Created in Master PDF Editor - Demo Version

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní

Řízená stratifikace tepla v akumulačním zásobníku

Bakalářská práce

Studijní program: B2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301R000 – Strojní inženýrství

Autor práce: **Michal Svatoš**
Vedoucí práce: doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.

Liberec 2016

Created in Master PDF Editor - Demo Version

Created in Master PDF Editor - Demo Version

TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Mechanical Engineering

Control stratification of heat in an accumulative storage tank

Bachelor thesis

Study programme: B2301 – Mechanical Engineering
Study branch: 2301R000 – Mechanical Engineering

Author: **Michal Svatoš**
Supervisor: doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.

Liberec 2016

Created in Master PDF Editor - Demo Version

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní
Akademický rok: **2015/2016**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Michal Svatoš**
Osobní číslo:	**S15000500**
Studijní program:	**B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor:	**Strojní inženýrství**
Název tématu:	**Řízená stratifikace tepla v akumulačním zásobníku.**
Zadávající katedra:	**Katedra energetických zařízení**

Zásady pro vypracování:

Využití tepelného čerpadla typu voda - voda pro stratifikaci teplotních vrstev v akumulačním zásobníku.

1. Proveďte základní rešerši o ukládání tepla v akumulačních zásobnících.
2. Navrhněte experimentální zapojení tepelného čerpadla typu voda-voda s akumulační nádrží. Seznamte se s experimentálním zařízením a popište ho.
3. Proměřte průběh změny teplotního rozložení v nádrži při alespoň 5 režimech nabíjení při různých průtocích studené a teplé vody.
4. Naměřená data zpracujte a vyhodnoťte.
5. Formulujte závěry.

Rozsah grafických prací: **10**

Rozsah pracovní zprávy: **35 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

[1] **CHYSKÝ, J., HEMZAL, K. et al., 1993.** *Větrání a klimatizace.* **Technický průvodce (31). Praha: SNTL.**

[2] **ŠVARC, P., SEIDL, J., DVOŘÁK, V., 2013.** *Experimental study of influence of inlet geometry on thermal stratification in thermal energy storage during charging process.* **EPJ Web of Conferences (67) 02114.**

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.**
Katedra energetických zařízení

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Petr Švarc**
Katedra energetických zařízení

Datum zadání bakalářské práce: **18. listopadu 2015**

Termín odevzdání bakalářské práce: **18. února 2017**

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

L.S.

Technická univerzita v Liberci - 7a -

doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 18. listopadu 2015

Created in Master PDF Editor - Demo Version

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 8. 7 2016

Podpis: Svatoš

Created in Master PDF Editor - Demo Version

Řízená stratifikace tepla v akumulačním zásobníku

Anotace

Tématem bakalářské práce je řízená stratifikace tepla v akumulačním zásobníku. Měření bude zaměřeno na zjištění závislosti teplot na výšce akumulačního zásobníku pro různé režimy. Pod pojmem různé režimy se rozumí různé průtoky, výkony tepelného čerpadla aj. Během práce bylo provedeno 5 měření. Měření bylo provedeno na zařízení s otevřeným systémem. Pro porovnání výsledků měření, byly naměřené hodnoty vyneseny pro bezrozměrnou výšku y*a bezrozměrnou teplotu T*. Z vypočtených údajů byly vypracovány diagramy teplotního rozvrstvení vody v akumulačním zásobníku.

Klíčová slova: akumulace tepla, stratifikace, akumulační zásobník

Annotation

The subject of the bachelor thesis is control stratification of heat in an accumulative storage tank. The measuring is aimed to find the relation of the heat to the hight of the accumulative storage container for various regimes (different flow rate, output of a heat pump, etc.) Measuring on a device with opened system was conducted five times during the work on the thesis. For comparison of the results of the measuring, the values were carried out for dimensionless hight y* and dimensionless temperature T*. Diagrams of thermal stratification of water in the accumulative storage container were devised from the computed data.

Key words: accumulation of heat, stratification, accumulative storage tank.

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce Doc. Ing. Václavu Dvořákovi, Ph.D. a Ing. Petru Švarcovi za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích bakalářské práce.

Seznam použitých symbolů a jednotek

y^*	bezrozměrná výška	(-)
y	výška termočlánku	(m)
H	výška akumulačního zásobníku	(m)
T^*	bezrozměrná teplota	(-)
T	naměřená teplota	(K)
$T_{min.}$	minimální naměřená teplota	(K)
$T_{max.}$	maximální naměřená teplota	(K)
t^*	bezrozměrný čas	(-)
t	čas	(s)
ρ	hustota	(kg/m^3)
m	hmotnost	(kg)
c_p	měrná tepelná kapacita	(J/kg.K)
P	tepelný výkon	(W)
$\dot{m}_A$	hmotnostní průtok na okruhu s teplou vodou	(kg/s)
$\dot{m}_B$	hmotnostní průtok na okruhu se studenou vodou	(kg/s)
$\dot{V}_A$	objemový průtok na okruhu s teplou vodou	(m^3/s)
$\dot{V}_B$	objemový průtok na okruhu se studenou vodou	(m^3/s)
$\dot{Q}_A$	výkon na okruhu s teplou vodou	(W)
$\dot{Q}_B$	výkon na okruhu se studenou vodou	(W)
$P_{TČ}$	výkon tepelného čerpadla	(W)
ε	topný faktor	(-)

Obsah

1. Ukládání tepla 6

Teplo 6

1.1 Akumulace tepla 6

Způsoby akumulace tepelné energie 6

Akumulace pomocí citelného tepla 7

Akumulace pomocí sorpčního tepla 7

Akumulace pomocí latentního tepla 7

Akumulace pomocí reakčního tepla 9

Jiné způsoby akumulace tepla 9

1.2 Akumulační zásobník 9

1.3 Tepelné ztráty 10

1.4 Stratifikace 11

Využití stratifikace v praxi 11

Stratifikační zásobník 11

1.5 Nabíjení a vybíjení zásobníků 12

Přímé nabíjení a vybíjení 13

Přímé nabíjení a nepřímé vybíjení 13

Nepřímé nabíjení a přímé vybíjení 13

Nepřímé nabíjení a vybíjení 13

2. Návrh experimentálního zapojení 14

Popis měřících a experimentálních zařízení 14

2.1 Akumulační zásobník 14

2.1.1 Princip tepelného čerpadla 15

Tepelné čerpadlo voda/voda 17

Topný faktor 18

Tepelné čerpadlo voda – voda v laboratoři KEZ 19

2.1.2 Měřící zařízení DW6092 (wattmetr) a Ahlborn (průtokoměr) 20

Wattmetr DW6092 20

Průtokoměr Almemo 2290 -3 20

2.1.3 Měřící přístroj Dewetron 5000 21

2.2 Schéma zapojení 22

2.3 Návod na měření 23

3. Výpočtová část 25

3.1 Zpracování naměřených hodnot 25

4. Vyhodnocování a zpracování dat 28

4.1 Měření a zpracování naměřených výsledků režimů 28

4.2 Ukázka měření kdy průtok kolísal po celou dobu měření 32

4.3 Vyhodnocování stratifikace při různých režimech nabíjení 34

1. režim nabíjení 34

2. Režim nabíjení 35

3. Režim nabíjení 36

4. Režim nabíjení 37

5. Režim nabíjení 38

4.4 Výsledné grafy stratifikace 39

5. Závěr 41

1. Ukládání tepla

Teplo

Teplo je tepelná energie sdělená mezi termodynamickou soustavou a okolím a je tedy jedním ze způsobů, jimiž soustava reaguje s okolím. Teplo podobně jako práce, nezávisí jen na stavu soustavy, ale i na způsobu její reakce s okolím a není tedy veličinou stavovou. Teplo, podobně jako vnitřní energie, je energií tepelnou, od vnitřní energie se však zásadně liší tím, že je energií sdělenou mezi soustavou a okolím.[1]

1.1 Akumulace tepla

Akumulace tepla je proces, při kterém se pomocí fyzikálních a chemických jevů ukládá získané teplo v různých podobách. Obecně lze rozlišovat akumulaci přirozenou, jestliže se v jednotlivých komponentech soustavy, které plní ve zdroji a rozvodu tepla jinou hlavní funkci, může značně nahromadit značnější množství tepelné energie, nebo umělou, realizovanou ve zvláštních akumulátorech tepla.

Cílem akumulace tepla je
- zmenšení instalovaného tepelného výkonu zdroje (akumulátor se nabijí v mimošpičkovém období)
- překlenutí období se zvýšenými nároky, aniž by se musel uvádět do chodu další zdroj tepla (výtopna, další kotel teplárny)
- pomoc při překonávání rychlých výkyvů v zatížení
- překonání období nízkého odběru, aniž by se musel vypínat zdroj
- krytí noční spotřeby při odstaveném zdroji [2]

Způsoby akumulace tepelné energie

K akumulaci tepelné energie můžeme využít libovolný vratný nebo cyklický proces, při němž vzrůstá vnitřní energie systému. Podle využívaného fyzikálně chemického principu můžeme rozdělit akumulaci tepelné energie do několika typů:
- akumulace citelného tepla
- akumulace latentního tepla
- akumulace sorpčního tepla
- jiné fyzikálně chemické procesy

Akumulace pomocí citelného tepla

Ohřev pracovní látky je nejjednodušší způsob akumulace tepla. Využívá měrné teplo pracovní látky. Protože princip je snadno pochopitelný, byl tento způsob akumulace historicky první, který byl využíván. Vhodná pracovní látka musí mít velkou tepelnou kapacitu a nízkou cenu. Těmto požadavkům nejlépe odpovídá voda. Známý je elektrický zásobníkový ohřívač teplé vody (bojler) nebo zásobník solárního kolektoru. Voda má ze všech látek největší měrnou tepelnou kapacitu. V menší míře se používá kamenivo nebo jiná pevná látka. Jejich výhodou je především vyšší rozsah provozních teplot a jednodušší konstrukce akumulátoru, mají však výrazně nižší tepelnou kapacitu. Výhody akumulace citelného tepla jsou nízká cena pracovní látky a nízké nároky na know-how. Hlavní nevýhodou je značný objem akumulátoru a skutečnost, že zuživatelná teplota v průběhu vybíjení klesá.

Akumulace pomocí sorpčního tepla

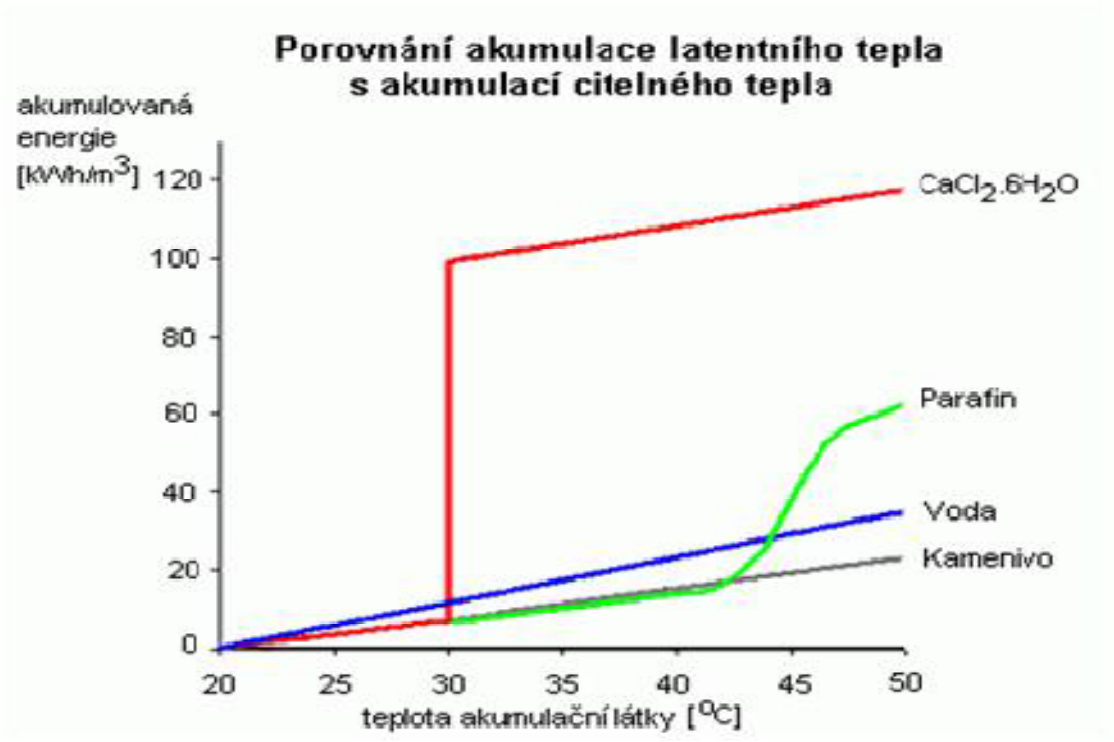
Akumulace pomocí sorpčního tepla využívá uvolňování tepla, které vzniká absorpcí vodní páry v pórech, nebo na povrchu materiálu, jedná se vlastně o akumulaci vlhkosti.

Proces absorpce závisí na teplotě, při kterém se plynné látky ze směsi plynů, nebo látky rozpuštěné v kapalině shromažďují na povrchu pevných látek (absorbentů). To vyvolá exotermní reakci, při které se uvolňuje teplo. Opačný proces, kdy se teplo přivádí a absorbovaná látka se z povrchu absorbentu uvolňuje, se nazývá desorpce. Jako absorbenty se využívají materiály s pórovitou strukturou, jako je například silikagel, zeolit, dále pak hydráty kovů, aktivní uhlí a jíly. Výhodou této technologie akumulace je značná hustota akumulace. Další výhodou je libovolná teplota v průběhu skladování, což předchozí dva způsoby neumožňují a lze tím v této fázi dosáhnout prakticky nulových ztrát tepla, s výjimkou vychladnutí. Nevýhodou u tohoto způsobu je vysoká cena materiálů a malý rozsah provozních teplot.

Akumulace pomocí latentního tepla

Akumulace latentního tepla využívá entalpii fázové změny pracovní látky. V čistých chemických látkách jsou možné tři druhy fázových změn: tání-tuhnutí, výpar-kondenzace a sublimace-desublimace. Ke skladování velkého množství páry bylo potřeba objemné zařízení odolávající velkým tlakům. Z toho důvodu je využitelný pouze fázový přechod mezi tuhou látkou a kapalinou. Výhodou oproti akumulaci citelného tepla je konstantní teplota a často i

menší objem. Pracovní teplotu akumulátoru lze určit vhodnou volbou pracovní látky. Nevýhodou je vyšší cena pracovní látky ve srovnání s akumulací citelného tepla. V praxi se ukazuje, že chemicky čisté látky se snadno znečistí, což ovlivní teplotu fázové změny a obvykle dojde k rozšíření rozsahu teplot. Používají se látky, které tají při požadované teplotě. Kromě chemicky čistých látek (např. síran sodný) se používají i směsi (např. parafin), u nichž lze v závislosti na složení dosáhnout požadované teploty fázové změny. Chemicky čisté látky tají při konstantní teplotě. Naproti tomu směsi tají v širším rozsahu teplot. Na obr. 1, níže můžeme vidět porovnání akumulace pomocí citelného tepla prostřednictvím vody a kameniva s akumulací pomocí latentního tepla prostřednictvím parafinu (směsi) a síranu sodného (chemicky čisté látky). Jak je vidět, chemicky čisté látky tají za konstantní teploty a směsi tají v širším rozsahu.



