

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ**

KATEDRA TECHNICKÝCH ZAŘÍZENÍ BUDOV



AKUMULACE TEPLA VE VODNÍM STRATIFIKAČNÍM ZÁSOBNÍKU

HEAT STORAGE IN WATER THERMAL STRATIFIED TANK

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vypracoval:

Bc. David Gazda

Vedoucí práce:

Ing. Daniel Adamovský, Ph.D.

2020

Čestné prohlášení

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

V Praze dne 24. 5. 2020

.....

Bc. David Gazda

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Danielovi Adamovskému, Ph.D. za trpělivost a čas jak při konzultacích praktické části, tak i při řešení textové části jako takové. Děkuji také své rodině a přítelkyni, která při mně stála a podporovala mě po celou dobu studia.

Obsah

Seznam obrázků.....	vii
Seznam grafů	viii
Abstrakt.....	ix
Klíčová slova.....	ix
A. Úvod.....	1
1. Motivace	2
2. Cíle práce	2
2.1 Přehled stávajícího stavu poznání.....	2
2.2 Analýza chování zásobníku	2
2.3 Identifikace výhod proti běžnému zásobníku	2
3. Rozsah závěrečné práce	3
B. Přehled stávajícího stavu	4
1. Akumulace energie obecně.....	5
2. Tepelné médium	6
2.1 Akumulace citelného tepla	6
2.2 Akumulace latentního tepla.....	7
3. Chemické médium.....	7
4. Tepelná izolace a její geometrie	8
4.1 Geometrie tepelné izolace.....	9
5. Geometrie zásobníku	10
5.1 Válcový a komolý kužel.....	10
5.2 Hranatý a válcový	11
6. Typy stratifikačních vestaveb	12
6.1 Otevřený systém.....	13
6.2 Uzavřený systém.....	14
6.3 Desky uvnitř nádrže.....	15
7. Materiál potrubí	17
8. Realizované projekty.....	18
C. Metodika měření	20
9. Popis experimentálního zařízení	21
10. Doporučení pro práci se zásobníkem.....	24
11. Popis experimentů	26
11.1 Příprava pro experiment	26

11.2	Výčet experimentů	28
12.	Způsob zápisu a vyhodnocování měřených dat.....	30
12.1	Měřicí zařízení	30
12.2	Vyhodnocování měřených dat.....	31
D.	Výsledky	34
13.	První experiment – ztráta	35
13.1	Tepelná ztráta.....	35
13.2	Součinitel prostupu tepla	37
14.	Druhý experiment – ochlazování.....	38
15.	Třetí experiment – ochlazování s ohřevem	41
16.	Čtvrtý experiment – přesnost měření.....	44
17.	Pátý experiment – porovnání.....	45
E.	Diskuze	47
□	Úvodem.....	48
□	První experiment – ztráta.....	48
□	Druhý experiment – ochlazování	49
□	Třetí experiment – ochlazování s ohřevem	50
□	Čtvrtý experiment – přesnost měření	52
□	Pátý experiment – porovnání.....	53
F.	Závěr	56
G.	Literatura	59

Seznam obrázků

1	Dělení dle tepelného média.....	5
2	Geometrie tepelné izolace.....	9
3	Teplotní rozvrstvení	9
4	Porovnání tvarů zásobníků.....	10
5	Rychlost ohřevu zásobníku.....	11
6	Termoklina	12
7	Otevřený systém	13
8	Uzavřený systém 1	14
9	Uzavřený systém 2	14
10	Konfigurace vnitřních desek.....	15
11	Porovnání desek konfigurace A.....	16
12	Porovnání desek konfigurace B.....	16
13	Porézní potrubí.....	17
14	Průběh teplot s porézním potrubím.....	17
15	Průběh teplot s porézním potrubím 2.....	17
16	Porézní potrubí 2.....	17
17	Friedrichshafen 1997.....	18
18	Hannover 2000	18
19	Mnichov 2007.....	19
20	Slatiňany 1996.....	19
21	Pohled v laboratoři.....	21
22	Schéma stratifikačního zásobníku.....	22
23	Pohled na hlavní ovládání zásobníku	22
24	Pohled na výstupní větve ze zásobníku.....	22
25	Umístění teplotních čidel a schéma vestavby.....	23
26	Dopouštění topné větve.....	24
27	Dopouštění chladicí větve.....	24
28	Znečištěný zásobník.....	26
29	Čistý zásobník.....	26
30	Původní izolace.....	27
31	Nový izolace.....	27
32	Zásobník před experimentem.....	27
33	Zásobník během experimentu.....	27
34	Chování vestavby pro první experiment.....	28
35	Chování vestavby pro druhý experiment.....	28

36	Chování vestavby pro třetí experiment.....	29
37	Chování vestavby pro třetí experiment.....	29
38	Chování vestavby pro pátý experiment.....	29
39	Chování vestavby pro pátý experiment.....	29
40	Měřicí zařízení pro experimenty.....	30
41	Otevřené klapky vestavby.....	38
42	Horní klapky ohřívající větve.....	42
43	Spodní klapky chladící větve.....	42

Seznam grafů

1	Tepelná ztráta zásobníku po výšce.....	34
2	Tepelná ztráta zásobníku v čase.....	36
3	Průběh součinitele prostupu tepla.....	37
4	Teplota v zásobníku po výšce – ochlazování.....	38
5	Ochlazování zásobníku konstantním výkonem.....	40
6	Srovnání ohřevu s ochlazováním.....	41
7	Ohřev zásobníku s ochlazováním.....	43
8	Bilance ochlazování zásobníku.....	44
9	Teplota v čase při ohřevu elektrokotlem.....	45
10	Teplota po výšce při ohřevu elektrokotlem.....	45
11	Teplota v čase při ohřevu kombinací elektrokotle a topné spirály.....	46
12	Teplota po výšce při ohřevu kombinací elektrokotle a topné spirály.....	46
13	Průběh součinitele prostupu tepla pro 3 měření.....	49
14	Referenční ochlazování pro druhý experiment.....	49
15	Srovnávací grafy ochlazování zásobníku.....	50
16	Porovnání způsobů ohřevu.....	55

Abstrakt

Předmětem závěrečné diplomové práce je experimentální měření na vodním stratifikačním zásobníku v demonstrační laboratoři TZB, katedry technických zařízení budov, fakulty stavební ČVUT v Praze. Bylo provedeno 5 různých experimentálních měření, která měla simulovat typické stavy v běžném provozu. Měření, u kterých byly podobné okrajové podmínky vyhodnoceny a porovnány s výsledky jiných autorů zabývajících se podobnou problematikou. Zbylá měření byla vyhodnocena a podrobena rozborům na základě kterých byl zaznamenaný děj identifikován.

Klíčová slova

Akumulace tepla, vodní zásobník, stratifikace, ohřev, ochlazení, ztráta zásobníku, termoklina

Abstract

The subject of the final diploma thesis is experimental measurements on a water stratification tank in the demonstration laboratory of TZB, Department of Technical Equipment of Buildings, Faculty of Civil Engineering CTU in Prague. 5 different experimental measurements were performed to simulate typical conditions in normal operation. Measurements in which similar boundary conditions were evaluated and compared with the results of other authors dealing with similar issues. The remaining measurements were evaluated and subjected to analyzes on the basis of which the recorded event was identified.

Keywords

Stratified storage tanks, stratification, heating, cooling, tank loss, thermocline.

A. Úvod

1. Motivace

Během školy mě velmi zajímaly příklady z praxe, stejně tak i srovnání teorie s praxí. Na bakalářském studiu jsem prováděl závěrečnou práci v experimentálním centru ČVUT, kde jsem zkoumal vliv ocelových drátků ve vysokopevnostním betonu podle různého hmotnostního poměru vzhledem k jejich délce. Tato práce pro mě byla velkou zkušeností a předurčila mi směr i v závěrečné práci magisterského studia. Byl jsem rozhodnutý pro neobyčejné provedení. Další výzvou pro mě tedy bylo vyzkoušet si reálné zařízení, provádět na něm měření, vyhodnocovat výsledky a celou problematiku analyzovat. Při práci na experimentu jsem byl velmi pečlivý a důsledný. Na samotném zařízení jsem nechal kromě měření také kus práce a díky této kombinaci mě celá závěrečná práce bavila o to víc.

2. Cíle práce

2.1 Přehled stávajícího stavu poznání

Před započítím experimentů jsem prostudoval zahraniční články zabývající se problematikou akumulací tepla. Uváženě jsem z nich vybral související případně velmi zajímavé kapitoly, které jsem popsal v přehledu stávajícího stavu.

2.2 Analýza chování zásobníku

Tato práce je prováděna na zmenšeném typu zásobníku používaném pro velké objemy, proto se jeho chování může mírně lišit od typizovaného, odladěného výrobku. Na základě předem určeného popisu experimentu budu provádět měření, které budu následně vyhodnocovat a vyvozovat závěry. V rámci těchto vyhodnocování budu také analyzovat chování zásobníku při určitých stavech.

2.3 Identifikace výhod proti běžnému zásobníku

Běžně používaný zásobník tepla je klasický. Ten je ohřátý na určitou teplotu a nemá možnost řízeného odběru tepla. Požadované teploty vody se dosahuje trojcestným ventilem s redukcí studenou vodou nebo zpátečky.

Sofistikovanější zařízení v akumulaci tepla je tzv stratifikační zásobník tepla. Zásadním rozdílem oproti klasickému zásobníku tepla je možnost teplé vody o určité teplotě z daného odběrného místa bez dalšího míšení trojcestným ventilem. Na základě fyzikálních vlastností kapalin je voda v zásobníku rozvrstvena podle její teploty. Dole je nejjchladnější a nahoře nejteplejší. Této výhody se využívá také u přívodu vratné větve, která se umístí tak, aby se zásobník zbytečně nepromíchával.

3. Rozsah závěrečné práce

Rozsahem tato práce informuje v první části o stávajícím stavu dané problematiky v širším spektru. Popisuje teoreticky akumulaci energie, vliv tepelné izolace na stratifikaci, geometrii zásobníku, typy vestaveb a použitý materiál. Tato práce se však bude zabývat pouze experimenty a jejich vyhodnocováním na vodním stratifikačním zásobníku tepla.

V další části je popsána metodika měření, v rámci které je popsáno experimentální zařízení, sepsána doporučení pro provoz zařízení výčet provedených experimentů a způsob vyhodnocování.

Dále jsou výsledky jednotlivých experimentů, které jsou následně rozebrány v diskuzi a shrnuty v krátkém závěru.

B. Přehled stávajícího stavu

1. Akumulace energie obecně

Akumulací tepla se zabýváme už od nedávna. Tepelná energie lze akumulovat do různých látek a skupenství. Zaujímá nás hlavně řízená akumulace tepla, které se dá využít později a překlenuje tak například kritické období za daný čas. To může nastat při nevyrovnané potřebě např. vytápění den-noc. V našich klimatických podmínkách je v moderních domech potřeba přibližně 1/3 energie pro tepelnou ztrátu budovy větráním, prostupem tepla konstrukcí a k ohřevu teplé vody pro potřebu uživatelů.

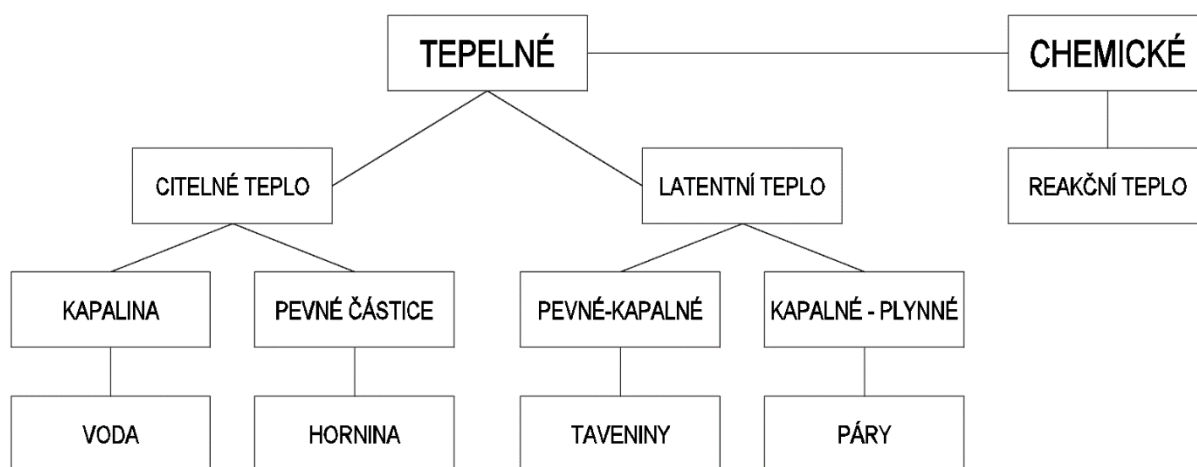
Z praktických aplikací jsou projekty, kdy se teplo akumuluje do velkoobjemových podzemních zásobníků, které slouží pro celé sídliště rodinných domů. Jsou i aplikace, kde má bytový dům vlastní velkoobjemový akumulační zásobník. Tyto velkoobjemové zásobníky slouží k sezónnímu použití, kdy se teplo během letního období naakumuluje a v zimním období využívá pro topení případně pro ohřev teplé vody. [1]

Akumulace energie je ale využívána i např. samotnou konstrukcí daného objektu. Akumulace tepelné energie do těžké konstrukce budovy může vyrovnat fázový posun pro potřebu nárazového vytápění, popř. chlazení vlivem střídání den-noc.

Ideálním akumulátorem je zařízení s co největší tepelnou kapacitou a nejmenší změnou objemu. Zároveň musí být reálně použitelné ve velkém měřítku, to znamená nízká cena a malý objem.

Pro akumulaci tepelné energie se používá cyklický nebo vratný proces, ve kterém dodáním tepla roste vnitřní energie systému.

Dle fyzikálně chemického procesu lze typy zásobníků rozdělit podle tepelného média na:



Dělení dle tepelného média - obr. 1

2. Tepelné médium

2.1 Akumulace citelného tepla

Jde o historicky první způsob akumulace tepla, který byl kdy využíván. Využívá měrné teplo pracovní látky, ta by měla být levná a mít velkou tepelnou kapacitu. Velkou nevýhodou akumulace citelného tepla je značný objem akumulátoru a jeho tepelná ztráta. Z tohoto důvodu může být vhodným akumulátorem nezavodněné podloží země. V případě zavodněného podloží bude akumulované teplo odvedeno pryč. Akumulace citelného tepla může být dále rozdělena do skupin:

2.1.1 Kapaliny

Voda – má ze všech látek největší měrnou tepelnou kapacitu. Ta se mění podle dané teploty a tlaku, přibližně je $4,2 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$. Avšak malý rozsah provozních teplot, $10\text{-}80 \text{ }^\circ\text{C}$. Používá se nejčastěji např. v kombinaci se solárními panely, případně kotli na tuhá paliva. Mezi její výhody patří vysoká měrná tepelná kapacita, dostupnost média, nízká cena a bezpečnost při manipulaci.

Směs – z důvodu širšího uplatnění kapalin, zejména v solárních systémech se voda používá ve směsi, např. vody a glykolu. Taktová směs je nemrznoucí a systém může fungovat celoročně. Toho se využívá zejména při instalaci solárního kolektoru a akumulačního zásobníku, kdy má solární okruh vlastní nemrznoucí směs a je tedy fyzicky oddělen

2.1.2 Pevné materiály

Kamenivo – jedná se o nezavodněný materiál, jehož měrná tepelná kapacita je přibližně $0,8\text{-}1,0 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$. Vzhledem k nízké kapacitě se navrhuje spíše v podzemní variantě z důvodu potřeby velkého objemu. Používá se tedy spíše k sezónní akumulaci tepla v podloží stavby pro celé sídliště nebo továrnu. Teplý vzduch proudí skrz kamenivo shora dolů a předává mu svoji energii. Výhodou tohoto materiálu je jeho téměř neomezená trvanlivost a vysoká tepelná odolnost až do $800 \text{ }^\circ\text{C}$.

Zemina – jedná se o podzemní zásobník tepla, který je izolovaný od okolí zejména hydroizolací, ta zabraňuje proudění spodní vody a následně odtoku energie pryč.

Jiné – Mezi další materiály používající se pro „hybridní“ akumulaci tepla jsou např. ocelové tyče. Ocel dokáže díky své struktuře stabilně udržet teplotu až do 650 °C. Systém ukládá solární a větrnou energii místo do baterií do tepelného úložiště. Podle článku [4] může být energie následně uvolněna ve formě tepla nebo elektřiny, kterou vyrobí parní turbína. Systém má vysokou životnost a dokáže uchovat energii po dobu 48 h.

2.2 Akumulace latentního tepla

Latentní teplo využívá změnu entalpie fázové změny pracovní látky. Z praktických důvodů se využívá fázový přechod mezi tuhou látkou a kapalinou. Výhodou oproti akumulaci citelného tepla je konstantní teplota a menší objem. Nevýhodou je vyšší cena akumulátoru ve srovnání s citelným teplem. Chemicky čisté látky tají při konstantní teplotě oproti chemicky znečištěným látkám či směsím tají v určitém rozsahu teplot. [1]

2.2.1 PCM materiály

Materiály s fázovou přeměnou PCM – Phase Change Materials. Jmenovitě se jedná o materiály chemických sloučenin jako je parafín, Glauberova sůl, polyethylenglykol, HDPE, kyselina stearová a jiné. Výhodou oproti akumulaci citelného tepla je konstantní teplota a menší objem. Chemicky znečištěné látky tají při širším rozsahu teplot. V rámci experimentů byla prokázána synergie v kombinaci PCM koulemi a vodou v zásobníku. Mezi jejich nevýhody patří cena, životnost daných cyklů a jejich možná hořlavost. [2][3]

3. Chemické médium

Z pohledu chemického média je ideální termochemickou reakcí pro tepelnou akumulaci endotermická reakce. Reagujícím látkám se přivádí reakční teplo a část tohoto tepla se se v nich akumuluje. Opačnou reakcí je endotermická reakce, kdy naakumulované látky uvolní teplo. Výhoda je například u rozkladů oxidů kovů. Při rozkladu dochází k uvolňování kyslíku a při vratné reakci kyslík z ovzduší opět odebírá. Mezi takové látky patří například rozklad oxidu draslíku. K reakcím dochází mezi 300–800 °C a uvolněné reakční teplo může být až 2,1 MJ/kg. [15]

Podle článku [5] může být dalším „hybridním“ materiálem pro akumulaci tepla hliník. Pro výrobu hliníku je potřeba velké množství energie. Pokud by se hliník rozložil, tato energie by se uvolnila. Elektřinou ze solárních panelů nebo elektrárny se při hydrolytické reakci uvolní za přítomnosti vody teplo a vodík, který může být převeden na elektřinu v palivovém článku.

4. Tepelná izolace a její geometrie

Z hlediska účinnosti zásobníku je důležitá jeho tepelná ochrana, zejména pokud jde o dlouhodobé sezónní skladování energie. V případě zemních zásobníků se navrhuje na nižší maximální teploty, přibližně do 60 °C. Pro jejich realizaci je potřeba vybrat vhodné podloží.

Konstrukce zásobníků se provádí z ocelového pláště, popřípadě z vodostavebního železobetonu nebo tvarovek z tepelněizolačního materiálu. Menší zásobníky se dodávají v jednom kuse, do 300 m³. Větší zásobníky se skládají na místě stavby.

Z hlediska tepelných ztrát zásobníku má rozhodující vliv materiál konstrukce a materiál tepelně izolační vrstvy. Izolační materiál musí mít velký tepelný odpor, který by neměl být závislý na okolních podmínkách jako je teplota, vlhkost, případně proudění vzduchu. V minulosti se hojně používala skelná vlna. V dnešní době se snaží uplatnit modernější materiály jako je pěnové sklo o různých frakcích v sypané formě. Dále se také používají lehčená kameniva jako je keramzit, perlit, případně stříkané polyuretanové izolace. V případě nízkoteplotních zásobníků lze uplatit polystyrén nebo extrudovaný polystyrén z důvodu jeho stability.

Z pohledu fyzikálních vlastností s rostoucí teplotou roste tepelná vodivost izolace. Při 70 °C již tato podstata nelze zanedbat. Při zvýšené vlhkosti roste tepelná vodivost, to je problém zejména podzemních zásobníků vlivem prostředí. U beztlakých zásobníků dochází k odpařování vody z hladiny. Skupenské teplo výparné vody tak tvoří další složku ztráty zásobníku. Dalším faktorem je průnik vody skrze konstrukci zásobníku, díky kterému je tepelná izolace znehodnocena. To může vznikat u železobetonových konstrukcí.

Při výběru sofistikovanější moderní tepelné izolace jsou na trhu tyto možnosti:

Aerogel – velmi lehký, porézní materiál vyráběný z oxidu křemičitého. Jeho tepelná vodivost je 0,014 W/(m·K). Nevýhodou tohoto materiálu je jeho savost. Při jeho aplikaci musí být chráněn hydroizolační vrstvou.

Vakuová izolace – mezi dvěma deskami se vytvoří podtlak, vakuum. Jeho přibližná tepelná vodivost je 0,006 W/(m·K).

