
n	Počet stěn	(-)
t_i	Výpočtová vnitřní teplota	(°C)
t_o	Teplota venkovního vzduchu	(°C)
$t_{o,s}$	Výpočtová teplota okolí suterénu	(°C)
τ	Počet hodin v měsíci	(hod)
$Q_{z,měsíc}$	Tepelné ztráty v jednotlivých měsících	(kWh)
$V_{směs}$	Objem směsi	(m ³)
$V_{písek}$	Objem písku	(m ³)
$V_{tekutina}$	Objem tekutiny (mezi zrny písku)	(m ³)
$m_{písek}$	Hmotnost písku	(kg)
$\rho_{písek}$	Hustota písku	(kg/m ³)
$m_{tekutina}$	Hmotnost tekutiny	(kg)
$\rho_{tekutina}$	Hustota tekutiny	(kg/m ³)
ϵ	Porozita písku	(-)
$\rho_{lože}$	Hustota lože	(kg/m ³)
ρ_{vzduch}	Hustota vzduchu	(kg/m ³)
k_e^0	Efektivní tepelná vodivost porézního prostředí naplněného nehybnou tekutinou	(W/mK)
Δt	Teplotní spád mezi částicemi	(K)
ΔL	Efektivní délka mezi	(m)
k_g	Tepelná vodivost tekutiny	(W/mK)
ϵ	Porozita lože	(-)
h_{rv}	Koeficient přestupu tepla radiací (mezi prázdnými objemy)	(W/m ² K)
q_s	Měrný tepelný tok pevnou fází	(W/m ²)
Δt_s	Teplotní spád v pevné části	(K)
Δt_{gs}	Teplotní spád v blízkosti kontaktu částic	(K)
k_s	Tepelná vodivost pevné části	(W/mK)
l_s	Efektivní délka pevné částice	(m)
l_v	Efektivní tloušťka filmu tekutiny přiléhající k povrchu dvou pevných částic	(m)

h_p	Součinitel přestupu tepla vyjadřující rychlost přestupu tepla kontaktní plochou mezi pevnými částicemi v loži	(W/m ² K)
B	Hustota lože	(-)
D_p	Průměr částic	(m)
ϕ	Koeficient vyjadřující efektivní tloušťku filmu tekutiny přiléhající ke kontaktu částic	(-)
h_{rs}	Koeficient přestupu tepla radiací (mezi plochami částic)	(W/m ² K)
γ	Konstanta velikosti částic	(-)
σ	Stefan-Boltzmannova konstanta	(W/m ² K ⁴)
T_l	Teplota lože v místě výpočtu	(K)
ϵ_r	Emisivita částic	(-)
ϕ_2	Hodnota ϕ při minimální porozitě lože	(-)
ϕ_1	Hodnota ϕ při maximální porozitě lože	(-)
ϵ_2	Minimální porozita lože	(-)
ϵ_1	Maximální porozita lože	(-)
κ	Podíl koeficientů tepelné vodivosti částic a tekutiny (k _s /k _g)	(-)
θ_0	Úhel odpovídající hranici oblasti tepelného toku pro jeden kontaktní bod (obrázek 5.2)	(rad)
n_p	Počet kontaktních bodů částice	(-)
$h_{plášť}$	Součinitel přestupu tepla pláště akumulátoru	(W/m ² K)
Nu_L	Nusseltovo číslo	(-)
k_v	Součinitel tepelné vodivosti vzduchu	(W/mK)
L_{char}	Charakteristický rozměr	(m)
Ra_L	Rayleighovo číslo	(-)
Gr_L	Grashofovo číslo (-)	(-)
Pr	Prandtlovo číslo vzduchu (-)	(-)
g	Gravitační zrychlení	(m/s ²)
β	Součinitel teplotní objemové roztažnosti	(1/K)
T_S	Teplota stěny	(°C)
T_∞	Teplota okolí	(°C)
L	Délka (charakteristický rozměr)	(m)
ν	Kinematická viskozita vzduchu	(m ² /s)
D	Průměr válcové plochy	(m)
S	Vzdálenost desek	(m)
a	Součinitel teplotní vodivosti (difuzivita)	(m ² /s)
N	Počet trubek	(-)
d	Vnitřní průměr trubek	(m)
D_{out}	Vnější průměr mezikruží	(m)
D_{in}	Vnitřní průměr mezikruží	(m)
h_{MS}	Součinitel přestupu tepla membránové stěny	(W/m ² K)
$\Delta \dot{E}_{st}$	Akumulovaná energie v systému	(W)
\dot{E}_{in}	Energie vstupující do systému	(W)
\dot{E}_{out}	Energie vystupující ze systému	(W)
\dot{E}_g	Energie generovaná v systému	(W)
k	Tepelná vodivost	(W/mK)
∇	Laplaceův operátor	(-)
T	Teplota	(K)
\dot{q}	Měrný tepelný tok	(W/m ³)