Obr. 1- Porovnání akumulace latentního tepla s akumulací citelného tepla

Akumulace pomocí reakčního tepla

Akumulace pomocí reakčního tepla je způsob, který využívá termochemické reakce. Tyto reakce se nazývají exotermická a endotermická. Nabíjení zásobníku se provádí pomocí endotermické reakce, při které se k reagujícím látkám dodává reakční teplo, jehož část se naakumuluje v reagujících látkách. Vstupní látka, ke které je během nabíjení přiváděno reakční teplo bývá většinou v pevné či kapalné fázi. Výstupní látky jsou obvykle dvě a jedná se buď o plyn a kapalinu, nebo o plyn a pevnou látku. K vybíjení se používá exotermická reakce, při které reagující látky uvolňují naakumulované teplo, které se může dále využít. Tyto reakce probíhají při vysokých teplotách a nejčastěji se využívá rozkladů oxidů kovů, hydroxidů kovů a peroxidů. Reagující látky, by měli být snadno oddělitelné a nepodléhat již dalším reakcím. Výhody tohoto způsobu spočívají v možnosti skladovat produkty reakce odděleně od sebe i při pokojových teplotách, čímž nám odpadá nutnost tepelné izolace zásobníku a tím jsou tepelné ztráty zásobníku pouze ve formě citelného tepla, které jsou však zanedbatelné ve srovnání s teplem z chemické reakce. Za další výhodu lze považovat kyslík, který vzniká, jako plynná složka reakce. Nevýhodami jsou problémy s vratnými reakcemi, chemická nestabilita látek, korodování termochemického zásobníku, toxicita a také vysoká cena.

Jiné způsoby akumulace tepla

Existuje mnoho dalších způsobů, které se dají využít pro akumulaci tepelné energie. Jejich využití je však buď omezené na speciální případy, zatím se pouze testují, nebo se kvůli jejich náročnosti, ať už technické či finanční nepoužívají. Všechny tyto údaje jsou čerpány z [3] a [5].

1.2 Akumulační zásobník

Akumulační zásobníky pomáhají srovnat nesoudobost energetických toků, mezi zdrojem a spotřebičem. Jinými slovy uchovává tepelnou energii v čase z období, kdy je tepelné energie přebytek do doby, kdy je tepelné energie nedostatek např. den – noc, léto – zima. Tím umožňuje využívat teplo, které získáme s lepší efektivitou a levněji. Nejčastěji používaný druh zásobníku je vodní zásobník, který se využívá k ukládání citelného, nebo latentního tepla.

Akumulační zásobníky dělíme na: krátkodobé – dlouhodobé
tlakové – beztlakové
nízkoteplotní - vysokoteplotní

V beztlakých zásobnících jsme schopni uchovat při stejné investici několikanásobně více tepelné energie, mají rovněž menší tepelné ztráty, než tlakové zásobníky. Tlakové nádoby se využívají při akumulaci tepla nad 100°C.U vysokoteplotních zásobníků je důležité udržování teplotní rozvrstvení (stratifikace). Pro tento systém byly vyvinuty zásobníky s vestavbou, která zavádí ohřátou vodu do výškové úrovně odpovídající teploty. V nízkoteplotních zásobnících je rozdíl teplot mezi spodní a horní částí zásobníku nízký, není tedy potřebná žádná vestavba. Krátkodobé nádrže uchovávají energii v rozmezí hodin, až dní. Dlouhodobé zásobníky uchovávají energii v rozmezí ročních období. U tohoto typu zásobníku se jako akumulační látka využívá také štěrk, nebo zemina. Výhoda využití akumulační nádrže spočívá v tom, že všechny zdroje pracují vždy ve svých nominálních parametrech, tudíž s maximální možnou účinností, a to vždy přináší nejen úsporu nákladů na vytápění nebo ohřev, ale také významně prodlužuje životnost zdrojů.

Nevýhodou některých těchto nádrží je jejich velká náročnost na skladovací prostor.[4]

1.3 Tepelné ztráty

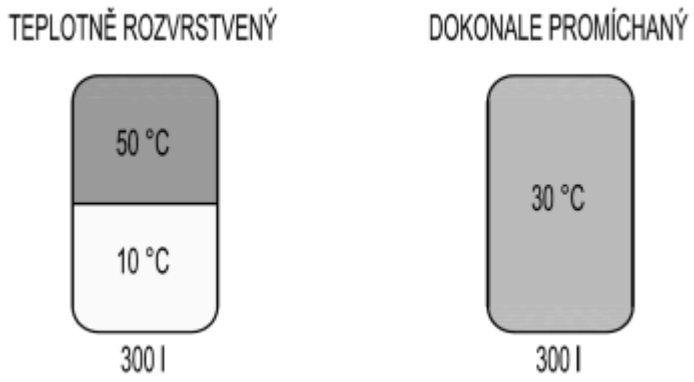
Akumulace tepla sebou nese přítěž v podobě tepelných ztrát. Ztráty tepla nastávají, když teplota v nádrži překročí teplotu okolí a jsou tím větší, čím větší je rozdíl těchto teplot. Pro snížení tepelných ztrát je vhodné zásobníky tepla pečlivě izolovat bez mezer a spár mezi izolací a nádrží a zamezit tak tepelným mostům. Pro běžné zásobníky pro ukládání tepla maximálně na několik dní se uvažuje minimální tloušťka izolace 10 cm (více je lépe). Izolační materiál by měl těsně přilehat k povrchu nádrže, aby se zamezilo ztrátám konvekcí, přímo z povrchu nádoby. Potrubí pro odvod teplé vody má být rovněž dobře izolováno a pokud možno vedeno zespodu nebo z boku nádrže se sklonem od ní, aby nedocházelo v době mimo provoz k vrácení ochlazené vody zpět do nádoby, to by vedlo k jejímu promíchávání. I velmi dobře izolovaný zásobník po určitém čase ztratí svou naakumulovanou energii. Časová hodnota, která udává, za jak dlouho poklesne akumulovaná energie na 37%, se nazývá časová konstanta zásobníku a je závislá, při dané izolaci a mediu, na poměru objemu a plochy akumulačního zásobníku. Tyto informace jsou čerpány z [6] a [7].

1.4 Stratifikace

Stratifikace je proces, při kterém se vytvářejí teplotní vrstvy v daném objemu vody. U hladiny je voda nejteplejší a u dna se drží voda studená, protože voda se s rostoucí teplotou roztahuje (klesá její hmotnost), a plave na studenějších vrstvách. Udržení teplotních vrstev ve vodním objemu napomáhá nízká tepelná vodivost vody. Tento děj se uskutečňuje buď uměle anebo přirozeně. V případě akumulačního zásobníku je výhodnější uměle vytvořená stratifikace, která ukládá teplo do vrstev zásobníku o stejné nebo podobné teploty.

Využití stratifikace v praxi

Máme dva zásobníky teplé vody o objemu 300 l. Uživatel vyžaduje 150 l teplé vody o teplotě 50°C, přičemž teplota přiváděné studené vody je 10°C. U prvního zásobníku je horní část zásobníku ohřátá na 50°C a dolní část zásobníku zůstává na teplotě 10°C, zatímco druhý zásobník je celý zahřátý na 30°C (zcela promíchán). Do obou zásobníků bylo dodáno stejné množství tepla. Uživatel prvního zásobníku je spokojen, protože má k dispozici požadované množství vody o požadované teplotě. Uživatel druhého zásobníku spokojen není, neboť odběr požadovaného množství vody musí být dohříván dodatkovým zdrojem tepla.

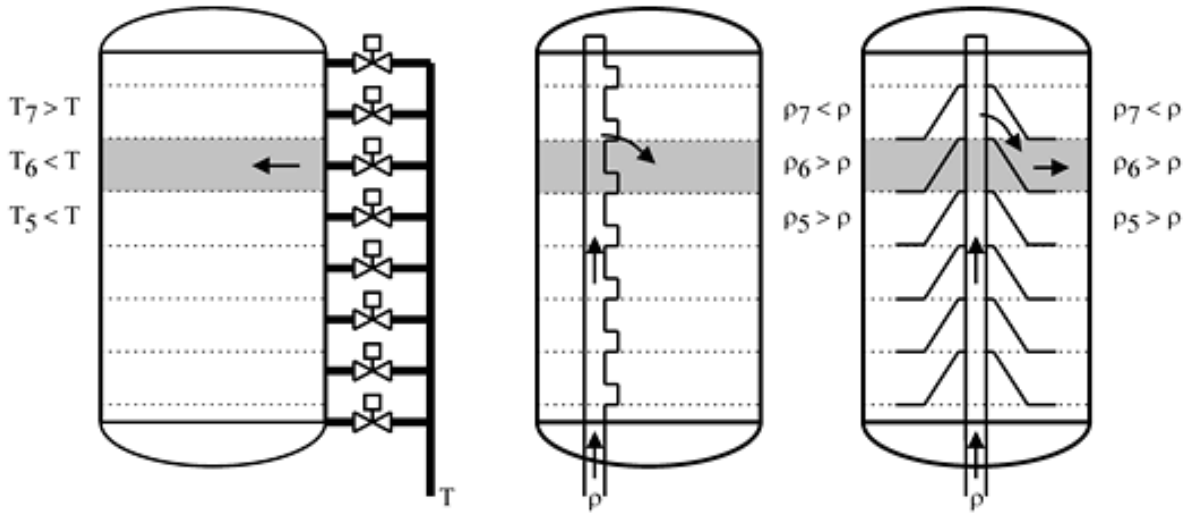


Obr. 2 – Rozdíl mezi stratifikovaným a promíchaným zásobníkem

Stratifikační zásobník

Je nádrž, kde se ukládá teplá voda ve vrstvách tak, že u hladiny je voda nejteplejší a u dna nejstudenější. V tomto stavu voda setrvává v každé nádrži, protože se s rostoucí teplotou roztahuje a je tedy lehčí a plave na studenějších vrstvách. Pro zásobníky tepla s řízeným vrstvením se používají různé způsoby jak dosáhnout teplotního vrstvení při nabíjení zásobníku, některé z nich jsou na obr. 3. První způsob (vlevo) je řízení stratifikace ventily ovládanými na základě porovnávání teploty v dané vrstvě zásobníku a teploty přiváděné

vody. Toho se využívá při rozdělení objemu akumulace do více zásobníků, např. u velkých soustav pro bytové domy. Přívodní potrubí s ventily do zásobníku je potom nutné navrhovat na nízkou vstupní rychlost a konstrukčně řešit tak, aby přiváděný proud nenarušil teplotní rozvrstvení objemu zásobníku. Jednodušším způsobem bez nároku na regulaci a elektrickou energii jsou samočinné trubkové stratifikační vestavby, které pracují na základě rozdílu hustot mezi přiváděnou vodou z výměníku a vrstvami akumulačního zásobníku. Voda o hustotě ρ je přiváděna vždy pod vrstvu, která má nižší hustotu. Trubkové vestavby (uprostřed) jsou levné prvky, zpravidla z plastového PVC potrubí. Odbočky se vybavují velmi lehkými zpětnými klapkami, které zabraňují znehodnocení teploty přiváděné teplé vody přisáváním vody z dolní chladnější části zásobníku. Speciální talířové vestavby (vpravo) mají tento problém vyřešen vlastní konstrukcí (přirozená gravitační zpětná klapka). U trubkových vestaveb je důležité udržet nízkou rychlost v přiváděcím potrubí pod 0,1 m/s, aby nebylo teplotní rozvrstvení narušeno účinkem kinetické energie proudu přiváděné vody. Tyto informace jsou čerpány z [9].



Obr. 3 různé způsoby řízeného teplotního rozvrstvení

1.5 Nabíjení a vybíjení zásobníků

Přívod a odběr pracovní látky zásobníku má největší vliv na jeho tepelné rozvrstvení. Může probíhat buď přímo, nebo nepřímo. Přímé nabíjení a vybíjení zásobníku se uskutečňuje přímo vodou přitékající a odtékající ze zásobníku. K nepřímému nabíjení a vybíjení je využíván tepelný výměník. Tyto způsoby se dají též kombinovat.

Přímé nabíjení a vybíjení

Horká voda je v tomto provedení přiváděna shora přímo do nádrže a studená je odváděná zespodu nádrže. Horká voda způsobuje tzv. pístový efekt, což znamená, že horká voda proudí ze shora dolů. Při vybíjení je proces přesně opačný. Pokud voda do zásobníku při nabíjení nebo vybíjení proudí vodorovně, nedochází k většímu promíchávání, tak je zásobník stratifikovaný. Nevýhodu má toto provedení při zapojení solárního kolektoru v podmínkách, kde hrozí, že teploty klesnou pod bod mrazu. Jelikož není oddělen okruh solárního panelu a zásobníku, nelze tento systém využívat v zimních měsících, a celý systém musí být vypuštěn.

Přímé nabíjení a nepřímé vybíjení

Toto provedení je stejné jako to předchozí, pouze odběr tepla je zprostředkován pomocí tepelného výměníku ve vrchní části zásobníku, kde jsou nejvyšší teploty. Vybíjení využívá dolů směřující konvekce, která nastane vlivem ochlazení. Tím dojde k promíchání objemu zásobníku. Při nabíjení nedochází k promíchání zásobníku. V praxi se to využívá jak pro přípravu teplé vody, tak i pro vytápění.

Nepřímé nabíjení a přímé vybíjení

V tomto případě je okruh zdroje oddělen od okruhu spotřebiče, tudíž lze použít libovolnou teplonosnou látku v okruhu zdroje. To umožňuje např. připojení solárního systému, který bude funkční i v podmínkách, kde teploty klesnou pod bod mrazu. Nabíjení je zprostředkováno pomocí tepelného výměníku, který je umístěn ve spodní části zásobníku, kde je studená voda. Při nabíjení nám ve výměníku vzniká konvekční proudění, stejně jako u předchozího provedení, jen s tím rozdílem, že probíhá opačným směrem, čili nahoru. Tím se nám celý zásobník promíchá. Vybíjení probíhá po vrstvách.