Nevýhoda aerogelu a vakuových desek je jejich cena. Při desce tloušťky 20 mm je cena přibližně 3000 Kč/m². Další jejich nevýhodou je variabilita provedení – nemožnost úpravy na místě stavby případně změna geometrie izolace po výšce zásobníku. Proveditelným řešením jsou vakuové pláště. Jedná se o dvouplášťový zásobník, kde je v dutině vytvořen podtlak. [6]

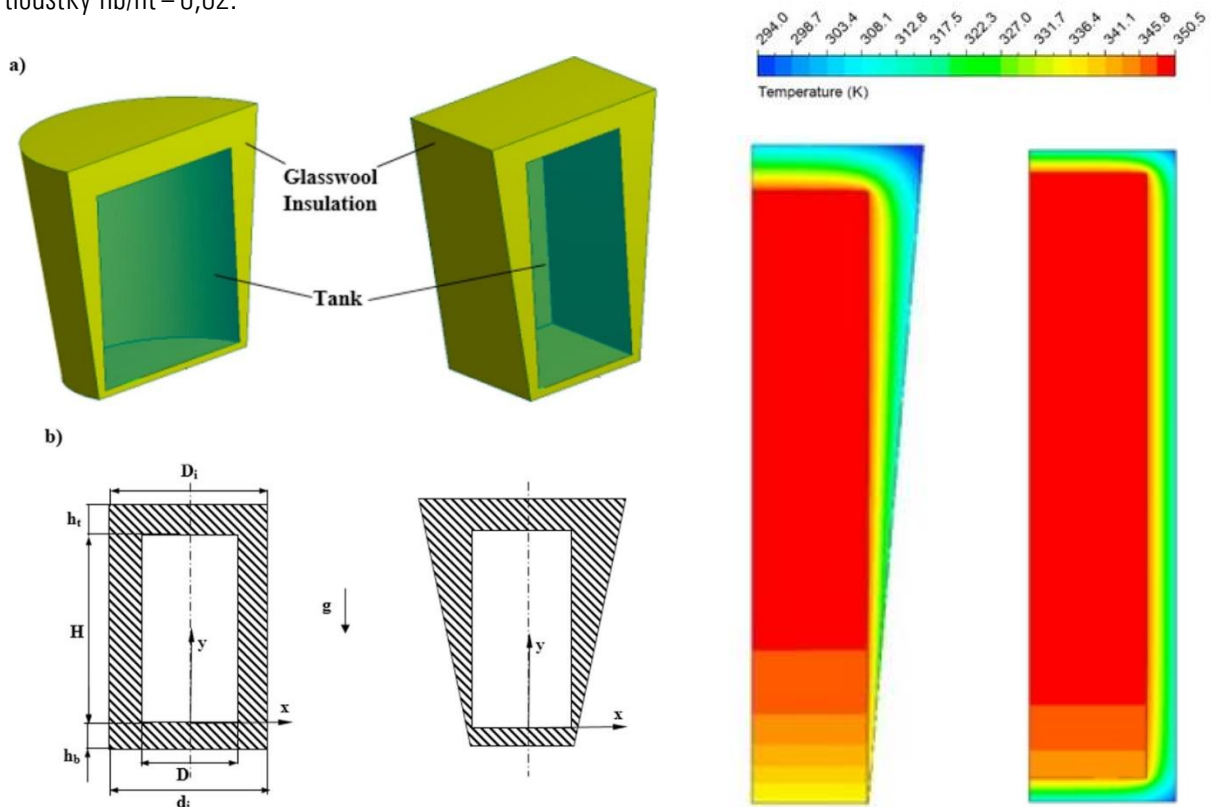
4.1 Geometrie tepelné izolace

Akumulační zásobníky se ve velké většině používají v kombinaci se solárními systémy pro ohřev vody. Zlepšení tepelné stratifikace zvyšuje účinnost celého systému.

V rámci studie [7] byl prokázán numerickými analýzami vliv změny geometrie izolace po výšce zásobníku. Jako izolační materiál byla použita skleněná vlna. Pro vyhodnocení byly použity tyto 3 parametry

- poměr stran nádrže D/H
- poměr spodního izolačního průměru k hornímu izolačnímu průměru d_i/D_i
- poměr spodní izolační tloušťky k horní izolační tloušťce h_b/h_t

Nízké hodnoty poměrů snížily množství horké a studené vody v zásobníku a zvýšily tepelné rozvrstvení. Maximální teplotní rozvrstvení nastalo při poměru stran $D/H=0,3$, izolačního průměru $d_i/D_i=0,75$ a poměru tloušťky $h_b/h_t=0,02$.



Geometrie tepelné izolace - obr. 2 [7]

Teplotní rozvrstvení - obr. 3 [7]

Pro tyto hodnoty byl maximální teplotní rozdíl mezi spodní a horní oblastí pro válcový zásobník o 131 % a o 138 % pro hranatou nádrž. Snížení poměrů významně zvýšilo teplotní rozvrstvení ve srovnání s použitím konstantní tloušťky tepelné izolace.

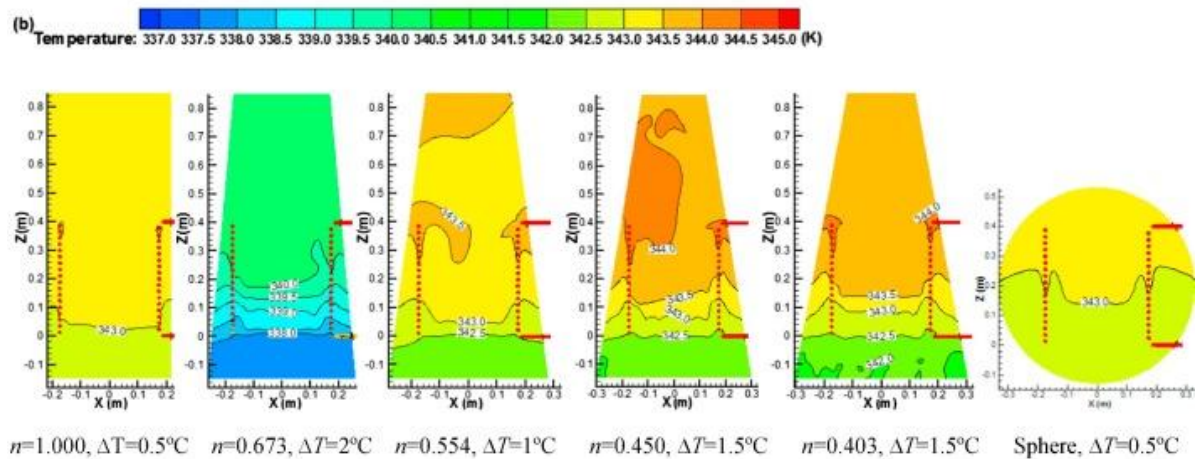
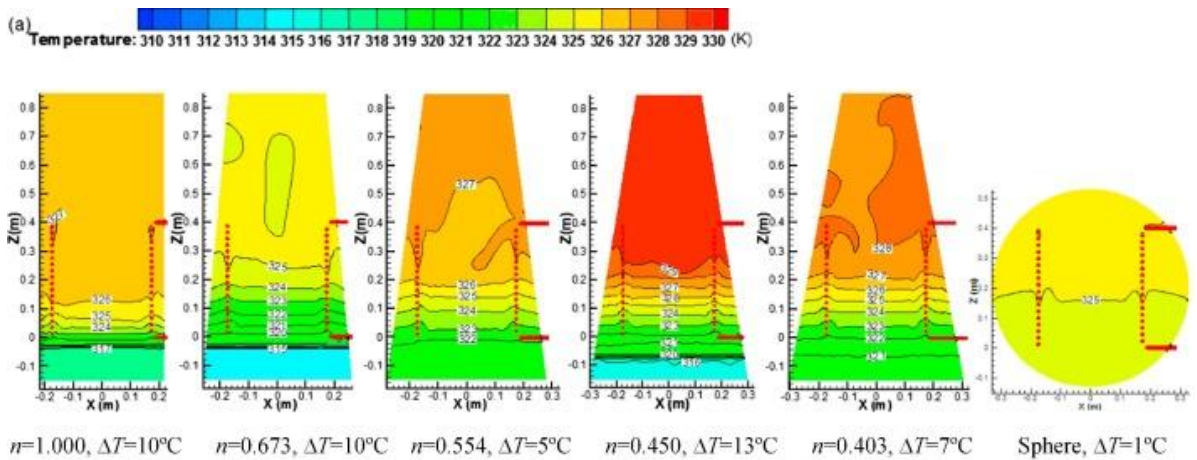
5. Geometrie zásobníku

Nádrž zásobníku tepla může být vyrobena v různých tvarech. Ten se odvíjí od objemu a případně prostoru, kde bude umístěn. Zásobníky se vyrábí zejména válcové a hranaté. Studie ve článku [10] se zabývala numerickou analýzou tvaru zásobníku. Byl zjištěn významný vliv tvaru akumulčních zásobníků na teplotní stratifikaci a jejich účinnost.

5.1 Válcový a komolý kužel

Teplotní stratifikace i účinnost ohřevu zásobníku ve tvaru komolého kužele byla lepší v porovnání s válcovým a sférickým. Z hlediska teplotní stratifikace byl nejlepší poměr poloměru 0,45. Co se týče účinnosti ohřevu zásobníku byl nejlepší poměr poloměru 0,55. Nejhorší teplotní stratifikace a účinnost ohřevu byla na sférickém zásobníku.

Vzhledem k optimálnímu tvaru vychází nejlépe jako vodní stratifikační zásobník komolý kužel. Protože poměr poloměrů klesal, došlo v zásobníku k viditelnější teplotní stratifikaci, ale účinnost ohřevu se snižovala. Zvýšení teplotní stratifikace v zásobníku tedy ne vždy zlepšilo tepelnou účinnost.

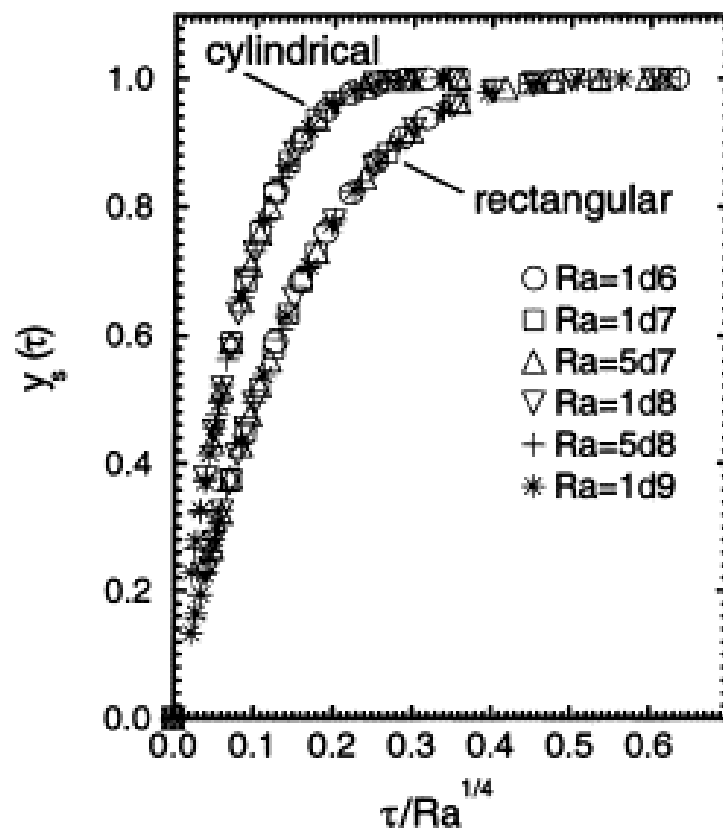


Porovnání tvarů zásobníků - obr. 4 [10]

5.2 Hranatý a válcový

Studie ve článku [9] se zabývala numerickou analýzou tvaru, kde porovnávala rychlost ohřevu hranatého a válcového zásobníku. Simulace představovala nestabilní přirozené proudění vody teplé vody. Na obrázku 5 je znázorněn průběh teploty v čase. Na vodorovné ose je čas vynesen proti Rayleighově číslu na $1/4$ pro jeho 6 čísel.

Z obrázku je viditelný rychlejší ohřev válcového zásobníku oproti hranatému. Při změně teploty ve válcovém zásobníku je vzdálenost od středu stejná, kdežto v případě hranatého jsou jeho rohy vzdálenější a ohřev je složitější.

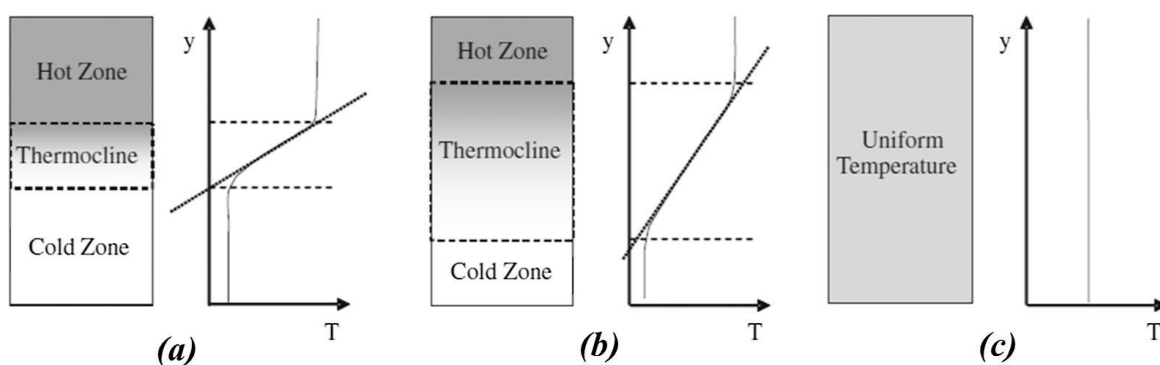


Rychlost ohřevu zásobníku - obr. 5 [9]

6. Typy stratifikačních vestaveb

Při akumulaci tepla v kapalinách tedy i vodě, můžeme ovlivnit její teplotní rozvrstvení. Vlivem snižující se objemové hmotnosti vody se zvyšující se teplotou, stoupá teplá voda vzhůru a vytlačí chladnou vodu. Pokud zajistíme řízený vstup a výstup ze zásobníku, můžeme tohoto jevu využít použitím např. difuzorů nebo horizontálních plátů v zásobníku, které brání velkému proudění. V porovnání s klasickým akumulacním zásobníkem máme k dispozici potřebnou teplotu ze zásobníku a nemusíme ji na trase směšovat trojcestným ventilem.

V klasických akumulacních zásobnících dochází k promíchání vnitřního média a není umožněn řízený odběr dané teploty. U stratifikačních nádrží je právě umožněn řízený odběr určité teploty podle výšky odběrného místa.



Termoklina - obr. 6 [2]

Termoklina je oblast rozložení teplot v zásobníku. Velikost termokliny ovlivňuje geometrický tvar nádrže, geometrie vstupů a výstupů z nádrže a dále rychlost proudící vody včetně její teploty. V případě vody vstupující do zásobníku s výrazně jinou teplotou, dojde k velkým vztakovým silám a oblast termokliny se zvětší – obrázek 6 (b). Pokud dojde k dokonalému promíchání vody v zásobníku, je termoklina svislá přímka – obrázek 6 (c)

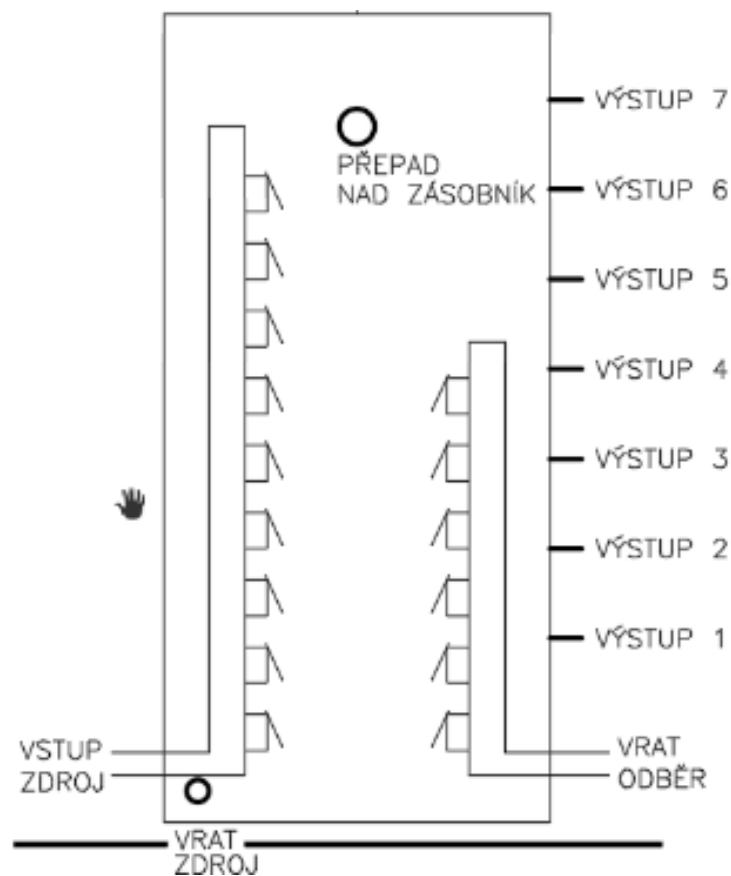
Kvalitní rozložení tepla v nádrži po vrstvách vede k úspoře energie. Snahou je tedy stratifikaci vylepšovat. Na základě provedených studií je prokázáno jak matematickým modelem, tak i experimentálním měřením vliv stratifikačních vestaveb na pozitivní rozložení tepla po výšce zásobníku. [2]

Systémy mohou být beztlaké, např. podzemní zásobník tepla umístěný v podlží domu. Tlakové systémy jsou chráněny expanzní nádobou a jsou propojeny s dalšími spotřebiči či zdroji tepla.

6.1 Otevřený systém

Otevřený systém vestavby je takový, kdy teplotná látka je tatáž ve zdroji tepla např. solárním kolektoru a zároveň ve spotřebiči např. podlahovém vytápění. Tento systém nelze použít při ohřevu teplé vody, kdy musí být odděleno teplotné médium. Výhoda otevřené vestavby je okamžité ohřátí média vedoucí ke spotřebiči. Nevýhodou je horší stratifikace vlivem promíchávání. Vliv roztažnosti teplotné látky se v tomto systému řeší otevřenou expanzní nádobou umístěnou v dostatečné výšce nad oběhovými čerpadly z důvodu správného dispozičního tlaku.

Snahou eliminovat vzájemné promíchání je umístění difuzoru na přívodu média do nádrže jak od zdroje, tak i od vratné větve ze spotřebiče. Materiál potrubí je do zásobníku klasicky navařený a následná vnitřní vestavba může být tvořena HT tvarovkami, které jsou zakončené nerezovými klapkami – obrázek 7. Jako to je v demonstrační laboratoři, kde se provádí experimenty.

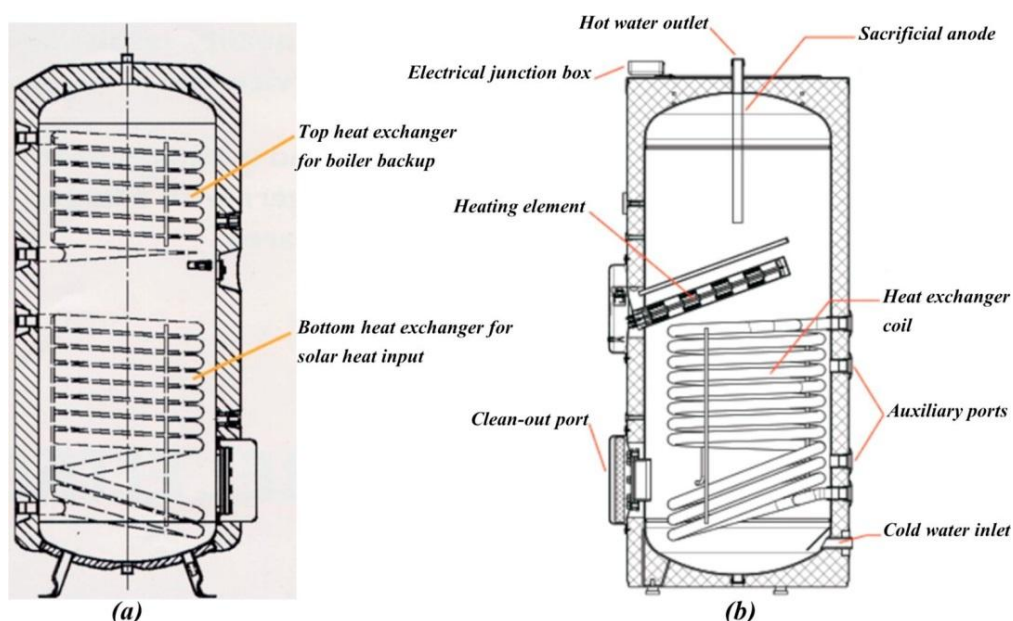


Otevřený systém - obr. 7

6.2 Uzavřený systém

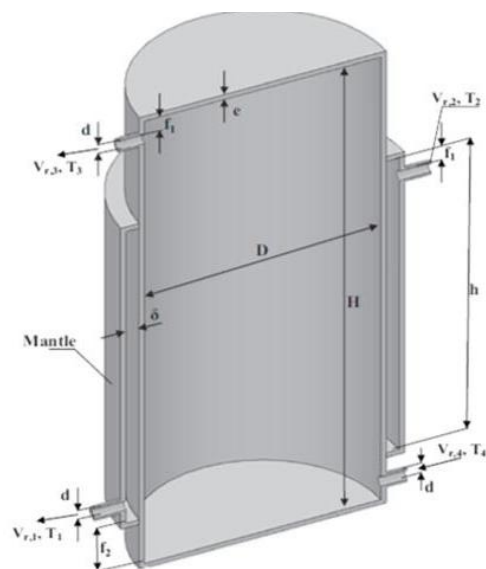
Uzavřený systém vestavby je příznivější pro tepelnou stratifikaci, jelikož nedochází k vzájemnému promíchání jednotlivých medií. To může mít negativní vliv na rychlost stratifikace. Tento systém se využívá při přímém ohřevu teplé vody.

V nádrži může být několik potrubních spirál. Primárně se používá pro zapojení solárních kolektorů. Sekundárně se používá pro zapojení přídavného zdroje tepla jako je elektrokotel, plynový kotel či kotel na tuhá paliva. – obrázek 8 (a). Jako záložní systém se používá elektrická topná spirála – obrázek 8 (b), která slouží při výpadku některého ze zdrojů, případně při extrémní potřebě energie. [3]



Uzavřený systém 1 - obr. 8 [2]

Další možností ohřevu uzavřeným systémem je skrze plášť zásobníku. Na obrázku 9 je konstrukce zásobníku, kde je topná voda přiváděna v horní části a odváděna v dolní části vnějšího pláště. Ohřívána voda v akumulacím zásobníku je v přiváděna v dolní a odváděna v horní části zásobníku. Stejný princip ohřevu lze uplatnit i u stratifikačního zásobníku, kde jsou odběrná místa po výšce. [2] Nevýhodou tohoto provedení bude nesteromerné ohřívání zásobníku.



