



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**Fakulta elektrotechnická**

**Katedra měření**

# **Kalorimetrický systém pro měření odebraného tepla z otopných těles**

Diplomová práce

Studijní program: Inteligentní budovy

Vedoucí práce: Ing. Lubor Jirásek, CSc.

**Ing. Martin Bína**

---

**Praha 2018**





# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Bína** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **382610**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra měření**  
Studijní program: **Inteligentní budovy**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Kalorimetrický systém pro měření odebraného tepla z otopných těles**

Název diplomové práce anglicky:

**Calorimetric System for Measuring Heat from Radiators**

Pokyny pro vypracování:

1. Na základu analýzy podle projektu I. a II. navrhnete demonstrační kalorimetrický měřicí systém řízený procesorem s možností rozšíření externí paměti zajišťující snímání, sběr, archivaci naměřených údajů celého systému pro možnost měření dodané energie do systému otopné soustavy a energie vydané modelem otopného tělesa.
2. Realizujte měřicí systém včetně programového vybavení systému se zahrnutím možných korekcí změn vlastností přenosového média.
3. Navrhnete a realizujete kompletní model otopné soustavy.
4. Proveďte ověřovací měření funkčnosti celého komplexu modelu otopné soustavy.
5. Zhodnotte dosažené výsledky a důsledky pro možnosti obecných otopných soustav.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Haasz, V. - Sedláček, M.: Elektrická měření. Přístroje a metody (2. vydání). Monografie ČVUT, Praha 2003
- [2] Katalogový list průtokoměru: [https://www.landisgyr.cz/webfoo/wp-content/uploads/2012/09/Katalogblatt\\_UH505-116d.pdf](https://www.landisgyr.cz/webfoo/wp-content/uploads/2012/09/Katalogblatt_UH505-116d.pdf), (16.2.2018)
- [3] Katalogový list procesoru ATMEL ATMEGA 328P

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Lubor Jirásek, CSc., katedra mikroelektroniky FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **19.02.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: \_\_\_\_\_

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2019**

Ing. Lubor Jirásek, CSc.  
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

**25-04-2018**

Datum převzetí zadání

Podpis studenta



# Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW apod.) uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne .....

.....

podpis



# Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Luboru Jiráskovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

# Abstrakt

Tato diplomová práce pojednává o problematice přenosu tepla kapalinou. Na úvod práce bude představena problematika přenosu tepla kapalinou, možné zdroje nepřesností při výpočtu a způsoby, jak tyto nepřesnosti kompenzovat nebo korigovat. V další části bude představen měřící systém v podobě kalorimetru, který bude tyto nepřesnosti uvažovat a korigovat. Dále bude navržen a vyroben demonstrační model otopné soustavy s tímto kalorimetrem. V poslední části pak bude provedeno základní prověření i detailnější měření kalorimetrického systému v různých provozních stavech a nakonec provedeno vyhodnocení.

# Abstract

This diploma thesis deals with the issue of heat transfer with liquid. The introduction of the thesis will introduce the issue of heat transfer with liquid, possible sources of inaccuracies in the calculation and ways to compensate or correct these inaccuracies. In the next part we will introduce a calorimeter measuring system, which will consider and correct these inaccuracies. Furthermore, a demonstration model of the heating system with this calorimeter will be designed and manufactured. In the last part, basic calibration and detailed measurements of the calorimetry system will be carried out in different operating states and finally evaluated.



## **Klíčová slova**

Kalorimetr, sdílení tepla, otopná soustava, voda, modelování, vytápění

## **Keywords**

Calorimeter, heat sharing, heating system, water, modeling, heating

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>10</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>12</b>
<b>SEZNAM TABULEK</b> .....	<b>13</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>14</b>
<b>1 PROBLEMATIKA PŘENOSU TEPLA KAPALINOU</b> .....	<b>15</b>
<b>1.1 KALORIMETRICKÁ ROVNICE</b> .....	<b>15</b>
<b>1.2 ZÁVISLOST NA TLAKU</b> .....	<b>16</b>
<b>1.3 ZÁVISLOST NA CHEMICKÉM SLOŽENÍ</b> .....	<b>17</b>
<b>1.4 ZÁVISLOST NA TEPLITĚ</b> .....	<b>18</b>
<b>2 ZPŮSOBY MĚŘENÍ PRŮTOKU A TEPLoty</b> .....	<b>20</b>
<b>2.1 MĚŘENÍ PRŮTOKU</b> .....	<b>20</b>
<b>2.1.1 Typy průtokoměrů</b> .....	<b>20</b>
2.1.1.1 Průřezové.....	21
2.1.1.2 Lopatkové, turbínkové.....	21
2.1.1.3 Anemometrické.....	21
2.1.1.4 Indukční.....	21
2.1.1.5 Ultrazvukové.....	22
<b>2.1.2 Vhodné typy průtokoměrů pro kalorimetrické měření</b> .....	<b>23</b>
<b>2.2 MĚŘENÍ TEPLoty</b> .....	<b>23</b>
<b>2.2.1 Typy teplotních snímačů</b> .....	<b>24</b>
2.2.1.1 Odporové (termistory).....	24
2.2.1.2 Termoelektrické.....	25
2.2.1.3 Polovodičové.....	25
<b>2.2.2 Vhodné typy teploměrů pro kalorimetrické měření</b> .....	<b>25</b>
<b>2.3 DALŠÍ FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ PŘESNOST MĚŘENÍ</b> .....	<b>26</b>
2.3.1 Tepelná roztažnost.....	26
2.3.2 Umístění kalorimetru.....	26
<b>2.4 SHRnutí PARAMETRŮ VODY</b> .....	<b>27</b>
<b>3 KALORIMETRICKÝ SYSTÉM</b> .....	<b>28</b>
<b>3.1 BLOKOVÉ SCHÉMA</b> .....	<b>28</b>
<b>3.2 POPIS JEDNOTLIVÝCH BLOKŮ</b> .....	<b>28</b>
3.2.1 Řídící počítač (MCU).....	28
3.2.2 Průtokoměr.....	29
3.2.3 Senzory teploty.....	30
3.2.4 Zesilovače.....	32
3.2.5 Napěťová reference pro Pt1000.....	34
3.2.6 Analogově digitální převodník.....	34
3.2.7 Napěťová reference pro A/D převodník.....	35
3.2.8 Zdroj záporného napětí.....	35
3.2.9 Sdílení dat – Wi-Fi modul.....	36
<b>3.3 ELEKTRICKÉ SCHÉMA ZAPOJENÍ</b> .....	<b>37</b>
<b>3.4 DESKA PLOŠNÝCH SPOJŮ</b> .....	<b>38</b>
<b>3.5 PROGRAMOVÉ VYBAVENÍ</b> .....	<b>39</b>
3.5.1 Popis programu.....	39

3.5.1.1	Měření průtoku .....	39
3.5.1.2	Měření teploty.....	39
3.5.1.3	Měření výkonu a dodané energie ohříváče.....	40
3.5.1.4	Výpočet výkonu a odevzdané energie otopného tělesa.....	40
<b>4</b>	<b>MODEL OTOPNÉ SOUSTAVY .....</b>	<b>42</b>
4.1	BLOKOVÉ SCHÉMA .....	42
4.2	POPIS BLOKŮ.....	42
4.2.1	Ohříváč .....	42
4.2.2	Čerpadlo.....	43
4.2.3	Otopné těleso .....	45
<b>5</b>	<b>MĚŘENÍ .....</b>	<b>47</b>
5.1	ZÁKLADNÍ PROVĚŘENÍ KALORIMETRU .....	47
5.1.1	Měření průtoku .....	47
5.1.2	Měření teploty.....	47
5.2	ZÁKLADNÍ PROVĚŘENÍ MODELU OTOPNÉ SOUSTAVY .....	48
5.2.1	Měření průtoku .....	49
5.2.2	Měření výkonu.....	50
5.3	MĚŘENÍ PROVOZNÍCH STAVŮ.....	52
5.3.1	Průtok 24 l/h, teplotní cyklus 30-50-30 °C .....	53
5.3.2	Průtok 84 l/h, teplotní cyklus 30-50-30 °C .....	54
5.3.3	Průtok 123 l/h, teplotní cyklus 30-50-30 °C.....	55
5.3.4	Průtok 144 l/h, teplotní cyklus 30-50-30 °C.....	56
5.3.5	Průtok 174 l/h, teplotní cyklus 30-50-30 °C.....	57
5.3.6	Průtok 24 l/h, teplotní cyklus 30-70-30 °C .....	58
5.4	SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ.....	59
	ZÁVĚR .....	61
	ZDROJE .....	63
	ZDROJE OBRÁZKŮ .....	65
	STRUKTURA PŘILOŽENÉHO CD.....	66
	PŘÍLOHY .....	67

# Seznam obrázků

Obr. 1 Závislost hustoty na teplotě a tlaku .....	17
Obr. 2 Závislost hustoty na teplotě .....	18
Obr. 3 Závislost měrné tepelné kapacity na teplotě .....	19
Obr. 4 Coriolisův průtokoměr .....	20
Obr. 5 Princip indukčního průtokoměru .....	22
Obr. 6 Princip přímého ultrazvukového průtokoměru .....	23
Obr. 7 Běžné pouzdro platinového teploměru.....	24
Obr. 8 Běžné pouzdro NTC termistoru.....	25
Obr. 9 Blokové schéma modulu kalorimetru .....	28
Obr. 10 Mikropočítač Arduino UNO R3.....	29
Obr. 11 Ultrazvukový průtokoměr Landis Gyr 2WR7 .....	30
Obr. 12 Závislost odporu na teplotě u platinového senzoru Pt1000.....	31
Obr. 13 Schéma zapojení operačního zesilovače pro měření teploty .....	31
Obr. 14 Invertující zapojení operačního zesilovače.....	33
Obr. 15 Schéma zapojení kalorimetru .....	37
Obr. 16 Rozložení DPS kalorimetru.....	38
Obr. 17 Fotografie kalorimetru včetně řídicího počítače .....	38
Obr. 18 Blokové schéma modelu otopné soustavy .....	42
Obr. 19 Fotografie ohřívače .....	43
Obr. 20 Fotografie čerpadla .....	44
Obr. 21 Charakteristika čerpadla .....	45
Obr. 22 Fotografie modelu otopného tělesa .....	46
Obr. 23 Snímek obrazovky při měření teploty.....	48
Obr. 24 Fotografie modelu otopné soustavy .....	49
Obr. 25 Oscilogram pulzů na výstupu z průtokoměru.....	50
Obr. 26 Program Arduino Dashboard pro zobrazení dat.....	51
Obr. 27 Průběh teplot.....	53
Obr. 28 Průběh energie.....	53
Obr. 29 Průběh teplot.....	54
Obr. 30 Průběh energie.....	54
Obr. 31 Průběh teplot.....	55
Obr. 32 Průběh energie.....	55
Obr. 33 Průběh teplot.....	56
Obr. 34 Průběh energie.....	56
Obr. 35 Průběh teplot.....	57
Obr. 36 Průběh energie.....	57
Obr. 37 Průběh teplot.....	58
Obr. 38 Průběh energie.....	58
Obr. 39 Závislost středního rozdílu teplot na průtoku.....	59

## Seznam tabulek

Tabulka 1 Součinitelé tepelné roztažnosti.....	26
Tabulka 2 Parametry procesoru ATMEGA 328P.....	29
Tabulka 3 Parametry průtokoměru Landis+Gyr 2WR7 .....	29
Tabulka 4 Závislost odporu na teplotě platinového čidla Pt1000 .....	30
Tabulka 5 Parametry operačního zesilovače LT6221.....	34
Tabulka 6 Parametry reference LM4041AILT-1.2 .....	34
Tabulka 7 Parametry vnitřního A/D převodníku ATMEGA 328P .....	34
Tabulka 8 Parametry reference LT1009 .....	35
Tabulka 9 Parametry DC/DC měniče VMA-0505SSH.....	35
Tabulka 10 Závislost hustoty a měrné tepelné kapacity na teplotě .....	41
Tabulka 11 Parametry čerpadla LP-25 .....	44
Tabulka 12 Závislost průtoku na napětí čerpadla a na jeho zaškrcení .....	50
Tabulka 13 Výsledky měření .....	53
Tabulka 14 Výsledky měření.....	54
Tabulka 15 Výsledky měření .....	55
Tabulka 16 Výsledky měření.....	56
Tabulka 17 Výsledky měření.....	57
Tabulka 18 Výsledky měření.....	58

# Úvod

V této diplomové práci se budu zabývat problematikou přenosu tepla kapalinou a jeho měřením, dále návrhem a výrobou kalorimetru zahrnující kompenzace na různé změny parametrů vody a návrhem a výrobou modelu otopné soustavy, kde by se daly funkce kalorimetru otestovat.

Hlavním cílem této práce je vytvoření demonstračního modelu otopné soustavy, které bude demonstrovat vlastnosti kalorimetru s funkcí korekce změn fyzikálních parametrů vody při různých provozních podmínkách.

K výběru tématu mě vede používání levných kalorimetrů v menších otopných soustavách. Tyto kalorimetry většinou při výpočtu tepelného výkonu nezohledňují, že fyzikální vlastnosti vody se při různých podmínkách mění a že dochází k ovlivnění schopnosti přenášet a sdílet teplo.

V této práci nejprve ve zkratce představím obecné zákonitosti přenosu tepla kapalinou, jejich základní rovnici, nepřesnosti, jaké při takovém měření mohou nastat, i způsoby, jak je kompenzovat. Dále představím běžné způsoby a principy, jakými se dá měřit průtok a teplota a zohledním jejich výhody a nevýhody pro použití v kalorimetrickém měření. Poté bude následovat návrh měřicího systému s kalorimetrem, který se bude snažit na základě předchozí analýzy tyto nepřesnosti eliminovat. Hlavní částí práce je potom výroba tohoto kalorimetru včetně programového vybavení. V této části navrhnu schéma zapojení i desku plošných spojů měřicí části kalorimetru. Následovat poté bude návrh a výroba demonstračního modelu otopné soustavy, na které bude možné demonstrovat funkci kalorimetru. Nakonec bude následovat měření vlastností kalorimetru pomocí tohoto demonstračního systému.

# 1 Problematika přenosu tepla kapalinou

V následujících kapitolách představím, jakým způsobem se vyhodnocuje a počítá teplo, které je sdíleno z otopného tělesa do okolí.

## 1.1 Kalorimetrická rovnice

Základní rovnicí, ze které vychází jakékoli sdílení tepla, je kalorimetrická rovnice. Z ní tedy musí vycházet i kalorimetrické měření odebraného tepla z otopných těles. Kalorimetrická rovnice je definována jako

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (1.1)$$

Kde  $Q$  je odebrané teplo (J),  $m$  je hmotnost teplotnosné kapaliny (kg),  $c$  je měrná tepelná kapacita ( $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) a  $\Delta T$  je rozdíl teplot (K), o který se teplotnosná kapalina v otopném tělese ochladila. Vzhledem k tomu, že pomocí průtokoměru měříme objem kapaliny (výjimkou jsou speciální typy průtokoměrů, které měří přímo hmotnostní průtok, např. Coriolisův), musíme pro správný výpočet tepla znát i hustotu kapaliny. Rovnice se tedy upraví takto

$$Q = V \cdot \rho \cdot c \cdot \Delta T \quad (1.2)$$

Kde  $\rho$  je hustota kapaliny ( $\text{kgm}^{-3}$ ) a  $V$  je objem kapaliny ( $\text{m}^3$ ). Objem kapaliny, která protekla systémem za určitý čas, změní průtokoměr buď přímo jako objem, nebo jako rychlost, to záleží na typu konkrétního průtokoměru. Objemový průtokoměr měří přímo objem proteklé kapaliny, pokud použijeme rychlostní průtokoměr, který měří rychlost proudění, objem kapaliny se spočítá jako

$$V = S \cdot v \cdot t \quad (1.3)$$

Kde  $S$  je plocha průřezu potrubí v místě měření ( $\text{m}^2$ ),  $v$  je střední rychlost proudění teplotnosné kapaliny ( $\text{ms}^{-1}$ ) a  $t$  je čas (s).

Teplo  $Q$  je energie předaná z otopných těles za určitý čas, což se hodí pro analýzu za delší časový interval, někdy ale potřebujeme znát okamžitý tepelný výkon předávaný otopnou soustavou. Ten se vypočítá podobně a vychází z kalorimetrické rovnice

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta T \quad (1.4)$$

Případně

$$\dot{Q} = \dot{V} \cdot \rho \cdot c \cdot \Delta T \quad (1.5)$$

Kde  $\dot{Q}$  je tepelný výkon (W),  $\dot{m}$  je hmotnostní průtok teplotnosné kapaliny ( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ) a  $\dot{V}$  je objemový průtok teplotnosné kapaliny ( $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ). Objemový průtok změříme buď objemovým průtokoměrem, nebo vypočteme z rychlosti proudění změřené rychlostním průtokoměrem jako

$$\dot{V} = S \cdot v \quad (1.6)$$

Ve většině používaných otopných soustav se jako teplotnosná kapalina používá voda, budu proto dále uvažovat jako teplotnosnou kapalinu pouze vodu. Výše uvedené vztahy se nicméně dají aplikovat na jakoukoli kapalinu, známe-li její vlastnosti.

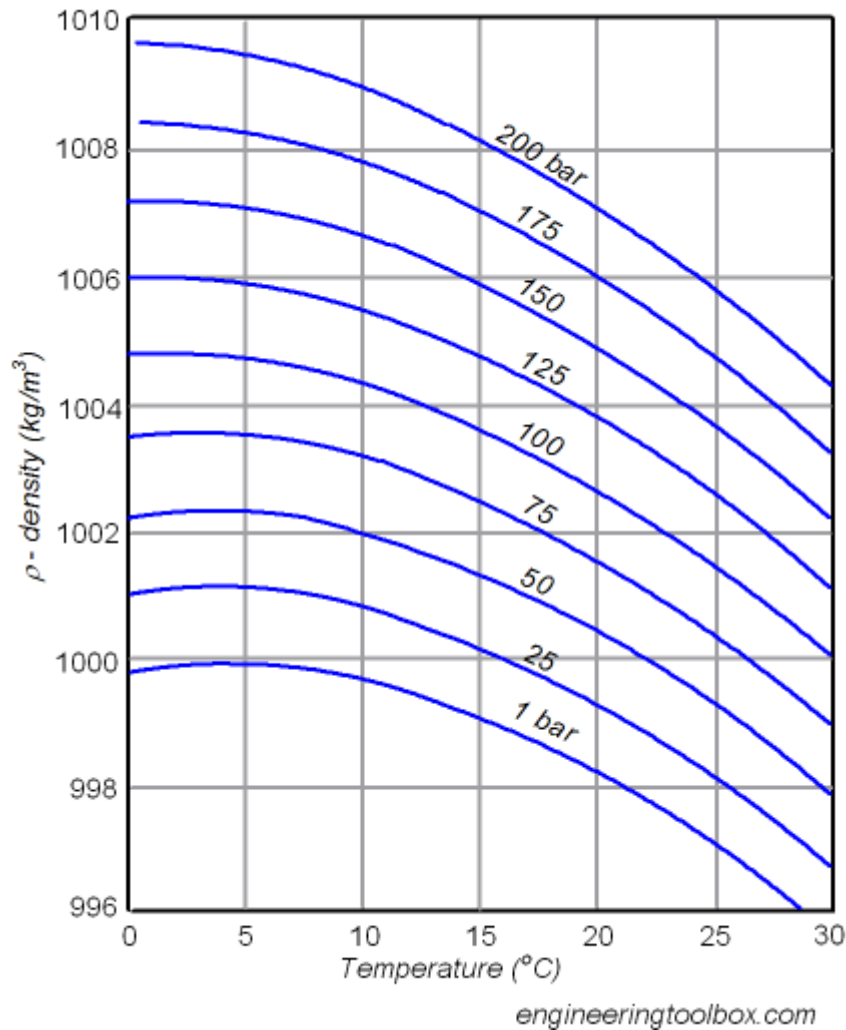
Měření z kalorimetrické rovnice platí přesně pouze v případě, že jsou všechny měřené a vypočítané veličiny konstantní a nezávislé na jiných veličinách. Tak to ale v praxi bohužel není. Fyzikální vlastnosti vody jsou závislé na celé řadě parametrů, zásadní z nich jsou tlak, teplota nebo její chemické složení.