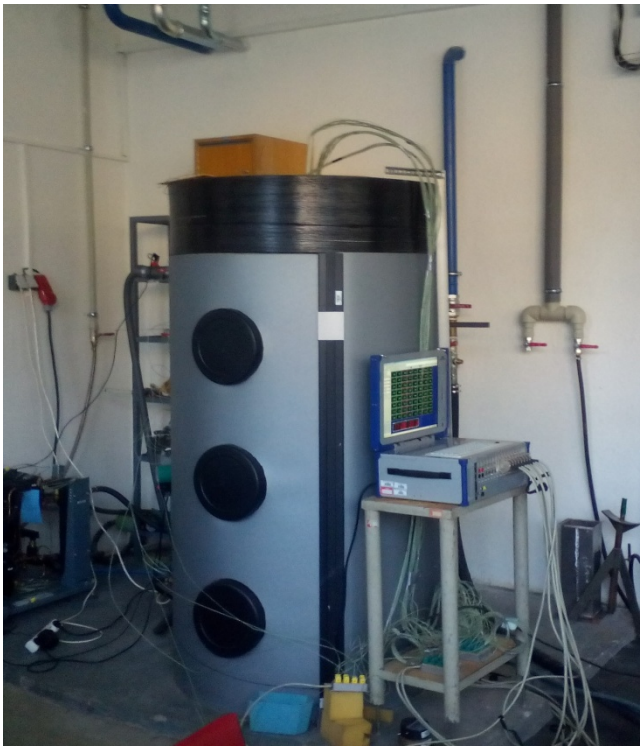
Nepřímé nabíjení a vybíjení

Pro přívod a odběr tepla se využívá tepelný výměník, to způsobuje promíchání objemu celého zásobníku jak při nabíjení tak i při vybíjení. Tzn., že systém má malou účinnost při tomto provedení. Využívá se v soustavách pro podporu vytápění. Informace o nabíjení a vybíjení zásobníků jsou čerpány z [5].

2. Návrh experimentálního zapojení

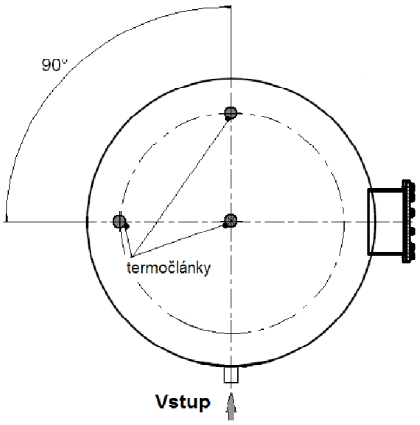
Popis měřících a experimentálních zařízení

2.1 Akumulační zásobník



Obr. 4 – Akumulační zásobník v laboratoři KEZ

Jedná se o otevřený, izolovaný akumulační zásobník s objemem 914 litrů vody, který má po obvodu přibližně 100 mm silnou izolaci z molitanové pěny. Před každým měřením byl tento akumulační zásobník napuštěn vodou z vodovodního řádu a hned po měření byl zase vyprázdněn. V zásobníku je umístěno 57 termočlánků, které jsou rozmístěny do tří sloupců po devatenácti (viz. obr. 5). Výšky jednotlivých termočlánků lze vidět na obr. 6. První sloupec je umístěn ve středu zásobníku, druhý je umístěn na okraji zásobníku naproti vtoku a třetí sloupec je umístěn na okraji zásobníku a pootočený o 90° od vtoku. Další termočlánky byly umístěny na vstupech a výstupech z akumulačního zásobníku.



Obr. 5 – ukázka rozmístění sloupců uvnitř akumulačního zásobníku

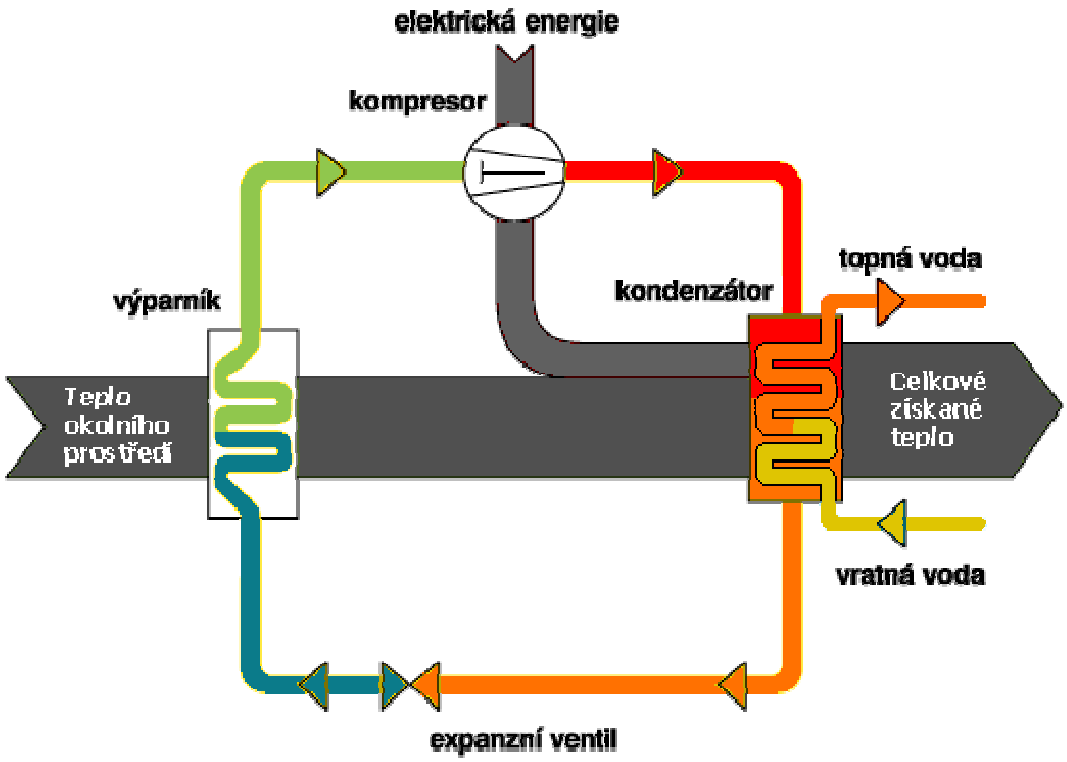
pozice termočlánků	
19	1645
18	1559
17	1473
16	1387
15	1301
14	1215
13	1129
12	1043
11	957
10	871
9	785
8	699
7	613
6	527
5	441
4	355
3	269
2	183
1	70

Tab. 1 vlevo jsou uvedeny pozice termočlánků vpravo jsou uvedeny výšky jednotlivých termočlánků v akumulačním zásobníku, výška je uvedena v mm

2.1.1 Princip tepelného čerpadla

Tepelné čerpadlo se skládá ze čtyř částí výparník, kompresor, škrtící ventil a kondenzátor. Tepelné čerpadlo získává teplo z okolního prostředí, kde je ho neomezené množství. Nejčastěji přímo ze vzduchu nebo ze země prostřednictvím kapaliny – nemrznoucí směsi. Ta proudí v trubkách zakopaných v zemi a „natahuje“ teplo z okolní zeminy. Nemrznoucí směs ohřátá „přírodním teplem“ se odvádí do výparníku tepelného čerpadla, kde se

nízkopotenciální teplo předá chladivu kolujícím uvnitř zařízení. Chladivo se tím ve výparníku vypaří a vzniklý plyn je nasán kompresorem. Kompresor ohřáté plynné chladivo prudce stlačí a pomocí fyzikálního principu komprese, kdy při vyšším tlaku stoupá teplota, vynese nízkopotenciální teplo na vyšší teplotní hladinu (cca 80°C). Kompresorem zahřáté chladivo putuje do kondenzátoru, teplo se zde předá do topné vody pro vytápění celého domu, ohřevu vody v zásobníku apod. a plynné chladivo změní svoje skupenství na kapalné. Z kondenzátoru putuje kapalné chladivo přes expanzní ventil, kde se prudce ochladí, zpět do výparníku, kde se opět ohřeje. Tento cyklus se stále opakuje, takže tepelné čerpadlo skutečně přečerpává teplo z vnějšího prostředí do vytápěného domu. V praxi se také můžeme setkat s označením primární a sekundární okruh. Primární okruh je v podstatě ta část tepelného čerpadla, která je zakopána v zemi, sekundární okruh pak představuje topný systém. Informace o principu tepelného čerpadla byly čerpány z [9].

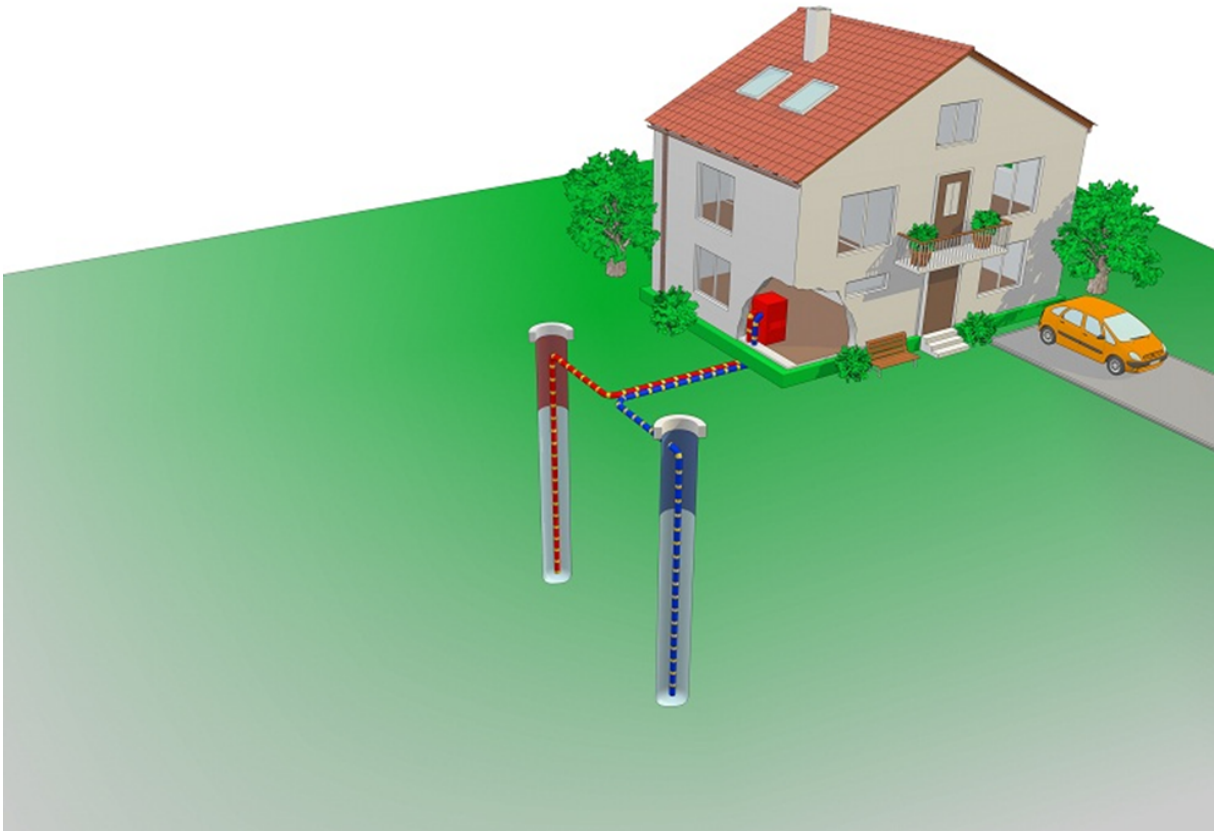


Obr. 6 princip tepelného čerpadla

Tepelné čerpadlo voda/voda

Tepelné čerpadlo voda/voda využívá jako zdroj tepla spodní (popř. povrchovou) vodu a získané teplo předává teplovodní topné soustavě v objektu. Zároveň ke svému provozu potřebuje určité množství elektrické energie. Pro možnosti instalace tepelného čerpadla voda/voda jsou však nutné specifické přírodní podmínky. Hlavní z nich je potřebná vydatnost pramene minimálně 0,5 l/s, pro běžný rodinný dům (čím vyšší výkon tepelného čerpadla, tím je potřeba větší průtok vody). Vydatnost pramene se musí ověřit čerpacími zkouškami, které by měly trvat dostatečně dlouho (někdy až 14 dní). Tato testovací fáze by se neměla podcenit, protože v případě chybných výsledků by mohla být následná investice do tepelného čerpadla zbytečná. Součástí tepelného čerpadla voda/voda jsou dvě studny – zdrojová a vsakovací. V těchto studních je uložená soustava potrubí se speciální kapalinou, která odebírá z podzemní vody teplo. Ze zdrojové studny se voda čerpá vodním čerpadlem do primárního výměníku, kde předá teplo chladivu tepelného čerpadla. Ochlazená voda se pak vypustí do druhé studny. Ve výparníku se ohřáté kapalné chladivo změní v plynné a pokračuje do kompresoru. Stlačením v kompresoru se prudce zvýší jeho teplota. Takto ohřáté chladivo odevzdá své teplo v sekundárním výměníku do vody topného systému. Po předání tepla se chladivo opět přemění na kapalinu a průchodem přes expanzní ventil se sníží jeho tlak. Následně začíná celý cyklus od začátku. Tímto způsobem se topná voda postupně ohřívá na teplotu potřebnou k vytápění prostor. Studny musí být od sebe vzdáleny alespoň 10 metrů. Ideální umístění je ve směru podzemních toků, tedy od zdrojové studny ke vsakovací. Půda v hloubce vodního zdroje musí navíc umožňovat rychlé vsakování vody. Poměrně důležitou roli hraje také kvalita vody, která může mít výrazný vliv na životnost a funkčnost trubek (trubky se mohou zanášet nečistotami a bahnem, nebo na nich může nadměrně ulpívat vodní kámen). Tento typ tepelných čerpadel dosahuje obvykle nejvyšší průměrné hodnoty topného faktoru (tj. poměr mezi vyrobenou a spotřebovanou energií) ve srovnání s jinými typy tepelných čerpadel. Možnosti užití tepelného čerpadla voda/voda jsou však poměrně omezené vzhledem k nedostatku vhodných lokalit. Podzemní voda je velmi výhodný zdroj tepla, protože se jejich teplota pohybuje kolem 10°C stabilně po celý rok. Voda má navíc výbornou tepelnou vodivost a rychle přenáší teplo. V tom spočívá výhoda např. oproti tepelným čerpadlům čerpajícím teplo ze vzduchu (tj. vzduch/vzduch,

vzduch/voda), jehož teplota nejvíce klesá právě v období, kdy je třeba nejvíce topit. Informace o tepelném čerpadle voda/voda jsou čerpány z [10].