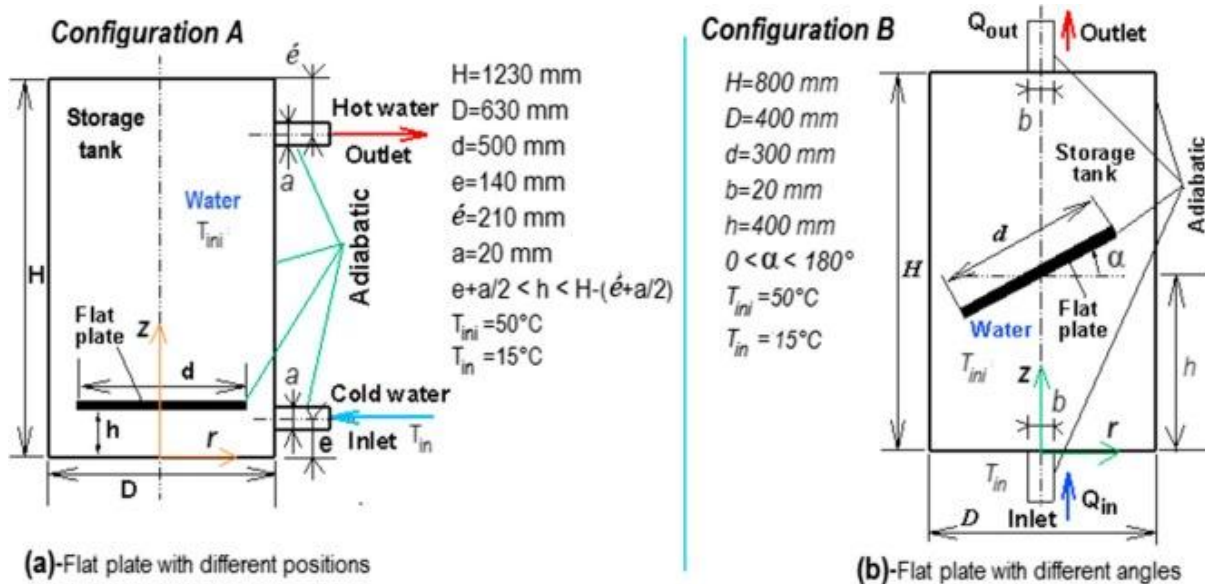
Uzavřený systém 2 - obr. 9 [2]

6.3 Desky uvnitř nádrže

Ke zlepšení teplotní stratifikace jde dospět několika výše popsanými kroky. Dalším je při absenci difuzorů umístění desky uvnitř zásobníku, která brání velkému vztlaku vody. Pokud je Richardsonovo číadlo větší než 1, znamená to, že vztlakové síly překonaly směšovací síly a dochází tedy k samovolnému promíchávání zásobníku a teplotní stratifikace zaniká.

Studie se v článku [11] zabývá numerickými simulacemi založenými na dvou konfiguracích zásobníků a vestaveb – obrázek 10.

- Konfigurace A má umístěn přívod i odvod po stranách a vnitřní desky umístěné vodorovně. V rámci této konfigurace byly desky vespod, uprostřed, v horní části zásobníku a také vzájemně nakombinované.
- Konfigurace B má umístěn přívod i odvod ve vertikální ose zásobníku. V rámci této konfigurace byla umístěna jedna vnitřní deska veprostřed zásobníku, pro kterou byly řešeny 4 stavy podle úhlu natočení, přičemž jeden stav s nulovým úhlem odpovídá poloze desky z konfigurace A, avšak má jiné vstupy.

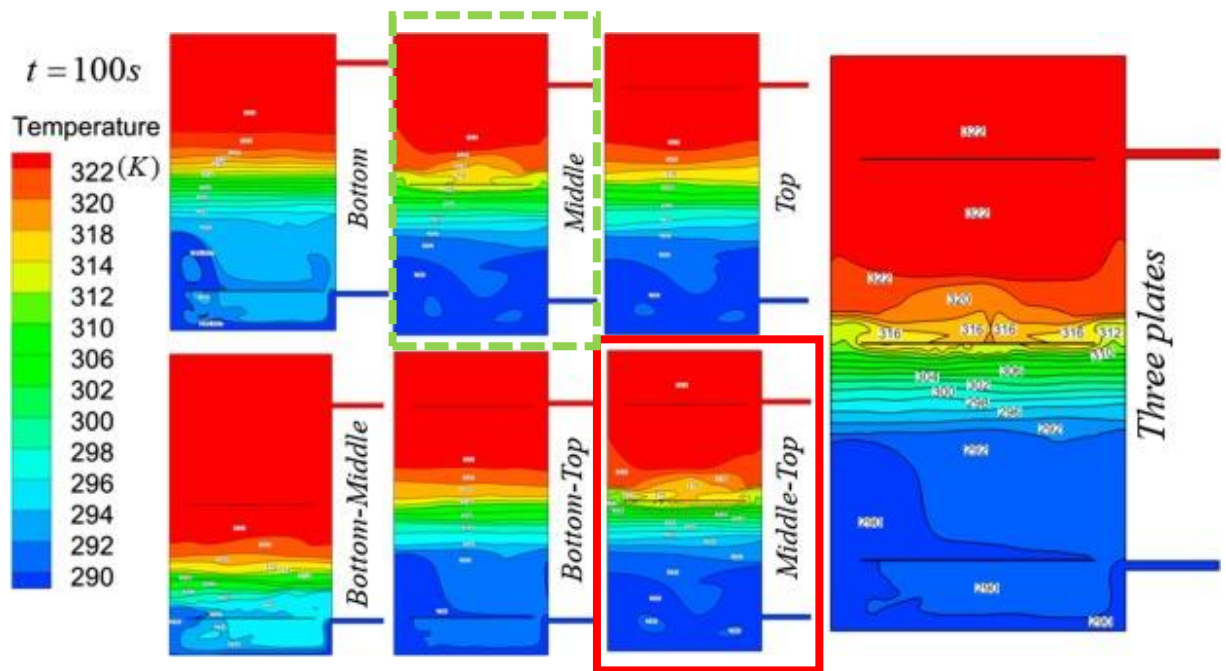


Konfigurace vnitřních desek - obr. 10 [11]

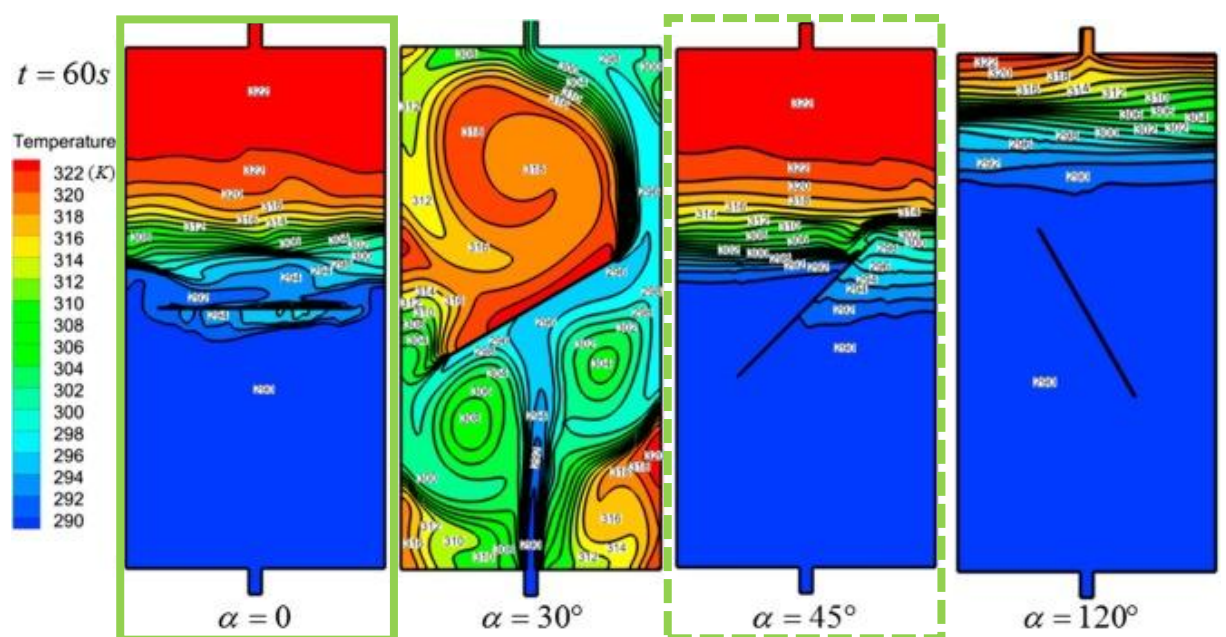
Při konfiguraci A, můžeme vidět na obrázku 11, přibližně stejné rozložení stratifikace až na polohu spodek a střed, kdy v tomto případě je nejvíce energie v horní části zásobníku. Při konfiguraci B je si blíže podobná poloha desky s 0° a deskou ve střední části z konfigurace A, ačkoliv mají jinou polohu vstupů a výstupů.

Poloha této desky rozrazí přívod média do zásobníku a zajišťuje tak homogenní teplotní stratifikaci. Současně je rozvrstvení na horní straně zásobníku téměř stejné pro případy 0 a 45 °.

Hlavním zjištěním provedené numerické simulace bylo pro konfiguraci A – obrázek 12, optimální uspořádání ve středu a nahoře. Pro konfiguraci B – obrázek 13, byla optimální poloha desky pod úhlem 0°, kdy bylo dosahováno největšího termoklinu.



Porovnání desek konfigurace A - obr. 11 [11]

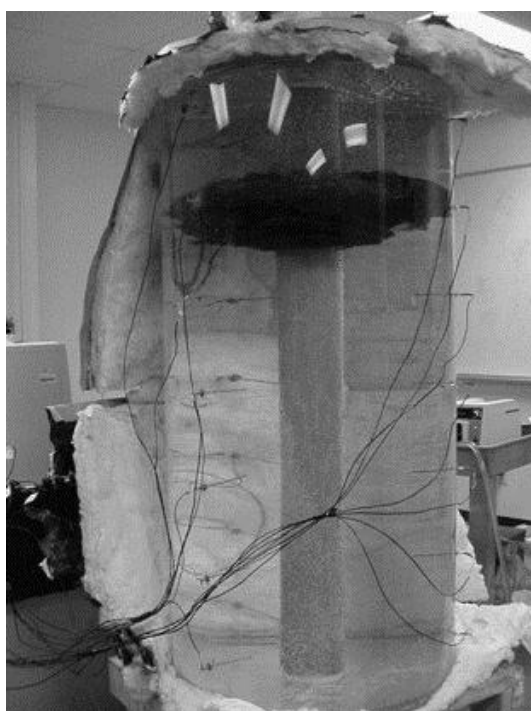


Porovnání desek konfigurace B - obr. 12 [11]

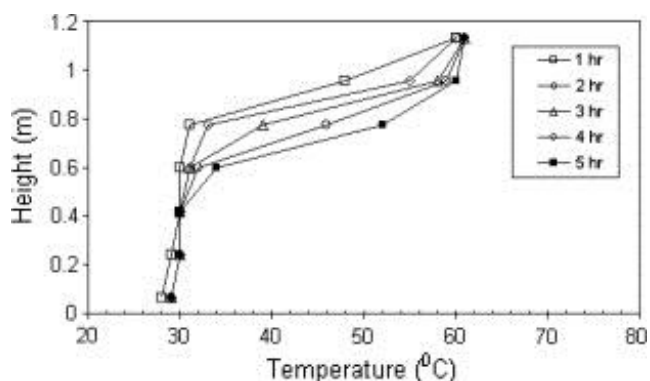
7. Materiál potrubí

Pokud do zásobníku přivedeme médium neboli vodu i výrazně jiné teplotě, než jaká je v místě zásobníku, dochází k destratifikaci. Další možností je použití speciálního přívodního potrubí. Touto problematikou se zabývali v experimentu [5], kde vycházeli z předpokladu, že do zásobníku vstupuje voda o jiné teplotě, než jaká je v zásobníku a je žádoucí zachovat jeho stratifikaci. Pro potlačení výše uvedených nežádoucích účinků byl použit porézní kryt, který umožňoval vstupující vodě procházet teplejší vodou v horní oblasti zásobníku bez rozmíchání.

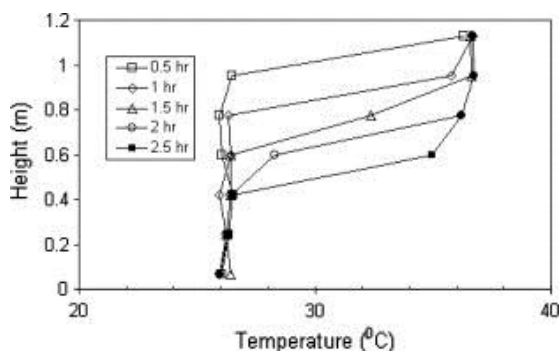
V rámci experimentu s porézním potrubím sestavili vodní zásobník o výšce 1,2 m – obrázek 13. Do zásobníku přiváděli horkou vodu o teplotě 62 °C obarvenou malým množstvím černého inkoustu, z důvodu vizualizace vodního toku. Experiment trval 5 hodin a dle obrázku 14 je viditelná funkčnost porézního potrubí.



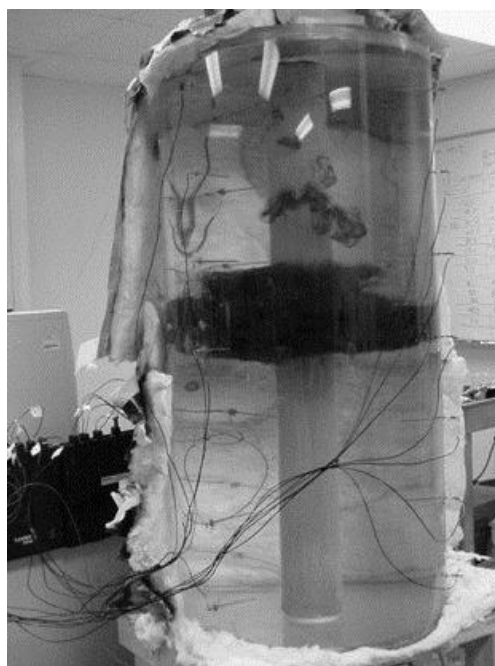
Porézní potrubí - obr. 13 [5]



Průběh teplot s porézním potrubím - obr. 14 [5]



Průběh teplot s porézním potrubím 2 - obr. 15 [5]



Porézní potrubí 2 - obr. 16 [5]

8. Realizované projekty

Zejména vodní zásobníky pro dlouhodobou akumulaci tepla se liší od ostatních hlavně svým provedením. Některé jsou nadzemní, jiné jsou skryté pod zemí. Dle článku [6] několik realizovaných velkoobjemových zásobníků pro sezónní akumulaci tepla

Friedrichshafen 1997 (SRN)

Zásobník měl sloužit pro 280 bytů. Jeho celkový objem je 12 000 m³. Plocha solárních kolektorů je 2 700 m². Konstrukce zásobníku je tvořena vnitřním pláštěm z nerezové ocele, nosná vrstva je ze železobetonu, tepelná izolace z minerální vlny chráněná z vnějšku hydroizolační fólií.



Friedrichshafen 1997 – obr. 17 [6]

Hannover 2000 (SRN)

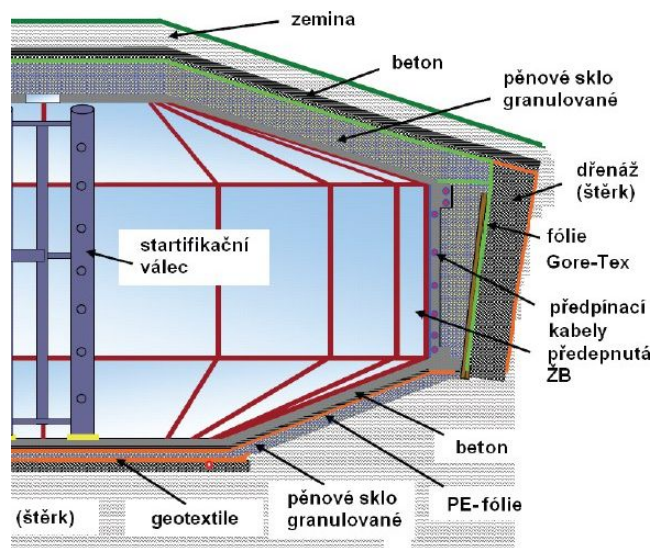
Zásobník obsluhuje teplem celkem 106 bytů. Jeho objem je 2 750 m³. Plocha solárních kolektorů je 1 470 m². Konstrukce zásobníku je z vnitřní strany tvořena vodostavebním železobetonem, hydroizolací, tepelnou izolací z pěnového skla, fólie, drenáže a zeminy. Zásobník je tedy kompletně umístěný pod terénem.



Hannover 2000 - obr. 18 [6]

Mnichov 2007 (SRN)

Zásobník dodává energii celkem 106 bytům. Jeho objem je 5700 m³. Plocha solárních kolektorů je 2761 m². Konstrukce je částečně zapuštěná do země, ačkoliv je na zásobníku vrstva zeminy. Nosný skelet tvoří železobetonová předepnutá prefabrikovaná konstrukce, která je izolovaná velkou vrstvou pěnového skla. Uvnitř zásobníku je integrovaná vestavba, která slouží jako difuzor.



Mnichov 2007 - obr. 19 [6]

Slatiňany 1996 (ČR)

Zásobník slouží pro domov sociálních služeb. Vytápěná plocha je přibližně 1000 m². Objem zásobníku je 1080 m³, plocha solárních kolektorů je jen 148 m². Specifikem tohoto systému je tepelné čerpadlo voda-voda, které dokáže odebírat ze zásobníku vodu až do teploty 12 °C. Toto velmi zvyšuje jeho účinnost. Konstrukce zásobníku je kovová, vnitřní vrstvu tvoří svařovaný plech, který je vynesena na trubkové konstrukci s tepelnou izolací.



Slatiňany 1996 - obr. 20 [6]

C. Metodika měření

9. Popis experimentálního zařízení

Zařízení pro experimentální měření se nachází v Demonstrační laboratoři TZB, katedry technických zařízení budov, fakulty stavební ČVUT v Praze. Laboratoř byla vybudována v roce 2008 pro laboratorní práce studentů a pro experimentální práce studentů magisterského a doktorandského studia.

V laboratoři se nachází jako hlavní zdroj tepla elektrický kotel Protherm REJNOK o deklarovaném štítkovém výkonu 6-18 kW (avšak při měření byl zjištěn vyšší) a hlavní zdroj chladu tepelné čerpadlo Viessman Vitocal 300. Mezi zařízeními je i vzduchotechnická jednotka s rekuperací a zvlhčováním, klimatizovaná komora a otopná soustava pro hydraulické vyvažování.

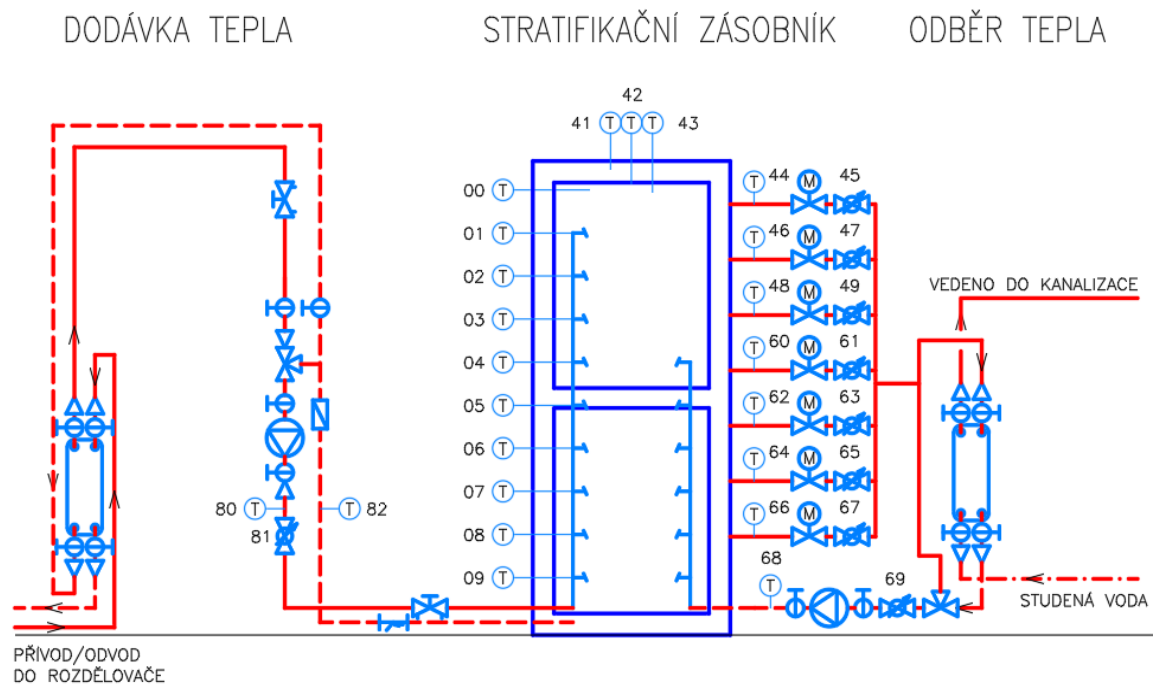


Pohled v laboratoři - obr. 21

Měření probíhalo na vertikálním zásobníku o objemu 660 l. Vnitřní plášť je tvořen z nerezové oceli. Vestavba uvnitř zásobníku slouží jako difuzor pro přívod teplé vody ze zdroje tepla a přívod ochlazené vody ze spotřebiče. Vestavba je tvořena z HT trubek s nerezovými klapkami na výstupu z důvodu usměrnění toku. Rozsah provozních teplot může být 25 °C až 70 °C. Spodní omezení je ovlivněno okolní teplotou případně teplotou ochlazované vody z vodovodu. Zásobník je beztlaký, s přepadem expandované vody do odpadu. Dodávka tepla pro zásobník je primárně přes deskový výměník RHC 15/30, který je napojen přes hromadný rozdělovač na elektro kotel – obrázek 21. Sekundárním zdrojem tepla je elektrická topná spirála o výkonu cca 4 kW. Celkový topný výkon může být přibližně 24,8 kW.

Po výšce zásobníku jsou umístěna teplotní čidla T0-T9 ve vzdálenosti 150 mm – obrázek 25. Na trase v potrubí jsou teplotní čidla ponorná PT204 – obrázek 24. Nahoře v zásobníku jsou umístěna 3 teplotní čidla 41-43 resp. H3-H1 ve vzdálenosti 100 mm – obrázek 25.