## 1.2 Závislost na tlaku

Hustota vody je závislá na tlaku a s rostoucím tlakem stoupá. Nárůst je ale velmi pozvolný. Hustota stoupne přibližně o  $1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  s každými 25 bary tlaku, což znamená, že při přibližně 255 výškových metrech vodního sloupce vzroste u dna hustota pouze o 0,1 % proti nulové hloubce. Přibližně, protože 25 barů odpovídá 255 metrům vodního sloupce. Vzhledem k tomu, že naprostá většina budov v našich krajích je vysoká jen několik desítek metrů, dá se pro potřeby kalorimetrického měření hustota v závislosti na tlaku považovat bez vlivu na přesnost za konstantní. [8]

Na následujícím grafu je naznačeno zvyšování hustoty vody s rostoucím tlakem při teplotách  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  až  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ .





Obr. 1 Závislost hustoty na teplotě a tlaku

Měrná tepelná kapacita s tlakem také nepatrně roste, ale tento nárůst je v řádech tisícín procenta na 1 bar, tedy je naprosto zanedbatelný. [9]

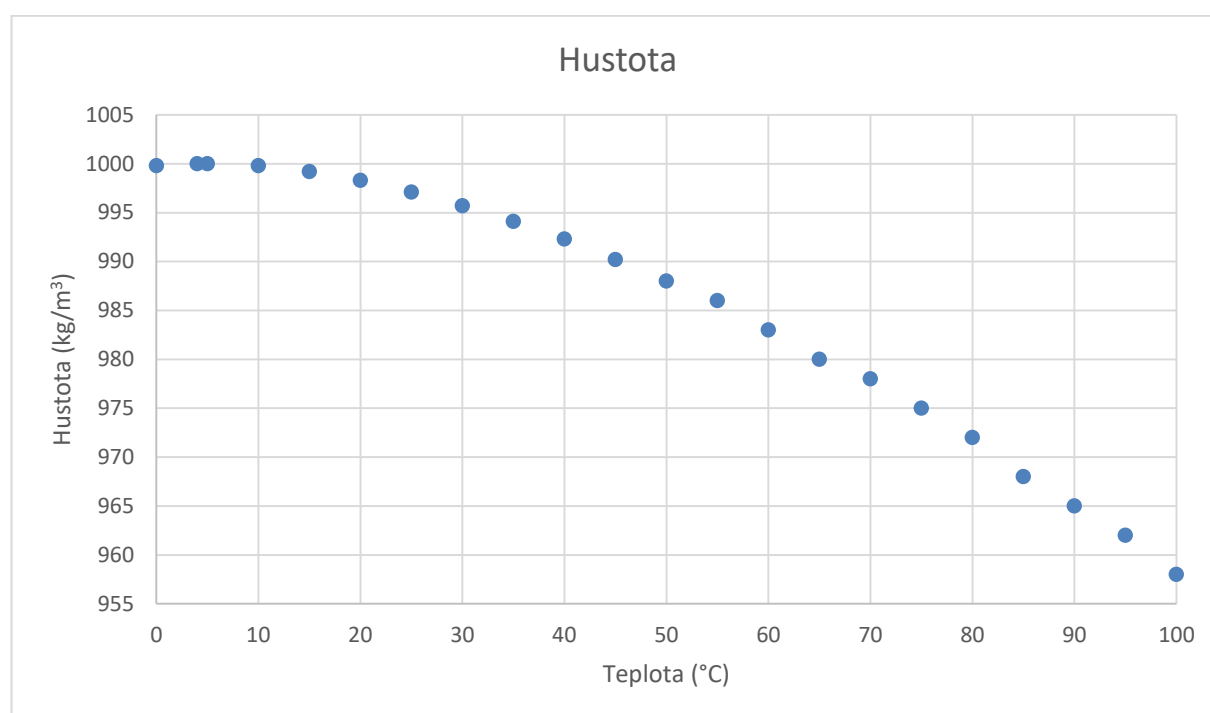
### 1.3 Závislost na chemickém složení

Chemické složení může teoreticky mít na fyzikální vlastnosti vody nezanedbatelný vliv, protože sloučeniny přimíchané ve vodě mohou mít výrazně odlišné vlastnosti, a tím mohou ovlivňovat celkové vlastnosti roztoku. Většina instalací otopných soustav ale používá ve svých rozvodech vodu z vodovodní sítě, proto je tento vliv ve většině případů zanedbatelný. Voda z vodovodního řadu je totiž pitná a musí splňovat přísná kritéria na druhy a množství příměsí. Její složení se také pravidelně měří a zaznamenává z důvodu hodnocení kvality vody. Z rozborů prováděných každý měsíc společností Pražské vodovody a kanalizace, a.s. vyplývá, že naprostá

většina příměsí je v řádech  $\mu\text{g/l}$  nebo  $\text{ng/l}$ , pouze několik málo prvků a sloučenin má koncentraci vyšší. Jedná se hořčík, vápník, sodík, sírany a chloridy a jejich koncentrace je pouze v jednotkách až nízkých desítkách  $\text{mg/l}$ , takže mají na hlavní fyzikální vlastnosti vody, jako je hustota a měrná tepelná kapacita, zanedbatelný vliv. [6]

## 1.4 Závislost na teplotě

Zdaleka největší vliv na fyzikální vlastnosti vody má její teplota. S touto je nutné počítat, protože právě díky změně teploty předává otopná soustava teplo. V následujícím grafu je vidět závislost hustoty na teplotě vody.

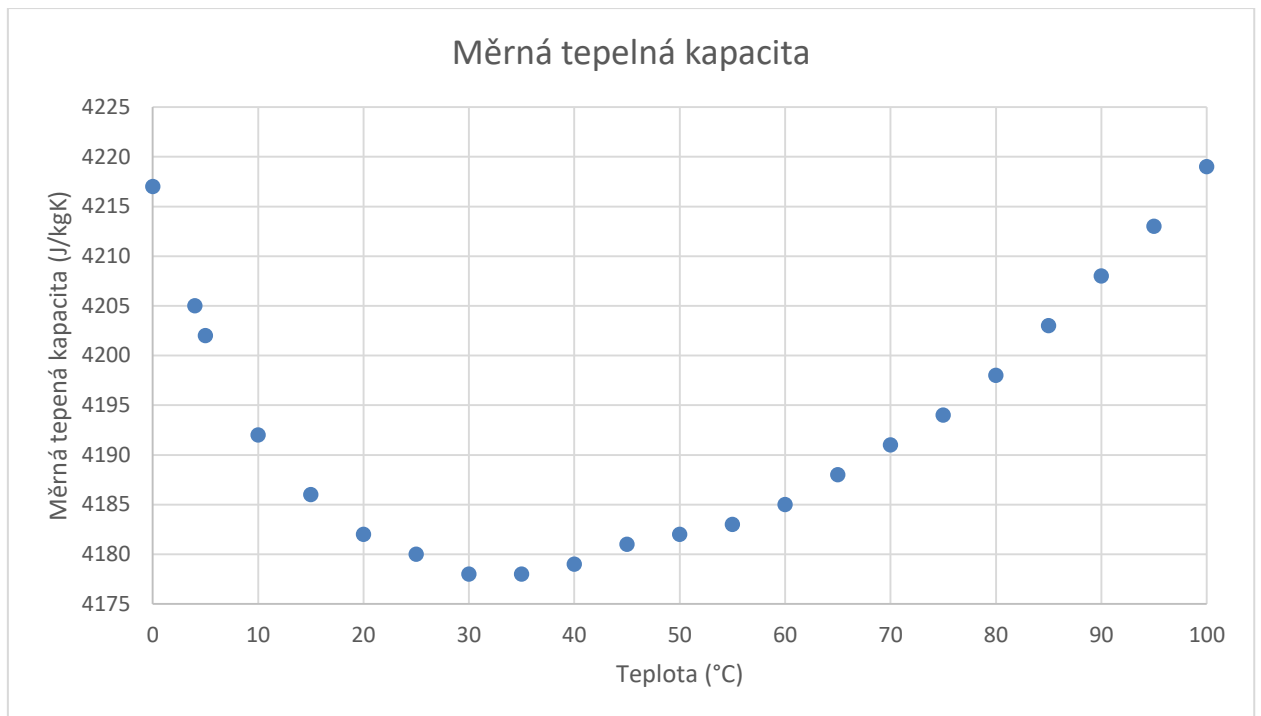


Obr. 2 Závislost hustoty na teplotě

Jak je z grafu patrné, hustota s rostoucí teplotou vody poměrně výrazně klesá, rozdíl mezi  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  činí asi 4,5 %. Tohoto rozdílu se s výhodou využívá u samotížných otopných soustav, které nepotřebují čerpadlo. Ohřátá voda díky nižší měrné hmotnosti stoupá stoupačkou nahoru, zatímco voda ochlazená v otopných tělesech má vyšší měrnou hmotnost a s pomocí gravitace klesá zpět dolů ke kotli, kde se opět ohřívá. [4]

Pro vyhodnocení samotného kalorimetrického měření je nutné znát, v jaké části soustavy se nachází průtokoměr, jestli je před otopným tělesem, kde je voda teplejší, nebo až za ním, kde je voda chladnější. Kalorimetr by pak měl brát v potaz, jak se teplota při průchodu otopným tělesem změní a podle toho korigovat naměřenou hodnotu.

Další, pro kalorimetrické měření důležitý parametr vody, který se s teplotou mění, je měrná tepelná kapacita (při konstantním tlaku)  $c$  ( $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ). Její teplotní závislost není tak výrazná, jako závislost hustoty, přesto by ale neměla být zanedbána. Její závislost na teplotě je složitější, na rozdíl od hustoty není při teplotách od  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  zcela monotónní, ale v rozsahu, který je běžný v otopných soustavách, měrná tepelná kapacita s teplotou mírně stoupá. [4]



Obr. 3 Závislost měrné tepelné kapacity na teplotě

Z grafu je patrné, že při teplotách nad 30 °C, které se v otopných soustavách vyskytují nejčastěji, měrná tepelná kapacita roste, při teplotě 100 °C je o 1 % vyšší proti 30 °C. Tím částečně kompenzuje pokles hustoty, takže předávané teplo s rostoucí teplotou tolik neklesá.

S rostoucí teplotou tedy hustota výrazně klesá a měrná tepelná kapacita mírně roste. Pro správný výpočet tepelného výkonu  $\dot{Q}_T$  (W) je tedy nutné použít upravenou kalorimetrickou rovnici ve tvaru

$$\dot{Q}_T = \dot{V} * (\rho_1 * c_1 * T_1 - \rho_2 * c_2 * T_2) \quad (1.7)$$

kde  $\dot{V}$  je objemový průtok ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ),  $\rho_1$  a  $\rho_2$  jsou hustoty před a za otopným tělesem ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ),  $c_1$  a  $c_2$  jsou měrné tepelné kapacity před a za otopným tělesem ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) a  $T_1$  a  $T_2$  jsou teploty kapaliny před a za otopným tělesem (K).

## 2 Způsoby měření průtoku a teploty

V následujících kapitolách představím nejpoužívanější průtokoměry a teploměry a vyberu ty, které jsou pro použití v kalorimetrickém měření nejvhodnější.

### 2.1 Měření průtoku

Průtok kapaliny se měří přístrojem zvaným průtokoměr. Existuje mnoho různých metod a principů, jak měřit průtok. Základní dělení průtokoměrů je podle veličiny, jakou ze svého principu měří.

#### 2.1.1 Typy průtokoměrů

Prvním druhem jsou hmotnostní průtokoměry, které měří přímo hmotnostní průtok. Do této skupiny patří například Coriolisův. <sup>[11]</sup>



Obr. 4 Coriolisův průtokoměr

Dalším druhem jsou objemové průtokoměry. Ty, jak název napovídá, tyto průtokoměry měří přímo protečený objem média a do této skupiny patří například lopatkové. <sup>[11]</sup>

V mé práci jsem se zaměřil na ty typy průtokoměrů, které jsou alespoň částečně vhodné pro použití při kalorimetrickém měření tepla.

### 2.1.1.1 Průřezové

Tento typ průtokoměru měří tlakovou diferenci, která vznikne na škrťicím členu. Tato tlaková diference je úměrná rychlosti proudění kapaliny, což je založeno na Bernoulliho rovnici. Průtokoměr tak měří tlak kapaliny před škrťicím členem a za škrťicím členem. [11]

Výhody tohoto průtokoměru jsou jednoduchá konstrukce, nízká cena a absence pohyblivých částí, nevýhody pak, že do soustavy vkládáme uměle překážku, na které vzniká tlaková ztráta. Další nevýhoda je úzký rozsah měřených hodnot, buď je při vysokých průtocích tlaková ztráta na škrťicím členu příliš velká, nebo je při malých průtocích tlaková diference neměřitelná. [11]

### 2.1.1.2 Lopatkové, turbínkové

Princip těchto průtokoměrů je, že proudící tekutina roztáčí lopatkové kolo nebo turbínku. V případě lopatkového působí tekutina na jednu polovinu lopatkového kola, v případě turbínkového je pak v protékaném prostoru umístěna turbínka. Rychlost otáčení turbínky je přímo úměrná rychlosti proudění kapaliny, stejně tak každému pootočení lopatkového kola odpovídá určitý proteklý objem tekutiny. Výstupem bývá zpravidla impulzní signál, kde je frekvence pulzů úměrná rychlosti proudění. [11]

Výhody tohoto typu průtokoměru jsou vysoká přesnost, jednoduchost a nízká cena, nevýhody pak závislost na viskozitě, značná tlaková ztráta, nižší spolehlivost kvůli rotujícím částem a pásmo necitlivosti u malých průtoků, kdy se kvůli statickému tření lopatkové kolo nebo turbínka neroztočí. [11]

### 2.1.1.3 Anemometrické

Tento způsob měření je založen na vyhřívání tělíska, které je umístěno v prostoru, kterým protéká tekutina (plyn nebo kapalina). Tělísko je vyhříváno elektrickým proudem a jeho elektrický odpor se mění s teplotou. Proudící tekutina toto topné tělísko ochlazuje a míra ochlazení závisí na rychlosti proudění, hustotě a teplotě tekutiny. Měření může probíhat buď způsobem, že je topné tělísko drženo na konstantní teplotě a je měřen měnící se elektrický výkon potřebný k udržení teploty, který je závislý na průtoku tekutiny, nebo je tělísko vyhříváno konstantním proudem a vyhodnocovací obvody měří změnu napětí, které se mění s teplotou, protože větším s průtokem je tělísko více ochlazováno. Pro vyhodnocení a vyloučení vlivu teploty je ještě nutné dalším senzorem měřit teplotu samotné tekutiny. [11]

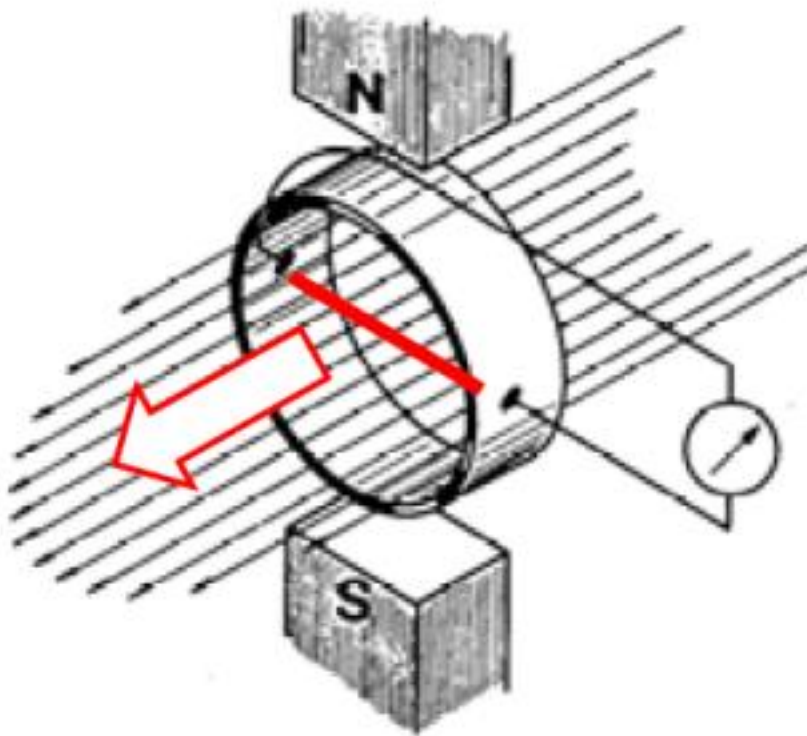
Výhodou tohoto čidla je jednoduchost senzoru, nízká cena a vysoká citlivost i pro malé průtoky, nevýhody jsou pak omezený rozsah provozních teplot a vysoké nároky na čistotu tekutiny. [11]

### 2.1.1.4 Indukční

Indukční průtokoměr funguje na principu Faradayova indukčního zákona, měřená kapalina proto musí být vodivá. Kapalina protéká magnetickým polem, které je kolmé na směr průtoku. Dále je ve stejném místě měřeno elektrické napětí, opět kolmo na směr průtoku i kolmo na magnetické pole. Pohybující se voda funguje jako vodič a způsobuje indukování elektrického napětí na měřicích

elektrodách, velikost napětí je přímo úměrná rychlosti proudění kapaliny, intenzitě magnetického pole a vnitřnímu průměru potrubí. [11]

Výhodou tohoto průtokoměru je minimální tlaková ztráta, nezávislost výsledků měření na teplotě, hustotě nebo znečištění kapaliny a vysoká spolehlivost, nevýhodou může být nutná minimální vodivost kapaliny, necitlivost při malých průtocích a vyšší cena. [11]



Obr. 5 Princip indukčního průtokoměru

### 2.1.1.5 Ultrazvukové

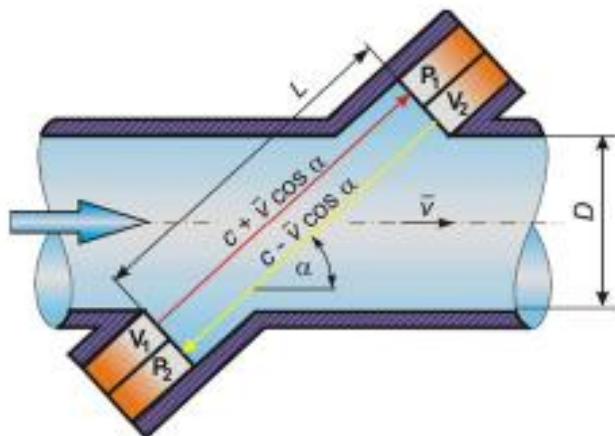
Tento druh průtokoměrů je založen na změně rychlosti šíření zvukové vlny proudem kapaliny. Dále se dělí na dva typy:

Dopplerův průtokoměr je, jak už z názvu vyplývá, založen na Dopplerově jevu při odrazu zvukové vlny. Tento typ průtokoměru generuje zvukové vlny, které se odrážejí pevných částic nebo bublinek obsažených v kapalině, a následně tyto vlny zpátky přijímá a vyhodnocuje změnu frekvence přijatých zvukových vln. Ke své funkci potřebuje právě určitý obsah bublinek nebo pevných částic v kapalině, proto je pro použití v otopných soustavách nevhodný a dále jsem se jím nezabýval. [11]

Druhým typem je přímý ultrazvukový průtokoměr, který současně vysílá dvě zvukové vlny, jednu po směru proudění kapaliny a druhou proti ní. Po jejich přijetí vyhodnotí rozdíl doby průchodu kapalinou, který je úměrný rychlosti proudění kapaliny. [11]

Výhodami přímého ultrazvukového průtokoměru jsou široký rozsah měřených průtoků, žádná dodatečná tlaková ztráta a absence pohyblivých dílů, nevýhodou je vyšší cena. Nezanedbatelnou výhodou je i možnost instalace speciálního příložného typu takového

průtokoměru přímo na již zabudované potrubí, pokud je z vhodného materiálu, zpravidla plastu. [11]



Obr. 6 Princip přímého ultrazvukového průtokoměru

### 2.1.2 Vhodné typy průtokoměrů pro kalorimetrické měření

Hlavní podmínkou průtokoměru, který má být použit v kalorimetrickém měření, je jeho přesnost. Má-li mít smysl korekce změn fyzikálních vlastností vody se změnami teploty, tlaku nebo chemického složení, musí být adekvátně přesné i měření průtoku, jinak jsou jakékoli korekce zbytečné. Tato přesnost by měla být zajištěna v širokém rozsahu průtoků. Dále by průtokoměr vhodný pro kalorimetrické měření měl mít malou tlakovou ztrátu, aby výrazně neovlivňoval tlakové poměry v otopné soustavě a aby zbytečně nezvyšoval čerpací práci oběhového čerpadla.