Obr. 7 ukázka tepelného čerpadla voda-voda

Topný faktor

Topný faktor (popř. COP, Coefficient of performance) je veličina, která je přímo závislá na poměru výkonu ku příkonu a která nám hodně napoví o efektivitě topení tepelným čerpadlem. Topný faktor patří mezi bezrozměrné veličiny, je tedy vyjádřen číslem. Nejčastěji se hodnota topného faktoru pohybuje v intervalu 2 až 5. Hodnota topného faktoru závisí na vstupní a výstupní teplotě, typu kompresoru a dalších okolnostech. Ve většině případů je topný faktor udáván jako teoretický, reálný, tzv. meziroční topný faktor bývá nižší a pohybuje se v intervalu 2 až 3,5. Informace o topném faktoru jsou uvedeny v [11].

Tepelné čerpadlo voda – voda v laboratoři KEZ

Obr. 8 Tepelné čerpadlo voda-voda (JDK-Dixell-XR20CX) v laboratoři KEZ

Tepelné čerpadlo se skládá z těchto čtyř části: výparník, kompresor, kondenzátor a škrtící ventil. Toto čerpadlo funguje následujícím způsobem:

1. Ve výparníku se ohřívá pracovní medium (chladivo), které po ohřátí přejde z kapalného do plynného stavu, který je pak nasáván do kompresoru.
2. Dále kompresor nasává sytou páru chladiva a stlačuje ji, díky čemuž se tak zvýší teplota a tlak chladiva.
3. Kondenzátor je část, v níž se dostává část tepla z chladiva do nádrže, kde je další výměník, ve kterém pracovní medium odevzdá své získané teplo a čímž přenese část tepla z chladiva do nádrže a zbylá část pokračuje do škrtícího ventilu ve zkapalněném stavu.
4. Škrtící ventil je poslední součástí tepelného čerpadla, v němž se pracovní medium seškrtí na původní nízký tlak (tj. chladivo předalo své teplo do topné soustavy a má zase svoji prvotní nízkou teplotu) a oběh se po té opakuje.

2.1.2 Měřící zařízení DW6092 (wattmetr) a Ahlborn (průtokoměr)

Obr. 9 Měřicí přístroje DW 6092 (wattmetr) vlevo a Ahlborn (průtokoměr) vpravo v laboratoři KEZ

Wattmetr DW6092

Měřící zařízení DW6092 na obrázku vlevo, nám posloužilo k měření příkonů na tepelném čerpadle. Tento přístroj umí měřit příkon na jednotlivých fázích, dále pak umí změřit i jalový, zdánlivý a činný výkon na jednotlivých fázích. Nás zajímal součet všech příkonů na jednotlivých fázích, což toto měřící zařízení umělo taky. Toto měřidlo nám ušetřilo spoustu práce tím, že v průběhu měření ukládalo data na SD kartu, každou sekundu. Hodnoty příkonu byly měřeny v kW. Přístroj byl po celou dobu měření napájen ze sítě.

Průtokoměr Almemo 2290 -3

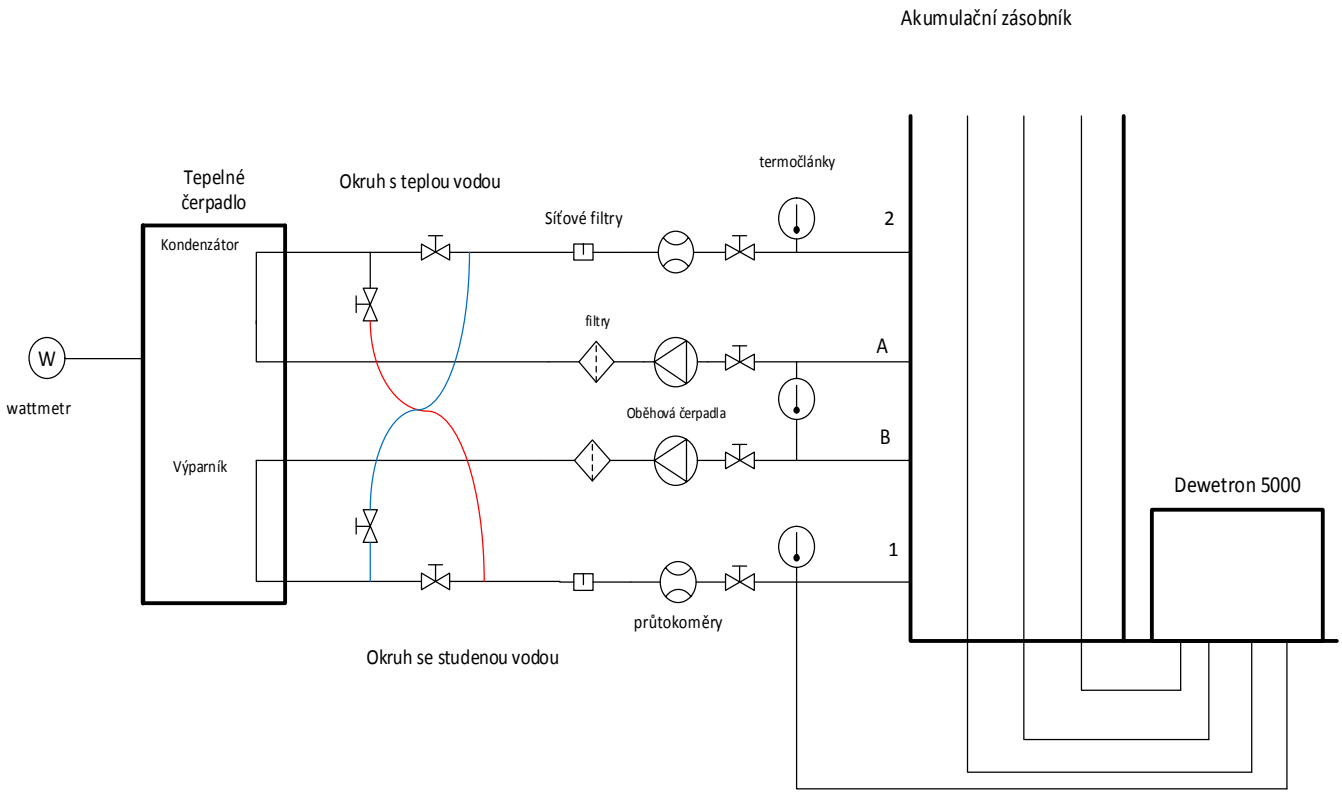
Pomocí měřicího přístroje Almemo 2290-3 (na obr. 7 vpravo) jsme zjišťovali průtoky jak na teplém tak i studeném okruhu. Ještě před tím, než se průtokoměr nainstaloval na oba okruhy, provedl pan Ing. Švarc kalibraci měřidla, pomocí Coriolisova průtokoměru (typ Siemens sitrans F C massflo mass 2100). Toto zařízení je schopno indikovat hodnoty ze 4 vstupních kanálů. Velkou nevýhodou bylo, že tento přístroj neumí ukládat data a jelikož průtok v různých časových intervalech často kolísal tak měření neprobíhalo přesně. Průtoky jsme proto zapisovali ručně zhruba cca každých 10 minut.

2.1.3 Měřící přístroj Dewetron 5000

Obr. 10 Měřící zařízení DEWETRON 5000 v laboratoři KEZ

Jedná se o počítačový software, který po zapojení jednotlivých konektorů do počítače a termočlánků do svorkovnic, dokázal změřit teplotu vody uvnitř akumulačního zásobníku v různých hladinových výškách a dále tím byly ještě měřeny teplotní hodnoty na vstupních a výstupních termočláncích v obou okruzích. Tento program nám ušetřil spoustu práce, protože ukládal každou sekundu hodnotu teploty na jednotlivých termočláncích po celou dobu měření. Z každého měření jsem pak získal soubor teplot, ze kterého bylo provedeno vyhodnocení pomocí grafů.

2.2 Schéma zapojení



Obr. 11 Schéma zapojení

Před spuštěním celého okruhu jsme nejprve museli napustit vodu do akumulačního zásobníku z vodovodního řádu. V průběhu napouštění jsme si připravili měřidla. Po naplnění zásobníku byl spuštěn měřicí přístroj DEWETRON 5000, abychom viděli teplotní hodnoty před začátkem měření. Poté byly spuštěny obě pomocná oběhová čerpadla a zároveň s nimi bylo spuštěno i tepelné čerpadlo voda/voda. Voda začala proudit kolem bodu A, kde u výstupu z akumulační nádrže byl namontován termočlánek určující teplotu uprostřed zásobníku. Před oběhovým čerpadlem je škrtící ventil. Před tepelným čerpadlem byl filtr, který zachycoval nečistoty jdoucí z akumulačního zásobníku. Na výstupu z tepelného čerpadla byly dva škrtící ventily. Jeden vedl přímo do horní části nádrže směrem k bodu 2 (ten byl po celou dobu měření vždy zapnutý). Druhý ventil (viz. červená čára) měl sloužit k měření promíchání teplé vody se studenou a vedl do dolní části akumulačního zásobníku, toto měření však nebylo provedeno. Hned za škrtícím ventilem byl nainstalován síťový filtr, který chránil průtokoměry před velmi malými nečistotami. Před vstupem byl namontován průtokoměr a hned za ním škrtící ventil, kterým jsme regulovali rychlost proudu do vstupu horní části akumulačního zásobníku. Před vstupem do akumulačního zásobníku byl

termočlánek, který určoval vstupní hodnotu teploty do horní části akumulačního zásobníku. To samé platí i pro okruh se studenou vodou.

2.3 Návod na měření

1. zkontrolujeme, zda jsou všechny ventily uzavřené
2. dáme do správné polohy třícestný ventil a otevřeme napouštěcí ventil, abychom mohli napustit zásobník
3. začneme naplňovat zásobník z vodovodního řádu
4. mezitím si připravíme následující měřidla: dewetron – měření všech teplot
   wattmetr DW 6092 – měření příkonu
   průtokoměr Ahlborn – měření průtoků
5. zapojíme všechny konektory podle čísel do dewetronu
6. zapojíme všechny termočlánky do svorkovnice
7. zapojíme měřící zařízení dewetron do elektrické sítě a zapneme ho
8. zkontrolujeme hladinu vody v zásobníku, dokud nebude plný
9. po naplnění uzavřeme napouštěcí ventil v dolní části zásobníku a vypneme vodu
10. otevřeme ventily u oběhových čerpadel
11. další ventily otevřeme podle toho, co budeme chtít proměřit, zda teplý a studený okruh zvlášť popř. zdali se má teplý a studený okruh promíchat
12. zapojíme tepelné čerpadlo a oběhová čerpadla do elektrické sítě
13. do elektrické sítě dále zapojíme všechna měřidla a zapneme je
14. počkáme asi 10 minut kvůli vzduchu v obou okruzích
15. zapneme tepelné čerpadlo
16. začneme měřit na dewetronu se nám budou zobrazovat teploty ve všech částech akumulačního zásobníku + teploty na obou okruzích
17. pomocí wattmetru budeme měřit příkon na tepelném čerpadle, wattmetr nám ukazuje spoustu údajů, jako jsou např. proudy a napětí na jednotlivých svorkách, dále nám umožňuje změřit i zdánlivý či jalový příkon, ale nás bude zajímat činný příkon, který samozřejmě wattmetr zvládne taky změřit
18. dewetron a wattmetr nám práci zjednoduší tím, že se získané hodnoty dají ukládat na disk resp. na SD kartu, tudíž nemusíme nic odečítat

19. z průtokoměru musíme bohužel odečítat naměřené hodnoty, zhruba každých cca 10 minut, což je dosti nevýhodné, jelikož průtoky v obou okruzích mohou kolísat
20. po měření vypneme tepelné čerpadlo a obě oběhová čerpadla
21. uložíme soubory s naměřenými hodnotami
22. dáme trojcestný ventil do správné polohy a vypustíme vodu ze zásobníku
23. vypneme veškerá měřidla a vypojíme je z elektrické sitě
24. uklidíme měřidla
25. zkontrolujeme, zda je zásobník prázdný a dáme všechny ventily do správné polohy

3. Výpočtová část

Výsledkem měření moji bakalářské práce by mělo být proměření teplotního rozvrstvení v akumulační nádobě při použití tepelného čerpadla voda/voda. Z každého měření jsem získal soubor teplot naměřených na jednotlivých termočláncích, v různých výškách, které byly ukládány každou sekundu po celou dobu měření. Pro každé měření jsem měnil hodnoty průtoku, který jsem zapisoval zhruba každých 10 minut. Konečným výsledkem by měli být grafy, pro alespoň 5 režimů nabíjení, kde by mělo být vidět teplotní rozvrstvení akumulačního zásobníku v závislosti na výšce.

3.1 Zpracování naměřených hodnot

Výpočet bezrozměrné výšky y^*

Je to poměr mezi výškou, kde je umístěný termočlánek ku celé výšce zásobníku. Jedná se o bezrozměrnou výšku a výška oblasti se vypočte ze vztahu:

$$y^* = \frac{y}{H} \quad , \tag{1}$$

kde y (m) je výška umístěného termočlánku a H (m) je celková výška zásobníku.

Výpočet bezrozměrné teploty T*

Je to podíl rozdílu mezi naměřenou a minimální teplotou v zásobníku ku rozdílu mezi maximální a minimální teplotou v zásobníku. Jedná se o bezrozměrnou teplotu vypočítanou ze vztahu

$$T^* = \frac{T - T_{min.}}{T_{max.} - T_{min.}} , \tag{2}$$

Kde T (K) je teplota naměřená v daném místě. $T_{min.}$ (K) je minimální teplota v zásobníku. A $T_{max.}$(K) je maximální nabíjecí teplota.

Výpočet bezrozměrného času t*

Čas měření udává poměr, mezi hmotností nabíjecí vody, která v zásobníku nahradila původní vodu a hmotností zásobníku v daném čase nabíjení a vypočte se dle vztahu:

$$t^* = \frac{(\dot{m}_A + \dot{m}_B)t}{m_{nádrž}}, \quad (3)$$

kde $\dot{m}$ [kg.s^{-1}] je hmotnostní průtok nabíjecí vody, t [s] je čas měření a m [kg] je hmotnost vody v objemu nádrže.

Výpočet hmotnostních toků u okruhu teplé vody m_A a u okruhu studené vody m_B

Je to součin objemového průtoku v místech A popř. B s hustotou vody a vypočte se dle vztahu:

$$\dot{m}_A = \dot{V}_A . \rho , \quad (4)$$

resp.

$$\dot{m}_B = \dot{V}_B . \rho , \quad (5)$$

kde $\dot{m}_A$ a $\dot{m}_B$ [kg/s] jsou hmotnostní průtoky, $\dot{V}_A$ a $\dot{V}_B$ [m^3/s] jsou objemové průtoky a ρ [kg/m^3] je hustota vody.