Průtokoměry jsou ponorná značky AHLBORN VTH15M/P s průtokem 2 - 40 l/minutu – obrázek 24. Případně byl použit příložený ultrazvukový průtokoměr PortaSonic 7000P

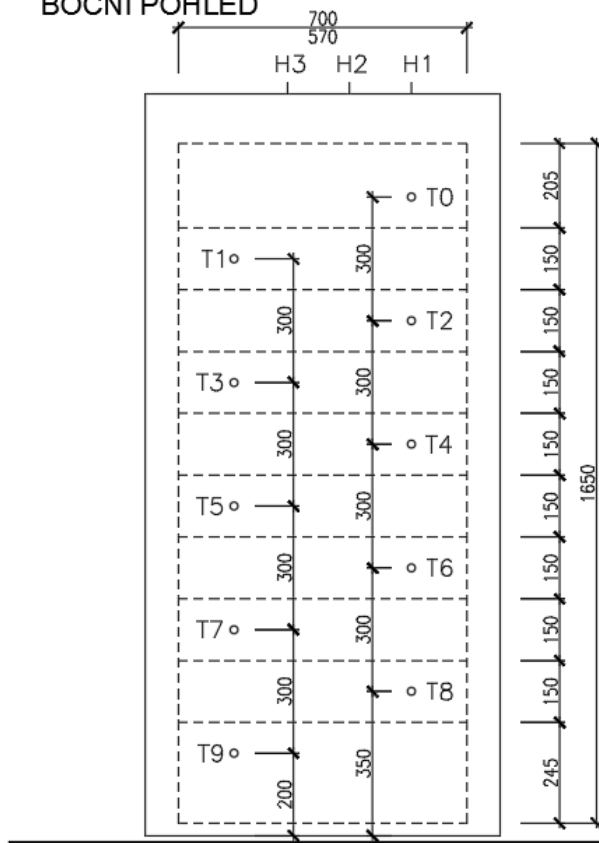


Pohled na hlavní ovládání zásobníku – obr. 23

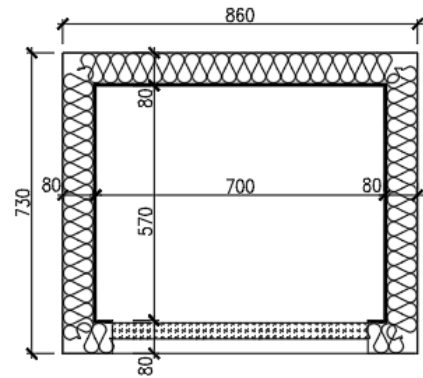


Pohled na výstupní větvě ze zásobníku – obr. 24

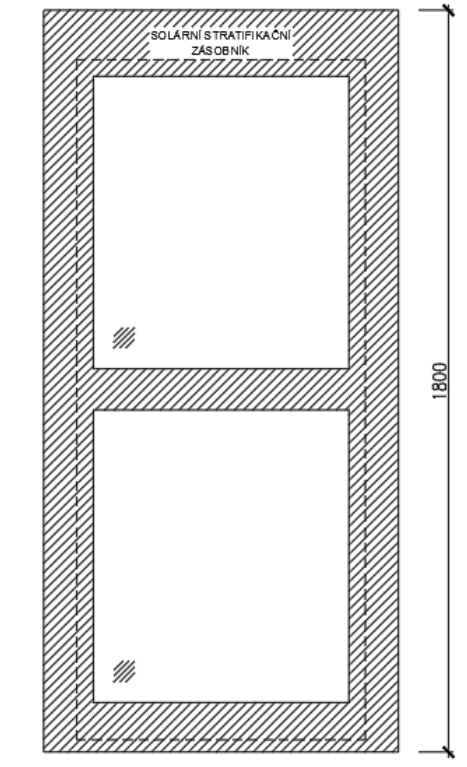
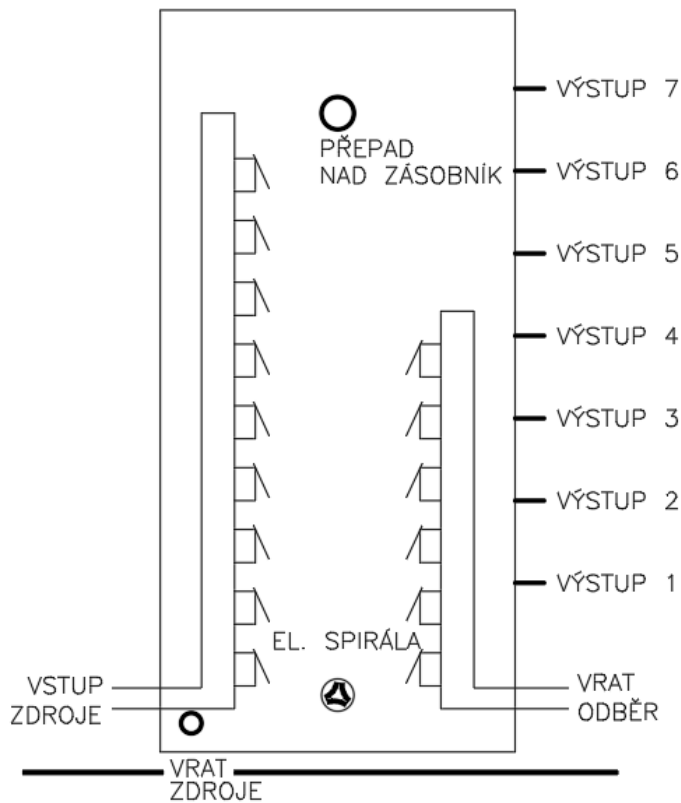
TEPLOTNÍ ČIDLA A JEJICH OBJEMY
BOČNÍ POHLED



PŮDORYS ZÁSOBNÍKU



PŘEHLED VESTAVBY

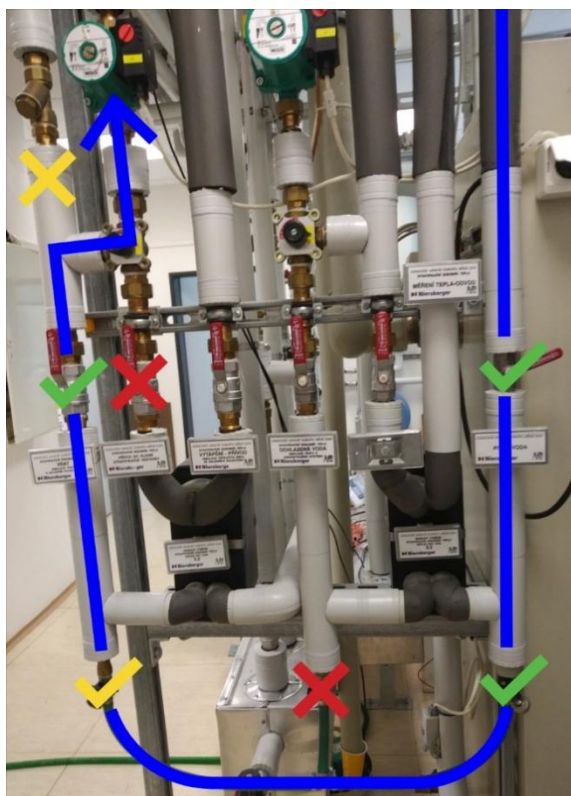


Umístění teplotních čidel a schéma vestavby - obr. 25

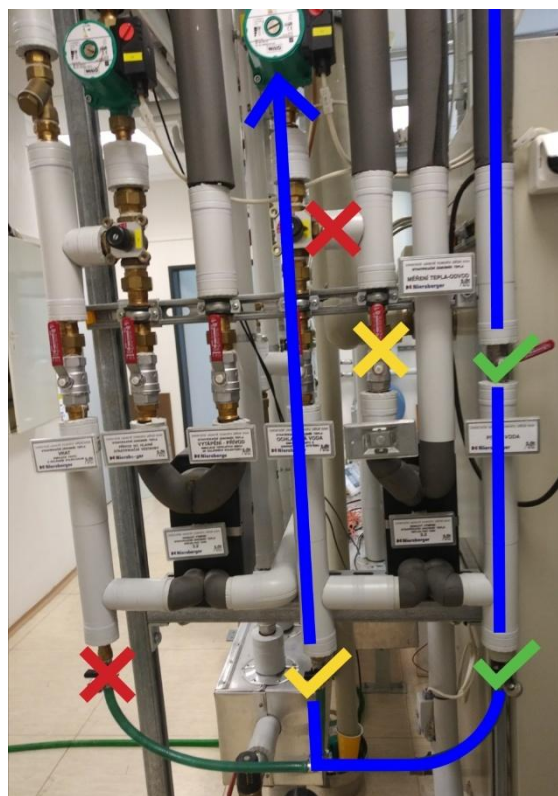
10. Doporučení pro práci se zásobníkem

Během práce na experimentu jsem si prošel několika jeho stavy. Touto kapitolou bych rád shrnul, zopakoval a doplnil doporučení pro práci se stratifikačním zásobníkem v laboratoři TZB.

- Obsluha kotle je dostatečně popsána v manuálu pro obsluhu laboratoře [14].
- Před spuštěním ohřevu zásobníku doporučuji postupně otevřít všechny kulové kohouty a vyzkoušet chod trojcestných ventilů.
- Před dopouštěním zásobníku umístit vhodnou nádobu pod přepadový odvod vody.
- Dopouštění ohřivací větve – obrázek 26. Nejprve uzavřít výstup z deskového výměníku, poté nastavit trojcestný ventil do polohy uzavřen výstup z deskového výměníku a uzavřít kulový kohout na vratky. Po těchto krocích se může pustit dopouštění studenou vodou a dvěma „vypouštěcími“ ventily do ohřivací větve. Jelikož je dopouštění napojeno k vybíjecí větvi půjde část vody do chladicího výměníku, proto doporučuji při dostatečném průtoku zapnout oběhové čerpadlo, které si vodu nasaje. Jakmile začne voda téct přepadem, otevřeme kulový kohout na vrtace (žlutý křížek) a uzavřeme přívod vody (žlutá fajfka), včetně celého přívodu vody.
- Dopouštění chladicí větve je obdobné ohřivací větvi – obrázek 27.



Dopouštění topné větve - obr. 26



Dopouštění chladicí větve - obr. 27

- Pokud byl zásobník po dobu několika týdnů mimo provoz, mohou být zatuhlá oběhová čerpadla. Ta se po zapnutí jednoduše nerozeběhnou. Odšroubujeme kovovou krytku a plochým šroubovákem otočíme hřídel, tím ji uvolníme a následně krytku zašroubujeme.
- Při dopouštění zásobníku uslyšíme syčení odvodušňovacích ventilů. Pokud ne, ověříme jejich funkčnost.
- Jakmile jsou obě větve dopuštěné, spustíme obě oběhová čerpadla na nejvyšší otáčky po dobu několika vteřin a současně s otevřenými všemi kulovými kohouty na odběrech tepla ze zásobníku.
- Během experimentu, při kterém dochází k ochlazení zásobníku se snižuje dispoziční tlak čerpadel. To má vliv na jejich průtok a při nízkém tlaku se zastaví. Proto je potřeba dopouštět vodu během experimentu jednou až dvakrát či třikrát, podle teploty.
- Při vypuštěném zásobníku může nastat zavzdušnění horní části. Odvzdušnění provedeme povolením a povytažením tepelných čidel.
- Pokud je zásobník vypuštěn a bude se znovu napouštět musí být otevřeny všechny kulové kohouty.
- Po skončení experimentu (při odchodu z laboratoře) otevřít všechny kulové kohouty na odběrech tepla ze zásobníku, z důvodu možných podtlaků.
- Při práci se zásobníkem doporučuji uzavření ostatních větví na rozdělovači/sběrači. Zabrání se tím nechtěným únikům tepla, sníží se odpor a zvýší průtok deskovým výměníkem.
- Doporučení pro správnou funkci elektrického kotle.
 - Pokud svítí oranžová kontrolka, znamená nejspíše pokles tlaku topné vody. Minimální dispoziční tlak je alespoň 1 bar. Tento tlak musí být na elektrickém kotli. Pokud během experimentu dojde k poklesu je nutné okruh dopustit např. přes vypouštěcí ventil hadicí napojenou na vodovod. Upozornění, ne vždy vypne kotel už při 1 baru (mně osobně až při 0,6).
 - Nevypínat kotel ihned po dokončení nahřívání. Kotel má nastavený čas 40 vteřin, kdy má doběh od momentu vypnutí topných spirál.
- Při splnění výše zmíněných bodů, by měl být zajištěn bezproblémový chod stratifikačního zásobníku.

11. Popis experimentů

11.1 Příprava pro experiment

Na stratifikačním zásobníku bylo provedeno několik experimentálních měření, která se postupně modifikovala, tak aby představila vybrané stavy z běžného provozu.

Před zahájením měření bylo provedeno čištění zásobníku. Míra usazenin pravděpodobně mohla mít vliv na průtok systémem a zároveň působily velmi nevzhledně při prosklené stěně. Nepředpokládá se, že by usazeniny měly negativní vliv na stratifikaci vodního zásobníku.



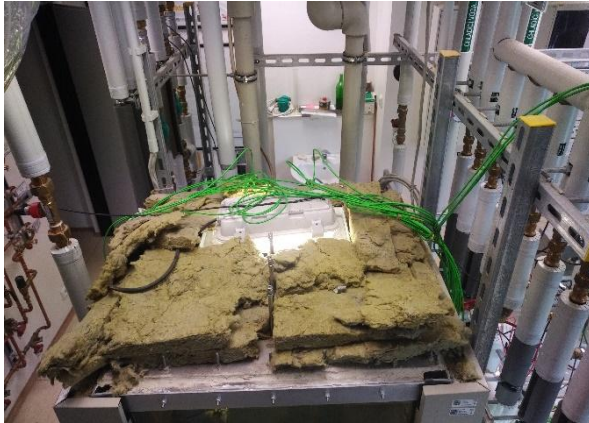
Znečištěný zásobník - obr. 28



Čistý zásobník - obr. 29

Dále byla provedena zběžná kontrola jako je např funkčnost teplotních čidel, průtokoměrů, čerpadel, odvzdušňovacích ventilů a chodu trojcestných ventilů. Jako nefunkční se projevilo několik průtokoměrů, ty byly označeny a přehozeny za funkční tak, aby neomezovaly průběh experimentu. Dále se zjistil problém s oběhovým čerpadlem pro chladicí okruh, při poklesu dispozičního tlaku a mírném zavzdušnění systému čerpadlo kolabovalo. To se vyřešilo záměnou oběhových čerpadel, což problém vyřešilo.

Během používání zásobníku a nutnosti manipulace okolo zásobníku se časem poškodila tepelná izolace ve víku a na předním panelu pláště. Izolace byla nahrazena a vyměněna za novou s obdobnými parametry a na konec byl osazen původní plechový zákryt s krásným štítkem.



Původní izolace - obr. 30



Nová izolace - obr. 31

Zásobník po dokončení zateplen a osazen původními kryty karoserie.



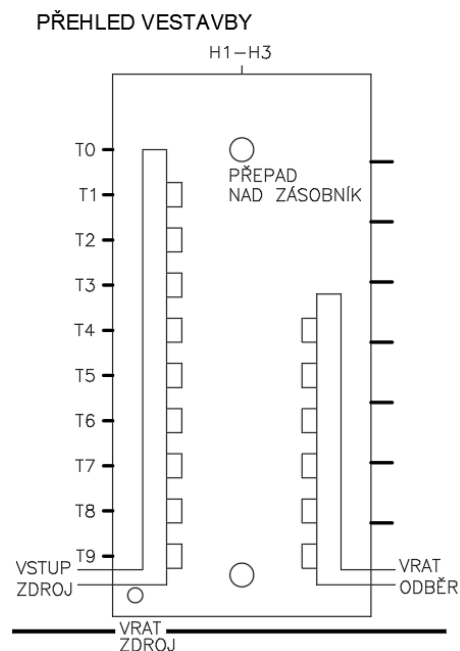
Zásobník před experimentem - obr. 32



Zásobník během experimentu - obr. 33

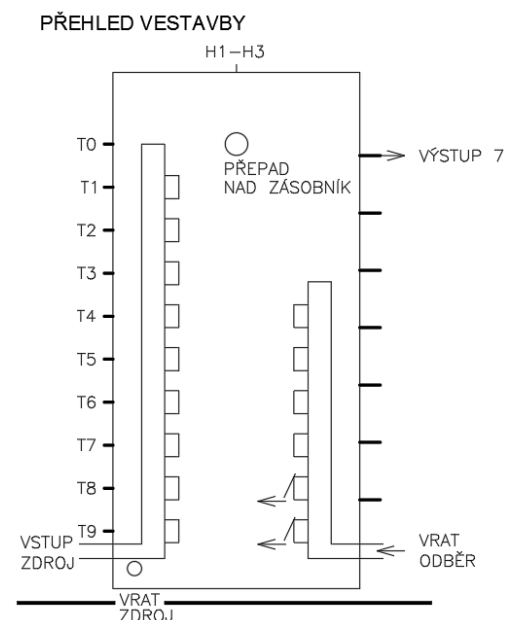
11.2 Výčet experimentů

- **První** měření bylo za účelem zjištění skutečné ztráty tepla pláštěm. Zásobník byl ohřát na teplotu 45-55 °C a poté byl měřen pokles teploty samovolným ochlazením po dobu několika desítek hodin. Jako porovnávací hodnota byla určena 1,16 W/(m²·K) podle článku [12], který porovnává výpočetní model v programu TRNSYS a skutečné chování zásobníku.



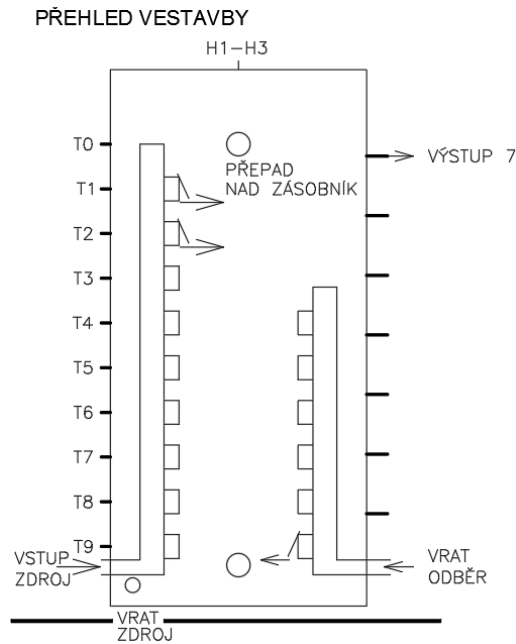
Chování vestavby pro první experiment - obr. 34

- **Druhé** měření bylo provedeno na ohřátém zásobníku na teplotu při horním líci 52 °C a při spodním líci 45 °C. Tento experiment simuloval odběr tepla stálým výkonem mezi 5-6 kW. Parametry vybíjení se během experimentu mírně měnily z důvodu různé účinnosti deskového výměníku a otáček oběhového čerpadla podle jeho teploty a aktuálního dispozičního tlaku. Obdobný experiment již prováděli Daniel Adamovský a kolektiv [12], avšak s jiným vybíjecím výkonem.

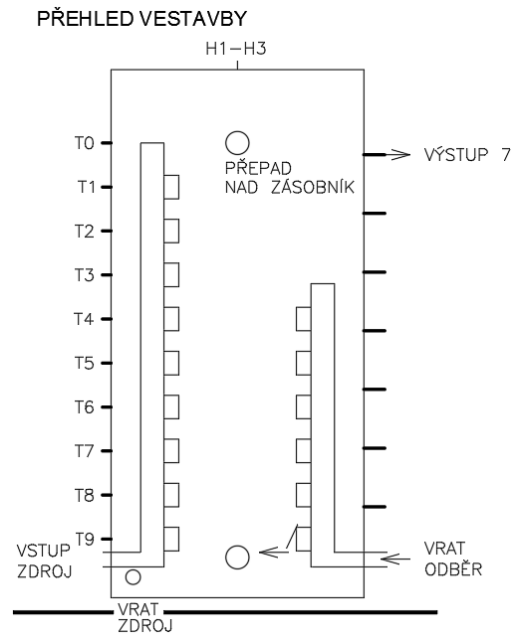


Chování vestavby pro druhý experiment - obr. 35

- **Třetí** měření simuluje při přehřátém zásobníku kombinaci ochlazování a zároveň jeho ohřev výkonem vyšším, než je ochlazování do teploty 53 °C a následně jen ochlazování do teploty 42 °C. Při ustáleném stavu by se začal zásobník opět dohřívat s ochlazováním na teplotu 53 °C – obrázek 36 a 37.

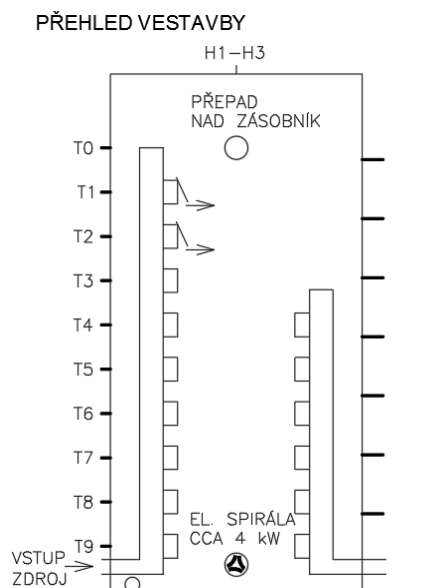


Chování vestavby pro třetí experiment – obr. 36

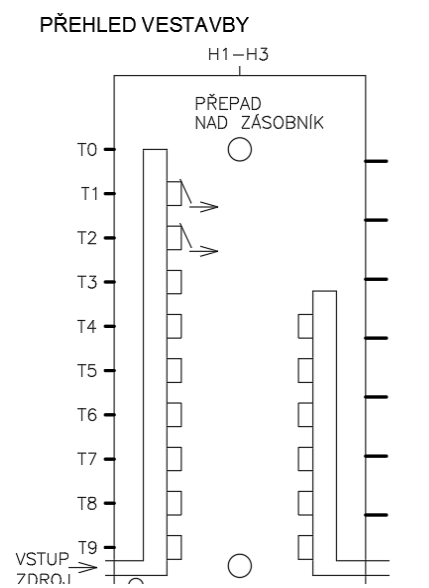


Chování vestavby pro třetí experiment – obr. 37

- **Čtvrtý** experiment vyhodnocoval chování zásobníku, kde byla zohledněna i jeho tepelná ztráta zjištěná prvním experimentem. Tento experiment by měl představovat chování zásobníku během měření a ukázat nepřesnost měření. Součtem odebraného výkonu a tepelné ztráty bychom měli dostat ustálený stav.
- **Páté** měření představuje srovnání dvou různých způsobů ohřevu zásobníku. Prvním stavem je ohřev elektrokotlem v kombinaci s topnou spirálou umístěnou u dna zásobníku celkovém výkonu přibližně 22 kW. Druhým stavem je ohřátí zásobníku pouze elektrokotlem o výkonu přibližně 18 kW.