Z výše uvedených podmínek vychází nejlépe a pro kalorimetrické měření je nejvhodnější ultrazvukový nebo indukční průtokoměr, protože do potrubí otopné soustavy nezanášejí žádnou další tlakovou ztrátu, disponuje vysokou přesností (u kvalitnějších typů méně než 1 %) a díky absenci pohyblivých dílů se dá předpokládat delší životnost v porovnání s ostatními. Jeho jedinou hlavní nevýhodou pak budou vyšší pořizovací náklady. Jako vhodné se jeví i lopatkové průtokoměry, které dosahují též vysoké přesnosti, jejich nevýhodou v porovnání s ultrazvukovými průtokoměry je nezanedbatelná tlaková ztráta a nižší teoretická životnost.

## 2.2 Měření teploty

Teplota je veličina, která charakterizuje, zda látka při kontaktu s jinou bude nebo nebude předávat nebo přijímat teplo, případně zda budou obě látky v tepelné rovnováze. Je to jedna ze základních veličin užívaných v technice prostředí. Měří se zařízením zvaným teploměr v několika různých stupnicích, například Celsiova, Fahrenheitova, Kelvinova atd. U nás se používá nejčastěji stupnice Celsiova. Existuje mnoho různých způsobů, jak teplotu měřit, já se opět zaměřím na ty,

kteře jsou pro použití při kalorimetrickém měření odebraného tepla z teplovodních otopných těles nejvhodnější.

## 2.2.1 Typy teplotních snímačů

V následující kapitole budou popsány nejpoužívanější snímače pro měření teploty a porovnány jejich hlavní výhody a nevýhody.

### 2.2.1.1 Odporové (termistory)

Senzory tohoto typu využívají závislost jejich odporu na teplotě. Obecně existují dva typy:

PTC (positive temperature coefficient) jsou termistory, jejichž odpor s teplotou roste. Nejpoužívanějším zástupcem této kategorie je kovový odporový teploměr Pt100 nebo Pt1000 (číslo udává referenční odpor při 0 °C). Jedná se o platinový teploměr, jehož odpor mírně roste s teplotou. Tato čidla jsou velmi přesná a mají malou nelinearitu (pro teplotní rozsah 0 °C až 100 °C je nejistota maximálně 0,38 °C). Dalším zástupcem kovových odporových snímačů jsou niklové snímače Ni100. Jejich vlastnosti jsou podobné Pt100, ale mají menší teplotní rozsah a větší nelinearitu. Vyrábějí se v mnoha různých velikostech a pouzdrech pro rozličné použití. Výhoda je vysoká přesnost a stabilita hodnoty v čase, nevýhodou může být vyšší cena. <sup>[10]</sup>



Obr. 7 Běžné pouzdro platinového teploměru

Druhým typem jsou NTC (negative temperature coefficient) termistory, které využívají negativní teplotní závislosti odporu, tedy u kterých s rostoucí teplotou klesá elektrický odpor. Jsou poměrně přesné, v rozsahu 0 °C – 100 °C lze měřit s přesností  $\pm 0,5$  °C. Vlastnosti jsou přesně opačné jako u odporových kovových teploměrů, nedosahují takové přesnosti a časové stability, proti tomu jsou však výrazně levnější. <sup>[10]</sup>





Obr. 8 Běžné pouzdro NTC termistoru

### 2.2.1.2 Termoelektrické

Termoelektrické teplotní senzory jsou založeny na Seebeckově termoelektrickém jevu. Termoelektrický článek je tvořen dvěma vodiči z různých kovových materiálů. Pokud je na konci, kde jsou tyto dva kovy spojeny, jiná teplota, než na konci druhém, pak se mezi různými materiály objeví napětí úměrné rozdílu teplot. Pro stanovení teploty na spojeném konci potřebují známou referenční teplotu pro srovnávací konec, tzv. teplotu studeného konce. [10]

Výhodou je nízká cena a vysoká přesnost, nevýhodou pak vyšší nelinearita (kterou lze ale v úzkém rozsahu teplot zanedbat). [10]

### 2.2.1.3 Polovodičové

Polovodičové teploměry využívají závislosti charakteristik polovodičového prvku na teplotě, nejčastěji úbytek napětí na PN přechodu při konstantním procházejícím propustném proudu. K tomu se využívá jako elektrický prvek tranzistor nebo dioda. [10]

Jejich výhody a nevýhody jsou srovnatelné s termoelektrickými, též jsou levné, ale mají vyšší nelinearitu, kterou lze ale v užším rozsahu teplot zanedbat. Také mají trochu horší přesnost, která závisí na přesnosti výroby konkrétní součástky. [10]

## 2.2.2 Vhodné typy teploměrů pro kalorimetrické měření

Hlavní a v zásadě jedinou důležitou podmínkou pro posouzení vhodnosti teploměru ke kalorimetrickému měření je jeho přesnost. Opět by nemělo smysl kompenzovat změny fyzikálních parametrů vody, pokud bych nedokázal přesně změřit teplotní rozdíl mezi přívodním potrubím a zpátečním potrubím.

Z představeného výběru jsou tak asi nejvhodnější kovové odporové teploměry, konkrétně platinové snímače Pt100 nebo Pt1000.

## 2.3 Další faktory ovlivňující přesnost měření

V následující kapitole budou popsány další problémy, se kterými je při kalorimetrickém měření nutno počítat.

### 2.3.1 Tepelná roztažnost

Kalorimetrické měření může dále ovlivnit, v případě použití ultrazvukového průtokoměru, teplotní roztažnost materiálu, ze kterého je potrubí vyrobené. Ultrazvukový průtokoměr se řadí mezi vhodné průtokoměry pro použití v kalorimetrickém měření, ale je nutné brát v potaz, že pokud je instalován na plastovém potrubí, bude jeho přesnost nezanedbatelně ovlivněna teplotní roztažností plastu. Síťovaný polyetylen nebo polypropylen, což jsou plasty, ze kterých se v poslední době nejčastěji vyrábí a instalují otopné soustavy, mají součinitel teplotní roztažnosti  $\alpha$  kolem  $0,15 \text{ mK}^{-1}$  až  $0,20 \text{ mK}^{-1}$ , což znamená, že při ohřátí o  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  zvětší svůj průměr asi o  $0,8 \%$  a průřez díky tomu vzroste až o  $1,5 \%$ . [4]

Další používané materiály, ze kterých je vyrobené potrubí otopných soustav, jako je například měď nebo ocel, mají teplotní roztažnost výrazně nižší, většinou o jeden řád, a proto je u nich tento vliv zanedbatelný. V následující tabulce jsou nejpoužívanější materiály pro rozvody otopných soustav a jejich součinitelé teplotní roztažnosti. [7]

Tabulka 1 Součinitelé tepelné roztažnosti

Materiál	Součinitel tepelné roztažnosti $\alpha$ [ $\text{mK}^{-1}$ ]
PP	0,15
PE	0,2
PE síťovaný	0,18
Měď	0,017
Ocel	0,015
Hliník	0,024
PVC	0,09

U plastových lopatkových nebo průřezových průtokoměrů bude tento vliv existovat také, protože z rovnice kontinuity vyplývá, že když se zvětší průřez potrubí, musí pro zachování konstantního průtoku kapaliny klesnout rychlost proudění. Vzhledem k tvarové složitosti měřicích komůrek s lopatkovým kolem bude ale výrazně složitější tuto změnu definovat.

Tento problém se teoreticky týká i indukčních průtokoměrů, jelikož ale mají tělo většinou z nerezové oceli nebo mosazi, která má výrazně menší součinitel tepelné roztažnosti, lze u nich tento jev zanedbat.

### 2.3.2 Umístění kalorimetru

Ačkoliv je v názvu práce uvedeno kalorimetrické měření tepla odebraného z otopných těles, v praxi odebírá teplo nejen samotné otopné těleso, ale i rozvodné potrubí otopné soustavy, které

k samotným otopným tělesům vede. Kalorimetr se tak zpravidla umísťuje hned k odbočce stoupacího potrubí na každém patře budovy, případně jich může být na jednom patře více.

Pro potřeby kalorimetrického měření je nutné měřit teplotu na přívodu a odvodu topné vody a měřit průtok kdekoli mezi tím. Průtokoměr je vhodné umístit na zpáteční potrubí, protože je zde nižší teplota vody a průtokoměr je tak méně tepelně namáhán, což působí příznivě na jeho životnost.

## **2.4 Shrnutí parametrů vody**

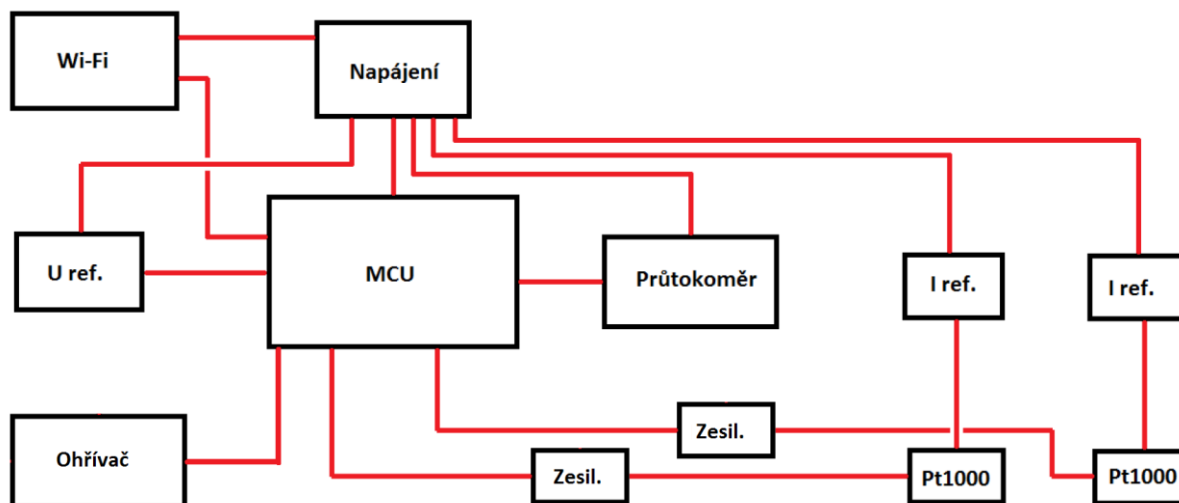
Z výše zmíněných kapitol vyplývá, že jako nejvhodnější pro kalorimetrické měření se jeví indukční nebo ultrazvukový typ průtokoměru, který dosahuje vysoké přesnosti, nenarušuje vnitřní průměr potrubí otopné soustavy žádnou překážkou, na které by vznikal úbytek tlaku, a neobsahuje žádné pohyblivé mechanické součástky, které by potenciálně snižovaly životnost.

Ze senzorů teploty pak jako nejvhodnější připadá senzor založený na principu kovového odporového teploměru, ideálně platinového, který má největší stabilitu hodnoty v čase.

## 3 Kalorimetrický systém

V následujících kapitolách bude popsán návrh a řešení konstrukce modulu kalorimetru pro mikropočítač Arduino UNO.

### 3.1 Blokové schéma



Obr. 9 Blokové schéma modulu kalorimetru

### 3.2 Popis jednotlivých bloků

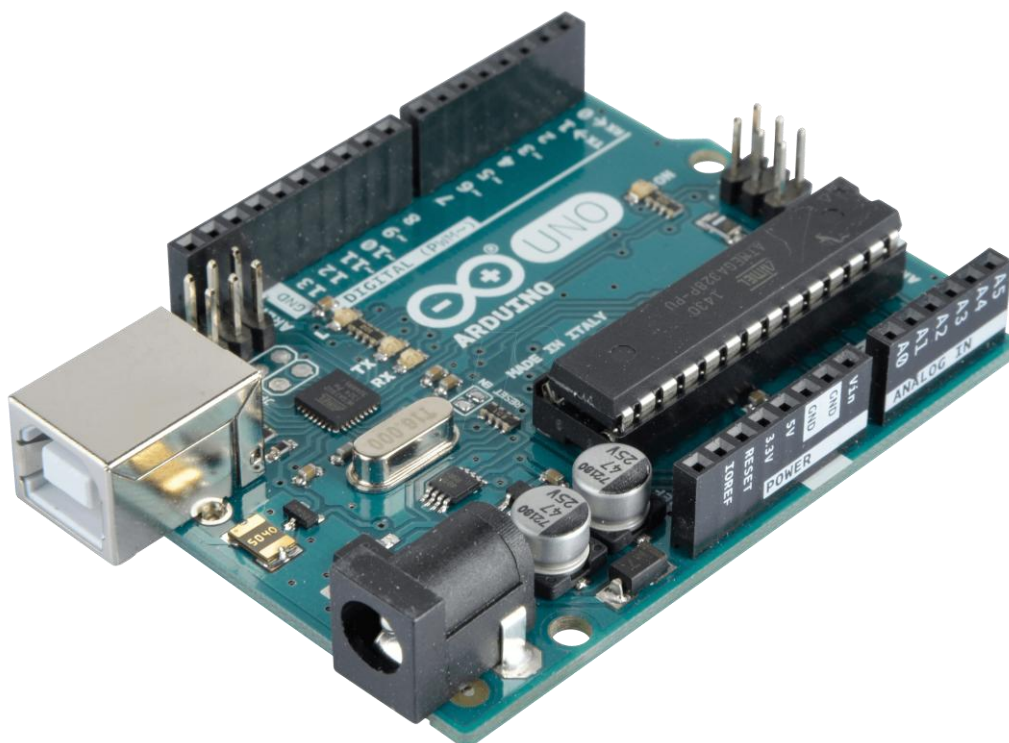
V následujících kapitolách budou popsány bloky, ze kterých se kalorimetr skládá. Je to řídicí počítač, průtokoměr, čidla teploty s potřebnou elektronikou a zdroje napětí pro teplotní senzory, pro analogově digitální převodník a pro zesilovače.

#### 3.2.1 Řídicí počítač (MCU)

Jako řídicí počítač slouží mikropočítač Arduino UNO s 8-bitovým procesorem Atmel ATMEGA 328P. Platforma Arduino byla zvolena hlavně z důvodu snazšího ladění a odstraňování chyb díky nativní podpoře sériové komunikace s PC a snazší práce s případným dalším sbíráním nebo sdílením dat, jako například s exportem dat přes WiFi. Hlavní část programu je napsána v jazyce C a teoreticky ji lze s drobnými úpravami použít i na jiných procesorech. Řešení komunikace s periferiemi na úrovni základního programování by přesahovalo rámec této práce. Odečítání měřených a vypočtených hodnot je možné přes PC nebo notebook pomocí sériového rozhraní. [3]

**Tabulka 2 Parametry procesoru ATMEGA 328P**

Frekvence	16 MHz
Programová paměť	32 KB
Operační paměť	2 KB
Časovače	2x 8-bit, 1x 16-bit
Vstupně-výstupní porty	20x
A/D převodník	10-bit, 6 kanálů



**Obr. 10 Mikropočítač Arduino UNO R3**

### 3.2.2 Průtokoměr

Jako měřič průtoku jsem z důvodů zmíněných v kapitole 2 vybral ultrazvukový průtokoměr Landis-Gyr 2WR7. Průtok je měřen pomocí dvou ultrazvukových impulzů, kdy je jeden vyslán potrubím šikmo ve směru toku kapaliny a druhý následně proti směru toku kapaliny. Z naměřených hodnot pro obě doby průběhů se vypočte rozdíl, který je přímo úměrný rychlosti proudění. Ze znalosti průřezu potrubí v měřeném místě se pak následně dopočítá i objemový průtok. [2]

Průtokoměr má bipolární impulzní výstup typu otevřený kolektor, který vyšle krátký puls, pokud od předchozího pulzu proteklo právě 100 ml kapaliny. Impulzy jsou vysílány v balících každé 2 dvě sekundy a délka jednoho pulzu je 100 milisekund. [2]

**Tabulka 3 Parametry průtokoměru Landis+Gyr 2WR7**

Jmenovitý průtok	0,6 m <sup>3</sup> /h
Maximální průtok	1,2 m <sup>3</sup> /h
Rozlišení	0,1 litru/impuls
Metrologická třída	1:100