Výpočet výkonů u okruhu teplé a studené vody

Je to součin hmotnostního toku s měrnou tepelnou kapacitou vodu a rozdílu teplot a vypočte se dle vztahu:

$$\dot{Q}_A = \dot{m}_A . c_p . (t_{max.} - t_{stř.}), \quad (6)$$

resp.

$$\dot{Q}_B = \dot{m}_B . c_p . (t_{stř.} - t_{min.}), \quad (7)$$

kde $\dot{Q}_A$ a $\dot{Q}_B$ [W] jsou výkony v okruhu A či B, $\dot{m}_A$ a $\dot{m}_B$ [kg/s] jsou hmotnostní průtoky, c_p [$\frac{J}{kg.K}$] je měrná tepelná kapacita vody (v našem případě c_p = 4180 $\frac{J}{kg.K}$) a $t_{max.}$, $t_{stř.}$, $t_{min.}$ [K] jsou hodnoty teplot v zásobníku.

Výpočet tepelného výkonu

Je to rozdíl výkonů okruhů s teplou a studenou vodou a vypočte se dle vztahu:

$$P = \dot{Q}_A - \dot{Q}_B , \quad (8)$$

kde P [W] je tepelný výkon okruhu, $\dot{Q}_A$ a $\dot{Q}_B$ [W] jsou výkony na obou okruzích.

Výpočet topného faktoru

Topný faktor je podíl mezi vyprodukovaným teplem a výkonem tepelného čerpadla, jedná se o bezrozměrnou veličinu a vypočte se ze vztahu:

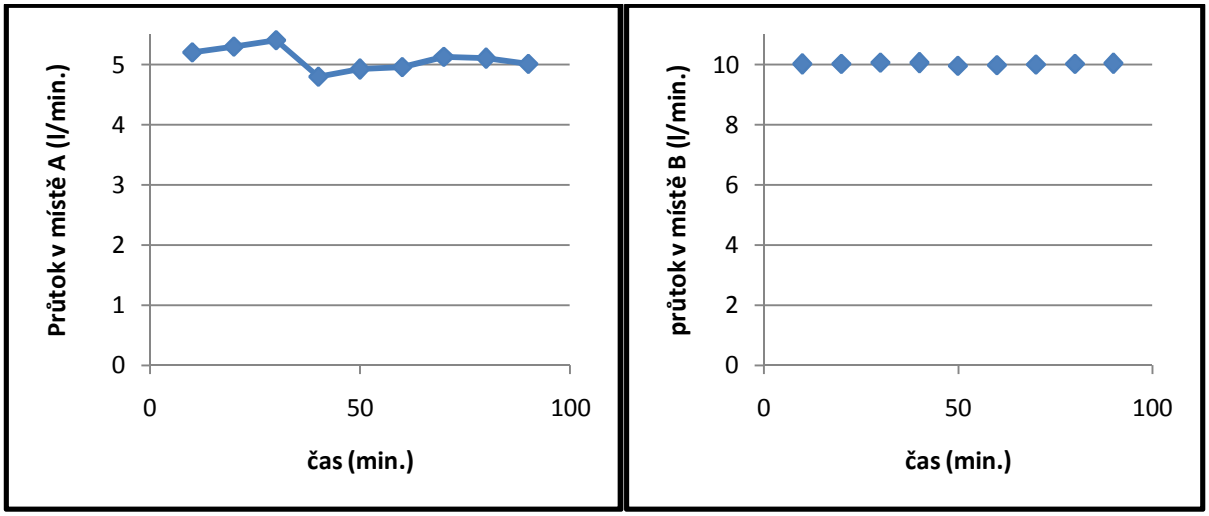
$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_A}{P_{tč}}, \tag{9}$$

kde $\dot{Q}_A$ [W] je vyprodukovaný teplo na teplém okruhu a *P* [W] je výkon tepelného čerpadla.

4. Vyhodnocování a zpracování dat

4.1 Měření a zpracování naměřených výsledků režimů

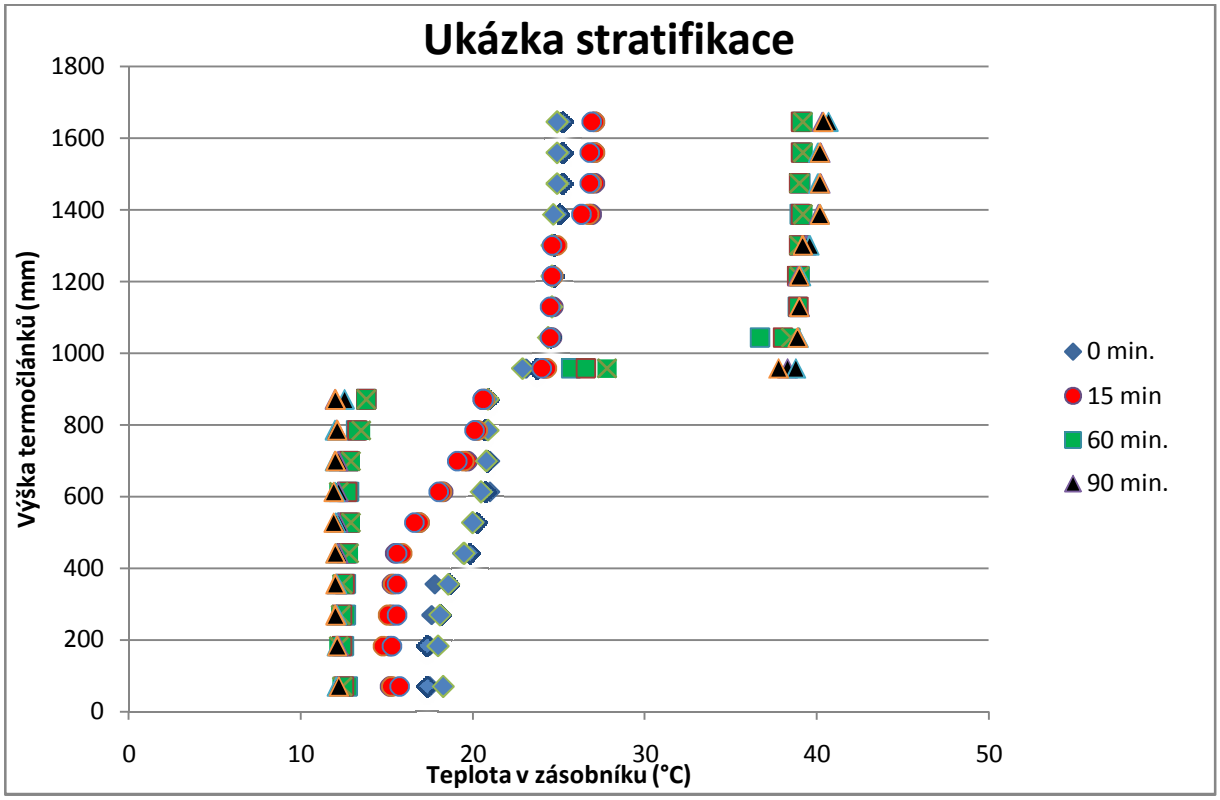
Než jsem začal zpracovávat a vyhodnocovat data do finální podoby, muselo proběhnout několik odborných konzultací ohledně zapojení, použití měřidel, nákupy chybějících prvků apod. Po vyřešení těchto problému následovala instalace zapojení (viz obr. 11). Hned po instalaci veškerých prvků, proběhla kalibrace průtokoměru a začalo se provádět odlaďování. Veškerá měření bakalářské práce probíhalo v laboratoři KEZ, a postup byl zhruba následující. Nejprve byl napuštěn akumulační zásobník vodou z vodovodního řádu. Mezitím než se akumulační zásobník naplnil vodou tak jsem si nainstaloval měřicí přístroje DEWETRON 5000 na měření teplot v akumulačním zásobníku, průtokoměr Ahlborn na měření průtoků na okruhy se studenou a teplou vodou a wattmetr DW 6092 na měření činného výkonu tepelného čerpadla. Ještě před spuštěním oběhových čerpadel jsem už musel mít zapnutý měřicí přístroj DEWETRON 5000, kvůli tomu abych věděl, jaké teploty jsou uvnitř zásobníku před začátkem měření. V průběhu měření jsem zhruba každých 10 minut zapisoval hodnoty na průtokoměru, tyto hodnoty jsem pak zapsal do tabulky (viz. tab. 2). Hodnoty byly měřeny v jednotkách l/min.



Obr. 12 grafická ukázka průběhu průtoků v závislosti na čase levý graf patří teplému okruhu a pravý graf patří studenému okruhu

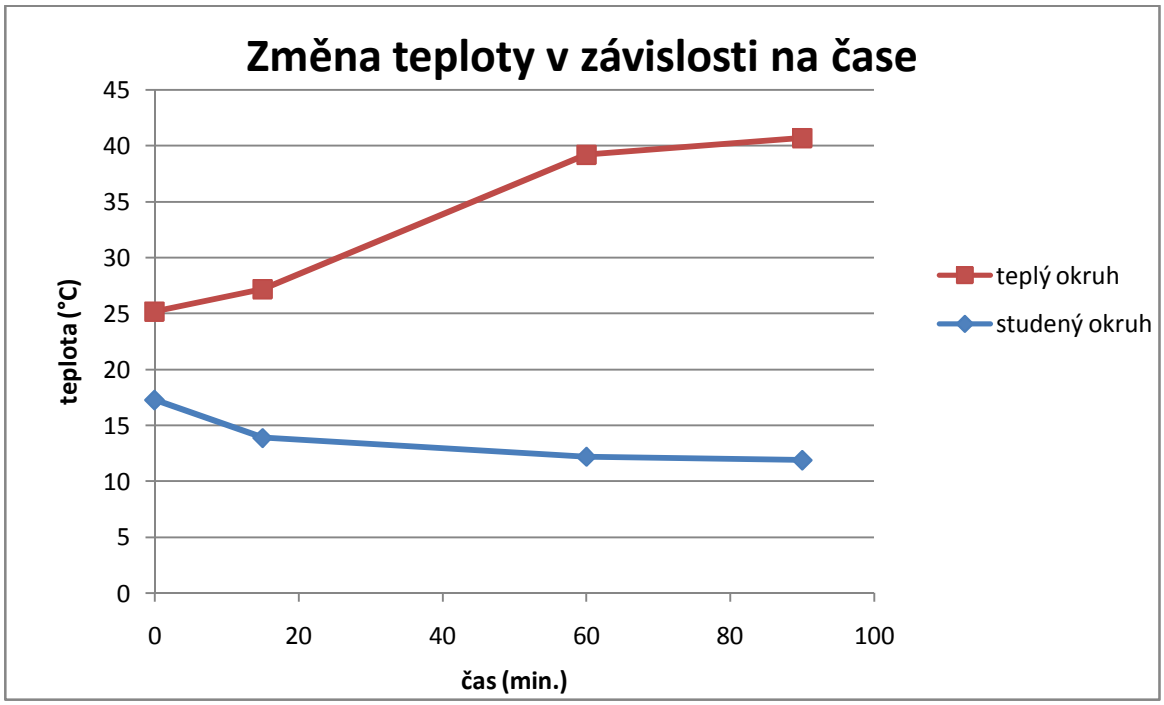
Zapisování hodnot průtoků nebylo zbytečné jak, lze vidět na grafech (obr. 12). Zatímco v místě A (okruh s teplou vodou) v průběhu měření jednou průtok zakolísal a poté se ustálil, tak v místě B (okruh se studenou vodou) se měnil jen nepatrně, v podstatě by se dalo i říct,

že průtok byl po celou dobu měření konstantní. Důvodů proč průtok kolísal, může být několik, např. oběhové čerpadlo v průběhu měření mohlo ztrácet výkon, dalším důvodem mohla být špatná montáž (např. netěsnosti ve spojích aj.), nečistoty v okruhu apod. Průtokoměr byl po celou dobu měření napájen 9V baterií. Měření výkonu na tepelném čerpadle nám zajistil měřicí přístroj DW6092. Toto měřící zařízení umí změřit spoustu věcí např. jalový či zdánlivý výkon. Pro naše měření však bylo potřeba změřit celkový činný výkon, což toto měřící zařízení umí taky. Další výhodou tohoto přístroje bylo, že dokázal ukládat naměřená data každou sekundu po celou dobu měření. Naměřená data se ukládala na SD kartu. Wattmetr byl po celou dobu měření napájen z elektrické sítě. Důležitou veličinou mého měření byly teploty v akumulačním zásobníku. Z každého měření byly získány hodnoty teplot naměřené na jednotlivých termočláncích, v různých výškách akumulačního zásobníku, které byly ukládány každou sekundu po celou dobu měření. Po každém měření bylo mým úkolem zpracovávat naměřená data a vyhodnocovat je graficky. Jak takový graf po měření vypadá, lze vidět na obr. 13.



Obr. 13 ukázka výsledného grafu po proměření

Na obr. 13 lze vidět finální výsledek mého měření. Je to grafické znázornění teplotní řízené stratifikace na začátku, v průběhu a na konci měření v akumulačním zásobníku. Je to závislost teploty v zásobníku na výšce jednotlivých termočlánků. Výšky jednotlivých termočlánků jsou uvedeny na obr. 6. Ještě než jsem spustil nabíjení zásobníku tak jsem už začal proměřovat teploty (na obr. 13 modrý kosočtverec). Teploty se nám již před začátkem měření značně lišily. Minimální teplota před spuštěním byla 18°C a maximální teplota byla 24°C. Po 15 minutách už lze vidět na grafu, jak se pomalu od sebe odděluje studená část zásobníku vůči teplé části zásobníku. Z naměřených dat bylo zjištěno, že v tomto čase byla minimální teplota 15,2 °C a maximální teplota 27,1 °C. Z hlediska přehlednosti jsem další čas měření zvolil po hodině měření (na obr. 13 zelený čtverec). Minimální teplota v tomto časovém intervale byla 12,2°C a maximální teplota byla 39,2 °C. Na grafu už je i názorně vidět jak se od sebe oddalují studené vrstvy od těch teplých vrstev. Po promíchání celého zásobníku (na obr. 13 černý trojúhelník), které trvalo zhruba 1,5 hodiny, už lze vidět finální podobu mého měření. V akumulačním zásobníku se rozdělily vrstvy na studenou v dolní polovině a teplou v horní polovině. Minimální naměřená teplota na konci měření byla 11,9 °C a nejvyšší teplota byla 40,8°C. Po promíchání celého zásobníku se teploty už ustálily, což znamená, že kdyby měření probíhalo dále, tak už se teploty o moc víc nezmění. I tak jsme dosáhli značného rozdílu teplot, kde se ve výsledku teploty od sebe liší o 28,9 °C. Na obr. 14 jsem ještě graficky znázornil, jak se měnila teplota na obou okruzích v akumulačním zásobníku v závislosti na čase. Co to v praxi pro uživatele znamená? V laboratoři KEZ má akumulační zásobník objem na zhruba 914 l vody, když zanedbáme ztráty v oběhu, tak budeme mít 457 l studené a 457 l teplé vody, což pro uživatele má obrovský význam. Má k dispozici vodu o dvou různých teplotách, což je určitě výhodnější než mít jen promíchanou vodu o jedné teplotě. Po měření proběhla výpočtová část, kde jsem pomocí vztahů (5), (6), (7), (8) a (9) počítal výkon na tepelném čerpadle, poté jsem pak porovnával vypočítaný a naměřený výkon tab. 2. Toto měření jsem použil jen jako názorný příklad jak takové měření a zpracování dat probíhalo. V dalším průběhu měření byly s docentem Dvořákem a s ing. Švarcem vyladěny všechny detaily (jako např. kolísání průtoků, co nejmenší rozdíl teplot na začátku měření aj.) tak, aby měření proběhlo co nejefektivněji.