ρ	Hustota	(kg/m ³)
c	Měrná tepelná kapacita	(J/kgK)
t	Čas	(s)
h	Součinitel přestupu tepla	(W/m ² K)

Seznam obrázků

- Obrázek 2.1 Recyklovaná keramika využitá pro TES [6]
Obrázek 2.2 Schéma akumulátoru tepla využívající pevné lože [10]
Obrázek 2.3 Zapojení TES s pevným ložem do systému koncentrované solární elektrárny [11]
Obrázek 2.4 Základní schéma fluidního lože
Obrázek 2.5 Fluidní výměníky tepla [12]
Obrázek 2.6 Schéma typického provedení Shell and tube akumulátoru [13]
Obrázek 2.7 Polar Night Energy, Finsko, Kankaanpää [15]
Obrázek 2.8 Model akumulátoru se sekčním rozdělením [16]
Obrázek 2.9 Zjednodušený model akumulátoru [16]
Obrázek 2.10 Ilustrační foto zařízení GridScale [17]
Obrázek 2.11 GridScale – Fáze nabíjení
Obrázek 2.12 GridScale – Fáze vybíjení
Obrázek 2.13 Ukázka použité frakce v demonstračním projektu [21]
Obrázek 2.14 Řez modelem akumulátoru [19]
Obrázek 2.15 Schéma zapojení celého zařízení [19]
Obrázek 2.16 Zapojení zařízení uvedené v patentu vázaném na zařízení MGTES [22]
Obrázek 2.17 Model modulu MGTES [23]
Obrázek 2.18 Schéma zapojení NREL – TES [24]
Obrázek 2.19 KRAFTBLOCK – Ukázka použitého materiálu [26]
Obrázek 2.20 Model realizace KRAFTBLOCK pro PepsiCo [29]
Obrázek 2.21 ETC – Experimentální zařízení [31]
Obrázek 3.1 a) Plán budov FSI VUT b) Část vícelodního komplexu (modře) využívaná EÚ
Obrázek 3.2 Zjednodušený model laboratoře v budově C3 [33]
Obrázek 3.3 FVE na střeše budovy C3
Obrázek 3.4 Grafické znázornění vyrobené elektřiny z FVE v jednotlivých měsících
Obrázek 4.1 Umístění akumulátoru v budově C3 (červená oblast)
Obrázek 4.2 Koncept pasivně vybíjeného pískového akumulátoru
Obrázek 4.3 a) Koncept akumulátoru s membránovou stěnou b) Řez akumulátorem
Obrázek 5.1 Digitální mikroskop KEYENCE VHX-7000 [37]
Obrázek 5.2 Stůl a objektiv mikroskopu s Petriho miskou se vzorkem
Obrázek 5.3 SW vyhodnocený snímek vzorku
Obrázek 5.4 Odměrný válec
Obrázek 5.5 Váha s naplněným odměrným válcem
Obrázek 5.6 Odměrný válec v ultrasonickém čističi
Obrázek 5.7 Odsávání přebytečného isopropylalkoholu
Obrázek 6.1 a) Model Basic b) Podélný řez modelem Basic
Obrázek 6.2 a) Ocelová obálka písku b) uložení topných patron
Obrázek 6.3 a), b) Topné patrony easytherm [39] c) Model patrony
Obrázek 6.4 a) Promat PROMASIL–1000 b) Fiberfrax® Durablanket® S [40] [41]
Obrázek 6.5 Detail uchycení vnějšího víka
Obrázek 6.6 Zóny pro přepravu akumulátoru
Obrázek 6.7 Manipulační prostředky a) Otvory pro manipulační lana b) Manipulační čepy
Obrázek 6.8 a) Model s membránovou stěnou b) Podélný řez modelem
Obrázek 6.9 a) Membránová stěna b) Detail membránové stěny
Obrázek 6.10 Regulační mechanismus
Obrázek 7.1 a) Model přestupu tepla mezi zrny b) Tepelé odpory přestupu tepla mezi zrny [43]
Obrázek 7.2 Model přenosu tepla v blízkosti kontaktních bodů částic [42]