Obr. 11 Ultrazvukový průtokoměr Landis Gyr 2WR7

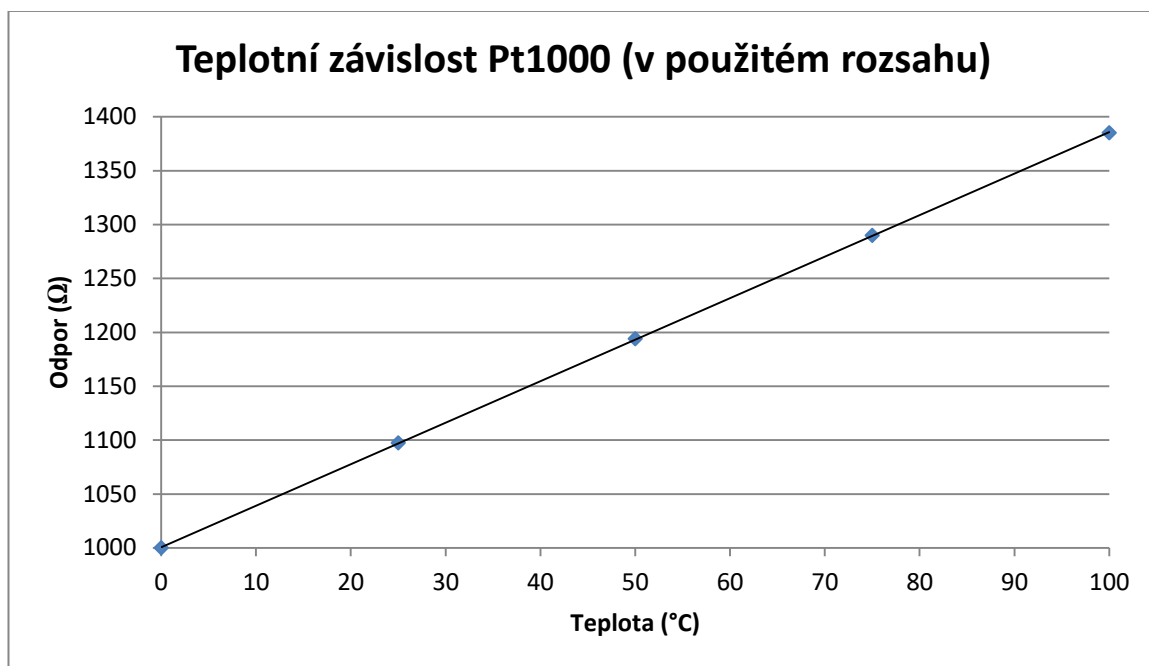
### 3.2.3 Senzory teploty

Jako čidla teploty jsou použity kovové odporové teploměry Pt1000. Změna odporu tohoto teploměru je téměř lineárně závislá na teplotě. Platinový teploměr jsem vybral z důvodu vysoké přesnosti a stability v čase a také proto, že má téměř lineární charakteristiku. V oblasti teplot, které pro kalorimetrické měření připadají v úvahu, lze jeho charakteristiku považovat za lineární. Základní hodnotu 1000 ohmů jsem pak zvolil proto, že při takových hodnotách odporu a nízkém měřicím proudu lze zanedbat odpor přívodních kabelů, protože vzhledem k odporu termistoru je jejich odpor zcela zanedbatelný. [16]

Na následující tabulce a grafu je průběh závislosti odporu platinového senzoru Pt1000 na teplotě. [16]

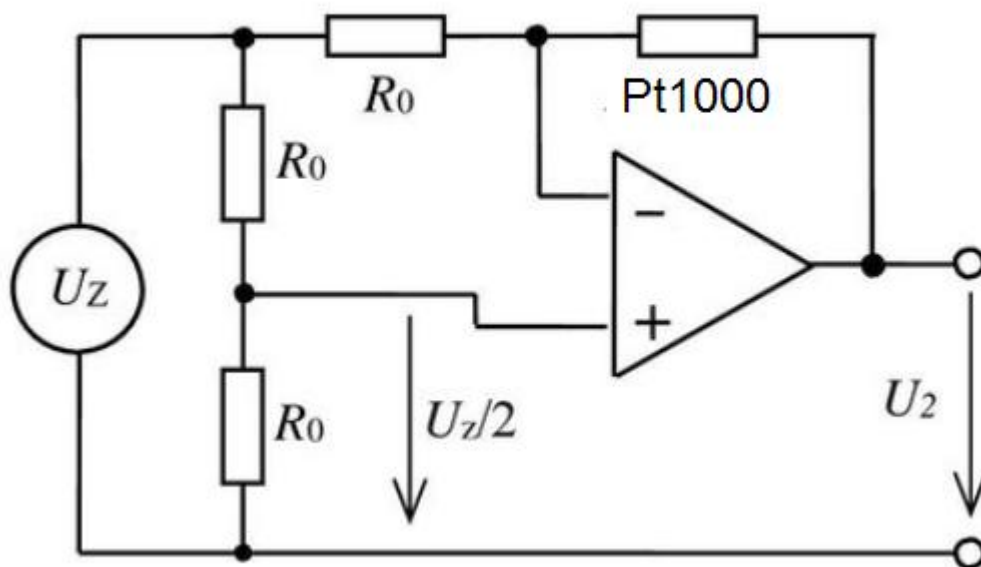
Tabulka 4 Závislost odporu na teplotě platinového čidla Pt1000

t [°C]	R [Ω]
0	1000
25	1097,35
50	1193,97
75	1289,87
100	1385,06



Obr. 12 Závislost odporu na teplotě u platinového senzoru Pt1000

Měřicí obvod tvoří operační zesilovač zapojený podle schématu na obrázku níže. Použil jsem obvod s operačním zesilovačem v invertujícím zapojení. Hodnoty odporů  $R_0$  se rovnají základní hodnotě platinového teploměru Pt1000 pro 0 °C, tedy 1000 Ω. [1]



Obr. 13 Schéma zapojení operačního zesilovače pro měření teploty

Toto zapojení je popsáno rovnicí:

$$U_z = -U_z * \frac{R_{Pt1000}}{R_0} + \frac{U_z}{2} \left( \frac{R_{Pt1000}}{R_0} + 1 \right) \quad (3.1)$$

Proud teplotním senzorem Pt1000 je určen vztahem:

$$I_{Pt1000} = \frac{U_z - \frac{U_z}{2}}{R_0} \quad (3.2)$$

Aby nebyla ovlivněna přesnost měření kvůli samoohřevu senzoru, je nutné protékat teplotní senzor co nejmenším proudem. Mnou použitý platinový senzor Pt1000 má dovolen nevyšší přípustný proud 1 mA, proto je nutné zvolit co nejnižší napětí  $U_z$ , ze kterého je senzor napájen. Vzhledem k nabídce součástek jsem zvolil zdroj napětí LM4041-1,2 s napětím 1,225 V. Dále jsem si určil, že mi pro funkci kalorimetru postačí měřit teplotu v rozsahu 0 - 100 °C, přičemž pro 0 °C by měl obvod generovat napětí 0 V. Za těchto podmínek vychází výstupní napětí při teplotě 100 °C: [1]

$$\begin{aligned} U_z &= -U_z * \frac{R_{Pt1000}(100^\circ C)}{R_0} + \frac{U_z}{2} \left( \frac{R_{Pt1000}(100^\circ C)}{R_0} + 1 \right) = \\ &= -1,225 * \frac{1385,06}{1000} + \frac{1,225}{2} * \left( \frac{1385,06}{1000} + 1 \right) = -0,23585 \text{ V} \end{aligned}$$

A měřící proud tekoucí teplotním čidlem:

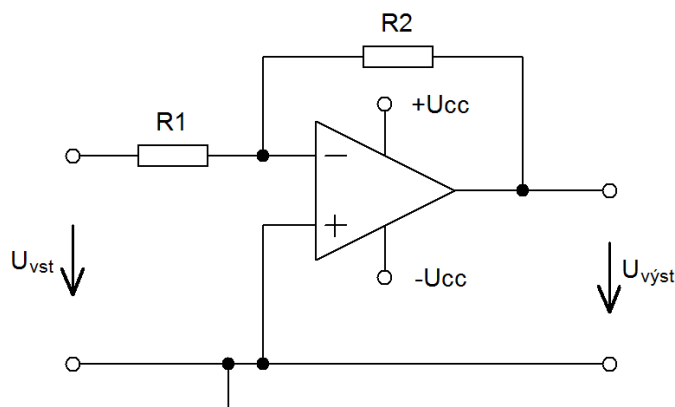
$$I_{Pt1000} = \frac{U_z - \frac{U_z}{2}}{R_0} = \frac{1,225 - \frac{1,225}{2}}{1000} = 0,6125 \text{ mA}$$

Vypočtený proud je menší než 1 mA, takže podmínka omezení proudu čidlem byla splněna. Vypočtené napětí pro teplotní rozsah 0 °C - 100 °C tedy odpovídá napětí 0 V - 0,23585 V.

### 3.2.4 Zesilovače

Vypočtený rozsah výstupního napětí je pro analogově digitální převodník použitého mikroprocesoru příliš malý, proto je nutné ho zesílit. Navíc má opačnou polaritu, než je pro vstup do analogově digitálního převodníku vhodné, proto je nejvýhodnější toto napětí zesílit pomocí operačního zesilovače v invertujícím zapojení, který toto napětí jak zesílí, tak i obrátí jeho polaritu. Zapojení tohoto zesilovače je na obrázku níže. [1]





**Obr. 14 Invertující zapojení operačního zesilovače**

Zesílení tohoto zapojení je popsáno vztahem

$$U_{výst} = -U_{vst} * \frac{R_2}{R_1} = -U_{vst} * A \quad (3.3)$$

Pro mnou použitý analogově – digitální převodník v procesoru je vhodné použít referenční (porovnávací) napětí 2,5 V, proto potřebuji napětí pro 100 °C zesílit právě na tuto hodnotu. Z důvodu tolerancí a nepřesností použitých součástek je vhodné zvolit hodnotu o trochu nižší, aby se na vstup převodníku nedostalo příliš vysoké napětí. Zvolil jsem proto zesílení přesně 10x, které je i snadno realizovatelné, čemuž zároveň dle výše uvedeného vztahu odpovídá poměr odporů rezistorů R2 a R1. Výstupní napětí pro 100 °C tedy bude

$$U_{výst} = -U_{vst} * \frac{R_2}{R_1} = -(-0,23585) * \frac{10}{1} = 2,3585 \text{ V}$$

Tomuto zapojení by odpovídaly hodnoty rezistorů například R1 = 1000 Ω a R2 = 10 000 Ω, já jsem takto zvolil R1 a R2 jsem realizoval jako sériovou kombinaci pevného rezistoru 4700 Ω a odporového trimru 10 000 Ω. Toto řešení mi umožní jednak v případě potřeby seřídít nebo upravit výsledné zesílení tak, aby kompenzovalo nepřesnosti a tolerance ostatních použitých součástek, tak i nastavit přesné zesílení operačního zesilovače, abych získal na výstupu pro rozsah 0 – 100 °C plný rozsah napětí 0 – 2,5 V, čímž si zjednoduším výpočet teploty. To se provede nastavením odporu R2 pomocí trimru na hodnotu

$$A = \frac{2,500}{0,23585} = 10,6$$

V mé aplikaci jsem použil dvojitý operační zesilovač LT6221 od společnosti Linear Technology. [14]

**Tabulka 5 Parametry operačního zesilovače LT6221**

Napájecí napětí	2,2 - 12,6 V
Offsetové napětí	max. 350 $\mu$ V
Vstupní proud	max. 150 nA
Klidový proud	max. 1 mA
Výstupní proud	50 mA

### 3.2.5 Napěťová reference pro Pt1000

Jak jsem již zdůvodnil v předchozích odstavcích, vzhledem k použitému zapojení a proudovému omezení teplotních čidel je vhodné použít zdroj napětí s hodnotou okolo 1 V až 1,5 V. Pro tento účel jsem tedy vybral napěťovou referenci LM4041AILT-1.2 od výrobce ST Microelectronics. Tato napěťová reference má referenční napětí 1,225V s vysokou přesností 0,1 %. [21]

Tato reference je zapojena v katalogovém zapojení se srážecím rezistorem s hodnotou 1000  $\Omega$ . [21]

**Tabulka 6 Parametry reference LM4041AILT-1.2**

Referenční napětí	1,225 V
Přesnost	0,10 %
Teplotní závislost	36 ppm/ $^{\circ}$ C

### 3.2.6 Analogově digitální převodník

Jako analogově digitální převodník je použit interní převodník v procesoru ATMEGA 328P s rozlišením 10bit. Při zvoleném referenčním napětí 2,5 V je tento převodník schopen dosáhnout rozlišení teploty 0,1  $^{\circ}$ C, což pro zvolenou aplikaci považuji za naprosto dostatečné. Z tohoto důvodu jsem zahrnul použití jiného externího analogově digitálního převodníku s vyšší přesností. [3]

**Tabulka 7 Parametry vnitřního A/D převodníku ATMEGA 328P**

Rozlišení	10 bitů
Absolutní přesnost	2 LSB
Nelinearita	0,5 LSB
Offset	2 LSB
Vstupní odpor	10 M $\Omega$

### 3.2.7 Napěťová reference pro A/D převodník

Napěťová reference slouží jako přesný zdroj konstantního napětí pro analogově-digitální převod. Pro moji aplikaci jsem vybral napěťovou referenci typu LT1009 od výrobce Texas Instruments. Tato reference má výstupní referenční napětí 2,5 V, má nízkou závislost na teplotě a dosahuje vysoké základní přesnosti 0,2 %. Pokud je to nutné, lze její výstupní napětí navíc donastavit pro ještě vyšší přesnost. S touto referencí je porovnáváno napětí, které bylo naměřeno na teplotním senzoru Pt1000 a zesíláno operačním zesilovačem v invertujícím zapojení. [17]

Tabulka 8 Parametry reference LT1009

Referenční napětí	2,500 V
Přesnost	0,20 %
Teplotní závislost	15 ppm/°C

### 3.2.8 Zdroj záporného napětí

Jelikož ve svém zapojení používám měření teploty pomocí operačního zesilovače v invertujícím zapojení, bylo nutné nějak vytvořit záporné napětí pro potřebu symetrického napájení operačního zesilovače. K tomu jsem se rozhodl využít integrovaného izolovaného DC/DC měniče.

Jedná se o nízko příkonový monolitický izolovaný DC/DC měnič. Tento měnič je napájen ze stejnosměrného napětí 5 V, které pomocí vnitřního spínaného zdroje mění na napětí stejné velikosti, ale galvanicky oddělené od napájecího napětí. To vše bez nutnosti dalších doplňujících součástek a v malém pouzdře velikosti 20 x 10 x 5 mm. [20]

Kladný pól výstupního napětí jsem poté spojil se společným vodičem, takže na záporném pólu jsem získal -5 V proti společnému vodiči. Operační zesilovače tedy napájím napětím +5 V a -5 V.

Použil jsem konkrétně měnič od výrobce VITEC, typ VMA-0505SSHP. V následující tabulce jsou jeho parametry. [20]

Tabulka 9 Parametry DC/DC měniče VMA-0505SSHP

Vstupní napětí	5 V ± 10 %
Výstupní napětí	5 V ± 3 %
Max. výstup. Proud	200 mA
Účinnost	66 % - 80 %
Spínací frekvence	cca 80 kHz
Výstupní zvlnění <sub>p-p</sub>	75 mV
Izolační napětí	2 kV

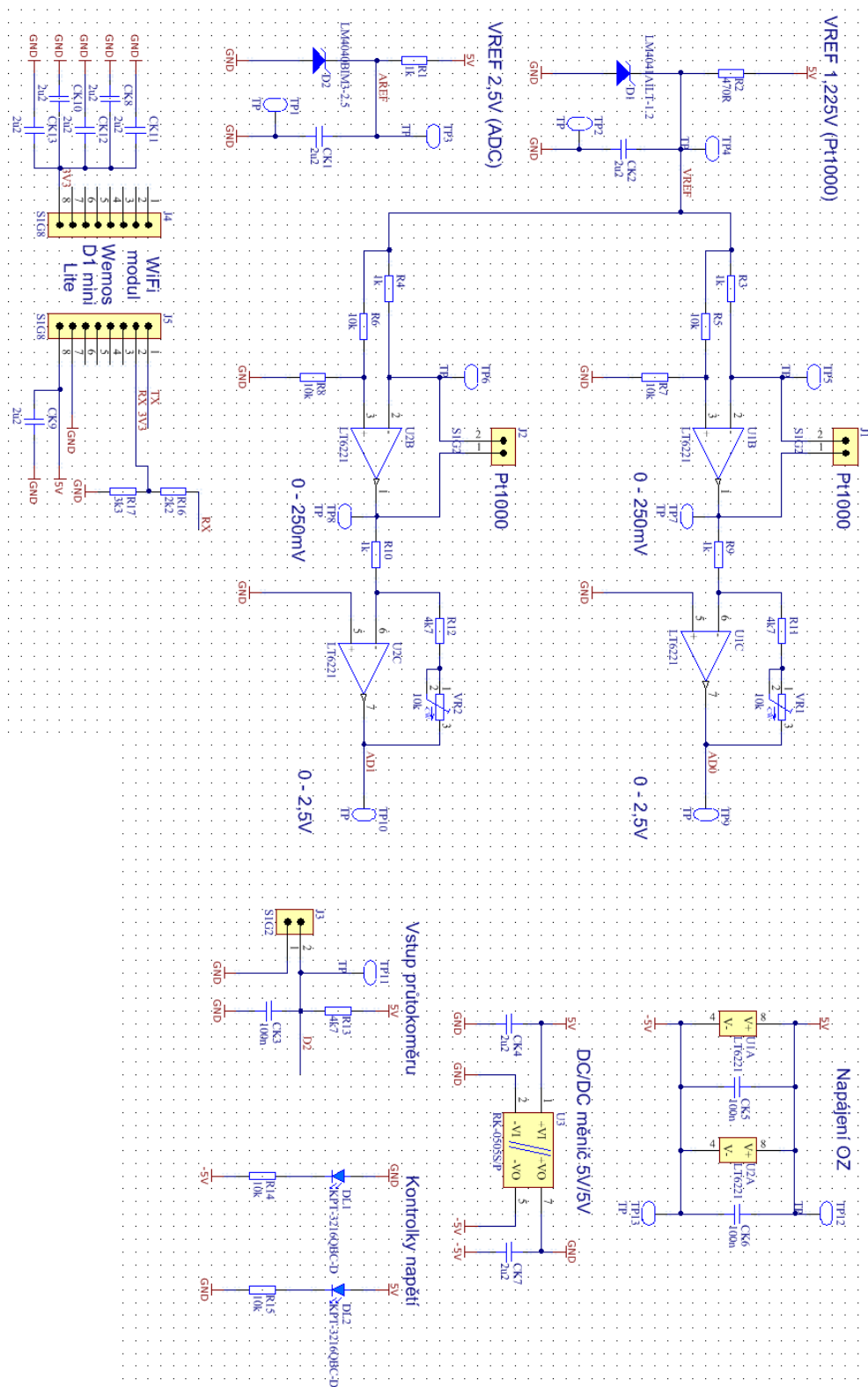
### 3.2.9 Sdílení dat – Wi-Fi modul

V dnešní době chytrých přístrojů a internetu věcí by moc nemělo smysl mít chytrý kalorimetr, který je schopný korigovat změny parametry vody a na jejich základě přesně počítat spotřebu tepla, kdyby v něm všechna data o spotřebě zůstala uložena a nedalo se s nimi nic dělat.

Kalorimetr proto ukládá naměřené hodnoty a zároveň vysílá všechna naměřená a vypočtená data, konkrétně průtok, teploty, korigované hodnoty měrné tepelné kapacity a hustoty a samozřejmě tepelné výkony a energie pomocí sériového rozhraní. Tyto hodnoty se pak dají číst pomocí přenosného počítače přes vestavěný převodník a USB zásuvku, nebo je možné kalorimetr osadit Wi-Fi modulem pro internet věcí Wemos D1 Mini, na který má kalorimetr připravenou patici, napájení i spojení s mikroprocesorem.