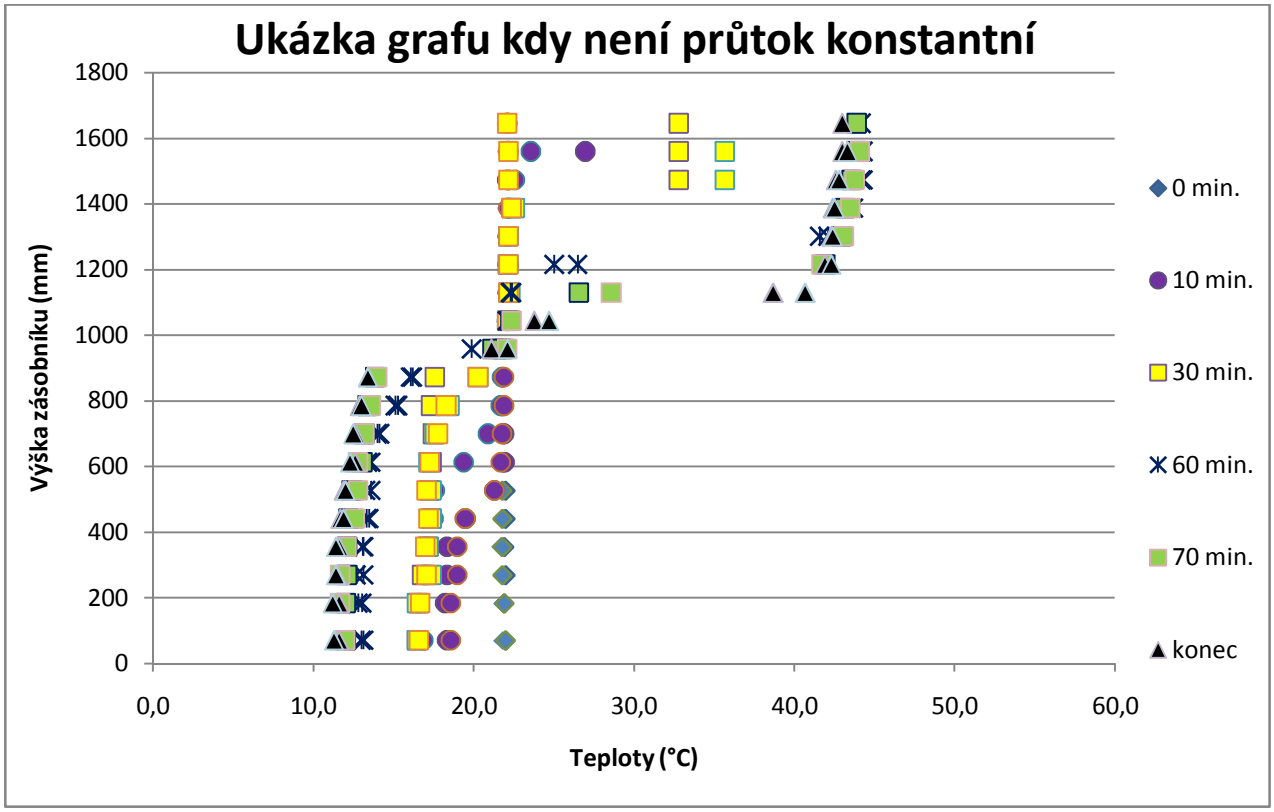


Obr. 14 ukázka změn teplot v akumulačním zásobníku v závislosti na teplotě

	A	B	Q_v	Q_k	P_{kom}	P_0	ε_k
čas	l/min.	l/min.	W	W	W	W	[-]
10	5,2	10,01	4319,11	5987,77	1668,66	1359	4,41
20	5,3	10,02	4881,29	6323,5	1442,21	1350	4,68
30	5,4	10,06	5040,80	6742,48	1701,68	1321	5,10
40	4,8	10,05	4825,96	6492,76	1666,80	1551	4,19
50	4,92	9,96	5411,18	6893,98	1482,80	1195	5,77
60	4,96	9,98	7646,48	6330,72	-1315,76	1263	5,01
70	5,13	9,99	7793,31	6654,46	-1138,85	1342	4,96
80	5,1	10,02	7746,92	6580,16	-1166,76	1329	4,95
90	5,01	10,03	7894,37	6429,29	-1465,08	1349	4,77

Tab. 2

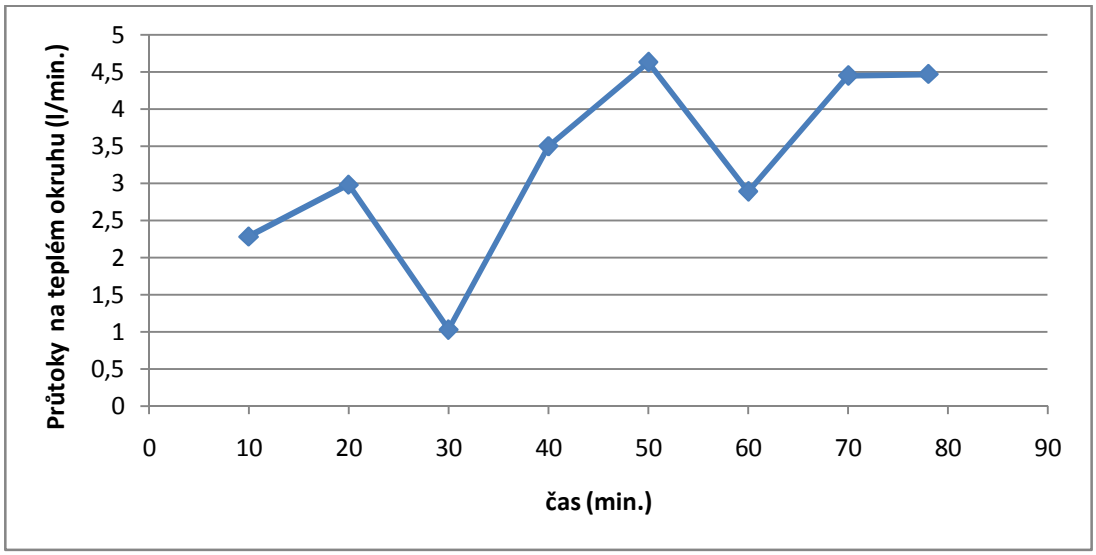
4.2 Ukázka měření kdy průtok kolísal po celou dobu měření



Obr. 15 ukázka grafu, při kterém kolísal průtok v průběhu měření

	A	B	Q_v	Q_k	P_{kom}	P_0	ε_k
čas	l/min.	l/min.	W	W	W	W	[-]
10	2,28	11,78	1065,76	1186,18	120,42	1114	1,06
20	2,98	11,78	983,77	1509,01	525,24	1064	1,42
30	1,03	11,8	1396,05	371,53	-1024,52	1092	0,34
40	3,5	11,73	1306,13	2427,85	1121,72	1109	2,19
50	4,63	11,68	1138,96	3404,40	2265,44	1696	2,01
60	2,89	11,67	1706,98	2004,71	297,73	1618	1,24
70	4,45	11,64	1621,52	3549,86	1928,34	1937	1,83
80	4,47	11,59	1291,64	3906,89	2615,25	1296	3,01

Tab. 3



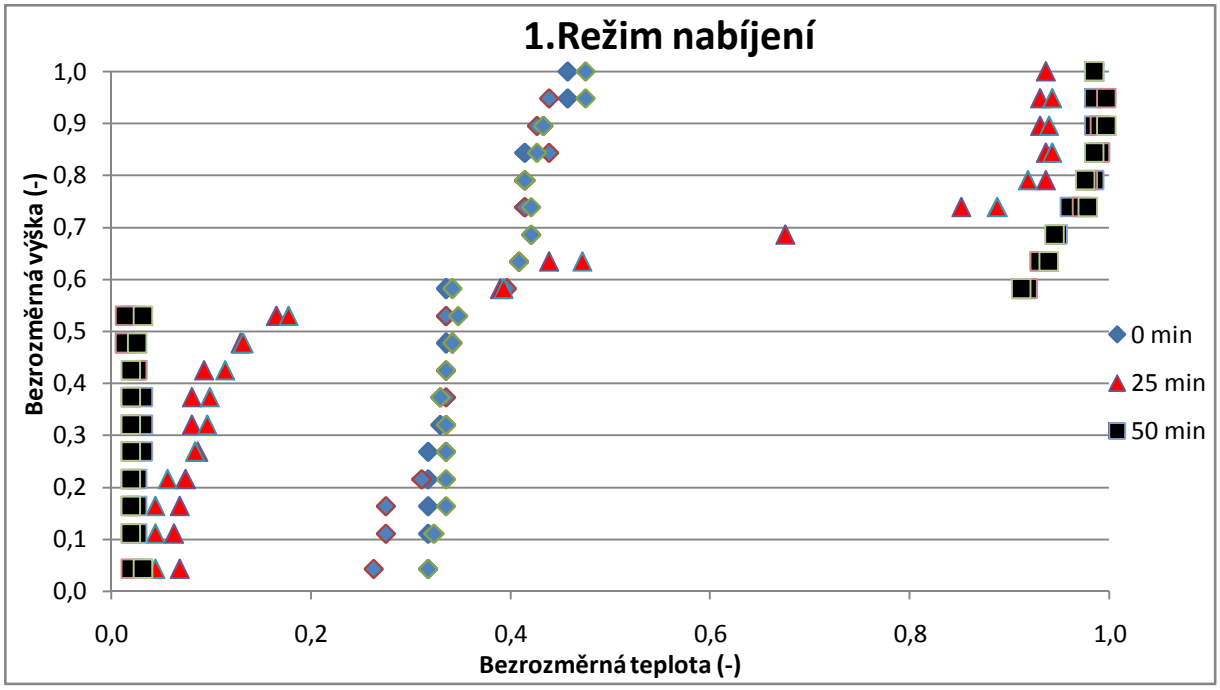
Obr. 16 grafická ukázka jak klesal či stoupal průtok na teplém okruhu při tomto měření

Při tomto měření rapidně kolísal průtok, na okruhu s teplou vodou, jak je patrné z grafu obr. 16 a ze zápisu hodnot tab. 3. Na začátku byla teplota ustálená na hodnotu kolem 22°C. V průběhu prvních 10 minut byl ustálen průtok vody na hodnotu 2,28 l/min. Při dalším zápisu však průtok rapidně stoupl nahoru a zvýšil se na hodnotu 2,98 l/min. Nejmenší hodnota průtoku byla naměřena po 30 minutách, kdy klesla na 1,03 l/min. Z grafu na obr. 17 lze vidět, že zatímco okruh se studenou vodou se začíná stratifikovat do dolní části akumulačního zásobníku, v horní části se voda začíná stratifikovat jen ve vrchních patrech, a u termočlánků, které jsou umístěny přímo u vstupu nabíjení. Jinak se teplota oproti počáteční moc nezměnila. Největší hodnota průtoku byla naměřena po 50 minutách, kdy hodnota průtoku činila 4,63 l/min. Po hodině měření byla hodnota průtoku 2,89 l/min. a z grafu (obr. 17) je vidět, že vrstvení probíhá už i v horní polovině měření. Ke konci měření se hodnoty na průtokoměru ustálily. Výsledná nejmenší naměřená hodnota na konci měření byla 11,2 °C a největší naměřená teplota měla hodnotu 43,3°C. Co to ve výsledku pro nás znamená? Zatím co na grafu obr. 15 vznikla polovina zásobníku s teplou vodou a druhá polovina zásobníku se studenou vodou, tak nyní máme polovinu zásobníku se studenou vodou, pak máme střední část zásobníku, kde se teplota v zásobníku v průběhu měření moc nezměnila a až nakonec máme určitou část s teplou vodou. V předchozím měření průtok zakolísal v okruhu s teplou vodou, ale jeho hodnoty se v závislosti na čase neměnily tak prudce jak při tomto měření, kde průtok chvíli stoupal a chvíli klesal a ustálil se až v posledních 10 minutách měření. Tím to měřením jsem chtěl poukázat, jak může vypadat stratifikace, pokud nebudeme dodržovat

ustálený průtok. Ve většině případů průtok takto kolísal hlavně u okruhu s teplou vodou, jelikož oběhové čerpadlo v průběhu měření ztrácelo výkon. V následujících bodech už budu popisovat měření jen co nejstručněji, v grafech už budu uvádět bezrozměrnou výšku a bezrozměrnou teplotu.