- Obrázek 7.3 Závislost efektivní tepelné vodivosti lože na teplotě
Obrázek 7.4 Proudění přirozenou konvekcí mezi vyhřívanými rovnoběžnými deskami [47]
Obrázek 7.5 Znárodnění nahrazení membránové stěny
Obrázek 8.1 Geometrie použita v programu Ansys a) model Basic b) model s membránovou stěnou
Obrázek 8.2 a) Síť modelu Basic b) Síť modelu s membránovou stěnou
Obrázek 8.3 OP – roční cyklus a) Nabíjení b) Chladnutí
Obrázek 8.6 Grafické znárodnění průběhu průměrné teploty akumulátoru v roce modelu Basic
Obrázek 8.7 Teplotní pole v průběhu celoroční simulace modelu Basic a) Červen b) Říjen c) Listopad d) První polovina února
Obrázek 8.8 OP – týdenní cyklus a) Den b) Noc
Obrázek 8.9 Grafické znárodnění týdenního průběhu průměrné teploty akumulátoru modelu Basic
Obrázek 8.10 Teplotní pole týdenní simulace a) Po 12 hodinách b) Na konci 3. dne c) Na konci 5. noci d) Na konci 7. noci
Obrázek 8.11 OP (membránová stěna) – roční cyklus a) Nabíjení b) Chladnutí
Obrázek 8.12 Grafické znárodnění průběhu průměrné teploty akumulátoru v roce modelu s membránovou stěnou
Obrázek 8.13 Teplotní pole v průběhu celoroční simulace modelu s membránovou stěnou a) Červen b) Říjen c) Listopad d) První polovina února
Obrázek 8.14 OP (membránová stěna) – týdenní cyklus a) Den b) Noc
Obrázek 8.15 Grafické znárodnění týdenního průběhu průměrné teploty akumulátoru modelu s membránovou stěnou
Obrázek 8.16 Teplotní pole týdenní simulace a) Po 12 hodinách b) Na konci 3. dne c) Na konci 5. noci d) Na konci 7. noci
Obrázek 8.17 Oblast akumulátoru, pro kterou odpovídají provedené simulace (modře)

Seznam tabulek

- Tabulka 1 Tepelné vlastnosti materiálů možných pro využití pro akumulaci tepla [8] [7] [9]
Tabulka 2 Průměrné teploty v jednotlivých měsících (1991–2020) – Jihomoravský kraj [34]
Tabulka 3 Tepelné vlastnosti budovy C3 [33]
Tabulka 4 Základní parametry pro výpočet tepelných ztrát
Tabulka 5 Tepelné ztráty laboratoře C3 v jednotlivých měsících
Tabulka 6 Vyrobená elektrina FVE na budově C3 – program Helioscope [35]
Tabulka 7 Technické parametry zakoupeného písku – od dodavatele
Tabulka 8 Naměřené a vypočtené hodnoty měření hustoty a porozity písku
Tabulka 9 Parametry topných patron
Tabulka 10 Konstanty potřebné pro výpočet k_{eff} [44]
Tabulka 11 Konstanty potřebné pro výpočet součinitele přestupu tepla pláště [38]
Tabulka 12 Konstanty potřebné pro výpočet součinitele přestupu tepla membránové stěny [38]
Tabulka 13 Roční průběh energetických stavů modelu Basic
Tabulka 14 Roční průběh energetických stavů modelu s membránovou stěnou
Tabulka 15 Nacnění modelu Basic
Tabulka 16 Nacnění modelu s membránovou stěnou
Tabulka 17 Porovnání tepelných ztrát objektu s dodanou energií do C3 jednotlivými modely

Seznam příloh

- 1 Výkres sestavy modelu Basic (HB_B_01)
- 2 Výkres sestavy modelu s membránovou stěnou (HB_MS_01)
- 3 Kusovník modelu Basic
- 4 Kusovník modelu s membránovou stěnou