### 3.3 Elektrické schéma zapojení

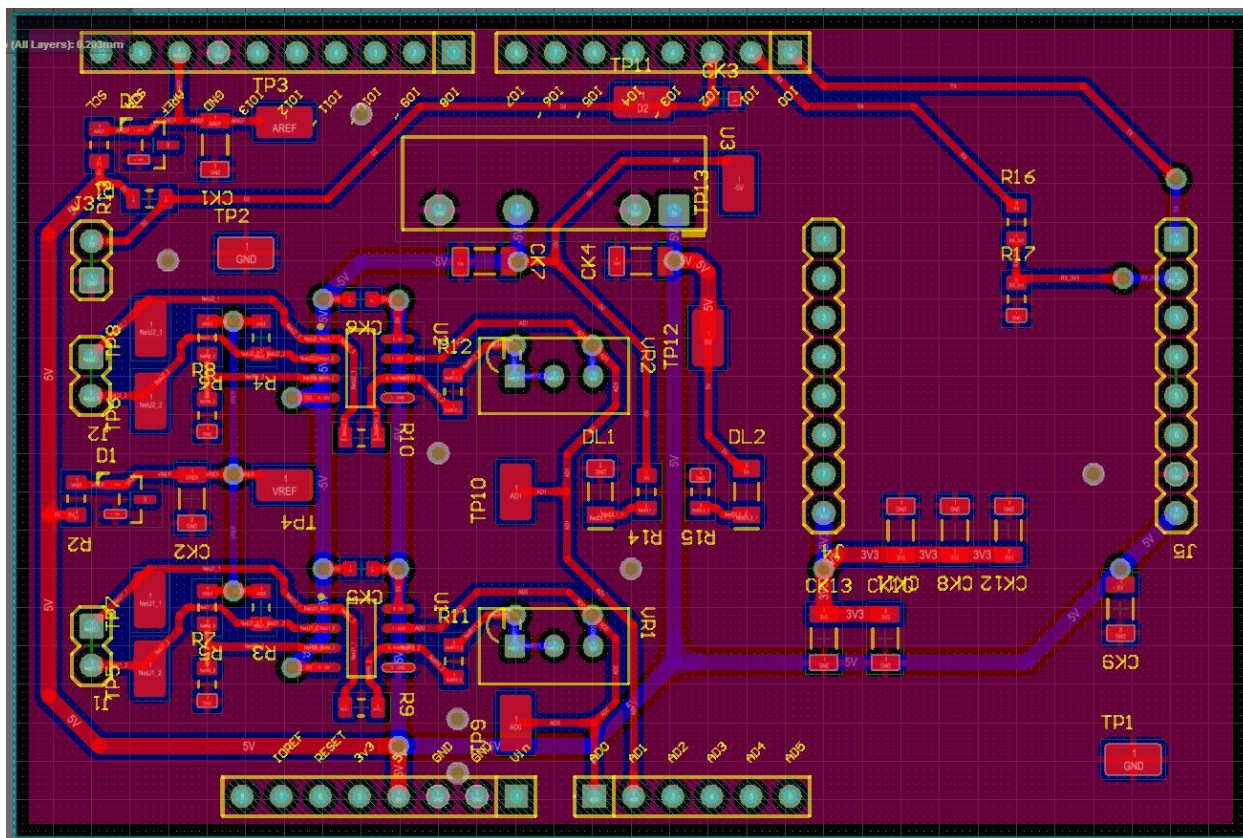
Na následujícím obrázku je schéma zapojení. Chybí na něm procesor, protože není součástí mnou navržené desky plošných spojů, ale náleží k desce plošných spojů mikropočítače Arduino UNO.



Obr. 15 Schéma zapojení kalorimetru

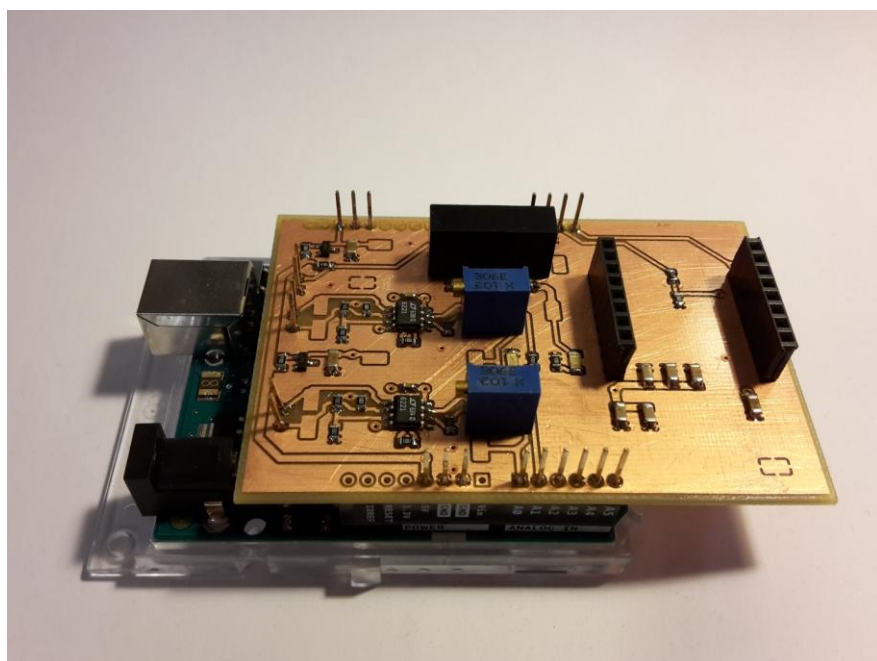
### 3.4 Deska plošných spojů

Na následujícím obrázku je deska plošných spojů navržena podle předcházejícího schématu v návrhovém prostředí Altium Designer.



Obr. 16 Rozložení DPS kalorimetru

Celkový pohled na hotový kalorimetr.



Obr. 17 Fotografie kalorimetru včetně řídicího počítače

## 3.5 Programové vybavení

### 3.5.1 Popis programu

Program kalorimetru je napsán v jazyce C. Skládá se z několika částí, kterými jsou měření průtoku, měření teploty, měření výkonu ohřívače a výpočet tepla. Nakonec jsou všechny naměřené a vypočtené hodnoty odesílány po sériové lince.

#### 3.5.1.1 Měření průtoku

Program hlídá digitální vstup od kalorimetru pomocí funkce přerušení. Každý impuls, který na tento vstup přijde, vygeneruje přerušení, které ve své obsluze zaznamená, že takový impuls proběhl, a inkrementuje příslušnou proměnnou. Jednou za 10 sekund program přečte, kolik těchto impulsů bylo zaznamenáno, a příslušnou proměnnou opět vynuluje. Z počtu načtených impulsů, z uplynulého času a ze znalosti, že jeden impuls znamená protečení 0,1 litru vody, potom snadno spočítá objemový průtok  $Q_V$ :<sup>[3]</sup>

$$Q_V = n * 0,1 * 0,1 \text{ (l/s)}$$

kde  $n$  je zaznamenaný počet impulsů za 10 sekund.

#### 3.5.1.2 Měření teploty

Pro měření teploty je nutné nejdříve změřit napětí za zesilovačem. Tím, že jsem si pomocí odporového trimru přesně nastavil zesílení druhého operačního zesilovače, mohu pomocí analogově digitálního převodníku měřit přímo teplotu. Takto zesílené měřené napětí nabývá hodnot z intervalu 0 V až 2,5 V, což odpovídá teplotám 0 °C – 100 °C. Napětí, potažmo teplota je měřeno každé dvě sekundy. Ve skutečnosti se neměří přímo napětí, ale pouze poměr napětí na vstupu převodníku ku referenčnímu napětí. Napětí se poté vypočte ze vztahu

$$U_{ADC} = \frac{\text{hodnota ADC} * U_{REF}}{\text{Rozlišení ADC} - 1} \quad (3.4)$$

kde *Rozlišení* použitého převodníku je 10 bitů, tedy 1024 hodnot ( $2^{10}$ ), *hodnota ADC* nabývá čísla v rozsahu (0 ÷ 1023) a referenční napětí  $U_{REF}$  je přesně 2,500 V. Já ale vzhledem k vhodně nastavenému zesílení nemusím napětí vůbec počítat, místo toho stejným způsobem mohu měřit přímo teplotu

$$\vartheta_{ADC} = \frac{\text{hodnota ADC} * 100 \text{ °C}}{\text{Rozlišení ADC} - 1} \quad (3.5)$$

Naměřená teplota dále obsahuje šum, který vzniká jak kvůli okolnímu rušení, tak i samotným analogově digitálním převodem, proto měřené hodnoty průměruji. K tomu využívám klouzavý průměr za posledních deset vzorků teploty.

Stejným způsobem se změří a vypočítá i druhá teplota.

### 3.5.1.3 Měření výkonu a dodané energie ohřívače

Měření výkonu ohřívače probíhá podobným způsobem jako měření teploty, též za pomoci analogově digitálního převodníku. Napětí na rezistorech ohřívače je kvůli omezenému maximálnímu vstupnímu napětí převodníku 11x zmenšeno pomocí děliče napětí a poté přivedeno na vstup převodníku. Pro výpočet napětí použijí opět stejný vztah jako pro výpočet napětí, měřené napětí ale musím ještě vynásobit poměrem děliče napětí na vstupu převodníku

$$U_{ADC} = \frac{\text{hodnota ADC} * U_{REF} * 11}{\text{Rozlišení ADC} - 1} \quad (3.6)$$

Z naměřeného napětí dále spočítám výkon. Nedopustím se velké chyby, když celkový odpor topných rezistorů považuji za konstantní, okamžitý výkon se pak tedy spočítá ze známého vztahu

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (3.7)$$

kde  $P$  je elektrický výkon (W),  $U$  je měřené napětí (V) a  $R$  je odpor topných rezistorů ( $\Omega$ ).

Výpočet dodaného tepla ohřívačem se spočítá jednoduše jako součin okamžitého výkonu  $P$  (W) a vzorkovací periody měření teploty  $t$  (s).

$$W = P * t \quad (3.8)$$

kde  $W$  je dodaná energie (J) a  $t$  je doba vzorkovací periody (s).

### 3.5.1.4 Výpočet výkonu a odevzané energie otopného tělesa

Výpočet odebraného tepelného toku se spočítá pomocí vhodně upravené kalorimetrické rovnice

$$Q = \dot{V} \cdot (\rho_1 \cdot c_1 \cdot T_1 - \rho_2 \cdot c_2 \cdot T_2) \quad (3.9)$$

kde  $\dot{V}$  je objemový průtok ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ),  $\rho_1, \rho_2$  je hustota vody pro příslušnou teplotu,  $c_1, c_2$  je měrná tepelná kapacita ( $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) pro příslušnou teplotu vody  $T_1, T_2$  (K). Při výpočtu je tedy nutné přepočítat naměřenou teplotu ve  $^{\circ}\text{C}$  na K, což se provede jednoduše přičtením konstanty. Hustota a měrná tepelná kapacita je do výpočtu pro příslušnou teplotu dosazena z následující tabulky, přičemž hodnoty hustoty a měrné tepelné kapacity pro teploty, jež nejsou uvedené v tabulce, jsou lineárně interpolovány.



**Tabulka 10 Závislost hustoty a měrné tepelné kapacity na teplotě**

$T$ (°C)	$\rho$ (kgm <sup>-3</sup> )	$c$ (Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
5	1000	4202
10	999,8	4192
15	999,2	4186
20	998,3	4182
25	997,1	4180
30	995,7	4178
35	994,1	4178
40	992,3	4179
45	990,2	4181
50	988	4182
55	986	4183
60	983	4185
65	980	4188
70	978	4191
75	975	4194
80	972	4198
85	968	4203
90	965	4208
95	962	4213
100	958	4219

Výpočet odevzdaného tepla otopným tělesem se spočítá stejně jako u ohříváče jednoduše jako součin okamžitého výkonu  $P$  (W) a vzorkovací periody měření teploty  $t$  (s).

$$W = P * t \quad (3.10)$$

kde  $W$  je dodaná energie (J) a  $t$  je doba vzorkovací periody (s).

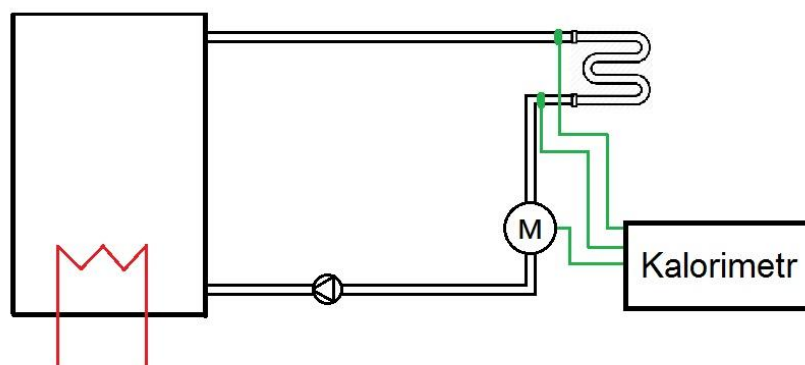
Všechny vypočítané hodnoty jsou poté odeslány na sériovou linku, kde jsem je přijímal a četl pomocí vestavěného USB převodníku a zobrazoval v prostředí Arduino Dashboard, které umožňuje snadno zobrazit data přicházející po sériové lince i jinak než v terminálu. [22]

## 4 Model otopné soustavy

V následujících kapitolách bude představen návrh modelu otopné soustavy a blokové schéma a poté popsány jednotlivé součásti modelu.

### 4.1 Blokové schéma

Blokové schéma bylo navrženo na základě předchozích kapitol. Obsahuje ohříváč, ve kterém je pomocí rezistorů měněna elektrická energie v teplo, model otopného tělesa, který tvoří menší chladič s ventilátorem, z již zmíněného průtokoměru a z čerpadla, které zajišťuje cirkulaci otopné vody.



Obr. 18 Blokové schéma modelu otopné soustavy

### 4.2 Popis bloků

V následujících kapitolách budou popsány hlavní části blokového schématu kromě samotného kalorimetru, kterému jsem se již dostatečně věnoval v předchozích kapitolách.

#### 4.2.1 Ohříváč

Pro simulaci otopného tělesa, které předává teplo z kapaliny do okolí, jsem nejdříve potřeboval nějakým způsobem kapalinu ohřát. K tomuto účelu jsem použil vlastnoručně navržený a vyrobený ohříváč. Jedná se o hliníkový blok velikosti asi 8 x 12 centimetrů, který je po délce

provrtán třemi otvory o průměru 8,5 milimetru. Na obou koncích každého otvoru se nachází příruba pro hadici a otvory tak protéká voda.

Dále je na tomto hliníkovém bloku rovnoměrně rozmístěno 12 kusů výkonových rezistorů, které blok ohřívají, a tím i kapalinu uvnitř. Použil jsem výkonové rezistory s výkonem 25 W a hodnotou odporu 4,7  $\Omega$ . Rezistory jsou rozděleny do párů, uvnitř párů jsou spojeny sériově. Těchto šest párů je pak vzájemně spojeno paralelně. Jako celek má tedy ohřívač odpor 1,56  $\Omega$  a jmenovitého výkonu 300 W dosahuje při napětí 21,7 V. Ohřívačem při tom protéká proud 13,84 A. [21]

Součástí ohřívače je i rezistorový dělič napětí, který snižuje napájecí napětí rezistorů na jednu jedenáctinu. Toto snížené napětí pak zpracovává analogově digitální převodník mikropočítače a měří tak napětí na ohřívači, aby poté mohl spočítat jeho okamžitý výkon.



Obr. 19 Fotografie ohřívače

## 4.2.2 Čerpadlo

Pro zajištění možnosti sdílení tepla je nutné, aby voda mezi ohřívačem a otopným tělesem cirkulovala. Ve speciálních případech to lze zajistit bez čerpadla, tento případ se nazývá samotížná otopná soustava. Pro ni jsou ale potřeba splnit složité podmínky pro vlastnosti a polohu jednotlivých součástí otopné soustavy, takže jsem byl v mém případě nucen použít čerpadlo.

Výběr čerpadla pro mě nebyl úplně jednoduchý, protože muselo splnit několik kritérií. V první řadě musí mít čerpadlo dostatečný výkon, aby dokázalo v otopné soustavě vytvořit dostatečný průtok. Vybíral jsem takové, které při minimální výtlačné výšce dokázalo vytvořit průtok alespoň 400 l/h. Další kritérium byla teplotní odolnost, protože čerpadlo musí být schopno pracovat s kapalinou o teplotě blízké se 100  $^{\circ}\text{C}$ . Poslední důležité kritérium byla schopnost pracovat na bezpečné nízké napětí 12 V nebo 24 V, protože zavádět střídavé síťové napětí do modelového

přípravku, kde jsou přístupné části a kde se může snadno rozlít voda, je z hlediska bezpečnosti nepřijatelné. [18]

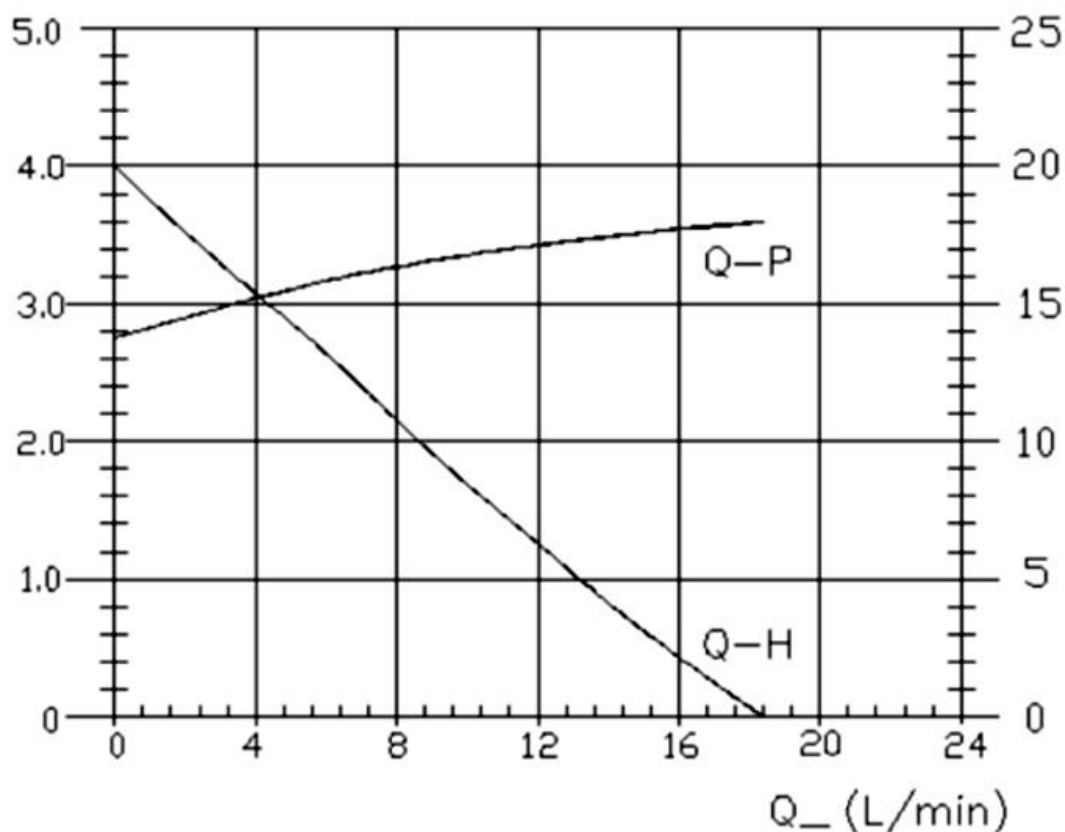
Na základě těchto kritérií jsem nakonec vybral čerpadlo LP-25 s bezkartáčovým motorem.