4.3 Vyhodnocování stratifikace při různých režimech nabíjení

1. režim nabíjení



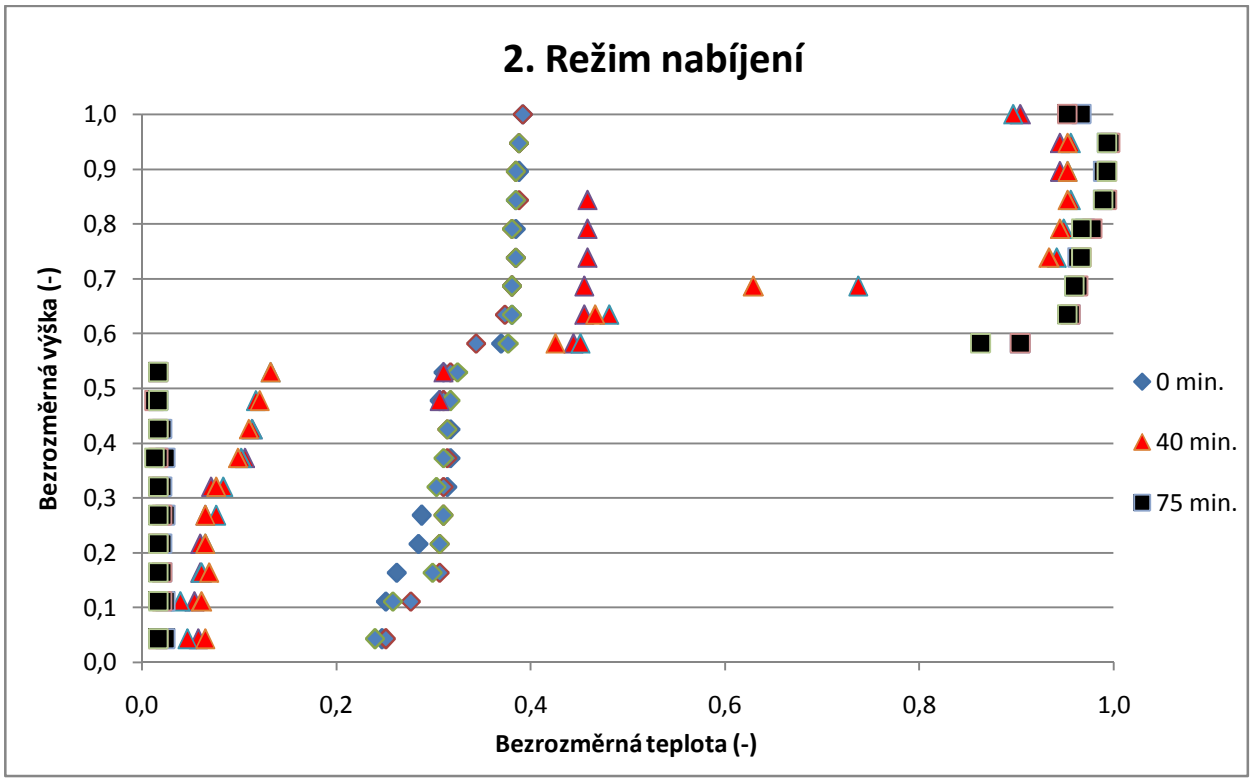
Obr. 17 výsledek prvního nabíjecího režimu

	A	B	Q_v	Q_k	P_{kom}	P_0	ε_k
čas	l/min.	l/min.	W	W	W	W	[-]
5	8,83	15,23	3391,71	4593,84	1202,13	1114	4,12
10	8,81	15,19	3805,65	4950,11	1144,45	1101	4,50
15	8,84	15,22	4236,85	5396,21	1159,35	1085	4,97
20	8,86	15,19	4122,79	5961,55	1838,76	1064	5,60
25	8,84	15,14	4007,26	6499,97	2492,71	1063	6,11
30	8,84	15,20	3917,27	6806,58	2889,31	1092	6,23
35	8,86	15,23	4720,61	6637,60	1916,99	1106	6,00
40	8,85	15,24	4670,63	6691,50	2020,86	1109	6,03
45	8,90	15,23	4879,73	6729,30	1849,57	1117	6,02
50	8,84	15,24	5201,39	6867,90	1666,51	1114	6,17

Tab. 4

Na obr. 17 lze vidět teplotní rozvrstvení v akumulačním zásobníku, při prvním režimu nabíjení. Při tomto měření byl využit maximální průtok na studeném okruhu. Toto měření trvalo zhruba 55 minut, proto byly hodnoty na průtocích zapisovány zhruba každých 5 minut. Před začátkem měření byla nejmenší hodnota teploty v akumulačním zásobníku 16,8°C a největší teplota byla 20,3°C. V průběhu měření nedocházelo ke kolizi s průtoky tab. 4. Na konci měření byla naměřena minimální hodnota teploty 12,7 °C a maximální hodnota teploty byla 29 °C.

2. Režim nabíjení



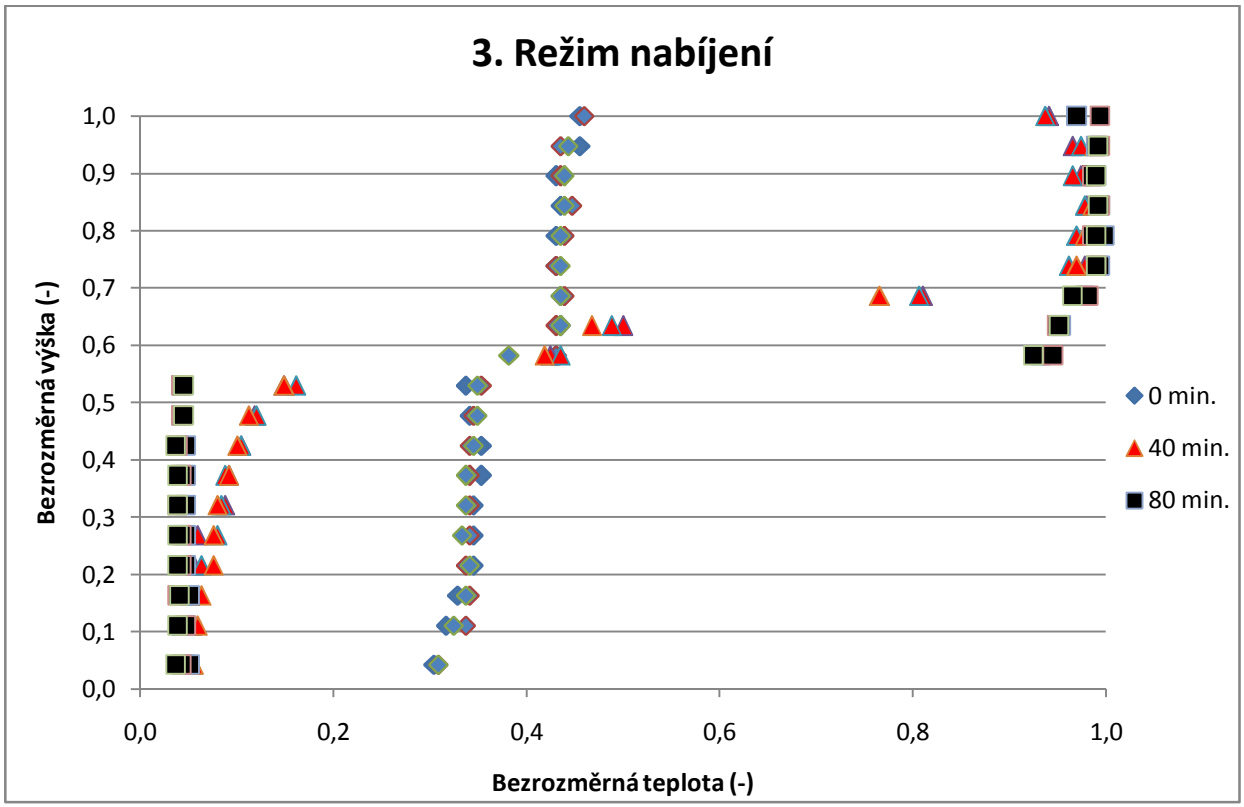
Obr. 18 výsledek druhého nabíjecího režimu

	A	B	Q_v	Q_k	P_{kom}	P_0	ε_k
čas	l/min.	l/min.	W	W	W	W	[-]
10	5,15	12,47	3384,541	4536,955	1152,41	1389	3,27
20	5,18	12,6	4121,328	5497,62	1376,29	1386	3,97
30	5,15	12,58	4552,529	5858,745	1306,22	1347	4,35
40	5,17	12,55	5065,712	6168,4	1102,69	1276	4,83
50	4,55	12,5	6617,01	5428,669	-1188,34	1244	4,36
60	4,54	12,49	6698,712	5574,201	-1124,51	1269	4,39
70	4,55	12,46	6942,984	5744,29	-1198,69	1433	4,01
80	4,54	12,53	6981,99	5763,157	-1218,83	1439	4,00

Tab.5

Na začátku měření byla minimální teplota v akumulačním zásobníku 22,1 °C a maximální teplota byla 26 °C. Na obr. 23 si lze všimnout, že v druhé polovině měření nám rapidně klesnul průtok na teplém okruhu, ale poté zůstal ustálen. Toto měření trvalo zhruba 85 minut. Na konci měření byla nejmenší hodnota teploty vody 15,8 °C a největší teplota vody v akumulačním zásobníku byla 42,3 °C.

3. Režim nabíjení



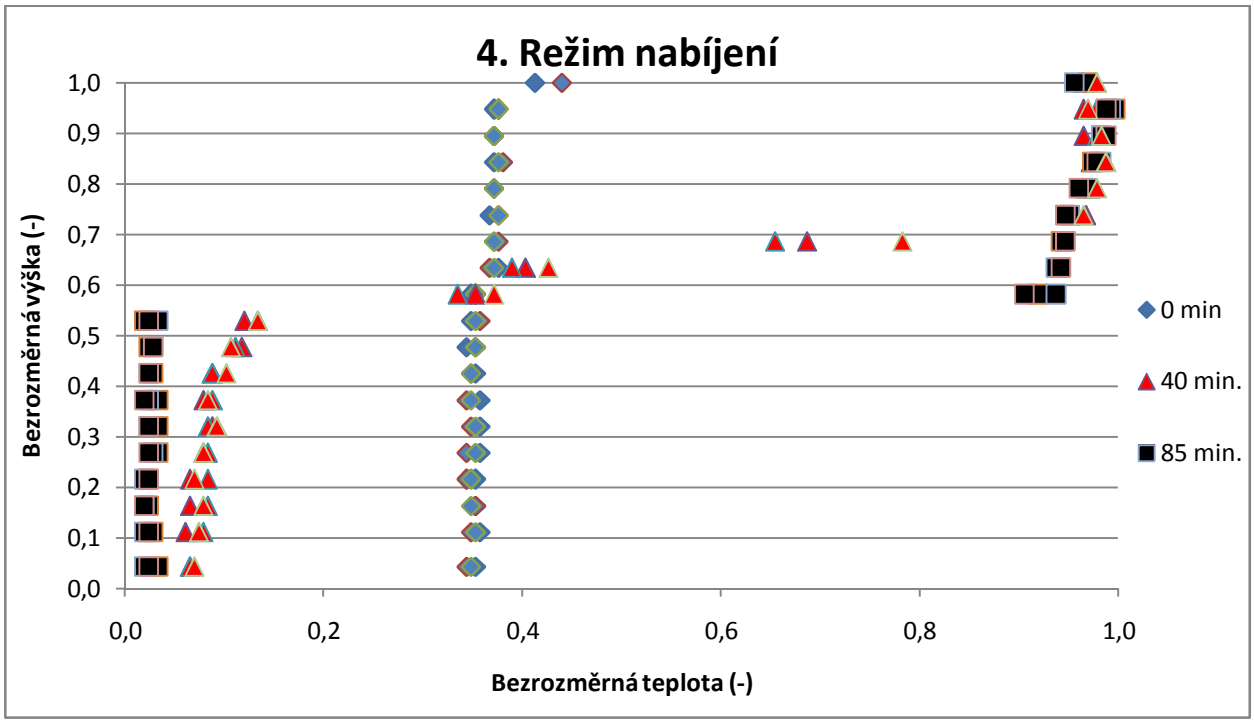
Obr. 19 výsledek třetího nabíjecího režimu

	A	B	Q_v	Q_k	P_{kom}	P_0	ε_k
čas	l/min.	l/min.	W	W	W	W	[-]
10	5,63	11,33	2365,48	3905,00	1539,52	1389	2,81
20	5,61	11,21	4290,79	5603,75	1312,96	1386	4,04
30	5,84	11,18	4668,33	6117,07	1448,74	1347	4,54
40	5,76	11,17	5052,84	6472,78	1419,94	1276	5,07
50	5,62	11,63	5022,38	6666,32	1643,94	1244	5,36
60	5,71	11,1	5180,07	6654,25	1474,18	1269	5,24
70	5,66	11,15	5436,40	6674,50	1238,10	1433	4,66
80	5,56	11,15	5048,08	6479,44	1431,36	1439	4,50

Tab. 6

Na obr. 19 lze vidět teplotní rozvrstvení v akumulačním zásobníku, při třetím režimu nabíjení. Před začátkem měření byla nejmenší hodnota teploty v akumulačním zásobníku 25,2°C a největší teplota byla 29°C. V průběhu měření nedocházelo ke kolizi s průtoky tab. 6. Po promíchání byla naměřena minimální hodnota teploty 18,7 °C a maximální hodnota teploty byla 42,2 °C.

4. Režim nabíjení



Obr. 20 výsledek čtvrtého nabíjecího režimu

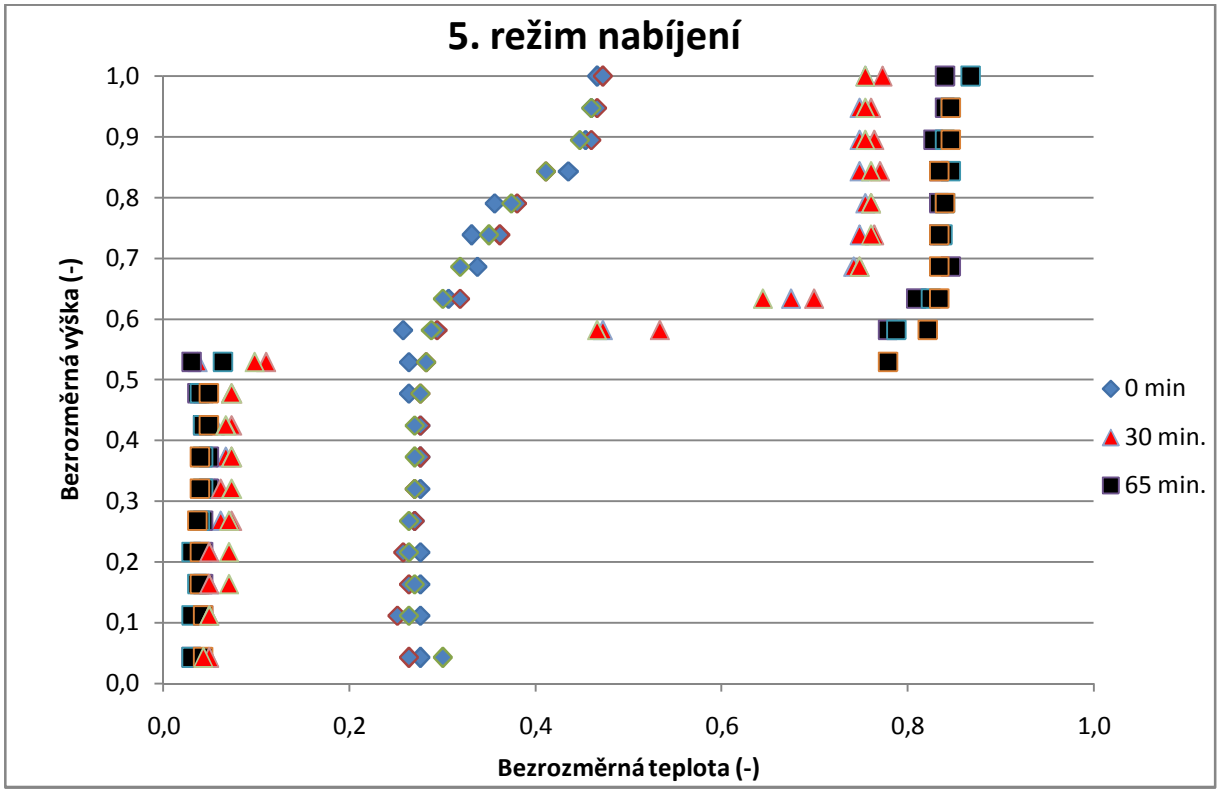
	A	B	Q_v	Q_k	P_{kom}	P_0	ε_k
čas	l/min.	l/min.	W	W	W	W	[-]
10	6,1	11,78	4915,177	6324,779	1409,602	1689	3,74
20	6,08	11,73	5302,174	6388,096	1085,922	1386	4,61
30	6,12	11,75	5392,925	6557,033	1164,108	1274	5,15
40	6,12	11,73	7504,615	5880,178	-1624,44	1268	4,64
50	6,29	11,63	8087,649	6521,78	-1565,87	1439	4,53
60	6,4	11,68	7959,972	6680,072	-1279,9	1383	4,83
70	6,41	11,74	7429,372	6424,662	-1004,71	1390	4,62
80	6,44	11,73	7586,187	6454,731	-1131,46	1447	4,46

Tab. 7

Na obr. 20 lze vidět teplotní rozvrstvení v akumulačním zásobníku, při čtvrtém režimu nabíjení. Před začátkem měření byla nejmenší hodnota teploty v akumulačním zásobníku 10,4°C a největší teplota byla 13,4°C. V průběhu měření se zhruba v 50 minutě zvýšil průtok

na okruhu se studenou vodou, poté se zase ustálil tab. 7. Po promíchání byla naměřena minimální hodnota teploty 6,4 °C a maximální hodnota teploty byla 21 °C.