Chování vestavby pro pátý experiment – obr. 38.2



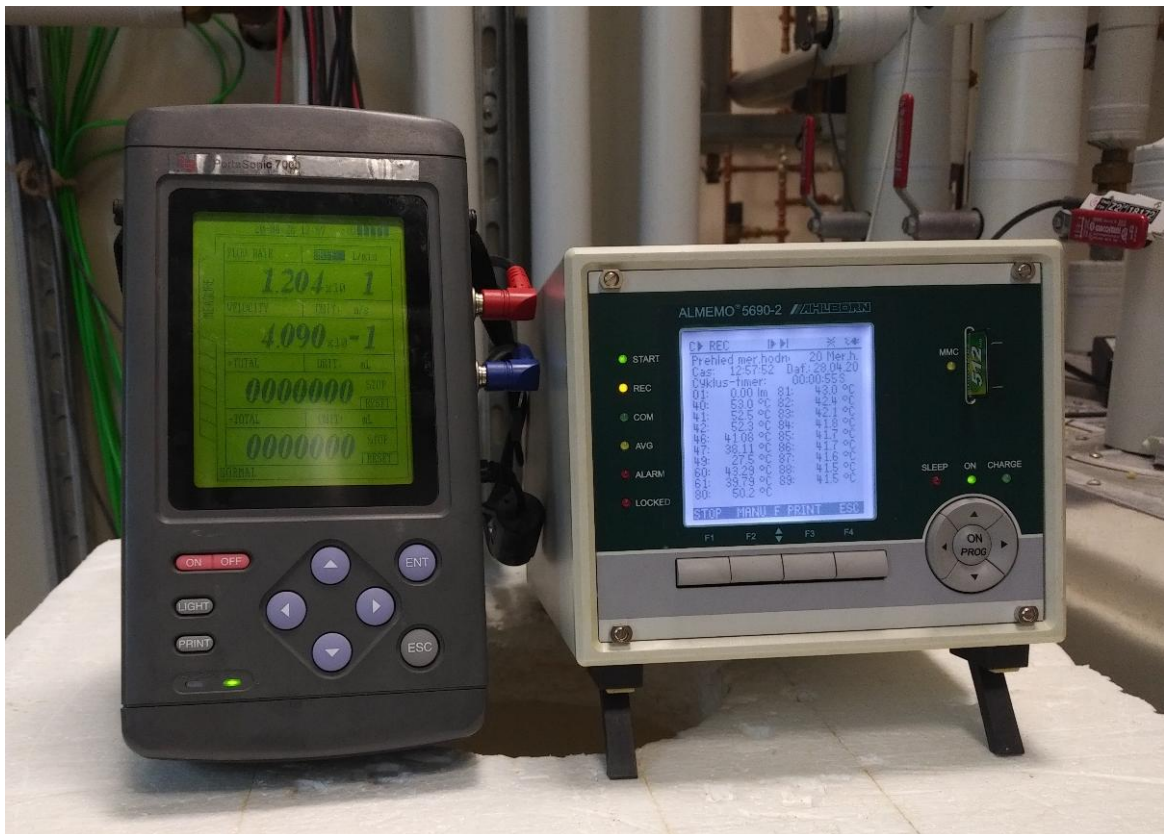
Chování vestavby pro pátý experiment – obr. 39

12. Způsob zápisu a vyhodnocování měřených dat

12.1 Měřicí zařízení

Zápis dat z teplotních a průtokových čidel probíhal měřicí ústřednou ALMEMO 5690-2 AHLBORN – obrázek 40. Data byla ukládána minutovým intervalem. Délka měření probíhala v závislosti na daném experimentu od několika desítek hodin po jednotky hodin. V místech, kde nebylo možné měřit průtok průtokovými čidly, byl použit příložený ultrazvukový průtokoměr PortaSonic 7000P. Data byla následně upravena a vyhodnocena v programu Microsoft Excel.

Teplota ve vrstvách v zásobníku byla získávána odporovými termočláňkovými čidly typu K a teplota vody v každé větvi potrubí ponornými čidly PT100.



Měřicí zařízení pro experimenty - obr. 40

12.2 Vyhodnocování měřených dat

Při vyhodnocování tepelné ztráty byla měřena teplota po výšce zásobníku a teplota v okolí. Při vyhodnocování dat jsem minutové kroky zprůměroval na hodinové, z důvodu neustáleného experimentálního stavu při měření. Z hodinového kroku byl vypočten rozdíl energie (4), který znamenal danou ztrátu. Ta byla následně opravena o rozdíl teplot s okolím a plochou zásobníku (5). Ze tří měření byl stanoven průměrný součinitel prostupu tepla. (6)

Při ostatních experimentech byla použita kalorimetrická rovnice pro výpočet odebíraného/dodávaného výkonu (2), případně pro výpočet energie v zásobníku (3).

Použité konstanty při výpočtu:

Objem zásobníku	$V = 0,66 \text{ m}^3$
Plocha pláště zásobníku	$S = 6,98 \text{ m}^2$
Měřená tepelná kapacita vody	$c = 4180 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$
Hustota vody	$\rho = 990 \text{ kg/m}^3$

Z důvodu minimálního ovlivnění výsledku jsem použil průměrné hodnoty měrné tepelné kapacity a hustoty vody pro teplotu 45 °C dle tab [13].

Výpočet odebíraného/dodávaného výkonu

$$Q_1 = Q_2 \quad (1)$$

$$Q = m \cdot c \cdot (t_1 - t_2) \quad (2)$$

$$E = V \cdot \rho \cdot c \cdot (t_1 - t_2) \quad (3)$$

kde

Q	Tepelný výkon	[W, kW]
E	Tepelná energie	[Wh, kWh]
M	hmotnost	[kg]
m	hmotnostní průtok	[kg/s]
c	měrná tepelná kapacita	[J/(kg·K)]
t ₁	teplota teplé vody	[°C]
t ₂	teplota vratné vody	[°C]

Výpočet průměrného U

$$Q_z = Q_0 - Q_i \quad (4)$$

$$U_i = \frac{Q_z}{S \cdot (T_{zas} - T_{int})} \quad (5)$$

$$U = \frac{U_I + U_{II} + U_{III}}{3} \quad (6)$$

kde

U průměrný součinitel prostupu tepla [W/(m²·K)]

U_i dílčí součinitel prostupu tepla [W/(m²·K)]

T_{zas} průměrná teplota po výšce zásobníku
v intervalu 60 minut [°C]

T_{int} teplota v okolí zásobníku
v intervalu 60 minut [°C]

Q_z pokles energie po 60 minutách [Wh, kWh]

Q₀ energie na začátku časového kroku [Wh, kWh]

Q_i energie na konci časového kroku [Wh, kWh]

Pokud se data při opakovaném experimentu velmi podobala, bylo provedeno jejich zprůměrování.

Při měření horních teplot v zásobníku byla zprůměrována do jednoho označená jako – Horní

Výpočet množství energie v ohřátém zásobníku na průměrnou teplotu 53 °C z okolní teploty 25 °C

$$E = V \cdot \rho \cdot c \cdot (t_1 - t_2) \quad (3)$$

$$E = 0,66 \cdot 990 \cdot 4180 \cdot (53 - 25)$$

$$E = 76\,473\,936\,J = 76\,474\,kJ \text{ nebo také } 21,2\,kWh$$

Kde

t_1 teplota vody v zásobníku [°C]

t_2 teplota v okolí [°C]

Výpočet změny objemu vody v zásobníku pro návrh expanzní nádoby při nejvyšší průměrné teplotě 60 °C

$$\Delta V = V_1 \cdot (\beta \cdot (t_1 - t_2)) \quad (7)$$

$$\Delta V = 660 \cdot (0,0004 \cdot (60 - 25))$$

$$\Delta V = 9,2 \text{ litrů}$$

Kde

Teplotní součinitel objemové roztažnosti $\beta = 0,4e10^{-3} \text{ K}^{-1}$

V_1 původní objem vody v zásobníku [litry]

t_1 teplota vody v zásobníku [°C]

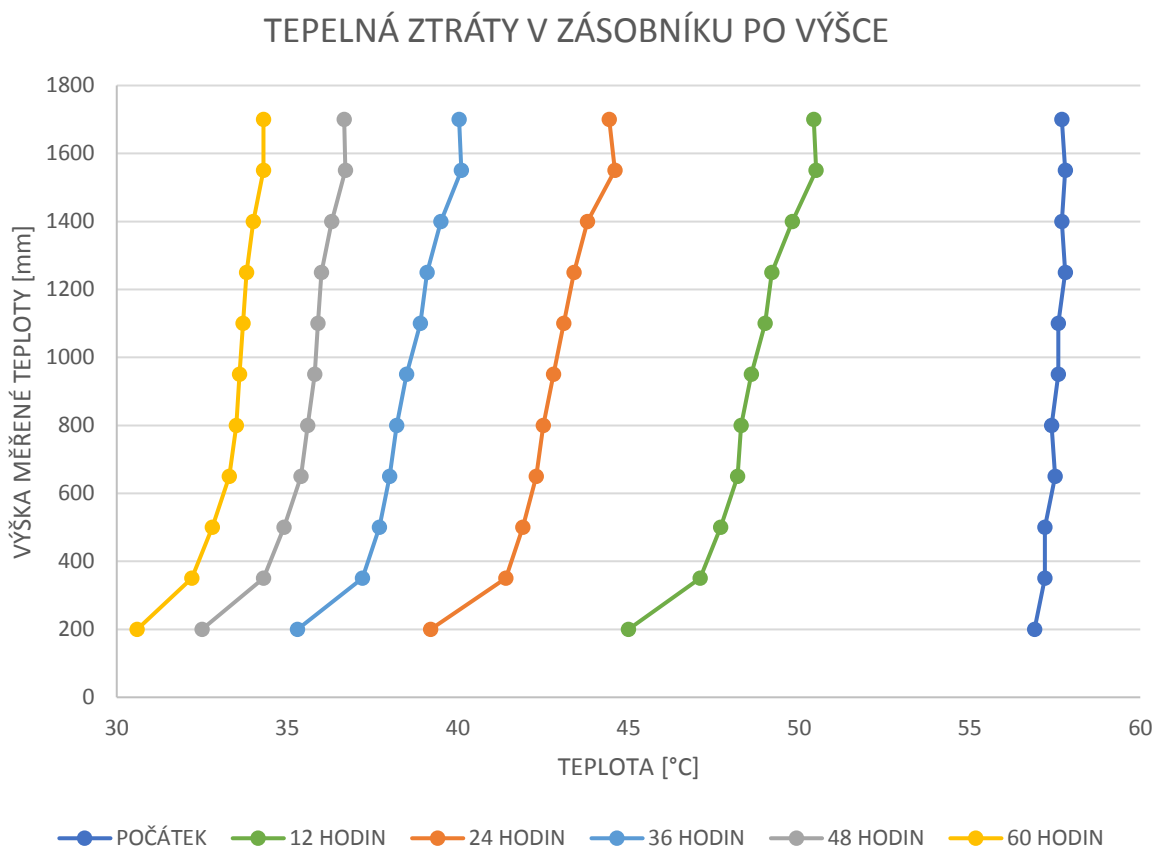
t_2 teplota v okolí [°C]

D. Výsledky

13. První experiment – ztráta

13.1 Tepelná ztráta

Byla provedena série měření s ohřátým zásobníkem na teplotu 58 °C při horním líci a poté byl měřen úbytek tepla po dobu několika desítek hodin.



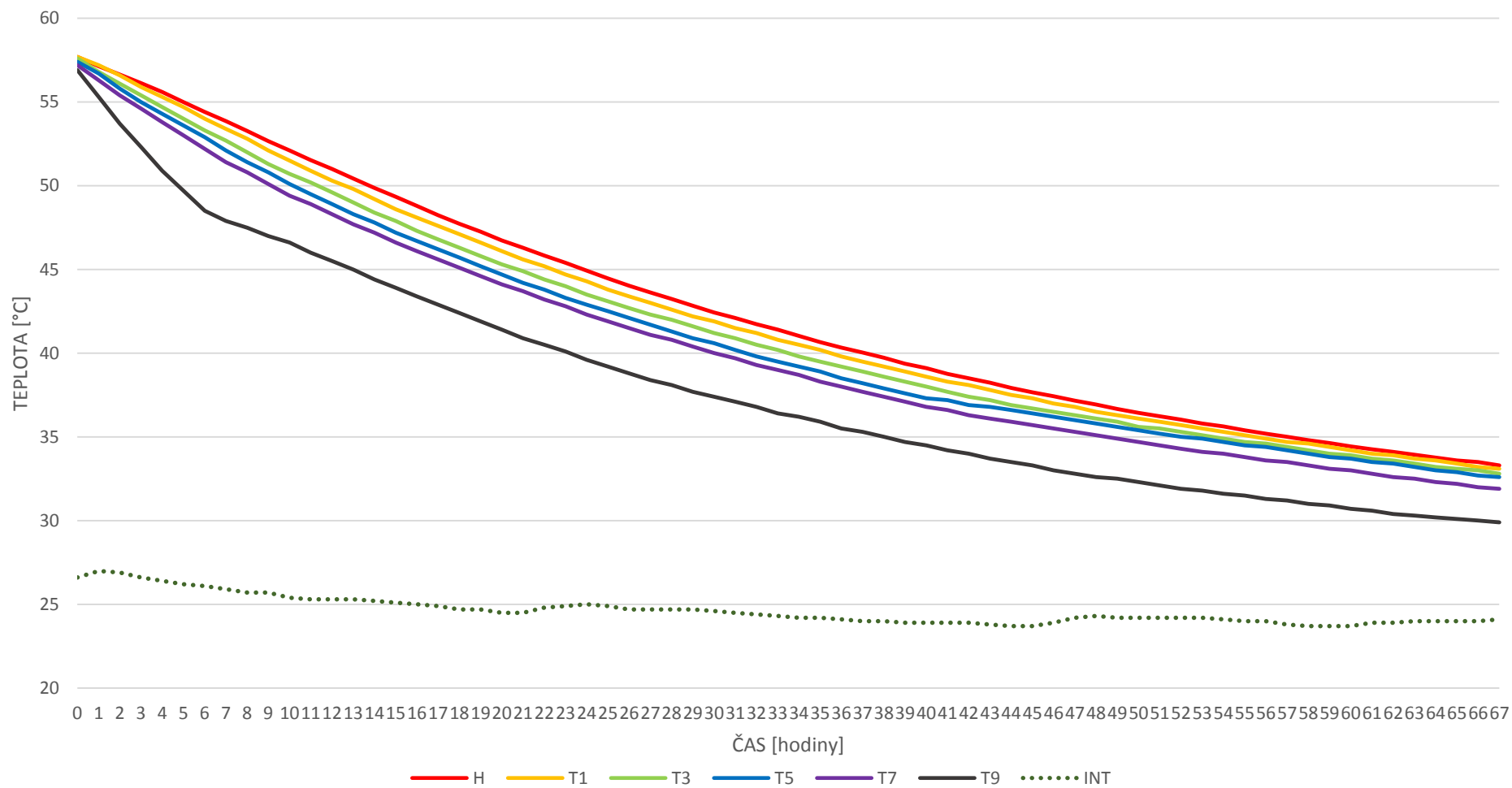
Tepelná ztráta zásobníku po výšce - graf 1

Na grafu 1 je znázorněná klesající teplota po výšce v zásobníku v intervalu 12 hodin. Z dat je viditelný strmější pokles teploty při prvních 24 hodinách a v dalších hodinách je pokles přibližně poloviční.

Ve spodní vrstvě je pokles teploty výrazný oproti ostatním vrstvám, jelikož je ve dně absence tepelné izolace. V dalších vrstvách je teplota poměrně ustálená a nedochází k žádnému vzájemnému promíchání.

V dalším grafu 2 tepelné ztráty je znázorněný pokles teploty v čase. V poslední vrstvě T9, u spodního líce je pokles teploty strmější z důvodu zmíněné absence tepelné izolace ve dnu zásobníku. Interiérová teplota (tečkovaně) je z počátku zvýšená právě vlivem tepelných ztrát zásobníku. Další periodické výkyvy jsou způsobené denními zisky jako je slunce a výměňková stanice umístěná pod laboratoří. Z důvodu přehlednosti grafu jsou zobrazena teplotní čidla po výšce 300 mm, tedy ob jedno čidlo.

TEPELNÁ ZTRÁTA ZÁSOBNÍKU V ČASE



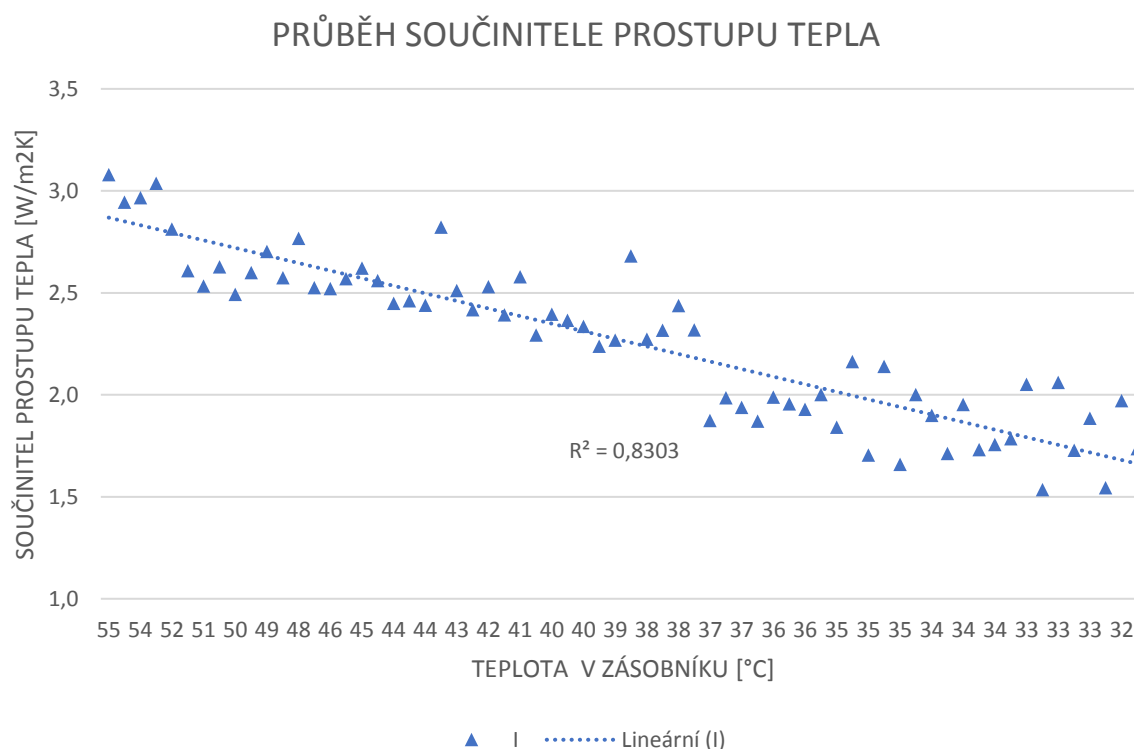
Tepelná ztráta zásobníku v čase - graf 2

13.2 Součinitel prostupu tepla

Z naměřených přesných rozměrů jsem vypočítal plochu zásobníku na $6,98 \text{ m}^2$ a objem samotného zásobníku na 660 litrů. Rozměry zásobníku a dílčí plochy včetně objemu na obrázku 25. Porovnávací hodnota byla $1,16 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ podle článku [12].

Již z grafu 2 je viditelný nepřímý pokles teploty. Při výpočtu byla zohledněna hustota a měrná tepelná kapacita vody podle teploty, avšak výsledek se lišil v řádu setin. Byla tedy stanovena konstanta podle průměrné teploty $45 \text{ }^\circ\text{C}$. Dále má vliv okolní teplota, která se pohybovala rozmezí od druhého dne přibližně do $1,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Klesající tendenci součinitele prostupu tepla má za příčinu vliv vnitřního chování zásobníku podle vnitřní teploty.

V grafu 3 je znázorněn součinitel prostupu tepla prvního měření a následně proložená lineární spojnice trendu.



Průběh součinitele prostupu tepla - graf 3

Celkový součinitel prostupu tepla byl vypočten průměrem ze 3 měření na $2,27 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Tato hodnota se liší oproti referenční $1,16 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ o $1,11 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, což je téměř dvakrát tak velká měrná tepelná ztráta.

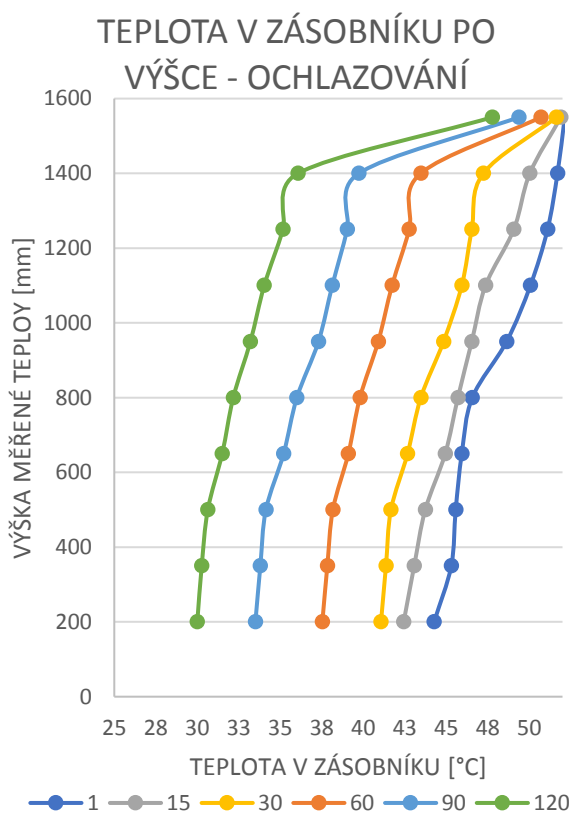
14. Druhý experiment – ochlazování

Experimentu předcházela článek [12], kde se v jednom experimentu provádělo ochlazování konstantním výkonem. Před započítáním experimentu se zásobník ohříval kombinací elektrokotle plným výkonem 20,8 kW a elektrickou topnou spirálou o výkonu 4 kW.

Zlomová teplota byla určena na 52 °C při horním líci, na základě, které se zastavil ohřev a zahájilo ochlazování o výkonu 5,5 kW. Odběrné místo ze zásobníku bylo pouze z výstupu ÚT7.

Na grafu 4 je znázorněna teplota po výšce v zásobníku při jeho ochlazování. Počáteční rozdělení teplot odpovídá patnácté minutě v grafu 4, tj. konec ohřevu počátek ochlazování. Z grafu 4 je názorný velmi přesný pokles teplot v čase, kdy při ochlazování nedošlo k žádnému výraznému promíchání jednotlivých vrstev. Odběrné místo bylo pod úrovní nejvyššího teploměru, proto je pokles teploty při vrchním líci minimální.

Na obrázku 41 je vidět vyšší teplotní spád vratné vody chladicího okruhu. Teplotní rozdíl byl nastaven na 10 °C, docházelo tedy ke vstupu chladnější vody, než jaká je v zásobníku, proto se otevřely jen klapky ve spodní části zásobníku.