Tabulka 11 Parametry čerpadla LP-25

Napájecí napětí	5 - 12 V
Max. příkon	17 W
Max. průtok	19 l/min
Max. výtlačná výška	3,7 m
Životnost	20 000 h
Pracovní teplota	-25 °C - 75 °C
Teplota kapaliny	-25 °C - 100 °C



Obr. 20 Fotografie čerpadla



Obr. 21 Charakteristika čerpadla

### 4.2.3 Otopné těleso

Poslední důležitou součástí modelu otopné soustavy bylo samotné otopné těleso. Při výběru jsem zohledňoval, aby mělo přiměřenou velikost ke zbytku otopné soustavy a zároveň aby bylo schopno do okolí sdílet dostatečné množství tepla na to, aby se daly změřit průkazné hodnoty. Nakonec jsem vybral chladič Alphacool NexXoS Xtreme I rev2. Tento chladič je původně určený pro nadšence, kteří si předělávají chlazení svého stolního počítače na kapalinové chlazení výkonných komponent, a slouží k odvedení tepla z kapaliny do okolí mimo skříň počítače. Má přiměřenou velikost, cca 15 x 12 x 4,5 centimetru a pro zvýšení sdílení tepla je ho možné osadit ventilátorem, což jsem také udělal. <sup>[17]</sup>

Ověřovací měření prokázalo, že jeho velikost je dostatečná, protože při vyšších teplotách teplotnosné kapaliny (vody) a nižších průtocích je na něm teplotní spád 4 °C – 6 °C a předávaný tepelný výkon do okolí je vyšší než 300 W, což je hodnota, jakou lze maximálně dodávat do systému v ohříváči.



**Obr. 22** Fotografie modelu otopného tělesa

## 5 Měření

V následujících kapitolách budou popsány měřené veličiny, způsob a princip jejich měření, a nakonec shrnuty naměřené a vypočtené hodnoty.

### 5.1 Základní prověření kalorimetru

Základní prověření kalorimetru zahrnovalo oživení samotné desky plošných spojů s mikroprocesorem, zkoušku, zda měří přibližně správnou teplotu a následně její přesné kalibrování. Vzhledem k tomu, že průtokoměr již poskytuje zpracovaný údaj o průtoku kapaliny, nebylo nutné výpočet průtoku nijak kalibrovat, stačí ověřit, že mikropočítač dokáže zpracovat příchozí pulzy.

#### 5.1.1 Měření průtoku

Jak již bylo napsáno, průtokoměr poskytuje přesný údaj o aktuálním průtoku v podobě pravidelných pulzů, přičemž každý pulz odpovídá proteklým 100 ml kapaliny. Ověření funkce jsem tedy provedl tím způsobem, že jsem ručně v pravidelných intervalech přiváděl na vstup od průtokoměru pulzy a sledoval, jestli mikropočítač tyto pulzy správně zaznamenává. Ukázalo se, že ano, a naprosto přesně.

#### 5.1.2 Měření teploty

Při měření teploty nebylo úplně nejdůležitější ani tak to, aby měřená teplota přesně odpovídala skutečné v celém rozsahu, ale protože kalorimetr pracuje s teplotní diferencí, tak hlavně, aby při umístění obou čidel do stejného teplotního prostředí ukazoval kalorimetr nulový rozdíl teplot. To jsem přesně udělal, nechal senzory teploty ustálit a poté doladil zesílení zesilovačů tak, aby ukazovaly stejnou teplotu. Nebylo potřeba velkého ladění, hodnoty se lišily maximálně o 0,5 °C, což bylo nejspíš způsobeno nepřesností a tolerancí použitých součástek včetně teplotních čidel. V následující tabulce je vidět výpis hodnot a teplot, které zasílá mikropočítač po sériové lince.

```
COM8 (Arduino/Genuino Uno)
Cas: 764s, Prutok: 0.00 l/s, ADC0: 189, 461.69mV, 1072.58ohm, 18.85°C, ADC1: 187, 456.81mV, 1070.55ohm, 18.32°C, Teplo: 0.00 W.
Cas: 765s, Prutok: 0.00 l/s, ADC0: 189, 461.69mV, 1072.58ohm, 18.85°C, ADC1: 187, 456.81mV, 1070.55ohm, 18.32°C, Teplo: 0.00 W.
Cas: 766s, Prutok: 0.00 l/s, ADC0: 189, 461.69mV, 1072.58ohm, 18.85°C, ADC1: 188, 459.25mV, 1070.93ohm, 18.42°C, Teplo: 0.00 W.
Cas: 767s, Prutok: 0.00 l/s, ADC0: 189, 461.69mV, 1072.58ohm, 18.85°C, ADC1: 187, 456.81mV, 1070.55ohm, 18.32°C, Teplo: 0.00 W.
Cas: 768s, Prutok: 0.00 l/s, ADC0: 189, 461.69mV, 1072.58ohm, 18.85°C, ADC1: 187, 456.81mV, 1070.55ohm, 18.32°C, Teplo: 0.00 W.
Cas: 769s, Prutok: 0.00 l/s, ADC0: 189, 461.69mV, 1072.58ohm, 18.85°C, ADC1: 187, 456.81mV, 1070.55ohm, 18.32°C, Teplo: 0.00 W.
Cas: 770s, Prutok: 0.00 l/s, ADC0: 189, 461.69mV, 1072.58ohm, 18.85°C, ADC1: 187, 456.81mV, 1070.55ohm, 18.32°C, Teplo: 0.00 W.
Cas: 771s, Prutok: 0.00 l/s, ADC0: 189, 461.69mV, 1072.58ohm, 18.85°C, ADC1: 187, 456.81mV, 1070.55ohm, 18.32°C, Teplo: 0.00 W.
Cas: 772s, Prutok: 0.00 l/s, ADC0: 189, 461.69mV, 1072.58ohm, 18.85°C, ADC1: 186, 454.36mV, 1070.17ohm, 18.22°C, Teplo: 0.00 W.
Cas: 773s, Prutok: 0.00 l/s, ADC0: 189, 461.69mV, 1072.58ohm, 18.85°C, ADC1: 187, 456.81mV, 1070.55ohm, 18.32°C, Teplo: 0.00 W.
Cas: 774s, Prutok: 0.00 l/s, ADC0: 190, 464.13mV, 1072.96ohm, 18.95°C, ADC1: 187, 456.81mV, 1070.55ohm, 18.32°C, Teplo: 0.00 W.
Cas: 775s, Prutok: 0.00 l/s, ADC0: 189, 461.69mV, 1072.58ohm, 18.85°C, ADC1: 187, 456.81mV, 1070.55ohm, 18.32°C, Teplo: 0.00 W.
Cas: 776s, Prutok: 0.00 l/s, ADC0: 189, 461.69mV, 1072.58ohm, 18.85°C, ADC1: 186, 454.36mV, 1070.17ohm, 18.22°C, Teplo: 0.00 W.
Cas: 777s, Prutok: 0.00 l/s, ADC0: 189, 461.69mV, 1072.58ohm, 18.85°C, ADC1: 187, 456.81mV, 1070.55ohm, 18.32°C, Teplo: 0.00 W.
Cas: 778s, Prutok: 0.00 l/s, ADC0: 189, 461.69mV, 1072.58ohm, 18.85°C, ADC1: 187, 456.81mV, 1070.55ohm, 18.32°C, Teplo: 0.00 W.
Cas: 779s, Prutok: 0.00 l/s, ADC0: 189, 461.69mV, 1072.58ohm, 18.85°C, ADC1: 187, 456.81mV, 1070.55ohm, 18.32°C, Teplo: 0.00 W.
Cas: 780s, Prutok: 0.00 l/s, ADC0: 189, 461.69mV, 1072.58ohm, 18.85°C, ADC1: 188, 459.25mV, 1070.93ohm, 18.42°C, Teplo: 0.00 W.
Cas: 781s, Prutok: 0.00 l/s, ADC0: 189, 461.69mV, 1072.58ohm, 18.85°C, ADC1: 187, 456.81mV, 1070.55ohm, 18.32°C, Teplo: 0.00 W.
Cas: 782s, Prutok: 0.00 l/s, ADC0: 189, 461.69mV, 1072.58ohm, 18.85°C, ADC1: 187, 456.81mV, 1070.55ohm, 18.32°C, Teplo: 0.00 W.
Cas: 783s, Prutok: 0.00 l/s, ADC0: 189, 461.69mV, 1072.58ohm, 18.85°C, ADC1: 187, 456.81mV, 1070.55ohm, 18.32°C, Teplo: 0.00 W.
Cas: 784s, Prutok: 0.00 l/s, ADC0: 188, 459.25mV, 1072.19ohm, 18.75°C, ADC1: 187, 456.81mV, 1070.55ohm, 18.32°C, Teplo: 0.00 W.
Cas: 785s, Prutok: 0.00 l/s, ADC0: 189, 461.69mV, 1072.58ohm, 18.85°C, ADC1: 187, 456.81mV, 1070.55ohm, 18.32°C, Teplo: 0.00 W.
Cas: 786s, Prutok: 0.00 l/s, ADC0: 189, 461.69mV, 1072.58ohm, 18.85°C, ADC1: 188, 459.25mV, 1070.93ohm, 18.42°C, Teplo: 0.00 W.
Cas: 787s, Prutok: 0.00 l/s, ADC0: 189, 461.69mV, 1072.58ohm, 18.85°C, ADC1: 186, 454.36mV, 1070.17ohm, 18.22°C, Teplo: 0.00 W.
Cas: 788s, Prutok: 0.00 l/s, ADC0: 189, 461.69mV, 1072.58ohm, 18.85°C, ADC1: 186, 454.36mV, 1070.17ohm, 18.22°C, Teplo: 0.00 W.
 Automatické scrollování
```

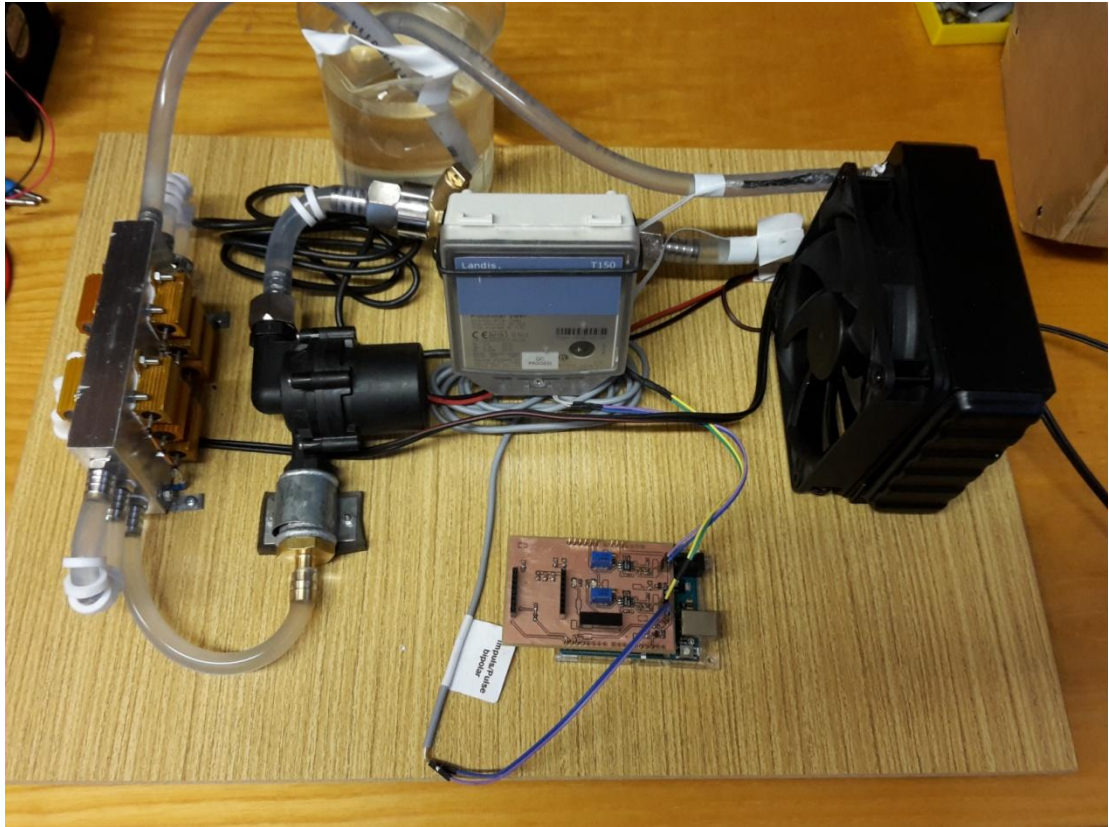
Obr. 23 Snímek obrazovky při měření teploty

## 5.2 Základní prověření modelu otopné soustavy

Prověření modelu otopné soustavy předcházelo nejdříve naplnění celé soustavy vodou a následně její odzdušnění. Při tom se ukázaly dvě komplikace. První bylo, že v celé soustavě je mnoho různých vzduchových kapes, kde se může hromadit vzduch, který je následně při větších průtocích strháván a zavzdušňuje celý systém. Druhá komplikace byla, že se ukázalo, že ultrazvukový průtokoměr je velmi citlivý na zavzdušnění a již při malém zavzdušnění začne generovat nepravidelné pulzy, které neodpovídají průtoku.

Naštěstí se ale po několika pokusech podařilo celou soustavu odzdušnit, aby spolehlivě fungovala přesně tak, jak má. Na následující obrázku je zachycen celý model otopné soustavy.





Obr. 24 Fotografie modelu otopné soustavy

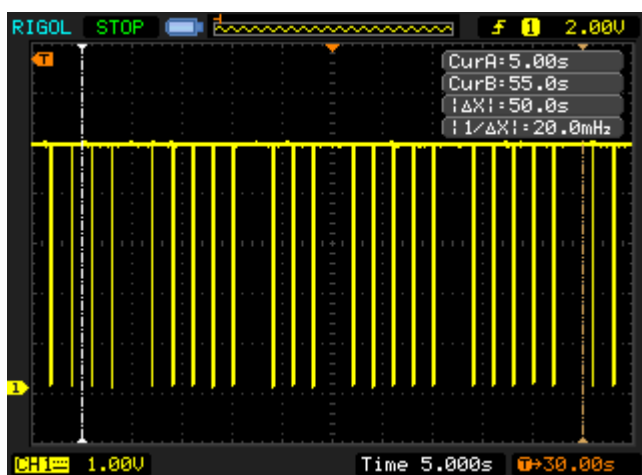
### 5.2.1 Měření průtoku

Jako první jsem na celé soustavě ověřoval, jak funguje měření průtoku, což, jak se ukázalo, souviselo i s detekcí zavzdušnění průtokoměru. Po několika pokusech o odvzdušnění už ale průtokoměr začal ukazovat stabilní hodnoty průtoku odpovídající realitě.

Na následující tabulce je charakteristika čerpadla, na které je vidět při jakém napájecím napětí dosahuje jakého průtoku. Nejnižší možné napájecí napětí je 5 V, pokud jsem chtěl měřit ještě menší průtoky, musel jsem do systému zařadit umělou překážku, kterou tvořily plastové trysky s různě velikým otvorem. Tyto trysky jsem vyrobil pomocí technologie 3D tisku.

Tabulka 12 Závislost průtoku na napětí čerpadla a na jeho zaškrvení

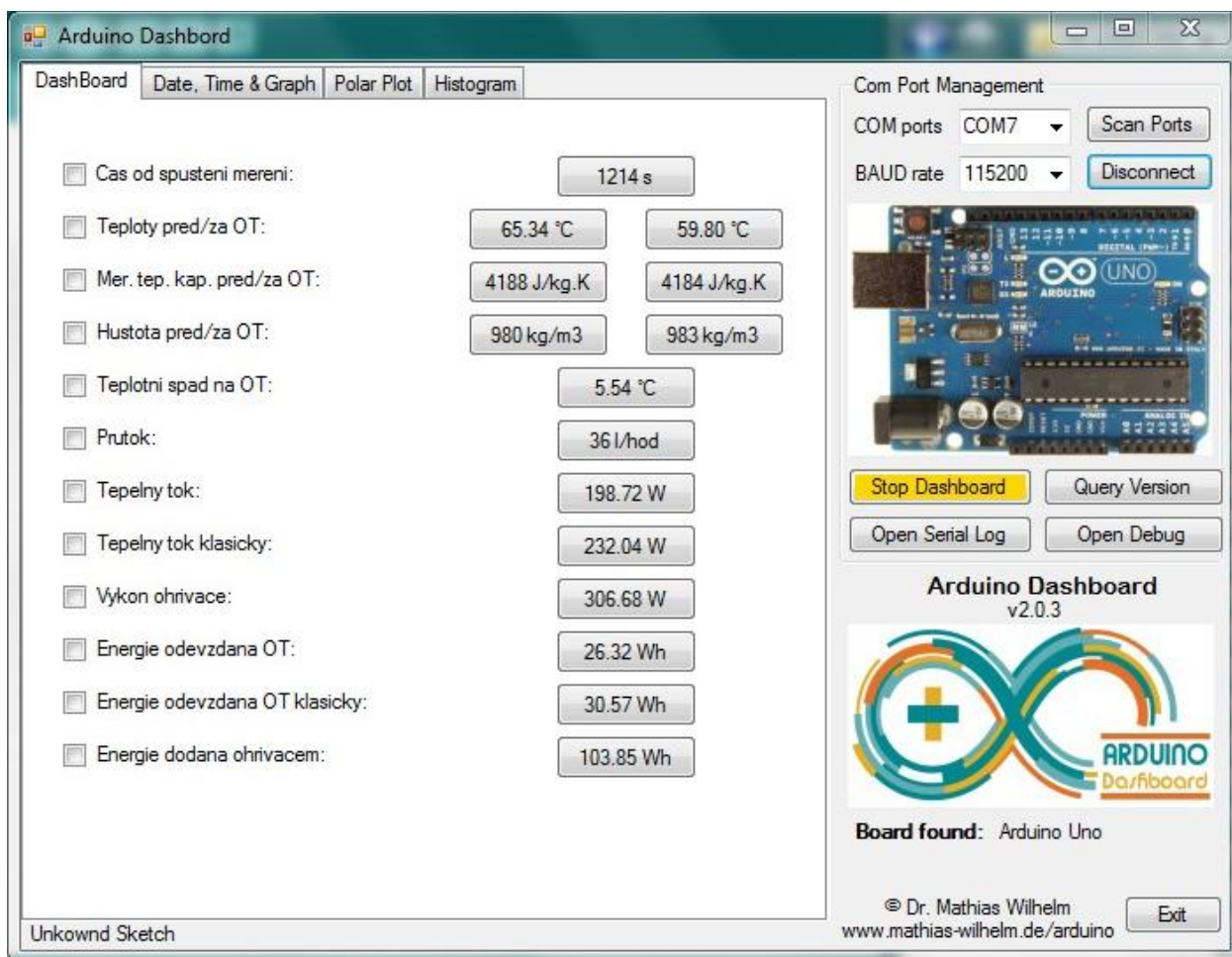
Napájecí napětí (V)	Tryska s otvorem (mm)	Průtok (l/s)	Průtok (l/h)
12		0,048	174
11		0,043	156
10		0,04	144
9		0,037	132
8		0,034	123
7		0,032	114
6		0,028	102
5		0,023	84
5	5 mm	0,022	78
5	4 mm	0,02	72
5	3 mm	0,015	54
5	2 mm	0,01	24



Obr. 25 Oscilogram pulzů na výstupu z průtokoměru

## 5.2.2 Měření výkonu

Měření teplot už jsem měl ověřené z prověřování samotného kalorimetru, mohl jsem tedy po ověření funkce měření průtoku rovnou přistoupit k měření výkonu. To jsem provedl tak, že jsem spustil cirkulaci otopné vody, zapnul ohřívač i ventilátor na chladiči a počkal, až se na otopném tělese vytvoří smysluplný spád teplot. Poté jsem zaznamenal vstupní hodnoty výpočtu tepla (teploty, průtok) i výsledky výpočtů (tepelný tok). Následně jsem ze zaznamenaných vstupních hodnot vypočítal tepelný tok ručně na papír a můj výsledek porovnal s vypočteným. Ukázalo se, že jsou téměř shodné, předpokládám proto, že drobné odchylky v řádu desetin jsou způsobené zaokrouhlováním.