5. Režim nabíjení



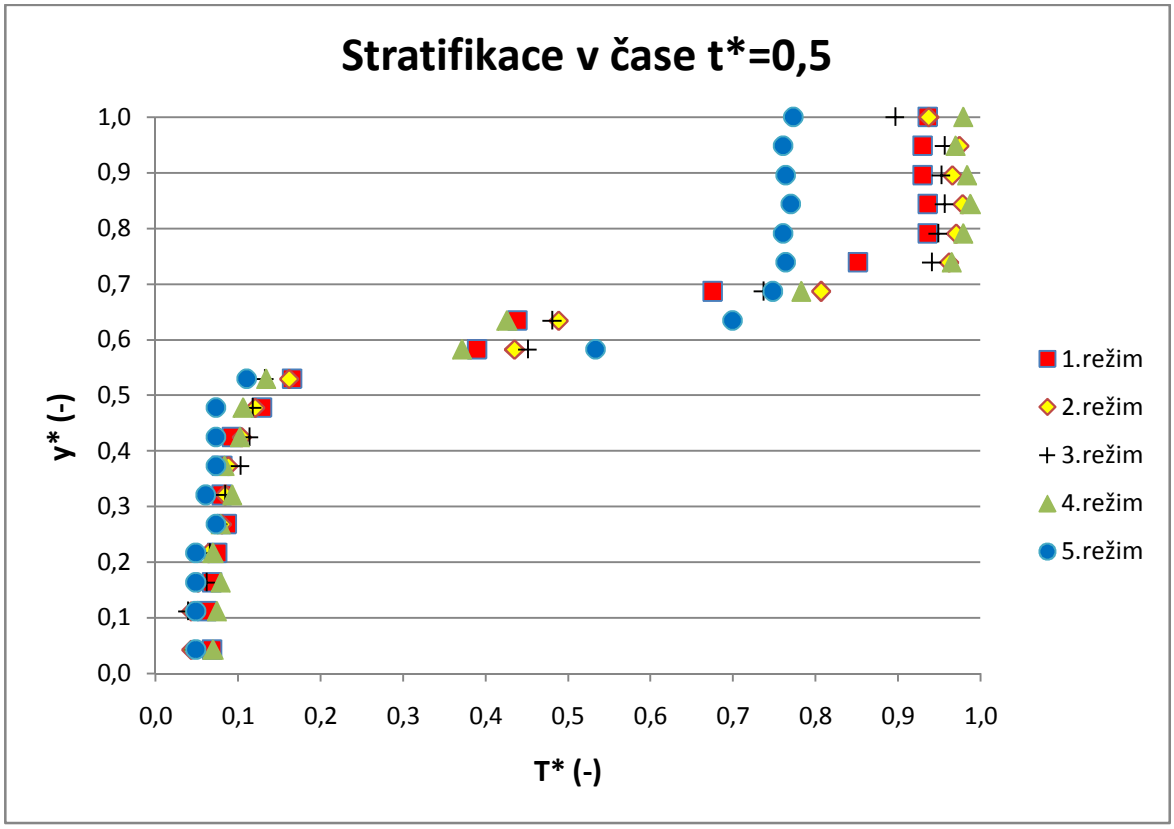
Obr. 21 výsledek pátého nabíjecího režimu

	A	B	Q_v	Q_k	P_{kom}	P_0	ε_k
čas	l/min.	l/min.	W	W	W	W	[-]
10	9	14,81	2370,564	3620,963	1250,40	885	4,09
20	9,01	14,82	3506,678	4374,983	868,30	882	4,96
30	9,07	14,87	3828,966	4655,781	826,82	861	5,41
40	9,1	14,88	4038,651	4671,181	632,53	905	5,16
50	9,17	14,88	4353,017	5279,599	926,58	887	5,95
60	9,2	14,89	4459,656	5424,507	964,85	905	5,99
70	9,15	14,91	4777,202	5521,968	744,77	907	6,09
80	9,15	14,9	4981,563	6156,677	1175,11	909	6,77

Tab. 8

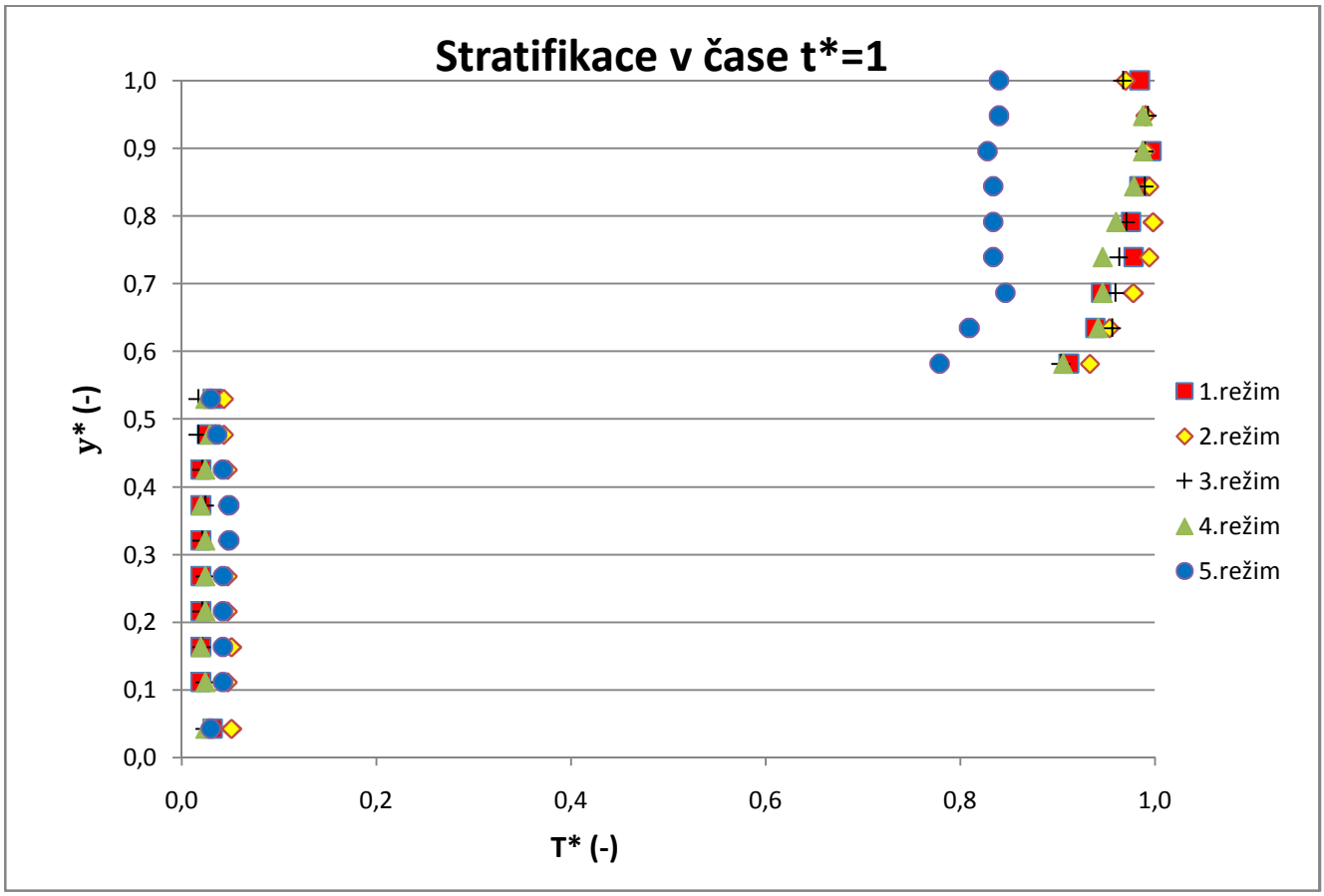
Při tomto měření byl využit maximální průtok na teplém okruhu tab. 8. Průtoky v průběhu měření nekolísaly, čili vrstvení proběhlo tak jak má, což je vidět na obr. 21. Před začátkem měření byla nejmenší teplota vody v dolní části 10°C a největší teplota vody v horní části byla 13,4 °C. Na konci měření, které trvalo zhruba 65 minut, byla naměřena minimální hodnota teploty v dolní části zásobníku 6,4 °C a maximální hodnota teploty v horní polovině byla 20,5 °C.

4.4 Výsledné grafy stratifikace



Obr. 22 Porovnání teplotního rozvrstvení v polovině měření

Na obr. 22 lze vidět, jak probíhalo teplotní rozvrstvení zhruba v polovině měření. Zatímco voda na studeném okruhu už se začíná vrstvit do finální podoby, tak voda na teplém okruhu ještě uprostřed akumulačního zásobníku není pořádně rozvrstvená, což mohlo zapříčinit kolísání průtoku, nebo ztráta výkonu na oběhovém čerpadle.



Obr. 23 Porovnání teplotního rozvrstvení na konci měření

Na obr. 23 vidíme, jak proběhlo teplotní rozvrstvení na konci měření pro všech 5 režimů. Z grafu je vidět, jak se nám krásně rozvrstvila studená a teplá vrstva zásobníku. Z grafu je vidět, že mezi 5. režimem a zbylými režimy je obrovský teplotní rozdíl v horní polovině zásobníku. Při 5. režimu byl nastaven maximální průtok na okruhu s teplou vodou a tím došlo k dodání menší tepelné energie na výparníku.

5. Závěr

Cílem bakalářské práce bylo proměřit 5 režimů stratifikace, pomocí citelného tepla v akumulačním zásobníku, ve kterém byly umístěny tři sloupce termočlánků, měřící teplotu. Všechny teplotní údaje byly po celou dobu měření zaznamenávány počítačovým softwarem DEWETRON 5000. Průtoky byly zapisovány zhruba každých 10 minut, jelikož měřící zařízení Ahlborn neuměl ukládat data, což byla velká nevýhoda tohoto měření, jelikož průtok v různých časových intervalech kolísal. Další nevýhodou tohoto měření bylo, že na začátku měření měla voda v akumulačním zásobníku vždy jinou hodnotu teploty. Naměřené výsledky poté byly zpracovány a vyhodnocovány do grafů o bezrozměrných souřadnicích. V průběhu měření došlo občas k zakolísání průtoků, které se pak ustálily, a ve výsledku nám vyšlo teplotní rozvrstvení v akumulačním zásobníku. Ve výsledných grafech je vidět jak se voda v průběhu a na konci míchání krásně rozvrstvila do studené vrstvy (dolní polovina zásobníku) a teplé vrstvy (horní polovina zásobníku). Z naměřených hodnot je vidět, že čím byl rychlejší průtok na okruhu s teplou vodou, tím pomaleji rostla teplota vody v akumulačním zásobníku obr. 23. To znamená, že u pátého režimu jsme dosáhli nejmenšího rozdílu teplot na konci měření mezi dolní a horní polovinou akumulačního zásobníku. Dále jsem počítal výkon na tepelném čerpadle a porovnával ho s naměřeným výkonem. Ve výsledku nám vyšlo, že se oba tyto výkony vzájemně lišily, což mohly způsobit tepelné ztráty v kompresoru, v kondenzátoru nebo v hadicích, dále to mohlo způsobit kolísání výkonu na oběhovém čerpadle s teplým okruhem. Chyba výpočtu se mohla projevit i tím, že termočlánky měnily skokově teplotu. Zásadním rozdílem mezi teplým a studeným okruhem byl, též ve výkonu oběhových čerpadel. Na okruhu s teplou vodou byl interval výkonu oběhové čerpadla v rozpětí 28 až 48 W tak, na oběhu se studenou vodou byl výkon oběhové čerpadla v intervalu 18 až 290 W. V další práci bude přínosné dát obě oběhová čerpadla se stejným nebo podobným výkonem, aby byl zajištěn rovnoměrnější průtok vody, oběma okruhy.

Seznam použité literatury

[1] M.Sazima – V.Kmoníček – J.Schneller a kol. Teplo (technický průvodce 2) str. 25

[2] M.Sazima – V.Kmoníček – J.Schneller a kol. Teplo (technický průvodce 2) str. 563 – 564

[3] Bechník B. Akumulace tepelné energie – fyzikální principy. Portál TZB-info 2003. (online). URL: <http://www.tzb-info.cz/1482-akumulace-tepelne-energie-fyzikalni-principy>

[4] Kramoliš P. Zásobníky tepla. Portál TZB-info 2004. (online). URL: < http://www.tzb-info.cz/1950-zasobniky-tepla>

[5] Mokriš L. Akumulace tepla v solárních tepelných soustavách. Bakalářská práce. Fakulta strojního inženýrství. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí bakalářské práce: Pavel Charvát.

[6] Matuška T. Prvky solárních soustav. Portál TZB-info. 2006. (online). URL: <http://www.tzb-info.cz/3626-prvky-solarnich-soustav-iv>

[7] Daněk T. Akumulační nádrž tepelného čerpadla. Diplomová práce. Fakulta strojního inženýrství. Vysoké učení v Brně. Vedoucí diplomové práce: Jiří Hejčík

[8] Matuška T. Zásobník tepla s řízeným teplotním vrstvením (stratifikací). Portál TZB-info. 2005. (online). URL:<http://oze.tzb-info.cz/solarni-kolektory/zasobniky-tepla-s-rizenym-teplotnim-vrstvenim-stratifikaci>

[9] <http://www.abeceda-cerpadel.cz/cz/princip-tepelneho-cerpadla>

[10] http://www.ekobonus.cz/tepelne-cerpadlo-voda-voda-dobra-volba-vyzadujici-specificke-prirodni-podminky-odebrano

[11] Knob R. Jak je to s výkonem a účinností tepelného čerpadla. Portál 4u-therm. http://www.4u-therm.cz/zakladni-informace-jak-je-to-s-vykonem-TC.php?str=6