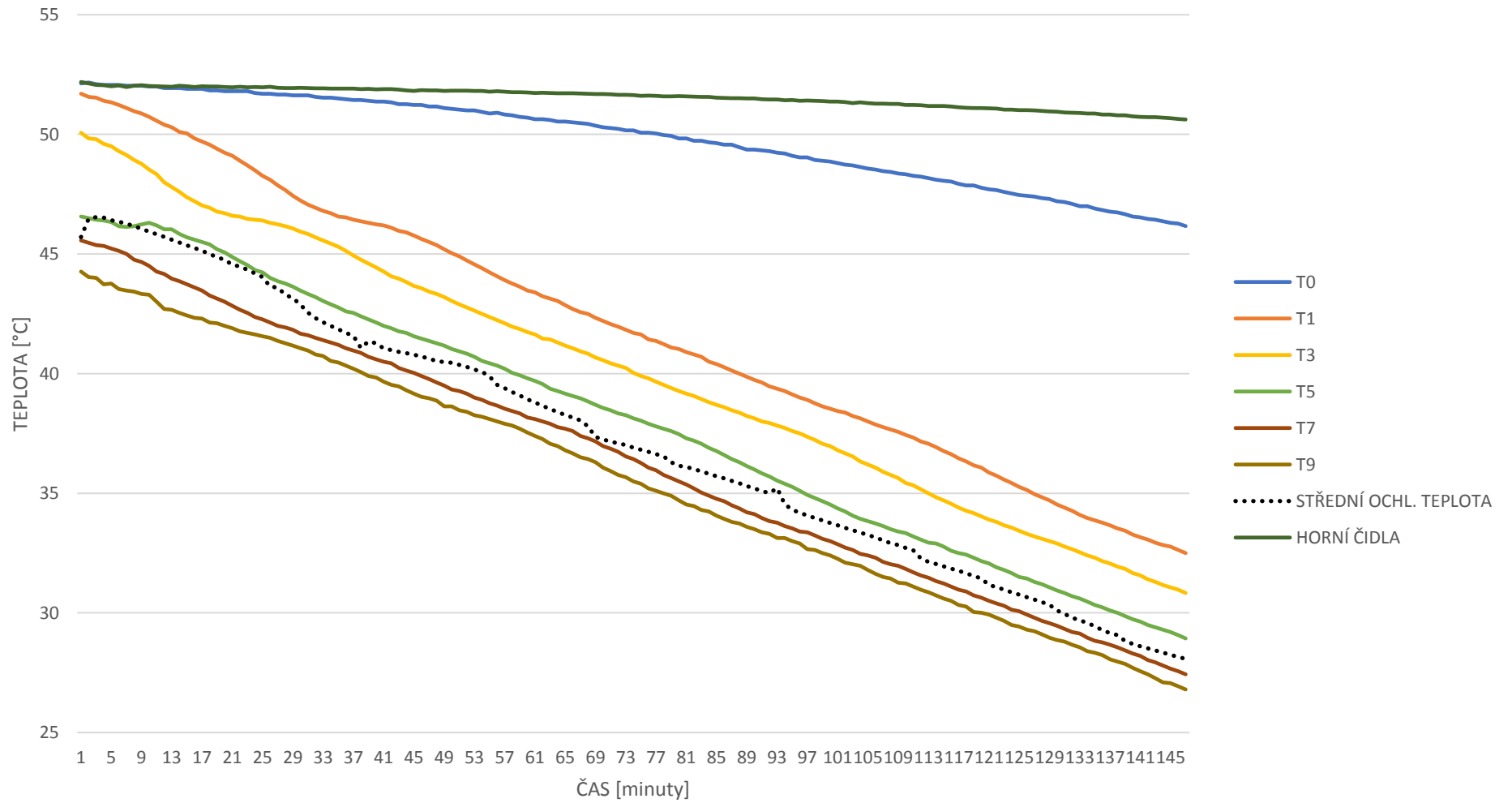
Teplota v zásobníku po výšce – ochlazování – graf 4



Otevřené klapky vestavby – obr. 41

Na grafu 5 je znázorněna teplota v závislosti na čase při ochlazování. Teplotní čidla T0-T9 – obrázek 25, str. 33, znázorňují teplotu v určité výškové úrovni. Odběrné místo je níže, než je T0 a horní čidla teplot, proto je pokles teploty tak minimální. Velmi zajímavým jevem při ochlazování byl rozdíl teplot T0 a T1, ten dosahoval 13,7 °C při změně výšky o 15 cm, tj vzdálenost čidel. Ve skutečnosti byl tento přechod přibližně 5 cm.

OCHLAZOVÁNÍ ZÁSOBNÍKU STÁLÝM VÝKONEM



Ochlazování zásobníku konstantním výkonem – graf 5

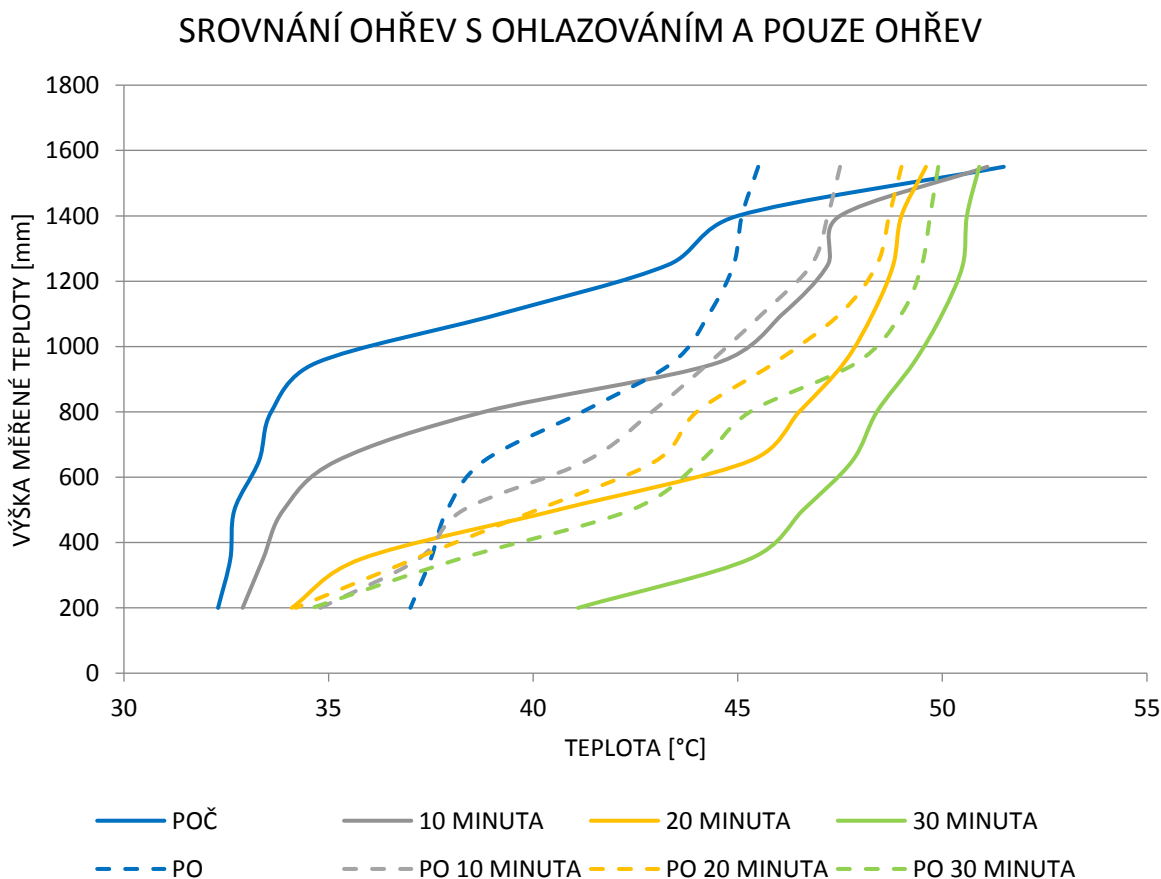
15. Třetí experiment – ochlazování s ohřevem

Tento experiment ukazuje chování zásobníku při ochlazování a ohřívání současně. Experiment byl započat na přehřátém zásobníku na teplotu 45 °C, při výpustné úrovni. Ze zásobníku byla odebírána menší energie než dodaná. Dodávaný výkon z elektrického kotle byl jeho maximálně možný tj. 20,8 kW po dobu 65 minut. Odebíraný výkon ze zásobníku se měnil v průběhu času a dosahoval od 9,2 do 12 kW po dobu od počátku do 115 minut.

Z grafu 6 je zřejmý rozdíl mezi ochlazováním s ohřevem a pouze ohřevem.

Plnou čarou je znázorněn pouze ohřev. Je znatelný rozdíl mezi teplotou v počátku a po třiceti minutách (modrá a zelená křivka). Z důvodu velké vzdálenosti mezi křivkami je zřejmý velký nárůst teplot.

Čárkovanou čarou je znázorněn ohřev v kombinaci s ochlazováním. Křivky jsou souměrnější a teplota je více rozložena po výšce zásobníku



Srovnání ohřevu s ochlazováním graf 6

Na grafu 7 je předeřtý zásobník na teplotu 45 °C při výpustné úrovni. Od tohoto okamžiku začalo měření, kdy se zásobník stále ohřival plným výkonem 20,8 kW a zároveň ochlazoval výkonem v rozmezí 9,2 – 12 kW. Tento režim trval, dokud nedosáhla maximální teplota 53 °C – obrázek 42 otevřených klapek. Ohřev se zastavil a probíhalo už pouze ochlazování do teploty 45 °C, kdy by se cyklus začal periodicky opakovat.

Dále je z levé části grafu 7 patrná velmi nízká teplota u dna zásobníku, ta je způsobena velkým chladícím výkonem, který byl dosažen velkým teplotním spádem a vratná voda tak podchlazovala dno zásobníku. Při ochlazování zásobníku byl velký teplotní spád, a proto docházelo k výraznému ochlazení dna zásobníku a částečně i druhé spodní vrstvy. Na obrázku 43 je vidět otevřená poloha spodních klapek právě z důvodu nízké teploty vratné vody.

Na pravé části grafu 7 dochází už pouze k ochlazování zásobníku. Odběrné místo je pro první i druhou část v horním odběrném místě ÚT7. To nám ukazuje na vysokou teplotu při horním lici zásobníku, kde není možný odběr vody. Úbytek tepla je částečně způsoben tepelnou ztrátou a částečně ochlazováním od spodní vrstvy v místě odběru. V ostatních vrstvách pak teplota úměrně klesá a klesá i střední teplota chladící větve.

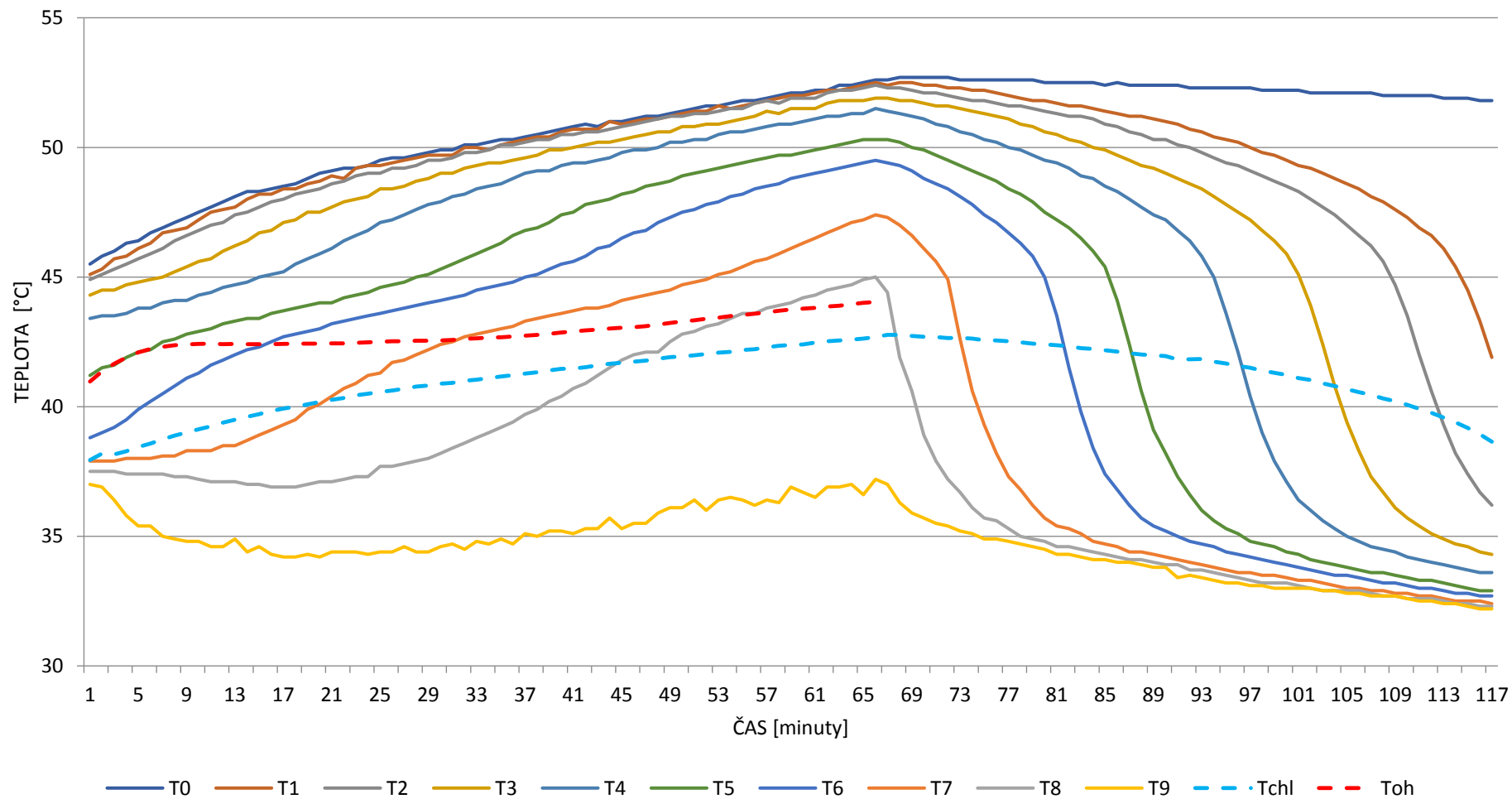


Horní klapky ohřívající větve- obr. 42



Spodní klapky chladící větve- obr. 43

OHŘEV ZÁSOBNÍKU S OCHAZOVÁNÍM A POUZE OCHLAZOVÁNÍM



Ohřev zásobníku s ochlazováním - graf 7

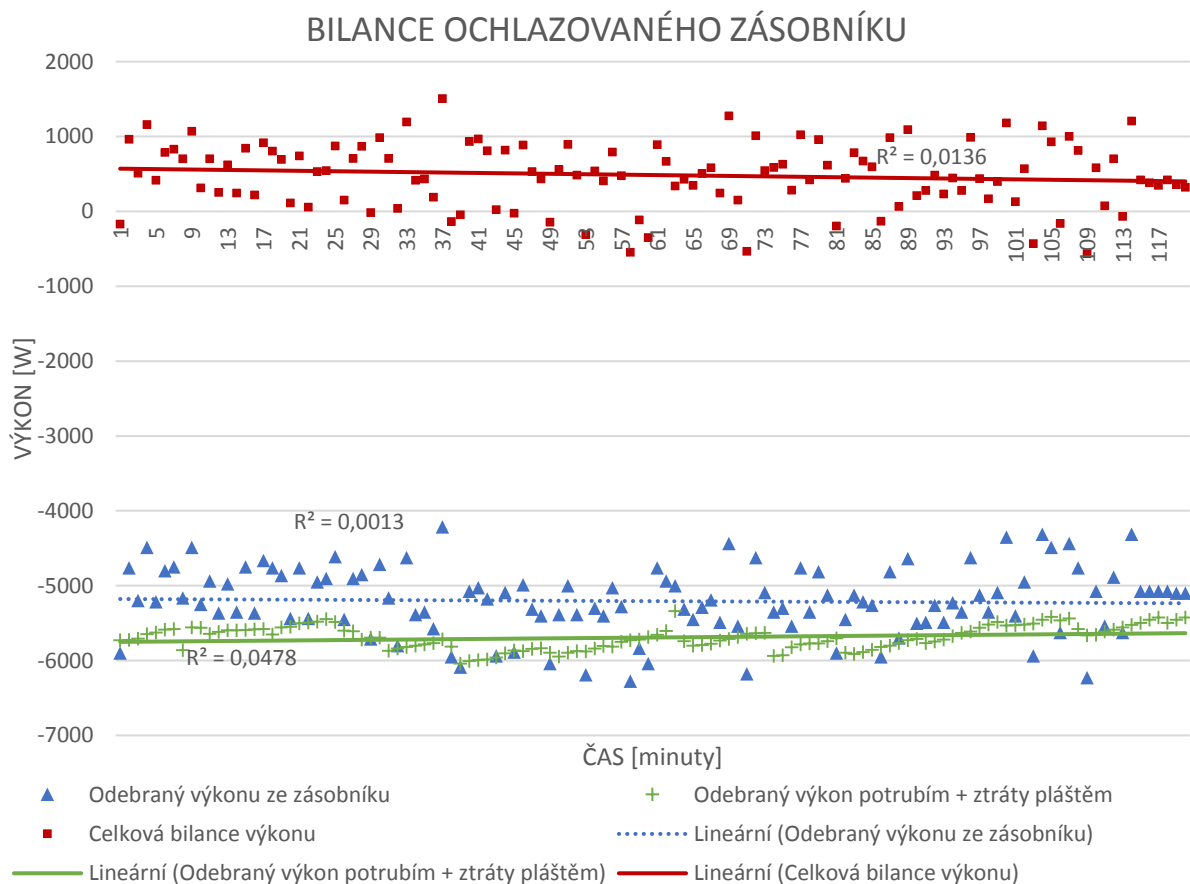
16. Čtvrtý experiment – přesnost měření

Čtvrtý experiment se zaměřuje na kvalitu provedení vybraných předchozích experimentů. Běžně se tepelná ztráta pláštěm neuvažovala, jelikož cílem experimentu bylo ukázat, jak se zásobník chová za určitých okrajových podmínek.

Za ideálních podmínek má zásobník tepla vnitřní energii závislou na jeho teplotě v daném místě. Pokud vezmeme v potaz ochlazování zásobníku, máme změnu energii v časovém kroku, tedy odebraný výkon, tepelnou ztrátu zásobníku a tyto veličiny sečteme, měli bychom být v rovnováze.

Na grafu 8 je blíže popsán druhý experiment. Z celého měření byly vybrány dvě hodiny, kdy všechna data vypadala ustáleně. V grafu je následně popsána změna výkonu v zásobníku o minutovém kroku. Chladicí výkon odebraný potrubím včetně ztrát byl sečten jako odebraný výkon + ztráty.

V rámci úseku 120 minut byla vypočtena průměrná odchylka o výkonu 485 W. Vlivem nepřesností byl odebraný výkon potrubím větší než výkon odebraný ze zásobníku

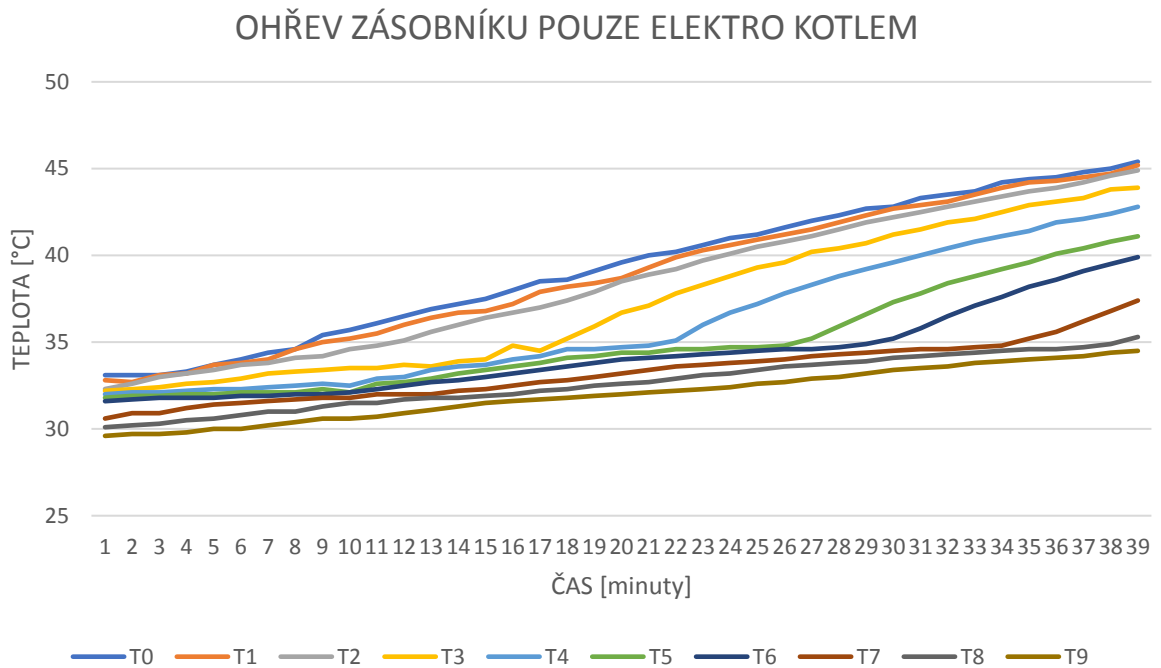


Bilance ochlazování zásobníku - graf 8

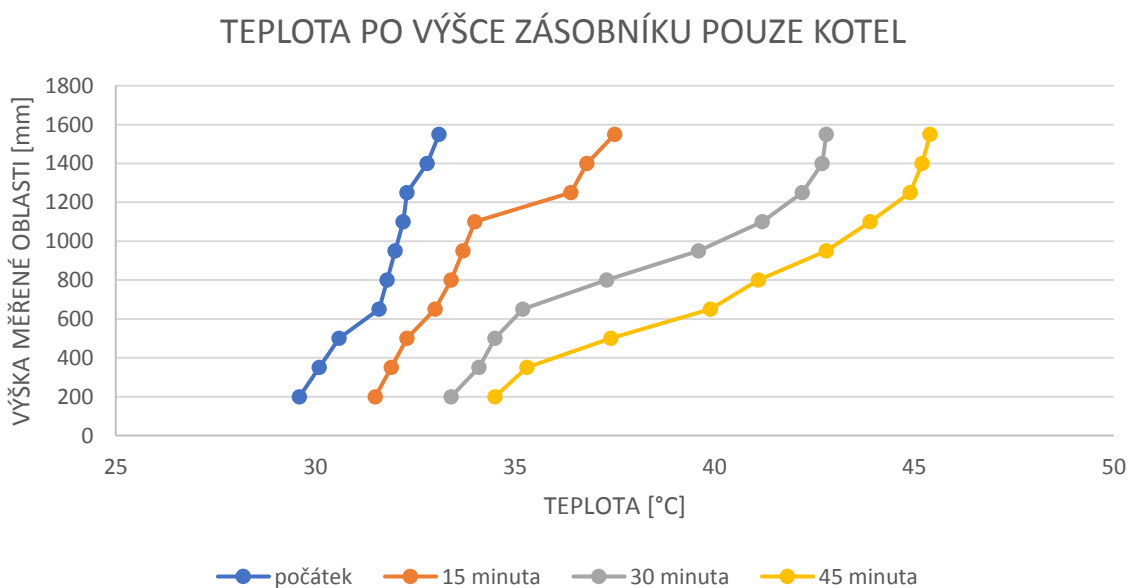
17. Pátý experiment – porovnání

Pátým experimentem je porovnání ohřátí zásobníku kombinací elektrokotle a topné spirály oproti samotnému elektrokotlí.

- Ohřev pouze elektrokotlem o výkonu 20,8 kW. Z grafu 9 je viditelné prohřátí směrem shora dolů. To jde porovnat i na grafu 10, kde se výrazně zvyšuje teplota v horních vrstvách.