Obr. 26 Program Arduino Dashboard pro zobrazení dat

### Kontrola výpočtu

Zjištění měrné tepelné kapacity a hustoty z Tabulky 10:

$$T_1 = 65,3 \text{ °C} \Rightarrow c_1 = 4188 \frac{\text{J}}{\text{kg.K}}, \rho_1 = 980 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}; T_2 = 59,8 \text{ °C} \Rightarrow c_2 = 4184, \frac{\text{J}}{\text{kg.K}}, \rho_2 = 983 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Výpočet tepelné energie podle rovnice (3.9), přitom je nutné přepočítat všechny teploty ze stupňů Celsia na Kelviny a průtok převést do základních jednotek:

$$T_1 = 65,34 \text{ °C} + 273,15 = 338,49 \text{ K}$$

$$T_2 = 59,8 \text{ °C} + 273,15 = 332,95 \text{ K}$$

$$\dot{V} = 36 \frac{\text{l}}{\text{h}} * \frac{1}{3600} * \frac{1}{1000} = 0,00001 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$\dot{Q}_T = \dot{V} * (\rho_1 * c_1 * T_1 - \rho_2 * c_2 * T_2) = 0,00001 * (980 * 4188 * 338,49 - 983 * 4184 * 332,9) = 198,6 \text{ W}$$

Odchylka od hodnoty vypočtené procesorem činí pouhých 0,1 W, což je 0,05 %. Tato odchylka vznikla nejspíš zaokrouhlováním při výpočtu a její velikost je zanedbatelná.

Výpočet výkonu otopného tělesa bez korekcí a za použití rovnice (1.5) a standardních hodnot  $\rho = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ,  $c = 4182 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$ :

$$\dot{Q}'_T = \dot{V} \cdot \rho \cdot c \cdot \Delta T = 0,00001 * 1000 * 4182 * (65,34 - 59,8) = 231,7 \text{ W}$$

Výpočet se opět liší o pouhé 0,36 W (0,15%), což považuji opět za zanedbatelné.

### 5.3 Měření provozních stavů

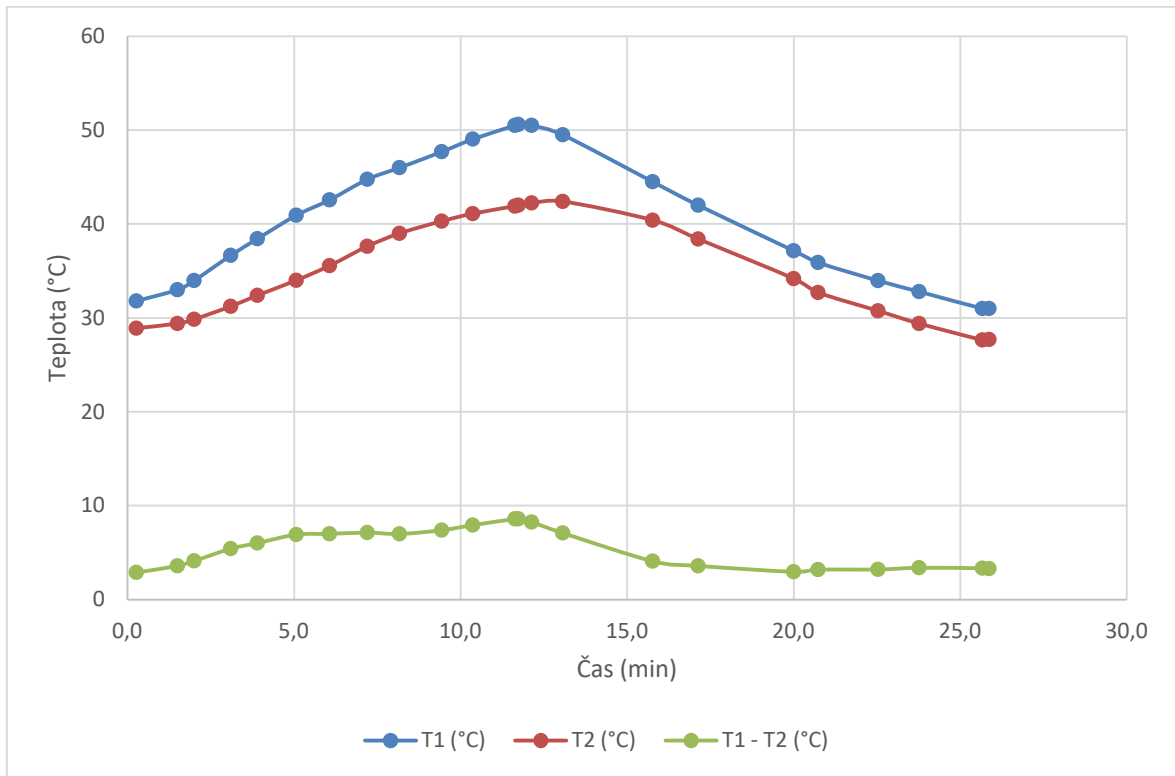
Při měření provozních stavů jsem zapnul cirkulační čerpadlo a ventilátor na otopném tělese. Pak jsem zapnul ohřívač a ohřál otopnou vodu na 30 °C. Po ustálení teplot jsem opět zapnul ohřívač a začal otopnou vodu ohřívat na maximální teplotu zmíněnou v nadpisu každé další kapitoly, poté jsem ohřívač vypnul a pokračoval v měření až do ochlazení vody zpět na 30 °C.

Při každém cyklu jsem měřil čas  $t$  (min), vstupní teplotu do otopného tělesa  $T_1$  (°C), výstupní teplotu  $T_2$  (°C), energii sdělenou otopným tělesem do okolí  $Q$  (Wh), energii sdělenou otopným tělesem do okolí vypočítanou standardním způsobem bez kompenzací  $Q'$  (Wh) a energii dodanou do systému ohřívačem  $Q_0$  (Wh).

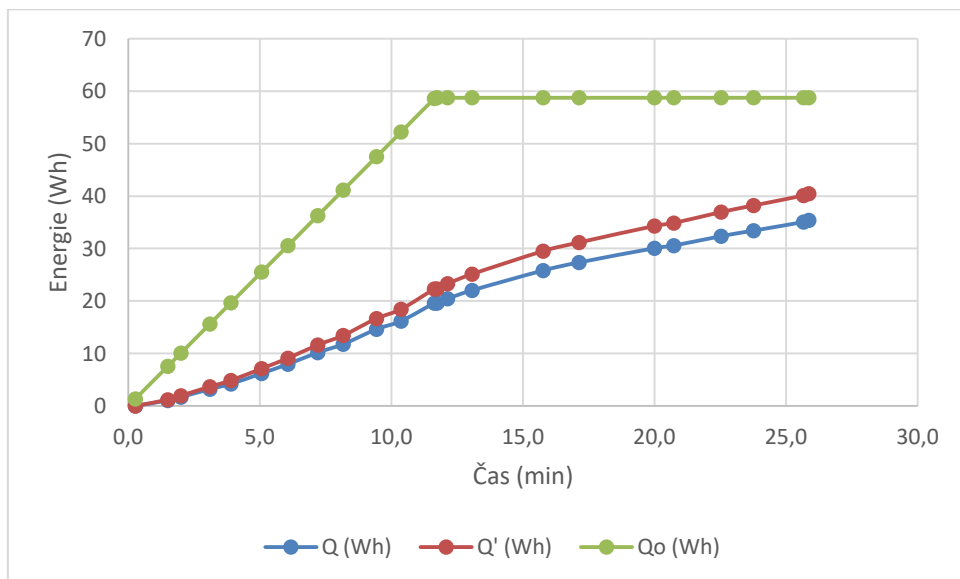
Z těchto hodnot jsem dále vypočítal teplotní spád na otopném tělese  $T_2 - T_1$  (°C), průměrný teplotní spád za celou dobu cyklu  $(T_2 - T_1)_{AV}$  (°C), průměrný výkon dodávaný otopným tělesem  $Q_{AV}$  (W) a pro porovnání průměrný výkon dodávaný otopným tělesem počítaný bez kompenzací  $Q'_{AV}$  (W).

Na následujících stranách se nacházejí pouze grafy naměřených hodnot, tabulky naměřených hodnot se nachází mezi přílohami na konci této práce.

### 5.3.1 Průtok 24 l/h, teplotní cyklus 30-50-30 °C



Obr. 27 Průběh teplot

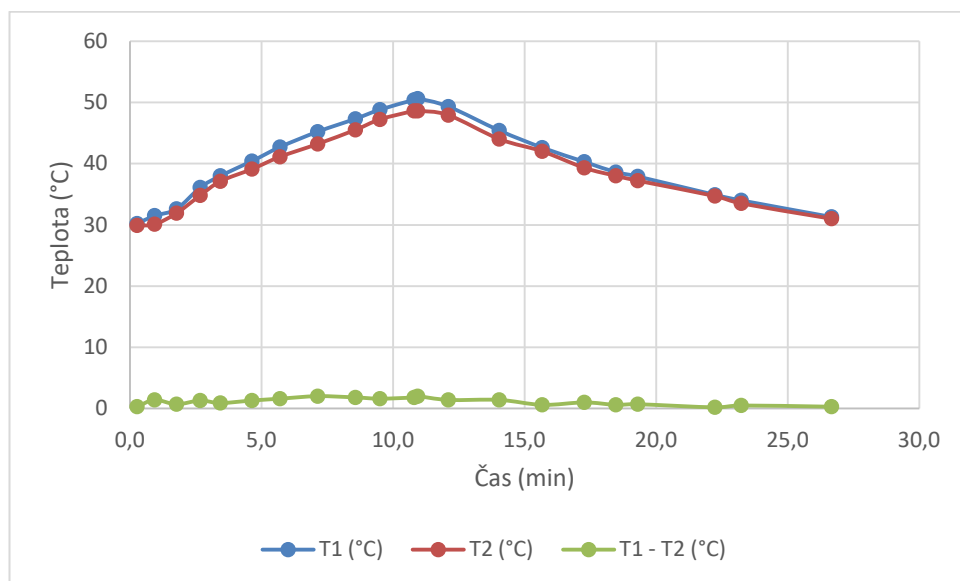


Obr. 28 Průběh energie

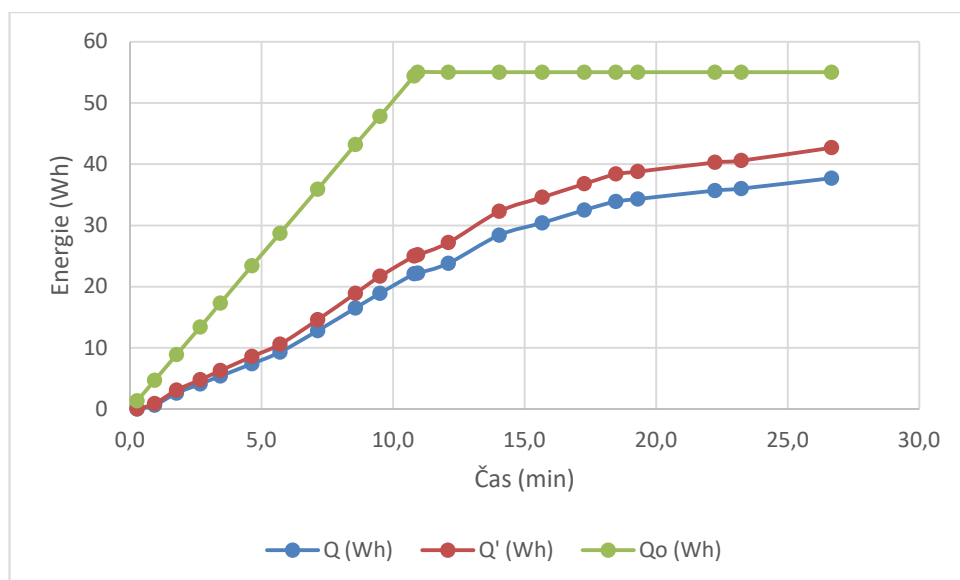
Tabulka 13 Výsledky měření

$Q_{AV}$ (W)	82,1
$Q'_{AV}$ (W)	93,8
$T1-T2_{AV}$ (°C)	5,4
$\eta$	60%
$\eta'$	69%

### 5.3.2 Průtok 84 l/h, teplotní cyklus 30-50-30 °C



Obr. 29 Průběh teplot

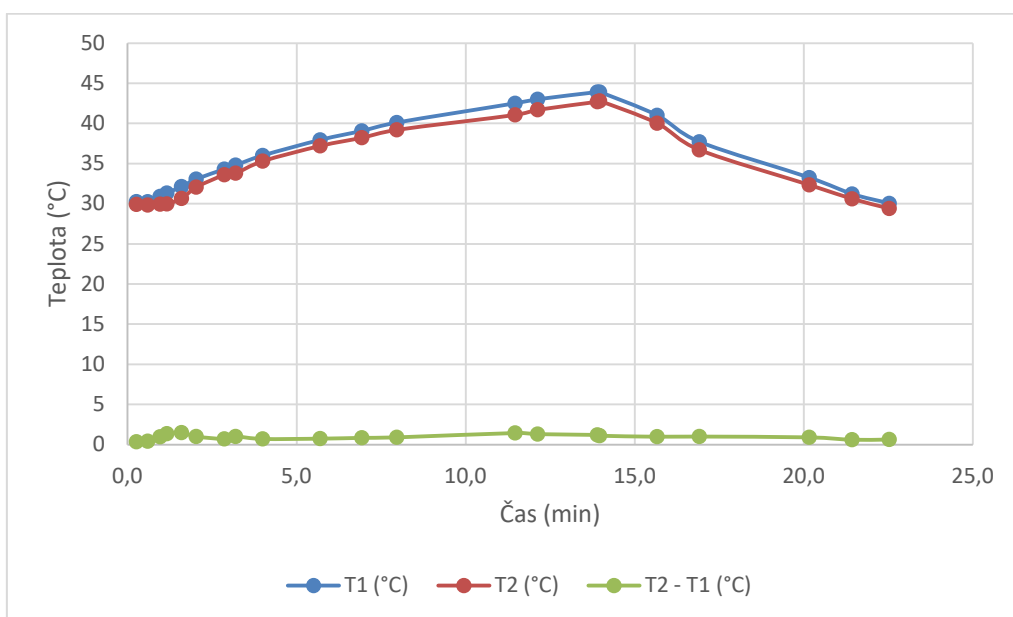


Obr. 30 Průběh energie

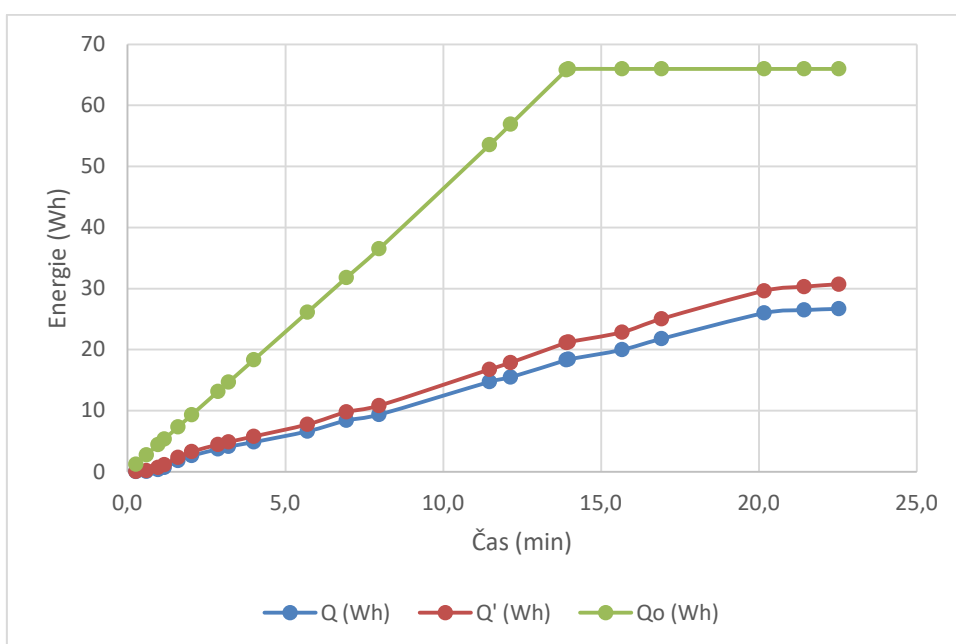
Tabulka 14 Výsledky měření

$Q_{AV}$ (W)	84,8
$Q'_{AV}$ (W)	96,1
$T1-T2_{AV}$ (°C)	1,1
$\eta$	69%
$\eta'$	78%