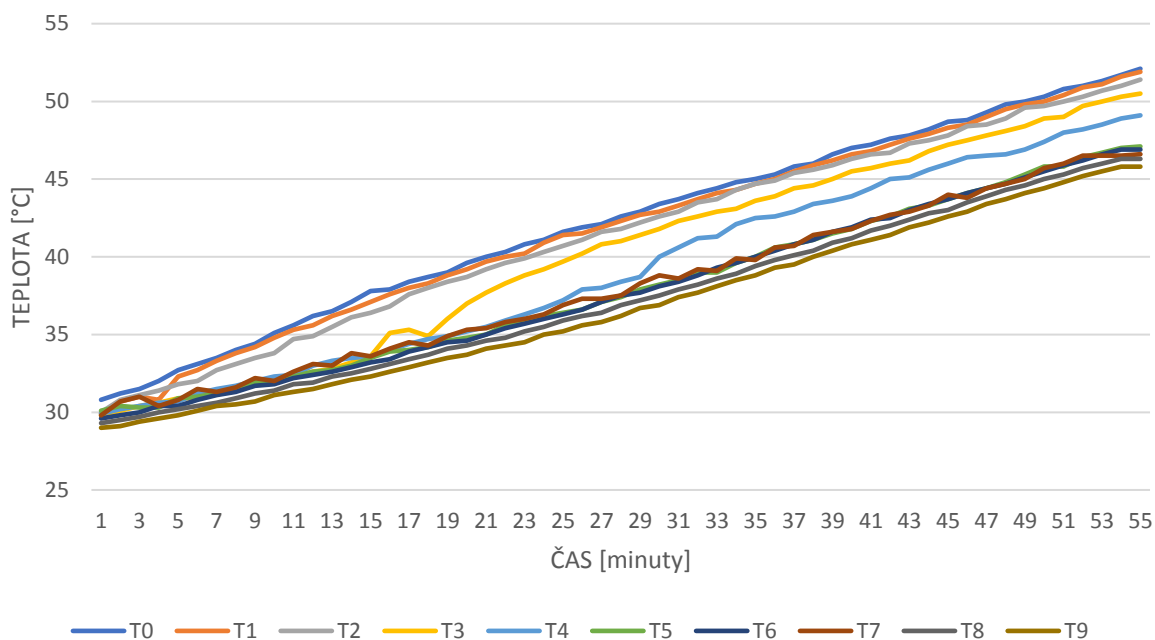
Teplota v čase při ohřevu elektrokotlem – graf 9



Teplota po výšce při ohřevu elektrokotlem – graf 10

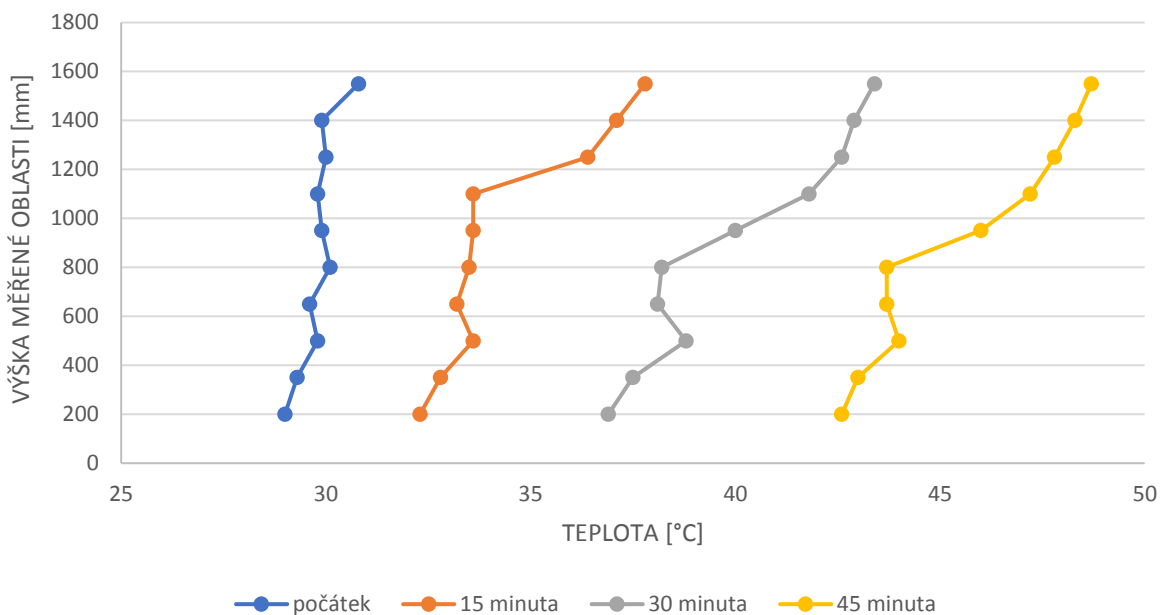
- Ohřev kombinací elektrokotle a topné spirály. Při kombinaci je viditelné prohřátí spodní části zásobníku. Může tedy tak dojít k rychlému prohřátí celého zásobníku.

OHŘEV ZÁSOBNÍKU KOMBINACÍ ELEKTRO KOTLE A TOPNÉ SPIRÁLY



Teplota v čase při ohřevu kombinací elektrokotle a topné spirály – graf 11

TEPLOTA PO VÝŠCE ZÁSOBNÍKU KOMBINACÍ ELEKTRO KOTLE A TOPNÉ SPIRÁLY



Teplota po výšce při ohřevu kombinací elektrokotle a topné spirály – graf 12

E. Diskuze

- Úvodem

Během ohřevu zásobníku z pokojové teploty tj. 25 °C například na teplotu 50 °C, dojde ke zvětšení objemu vody v zásobníku přibližně o 6,6 litru, při teplotě na 60 °C to je o 9,2 litru. Během práce se zásobníkem je to zajímavá informace například z důvodu velikosti nádoby pro expandovanou vodu nebo v opačném případě při ochlazování zásobníku je množství vody, které musí být do systému dodáno. Při této úvaze byla zanedbána vypařená voda, která tvoří zanedbatelný rozdíl.

Při dopouštění zásobníku během ochlazování byl skok teploty vratné vody do zásobníku nižší v řádu jednotek stupňů, avšak teplota vody v zásobníku se téměř nezměnila. Z důvodu správné funkčnosti oběhových čerpadel je potřeba minimální dispoziční tlak. Ten je zajištěn přepadovým potrubím, které dosahuje výšky přibližně 2 metrů nad čerpadla. Pokud se výška příliš sníží z důvodu změny objemu čerpadla začnou kolísat, z toho důvodu je nutné dopouštět systém několikrát během experimentu. Ze zkušenosti z druhého experimentu při ochlazování řádově 5 kW byl systém dopouštěn 3x a chod celého systému byl bezproblémový.

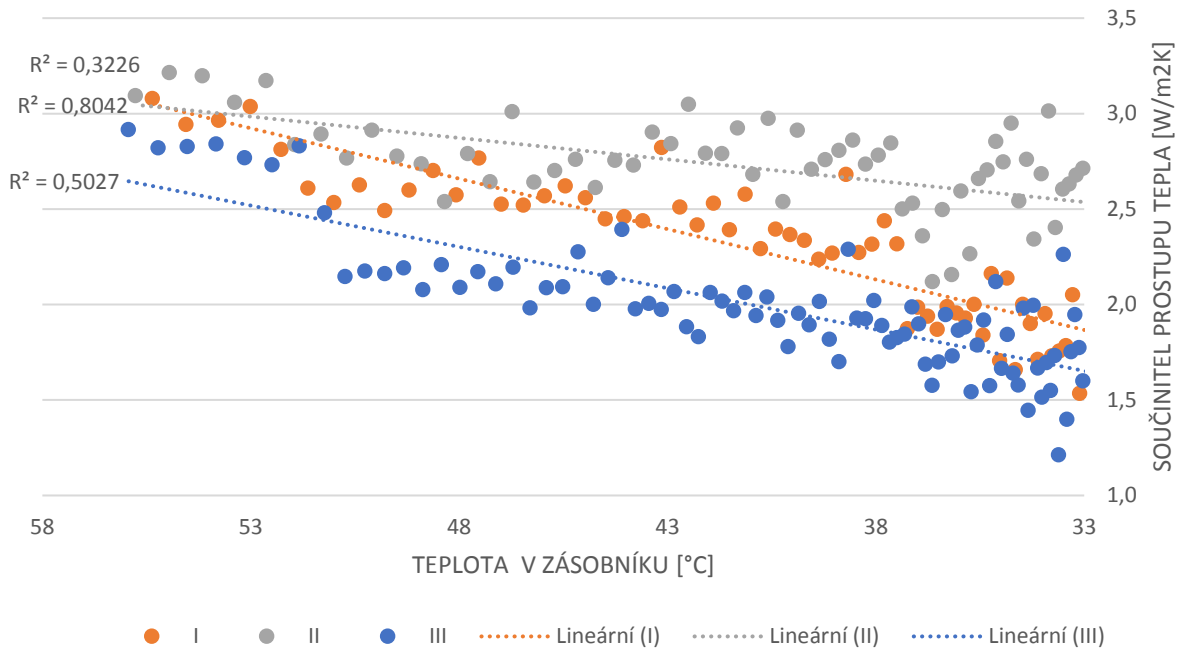
Na základě tohoto závěru, pokud by se umístila expanzní nádoba na přepadové potrubí o objemu minimálně 10 litrů, byl by zajištěn trvalý bezproblémový chod systému, případný přepad by zůstal z důvodu bezpečnosti při výjimečném dopouštění.

- První experiment – ztráta

Během přípravy před započítáním experimentů byla uvedena hodnota součinitele prostupu tepla $U = 1,16 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ ve článku [12]. Jelikož nebyla hodnota nijak zdůvodněná a zásobníku chyběla část izolace, byl proveden experiment se samovolným ochlazováním. Zásobník byl doplněn o chybějící izolaci a byla navracena původní karoserie. Experiment se prováděl celkem 3x. První dvě série trvaly 4 dny a poslední série trvala 6 dní. Výsledky byly velmi poměrně různé. Částečně to může být způsobené krátkým krokem měření, tj. jedna minuta. V grafu 13 jsou znázorněna bodově všechna 3 měření včetně lineárních spojnic trendu. Modře vyznačené je poslední měření, které trvalo 160 hodin. Při teplotě v zásobníku blížící se okolní teplotě byla změna energie v zásobníku malá a docházelo k výrazným odchylkám. Co se týče spojnic trendu jsou si blízké druhé a třetí měření. Zvláštní totožné chování všech měření bylo na začátku, kdy přibližně po 4. hodině byl skokový pokles teploty o 1-3 °C.

Podle grafu 14 experiment trval po dobu několika dnů. Vzhledem k různorodému složení zásobníku byl proveden experiment za účelem zjištění skutečné ztráty tepla pláštěm.

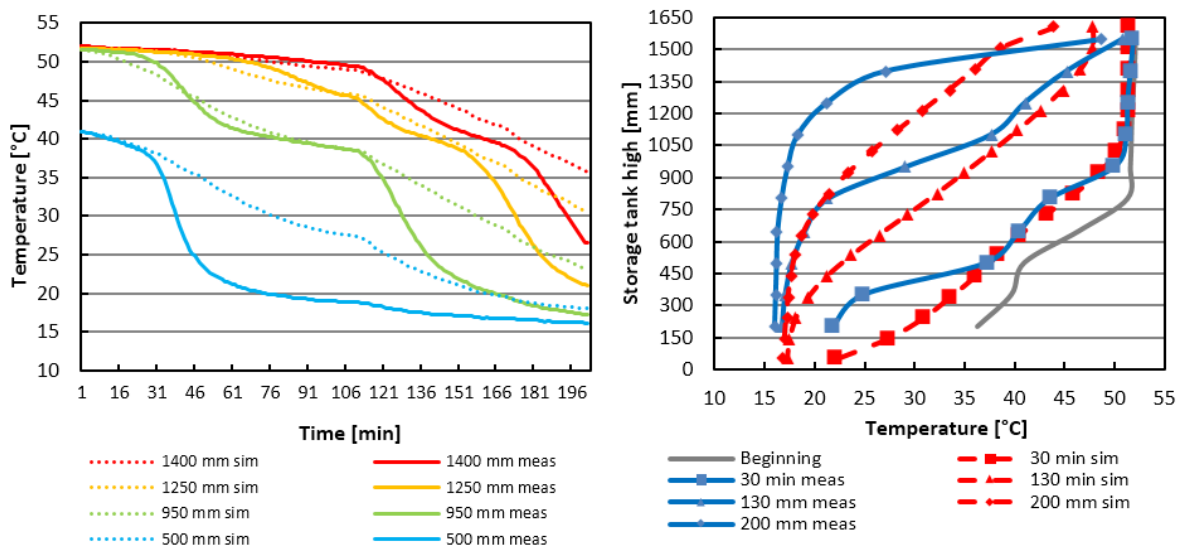
PRŮBĚH SOUČiniteLE PROSTUPU TEPLA PRO 3 MĚŘENÍ



Průběh součinitele prostupu tepla pro 3 měření – graf 13

• Druhý experiment – ochlazování

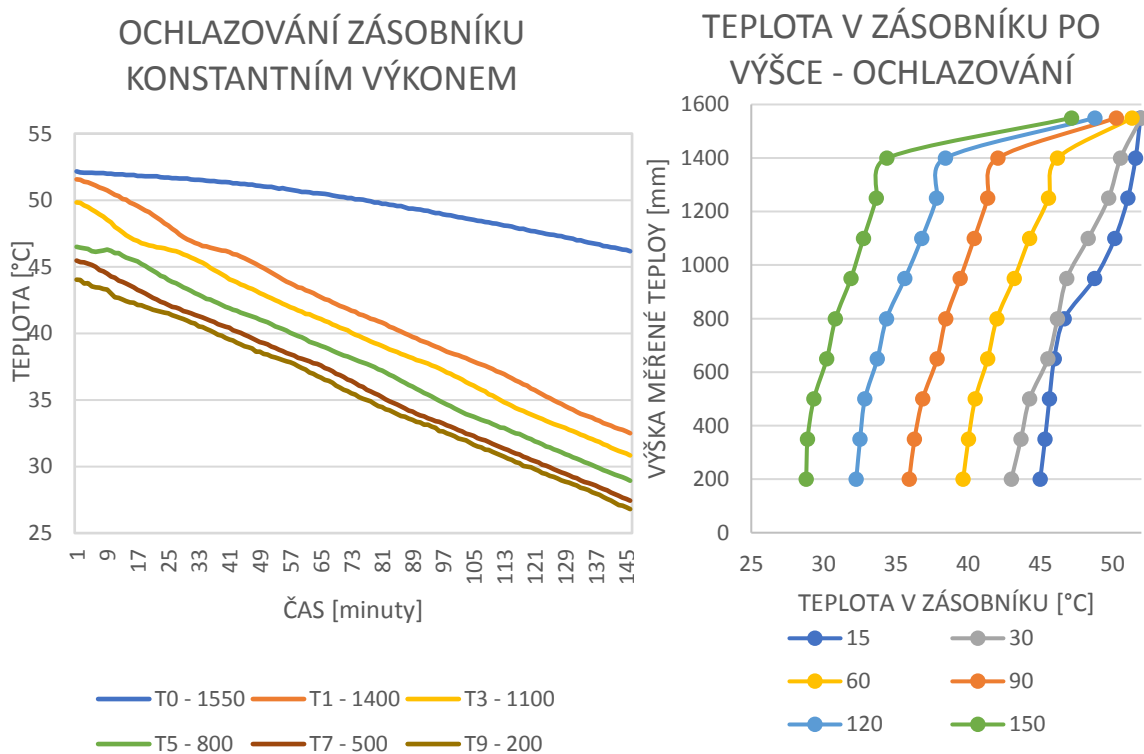
Před větším započítím složitějšího experimentu jsem se inspiroval okrajovými podmínkami opět v článku [12], kde byla prováděla simulace a následné měření na experimentálním zásobníku. Cílem bylo přiblížit se provedenému experimentu a porovnat naměřené hodnoty.



Referenční ochlazování pro druhý experiment - graf 14 [12]

Na grafu 14 je ze zmíněného článku porovnávána simulace (tečkovaně) a experimentální měření (plnou). Je viditelné zachování stratifikace v čase při ochlazování zásobníku o konstantním výkonu 3,8 kW. V průběhu čase se ochlazují nejdříve spodní a následně i horní vrstvy.

V porovnání s mnou provedeným experimentem, kdy chladicí výkon byl konstantní 5,5 kW je viditelný úměrný pokles dílčích teplot po vrstvách v zásobníku, avšak bez jakékoliv stratifikace – graf 15. Lze tedy usoudit, že výkon 5,5 kW už je příliš vysoký a zásobník se chová jako klasický bez využití stratifikace. Z grafu je také viditelné místo odběru teplé vody, které je pod vrchním teplotním čidlem. Prakticky je tam výškový rozdíl přibližně 8 cm a teplotní rozdíl byl 14 °C, což nasvědčuje příznivému zachování jednotlivých vrstev, nedochází tedy k vzájemnému promíchání. Pokles teploty horní vrstvy ve výšce 1550 mm je způsoben částečně tepelnou ztrátou a také mírným ochlazováním spodní kontaktní vrstvy. Směrnice ochlazování zásobníku odpovídá hodnotě 0,129 °C/minutu. Tj rozdíl teploty za čas.



Srovnávací grafy ochlazování zásobníku – graf 15

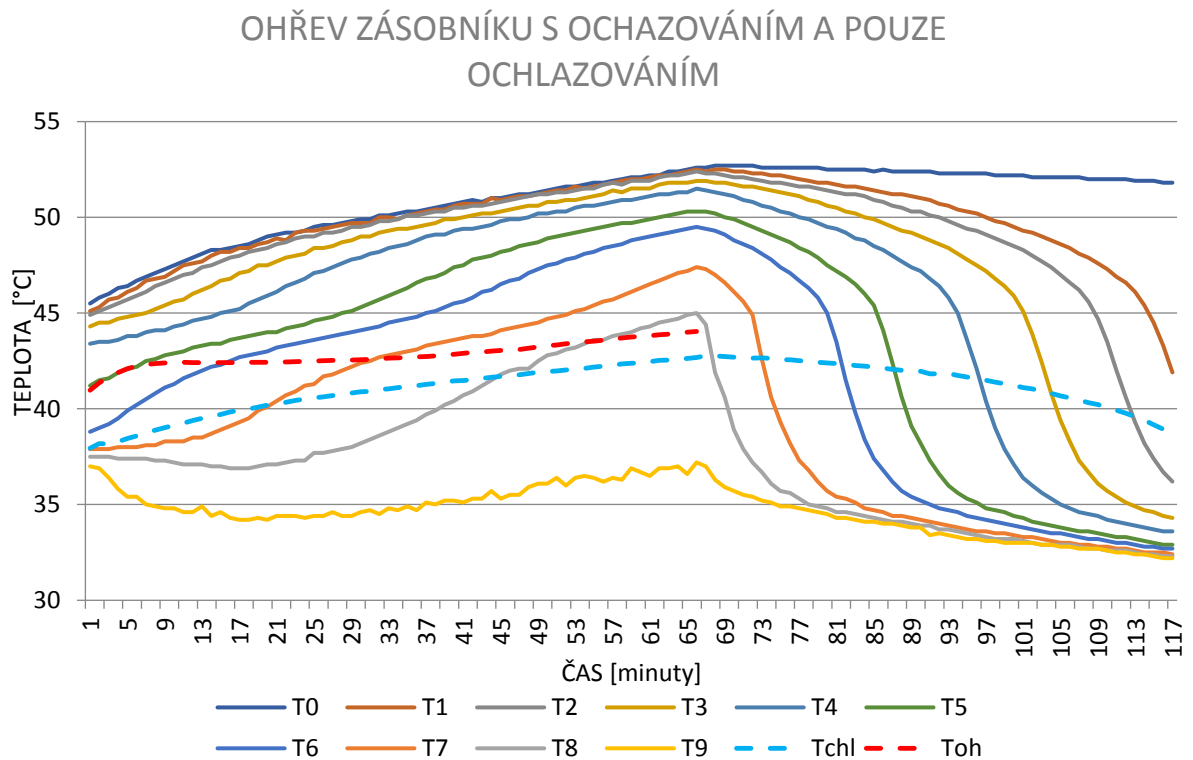
- Třetí experiment – ochlazování s ohřevem

Třetí experiment popisuje komplexnější přístup k zásobníku. Představuje provozní stav, který se skládá z ustáleného odběru tepla a ohřevu na 53 °C, přičemž nejnižší teplota v odběrném místě nesmí klesnout pod

teplotu 42 °C. Zásobník byl ohříván pouze elektrokotlem o výkonu 20,8 kW. Ochlazování bylo o výkonu v rozmezí 9,2-12 kW v závislosti na přírodní teplotě chladicí větve do deskového výměníku. Čím vyšší byla teplota přiváděné vody, tím větší byl rozdíl teplot na výměníku a výkon byl vyšší.

Graf 7 se skládá ze dvou částí, levá část je ochlazování s ohřevem, kdy je viditelná vyšší dodávka tepla. Po 65 minutách bylo dosaženo teploty 53 °C při horní vrstvě i v úrovni výstupu teplé vody. Z grafu je viditelná velmi blízká teplota horních vrstev T0 až T2, tato oblast je zároveň místem odběru a přivedená ohřátá voda je zároveň odebírána, avšak ne v takovém množství, a tak dochází k mírnému ohřevu celého zásobníku. Jelikož je chladicí i ohřívání výkon velký při velkém teplotním rozdílu. Rozdíl teplot ohřívání vody byl 20 °C. Rozdíl teploty chladicí vody byl v rozmezí 9-15 °C. To bylo ovlivňováno otáčkami čerpadla, která se v průběhu experimentu měnila a teplotou studené vody z vodovodu, která se také mohla mírně měnit. Odchylna v řádů několika desetín stupňů dělala velký rozdíl. Při ochlazování zásobníku z teploty 53 °C bez dalšího ohřevu byla velmi strmá a podobala se druhému experimentu.

Zajímavý je průběh ochlazování, který do teploty 45 °C je mírný o směrnici rovné 0,175 °C/minutu a v rozmezí teplot 45-35 °C je velmi strmý, odpovídající směrnici 1,67 °C/minutu. Pod teplotou v zásobníku 35 °C je ochlazování dílčích vrstev velmi pozvolné z důvodu malého rozdílu teplot. Odebíraný výkon ze zásobníku se měnil v průběhu času a dosahoval od 9,2 do 12 kW.



Ohřev zásobníku s ochlazováním - graf 7

- Čtvrtý experiment – přesnost měření

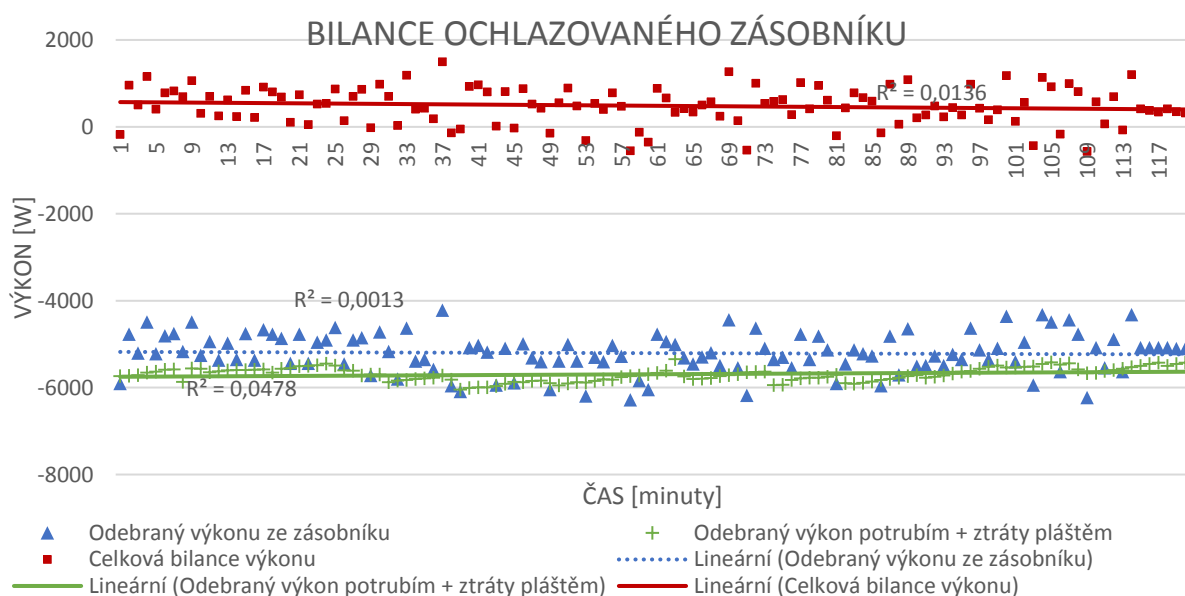
Čtvrtým experimentem je spíše vyhodnocení kvality měření. V rámci závěrečné práce byl proveden experiment, který měl simulovat ustálený stav z pohledu rovnováhy celého systému. Zásobník má určitou energii, ta se v čase změní. Dopočítáme výkon, o který se zásobník ohřál případně ochladil, dále máme dodávaný výkon (ohřev), odebraný výkon (ochlazení) a tepelné ztráty prostupem pláště. Množství energie pro odpar voní hladiny se zanedbává. Z důvodu: malá výparná plocha v uzavřené nádobě a minimální teplotní rozdíly. Možným ovlivňujícím faktorem může být položené zářivkové světlo pod horním krytem karoserie – obrázek 30 na straně 27. Světlo je v izolovaném krytu a je položené přímo na proskleném víku zásobníku, výkon světla může být přibližně 20-30 W, to je poměrně zanedbatelné ve srovnání například s chladícím výkonem, který je 5,3 kW.

Analýza druhého experimentu

Výčet hlavních výkonů:

- Chladicí výkon 5690 W
- Tepelná ztráta zásobníku při 55 °C 162 W
- Rozdíl energie v čase 60 minut -5150 W

Průměrné hodnoty za 120 minut.



Bilance ochlazování zásobníku - graf 8

Při součtu výkonů je chladící výkon o 378 W vyšší, než jaký byl rozdíl energie v zásobníku za dobu 2 hodin. To může být způsobeno částečně nepřesností průtokoměru.

Výrobce uvádí odchylku měření +/- 1 l/minutu, to odpovídá při této konfiguraci měření 100 W. Dále se rozdílu výkonu mohou podílet ztráty po trase potrubí. To je však izolované až na typická místa jako je čerpadlo, oblast průtokoměru, teplotního čidla a ventil. Celková odchylka však tvoří k celkovému odebranému výkonu přibližně 6 %, což by se dalo považovat za zanedbatelné.

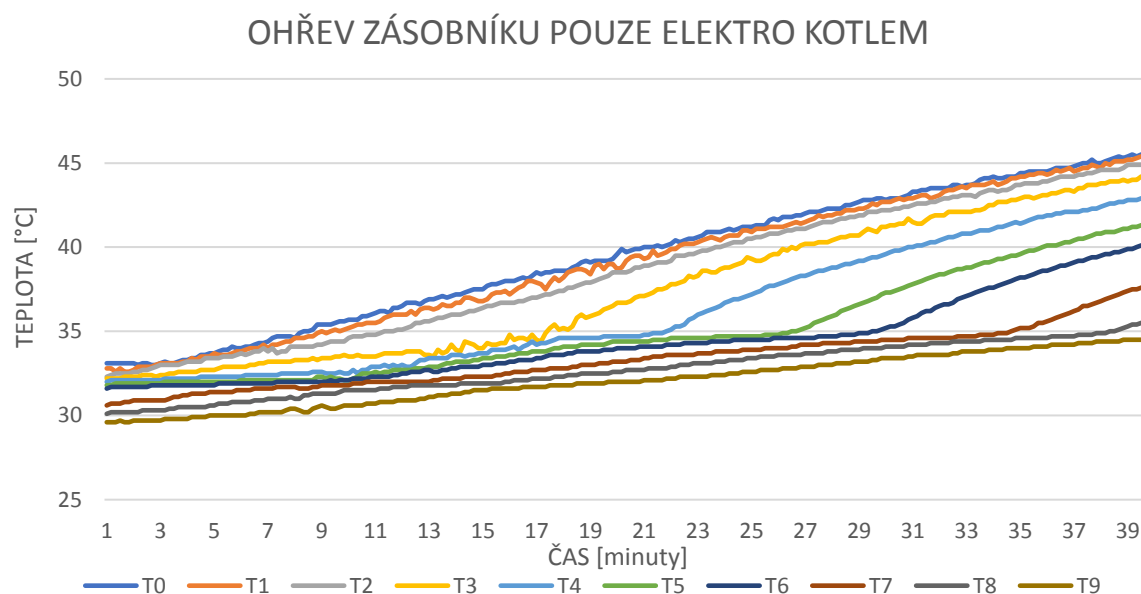
• Pátý experiment – porovnání

Ohřev zásobníku je zajištěn dvěma zdroji, hlavním je elektrokotel, který přivádí do zásobníku skrze rozdělovač a deskový výměník teplou vodu a ta ohřívá vodu v zásobníku. Elektrokotel obsahuje 3 topné spirály po 6 kW, během experimentu byl však naměřen maximální výkon 20,8 kW.

Vedlejším zdrojem tepla je elektrická topná spirála o výkonu přibližně 4 kW, která je umístěna ve spodní části zásobníku. Porovnáním výkonu zdrojů je zřejmé, že ohřev zásobníku nebude mít ve spodní polovině stejnou směrnicí růstu teploty jako v horní polovině. Dalším rozdílem je způsob distribuce tepla. Elektrokotel přivádí do zásobníku teplou vodu o vyšší teplotě, kdežto topná spirála lokálně zvyšuje teplotu v daném místě.

První způsob byl pouze elektrokotlem a druhým způsobem kombinace elektrokotle a topné spirály.

Z grafu 9 je viditelný nárůst teploty od horních vrstev postupně po spodní. Vzhledem k poloze umístění poslední klapky difuzoru, se ohřívají první 3 horní vrstvy, tj. T0-T2 současně. Následně se každou 4-6 minutu začínala prohřívat každá další vrstva.

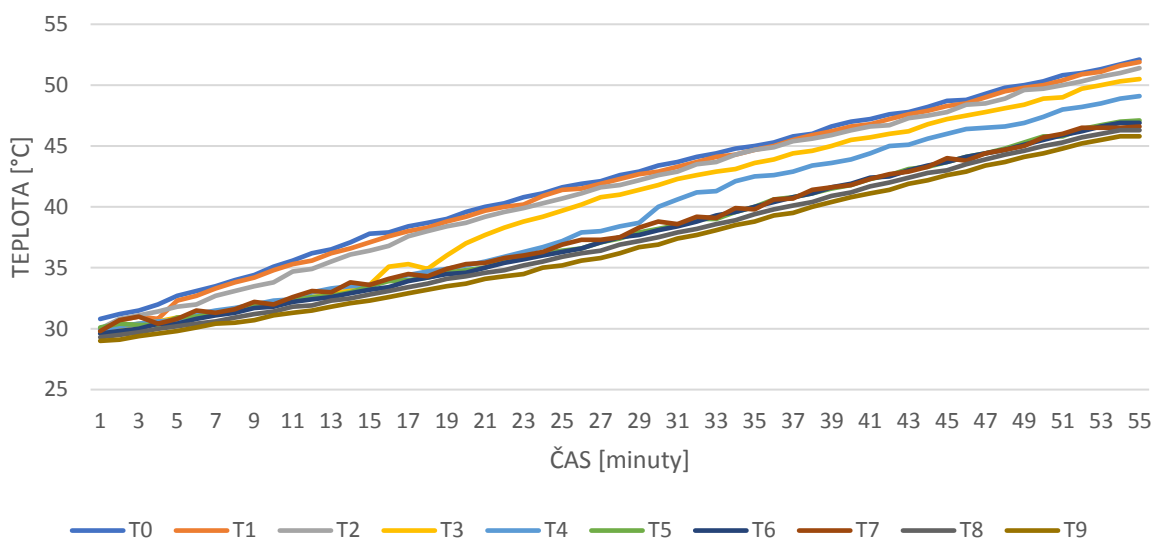


Teplota v čase při ohřevu elektrokotlem – graf 9

Na čtvrtém teplotním čidle T3 mezi 13 a 20 minutou je zajímavý průběh teploty, který je způsoben cirkulací chladicí větve bez chlazení. Ze zásobníku byla tedy odebírána teplá voda, která se následně vracela difuzorem zpět. To mělo nejspíše za následek mírné zpoždění ohřevu čtvrté vrstvy, ale žádným způsobem to nenarušilo stratifikaci zásobníku v širším měřítku.

Směrnice ohřevu zásobníku pouze elektrokotlem je v horní části 0,36 °C/minutu a 0,13 °C/minutu při spodní části zásobníku.

OHŘEV ZÁSOBNÍKU KOMBINACÍ ELEKTRO KOTLE A TOPNÉ SPIRÁLY



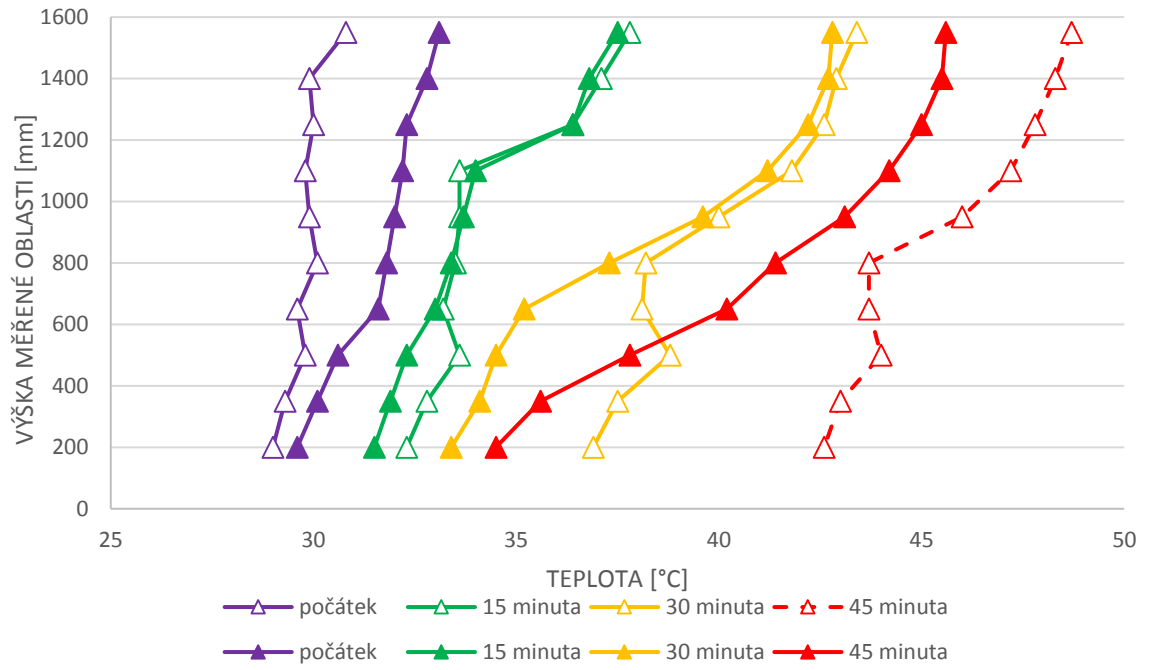
Teplota v čase při ohřevu kombinací elektrokotle a topné spirály – graf 11

Na grafu 11 je ohřev kombinací elektrokotle a topné spirály. Je viditelný rozdíl, kdy elektrokotel prohřívá horní polovinu zásobníku a topná spirála spodní část zásobníku, nejvíc 5 spodních vrstev přibližně o stejné směrnici, tj. 0,32 °C/minutu. Směrnice horní části je 0,39 °C/minutu. Je tedy evidentní, pozitivní ovlivnění ohřevu horní části.

Na grafu 16 je porovnání obou způsobů ohřevu. Plná značka ukazuje ohřev pouze elektrokotle. Prázdná značka ukazuje ohřev kombinací elektrokotle a topné spirály. Ačkoliv nebyly stejné všechny počáteční teploty po dílčích vrstvách v zásobníku, průběh teplot v horní polovině se choval velmi podobně. To má za následek ohřev elektrokotlem v horní části zásobníku vlivem klapky v difuzoru. Spodní část zásobníku se ohřívala výrazně rychleji vlivem topné spirály.

Zajímavostí u ohřevu kombinací je průběh teplot v úrovni 500 mm ode dna. Topná spirála je umístěná u teplotního čidla ve výšce 200 mm. Tudíž je zřejmé, že nedochází k ovlivnění teplotního čidla vlivem topné spirály.

TEPLOTA PO VÝŠCE ZÁSOBNÍKU



Porovnání způsobů ohřevu - graf 16

F. Závěr

Před samotnými experimenty jim předcházela řádná příprava mimo studování odborné literatury, také údržba zásobníku jako vypuštění zásobníku, v rámci čištění a obnova tepelné izolace, včetně vrácení původní karoserie. Během provádění experimentů vznikalo několik problémů se zavzdušněním systému, tím pádem i s oběhovými čerpadly. Při správném odvzdušnění a záměně čerpadel, byl problém vyřešen.

Po provedení série modifikovaných měření a jejich vyhodnocení, lze říci, že se zásobník chová správně. Je však potřeba hlídat dostatečný dispoziční tlak oběhových čerpadel a zásobník správně odvzdušnit před započítáním experimentu. Vnitřní vestavba s difuzory funguje správně. Voda je rozložena po vrstvách podle dané teploty a při ohřevu či chlazení je vrácena klapkou podle její hustoty.

Experimentální zásobník v laboratoři s vnitřní vestavbou vybavenou difuzory, se chová velmi obdobně, jako zásobník s porézním potrubím ve článku [5] kapitola 7. Toto řešení je tedy z pohledu funkčnosti si podobné, otázkou však je, jak se bude porézní potrubí chovat při silnějším znečištění topné vody. V systému experimentálního zásobníku jsou na obou trasách osazené filtry, a i přesto došlo ke znečištění. Otázkou je, v jakém jsou stavu, ty čištěné nebyly.

Z provedeného měření tepelné ztráty zásobníku, byla po zprůměrování vypočtena hodnota součinitele prostupu tepla $2,27 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, oproti tomu v článku [12] byla hodnota stanovena na $1,16 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Tato hodnota byla pravděpodobně vypočtena teoreticky bez zohlednění vedlejších vlivů a tepelných mostů. Hodnota je stanovena pro zásobník bez chodu oběhových čerpadel. Při experimentu s oběhovými čerpadly je nutno uvážit i ztrátu tepla vlivem trasy a jednotlivých segmentů, jako je oběhové čerpadlo, kulový kohout, jímka pro teploměr a průtokoměr. Tyto segmenty nejsou izolované a způsobují tepelnou ztrátu.

Prováděné měření s ochlazovacím výkonem $5,3 \text{ kW}$ bylo vyhodnoceno jako příliš velké a zamýšlená stratifikace nebyla využita. Zásobník si během experimentu zachovával úměrně se snižující teplotu v závislosti na jeho výšce. Ve srovnání s článkem [12], kde byl ochlazovací výkon $3,8 \text{ kW}$ a v čase po vrstvách byla zachována příslušná teplotní stratifikace. Teplot se neměnila úměrně vzhledem k výšce zásobníku.

Při komplexnější konfiguraci měření, byla zjištěna možná kombinace ohřevu a ochlazení zásobníku současně. Bylo zjištěno, že i přes velké výkony chlazení, si zásobník zachovával své teplotní rozvrstvení a dokázal se dále nahřívat bez jakéhokoliv promíchání. Ohřev zásobníku byl plným výkonem $20,3 \text{ kW}$ a chladicí výkon zásobníku byl $9,2 - 12 \text{ kW}$ v závislosti na okolních podmínkách.

Během analýzy chování zásobníku při druhém experimentu bylo zjištěno, že odebraný tedy chladící výkon je větší o 378 W. Což může být způsobeno nepřesností měření. Výrobce použitého průtokoměru deklaruje odchylku +/- 1 % měření, tj při provedené konfiguraci to činí 100 W. Zbylá odchylka 278 W z vypočteného výkonu může být způsobena dílčími segmenty na trase chladící větve, vypařeným teplem a vnitřním třením vody.

V rámci porovnání dvou způsobů ohřívání zásobníku bylo, že kombinace topné spirály a elektrokotle se příznivě ovlivňuje. Topnou spirálou se prohřívá samotný spodek a elektrokotlem hořejšek zásobníku. Přičemž ohřev spirálou nijak nenarušuje teplotní stratifikaci a nedochází tedy k promíchávání vody v zásobníku vlivem velkých vztlakových sil. Zásobník se kombinací obou zdrojů dokázal ohřát na teplotu 55 °C za necelou hodinu. Teplota však nebyla konstantní a u dna byla pouze 45 °C. Směrnice ohřevu horních vrstev vycházela pro kombinaci 0,39 °C/minutu, tedy o 0,03 °C/minutu rychleji než pro samotný elektrokotel. U spodní vrstvy byla směrnice pro kombinaci 0,32 °C/minutu, tedy o 0,19 °C/minutu rychleji než pro samotný elektrokotel.

Práce se zařízením mi rozšířila podvědomí i vědomosti o dané problematice, a také uvažování v souvislostech při řešení komplikací s nefunkčním zásobníkem.

G. Literatura

- [1] Bronislav Bechník, **Akumulace tepelné energie - fyzikální principy** [online] [cit. 15-3-2020] Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-tepla/1482-akumulace-tepelne-energie-fyzikalni-principy>
- [2] Fertahi, S. e-D, et. al., **Review on Solar Thermal Stratified Storage Tanks (STSST): Insight on stratification studies and efficiency indicators**, *Solar Energy*, Volume 176, 2018, p. 126-145, ISSN 0038-092X, [online] [cit. 28-2-2020]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.10.028>
- [3] Zilong Wang, Hua Zhang, Binlin Dou, Guanhua Zhang, Weidong Wu, **Influence of inlet structure on thermal stratification in a heat storage tank with PCMs: CFD and experimental study**, [online] [cit. 28-2-2020]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114151>
- [4] Andy Colthorpe, **Vattenfall pilots high temperature steel with up to 48hrs energy storage duration**, [online] [cit. 28-2-2020]. Dostupné z: <https://www.energy-storage.news/news/vattenfall-pilots-high-temperature-steel-with-up-to-48hrs-energy-storage-du>
- [5] Eva Tschudi, **Aluminium als Heizöl-Ersatz? HSR forscht an innovativer Energiespeicher-Lösung für die Energiewende**, [online] [cit. 28-2-2020]. <https://www.hsr.ch/de/die-hsr/aktuell/medien/detail/article/aluminium-als-heizoel-ersatz-hsr-forscht-an-innovativer-energiespeicher-loesung-fuer-die-energiewende/>
- [6] Ing. Martin Kny, Ing. Miroslav Urban, Ph.D. **Vodní zásobníky pro dlouhodobou akumulaci tepla**, [online] [cit. 28-2-2020] <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-tepla/11358-vodni-zasobniky-pro-dlouhodobou-akumulaci-tepla>
- [7] Burak Kurşun, **Thermal stratification enhancement in cylindrical and rectangular hot water tanks with truncated cone and pyramid shaped insulation geometry**, [online] [cit. 28-2-2020] <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.05.019>
- [8] Dragsted, J., et. al., **Thermal stratification built up in hot water tank with different inlet stratifiers**, *Solar Energy*, Volume 147, 2017, p. 414-425, ISSN 0038-092X, [online] [cit. 28-2-2020] <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.03.008>
- [9] Wenxian Lin S. W. Armfield, **Natural convection cooling of rectangular and cylindrical containers**, [online] [cit. 28-2-2020] [https://doi.org/10.1016/S0142-727X\(00\)00065-5](https://doi.org/10.1016/S0142-727X(00)00065-5)

- [10] Angui Li, Feifei Cao, Wanqing Zhang, Bingjin Shi, HuangLi, **Effects of different thermal storage tank structures on temperature stratification and thermal efficiency during charging**, [online] [cit. 28-2-2020] <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.08.025>
- [11] T.Bouhal, S.Fertahi, Y.Agrouaz, T.El Rhafiki, T.Kousksou, A.Jamil, **Numerical modeling and optimization of thermal stratification in solar hot water storage tanks for domestic applications: CFD study**, [online] [cit. 28-2-2020] <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.08.061>
- [12] Daniel Adamovsky, Michal Kabrhel, Karel Kabele, Miroslav Urban, **EVALUATION OF STRATIFIED STORAGE TANK EXPERIMENTAL MODEL AGAINST COMPUTER SIMULATION**, str. 2 [cit. 28-4-2020]
- [13] Jiří Matějček, **Fyzikální vlastnosti nemrznoucích směsí a navrhování soustav** [online] [cit. 28-4-2020] <https://vytapani.tzb-info.cz/6899-fyzikalni-vlastnosti-nemrznoucich-smesi-a-navrhovani-soustav>
- [14] **Manuál pro obsluhu laboratoře TZB**, interní dokument FSV ČVUT v Praze, MANUÁL_V1 (10/2018) [cit. 28-4-2020]
- [15] DUFFIE, J.A., BECKMAN, W.A. **Solar Engineering of Thermal Processes. A Wiley-Interscience Publication**. 2. vydání, 1980. 762 s. ISBN 0-471-05066-0