### 5.3.3 Průtok 123 l/h, teplotní cyklus 30-50-30 °C



Obr. 31 Průběh teplot

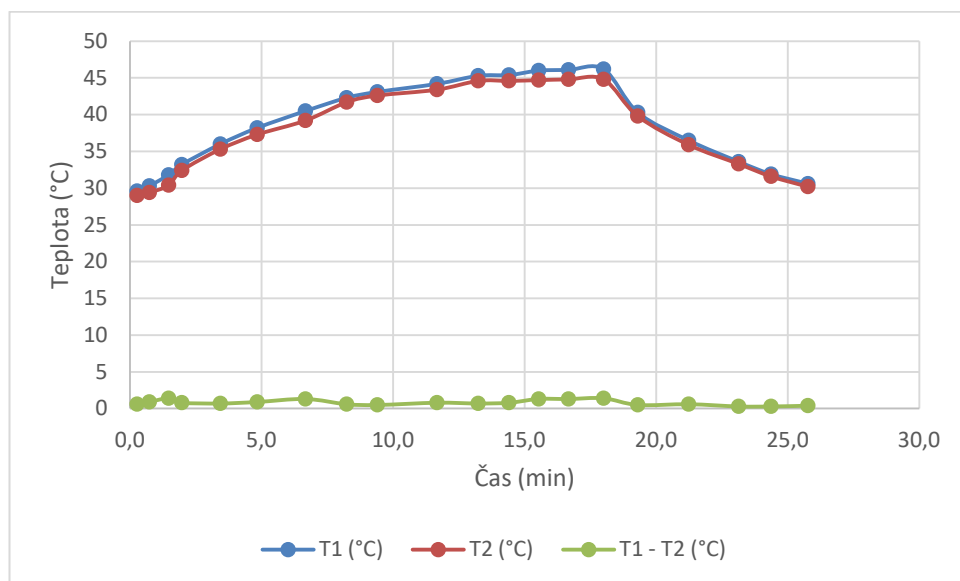


Obr. 32 Průběh energie

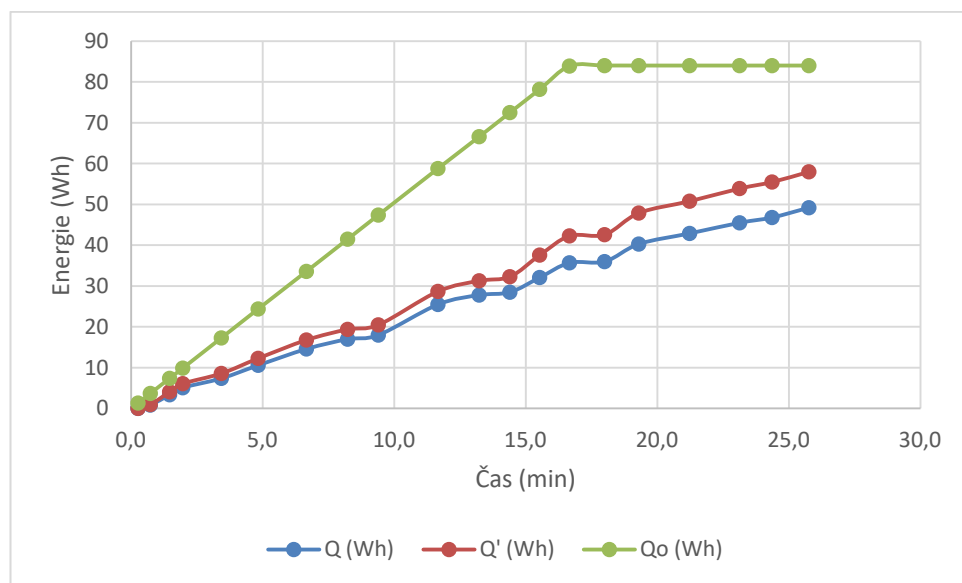
Tabulka 15 Výsledky měření

$Q_{AV}$ (W)	71,1
$Q'_{AV}$ (W)	81,7
$T1-T2_{AV}$ (°C)	0,9
$\eta$	40%
$\eta'$	47%

### 5.3.4 Průtok 144 l/h, teplotní cyklus 30-50-30 °C



Obr. 33 Průběh teplot



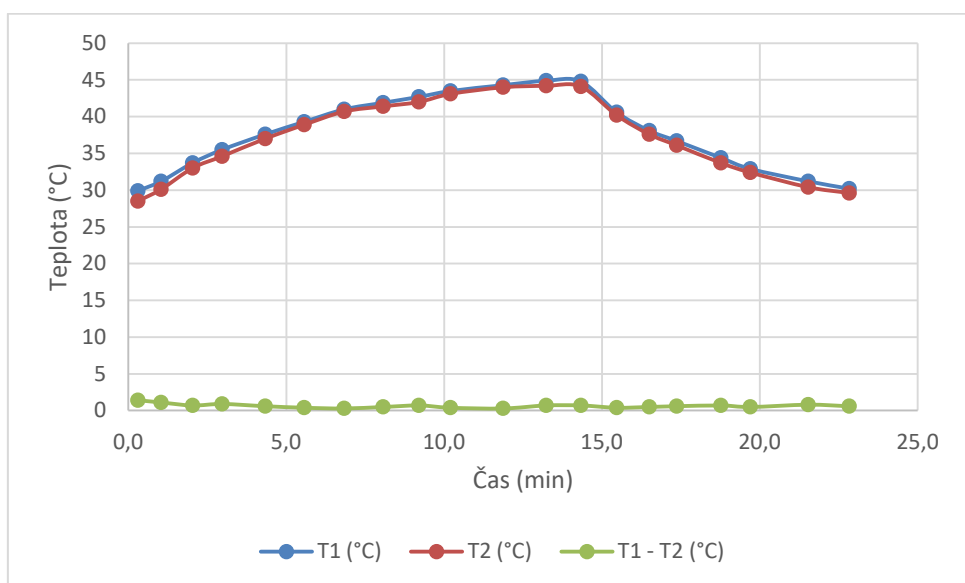
Obr. 34 Průběh energie

Tabulka 16 Výsledky měření

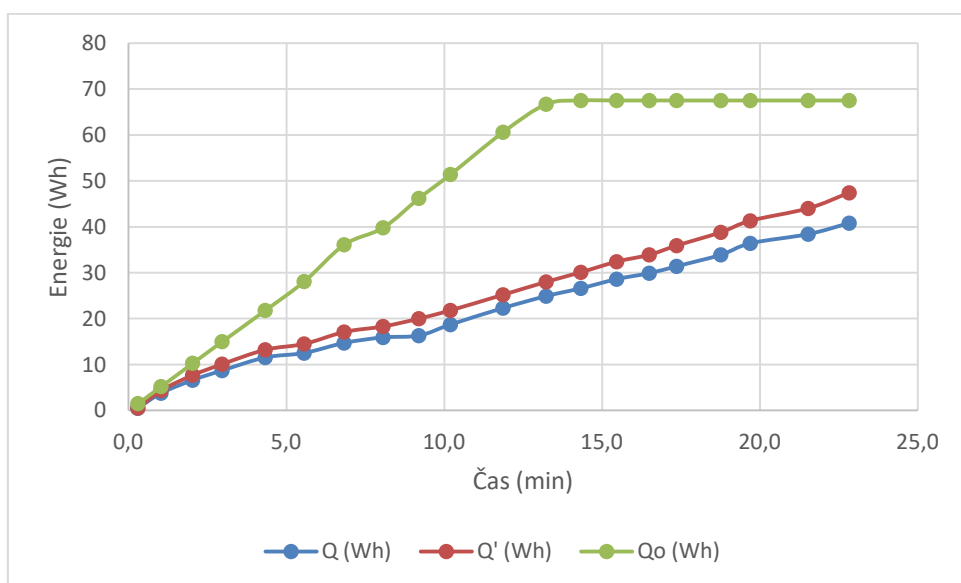
$Q_{AV}$ (W)	114,6
$Q'_{AV}$ (W)	135,1
$T1-T2_{AV}$ (°C)	0,8
$\eta$	59%
$\eta'$	69%



### 5.3.5 Průtok 174 l/h, teplotní cyklus 30-50-30 °C



Obr. 35 Průběh teplot

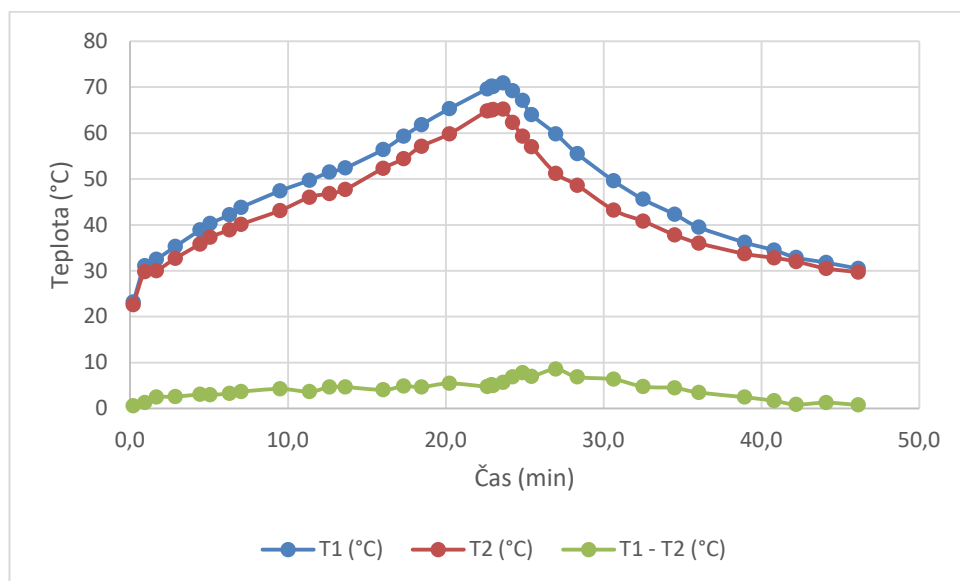


Obr. 36 Průběh energie

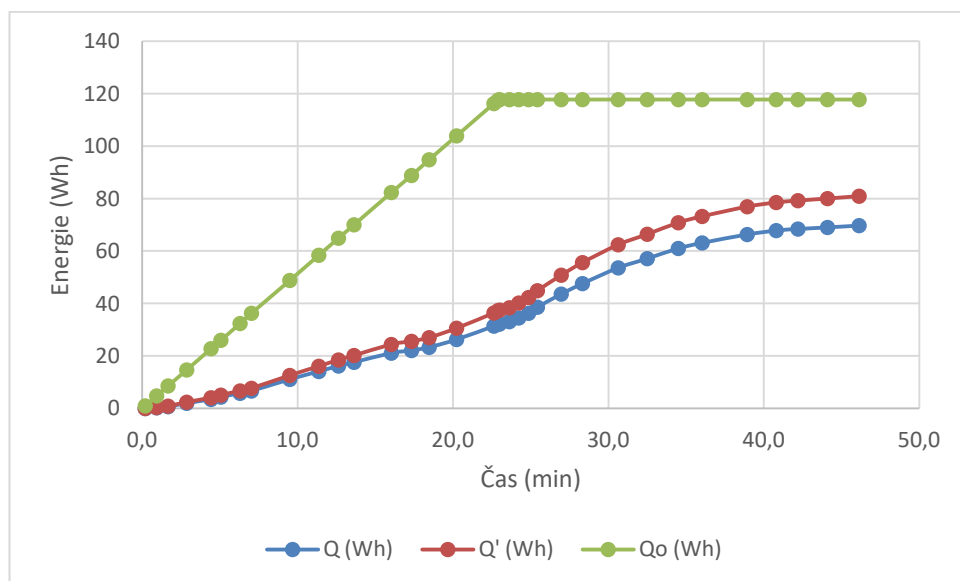
Tabulka 17 Výsledky měření

$Q_{AV}$ (W)	107,2
$Q'_{AV}$ (W)	124,6
$T1-T2_{AV}$ (°C)	0,6
$\eta$	60%
$\eta'$	70%

### 5.3.6 Průtok 24 l/h, teplotní cyklus 30-70-30 °C



Obr. 37 Průběh teplot



Obr. 38 Průběh energie

Tabulka 18 Výsledky měření

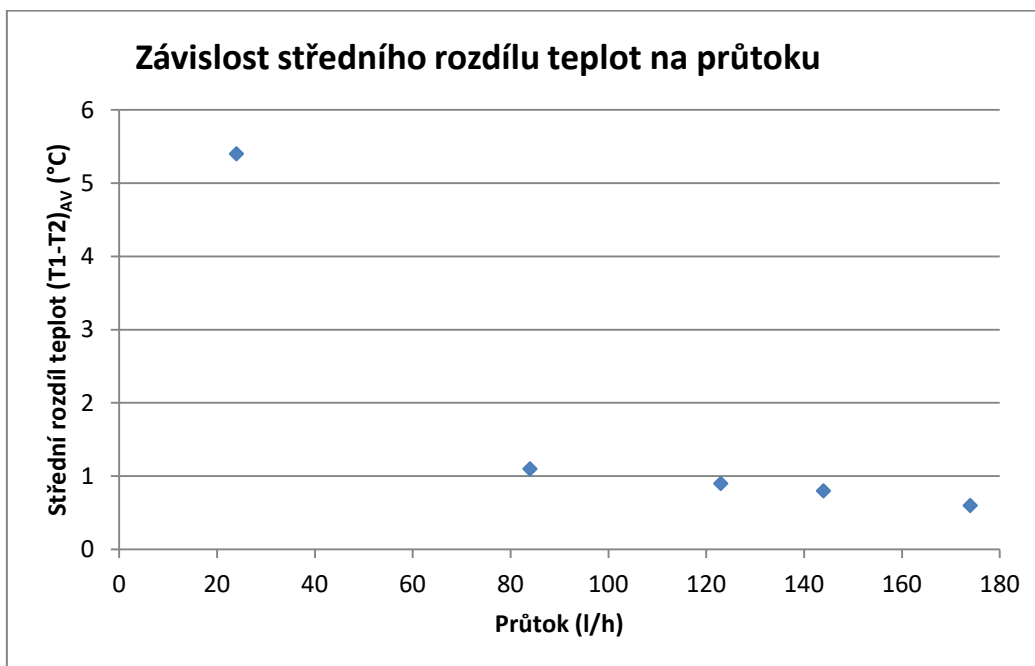
$Q_{AV}$ (W)	90,7
$Q'_{AV}$ (W)	105,2
$T1-T2_{AV}$ (°C)	4,1
$\eta$	59%
$\eta'$	69%

## 5.4 Shrnutí výsledků

Z vyhodnocení výsledků je patrné, že výkon ohříváče při určitých provozních stavech není dostatečný, při větších průtocích, přibližně od 120 l/h, již nestíhá ohřívat otopnou vodu. Do teploty cca 40°C ještě ohřívá rychle, ale od této hodnoty se ohřev začíná výrazně zpomalovat. Při nižších průtocích tento jev nenastává a dá se tak otopná voda ohřát i na více jak 70 °C. To je důvod, proč jsem většinu měření provedl jen v rozsahu teplot od 30 °C do 50 °C a jen jedno měření s malým průtokem jsem pro ověření provedl i při vyšší teplotě přes 70 °C. Je to způsobeno, jak již jsem zmínil, nedostatečným výkonem ohříváče, a pak také tím, že celá soustava není nijak izolována a dochází tak ke ztrátám tepla. Za největší ztráty je zodpovědná vyrovnávací a odvzdušňovací nádoba, kde se voda může odparem ochlazovat, a těleso průtokoměru, které je vyrobeno z mosazi, tedy z kovu s velmi dobrou tepelnou vodivostí. Dalším potenciálním místem, kde vznikají ztráty, je i samotný ohříváč, ve kterém se teplo z topných rezistorů uvolňuje nejen do protékající vody, ale i do okolního prostředí.

Tento problém by se dal vylepšit izolováním všech zmíněných součástí, tedy ohříváče, průtokoměru a vyrovnávací nádoby, například pomocí polystyrenu nebo minerální vaty. Tím by ale celý přípravek ztratil svojí demonstrační funkci, protože by jednotlivé součásti pod vrstvou izolace nebyly vidět. Další možností by byla izolace pomocí boxu z průhledného plastu (plexisklo), ale v takovém případě by jeho izolační schopnosti nebyly tak účinné a navíc by mohlo v případě vyšší teploty a vlhkosti dojít ke kondenzaci na stěnách boxu.

Další věc, která je z vyhodnocení výsledku patrná, je závislost rozdílu teplot vstupní a výstupní vody do otopného tělesa (teplotní spád). Tato závislost je vynesena na následujícím grafu. Je z ní patrné, že s rostoucím průtokem poměrně výrazně klesá rozdíl teplot, což se dá logicky zdůvodnit, protože čím rychleji kapalina otopným tělesem proteče, tím méně času má na sdílení tepla s okolím a tedy o to méně se stihne ochladit.



Obr. 39 Závislost středního rozdílu teplot na průtoku

Poslední důležitý poznatek, který je z naměřených hodnot vidět, je, jaký je rozdíl při výpočtu dodané energie standardní metodou s pevnými hodnotami měrné tepelné kapacity a hustoty a při použití hodnot kompenzovaných podle aktuální teploty vody. Ač se to na první pohled nemusí zdát, rozdíl ve vypočtené dodané energii vychází podle mnou provedených měření až 10 %, v závislosti na průtoku a rozdílu teplot mezi otopným tělesem a okolím, což není zanedbatelné číslo. Pokud má tedy spotřebitel v místě odběru instalován kalorimetr bez korekcí podle teploty otopné vody, tak mu tento kalorimetr teoreticky naměří až o 10 % větší odběr tepelné energie, než skutečně spotřeboval. Ze stejného důvodu mi také ve všech měřeních vyšla fiktivní účinnost při počítání se standardními hodnotami o 7 % až 10 % vyšší.

Nezanedbatelný je samotný rozdíl mezi dodaným teplem od ohřívače a vyzářeným teplem otopným tělesem. Účinnost dosahuje pouze 40 % až 70 %, což je způsobeno, jak již bylo zmíněno v prvním odstavci, ztrátami tepla, hlavně tedy v ohřívači, ve vyrovnávací nádobce a v tělese průtokoměru. Ostatní části systému, jako hadice a čerpadlo, jsou vyrobeny z plastové hmoty. Plasty a guma mají většinou nízký součinitel prostupu tepla, proto předpokládám, že tudy se ztrácí pouze malá, zanedbatelná část tepelné energie.

# Závěr

Cílem této diplomové práce bylo analyzovat, jak se mění vlastnosti vody jako otopného média při různých provozních stavech a jak tyto změny kompenzovat, a na základě této analýzy navrhnout demonstrační kalorimetrický měřicí systém řízený procesorem. Dále bylo cílem tento kalorimetrický systém realizovat, navrhnout a vyrobit k němu kompletní model otopné soustavy a provést na něm ověřovací měření funkčnosti celého komplexu s vyhodnocením dosažených výsledků.

Nejdříve jsem se zaměřil na vlastnosti vody jako takové, na změny jejich vlastností za různých podmínek, na způsoby, jak tyto změny definovat a na analýzu, jak podstatný mají tyto změny vliv na kalorimetrické měření. Zjistil jsem, že hlavní a největší vliv na vlastnosti vody má její teplota, neboť s teplotou se výrazně mění její hustota a měrná tepelná kapacita, což jsou důležité veličiny pro měření tepelné energie ve vodě obsažené.

Dále jsem provedl průzkum možností měření teploty a průtoku, což jsou hlavní veličiny, ze kterých se kalorimetrické měření provádí. Sestavil jsem přehled základních způsobů, jak měřit teplotu a průtok, a vybral ty nejvhodnější pro moji aplikaci. Konkrétně se jednalo o ultrazvukový nebo indukční průtokoměr, protože oba typy jsou velice přesné a vynikají dlouhou životností díky absenci jakýchkoli pohyblivých dílů, a platinové teploměry, které jsou rovněž velmi přesné a časově stabilní.

Následně jsem na základě zjištěných vlastností a parametrů vody navrhl kalorimetrický měřicí systém řízený procesorem. K tomuto systému jsem navrhl elektroniku i desku plošných spojů a následně kalorimetr vyrobil. Jako procesor jsem vybral mikropočítač ATMEL ATMEGA 328P, který je součástí vývojové desky Arduino. Platformu Arduino jsem si vybral hlavně z důvodu snadného připojení periférií pro komunikaci s okolím a také proto, že nativně podporuje komunikaci s počítačem po sériové lince, což nezanedbatelně ulehčuje nahrávání zdrojového kódu a jeho odladování. Průtokoměr jsem zvolil ultrazvukový, s výstupem typu otevřený kolektor, který dokáže procesor snadno zpracovat, jako teplotní čidla jsem pak zvolil platinové teploměry typu Pt1000, protože jsou velmi přesné a vzhledem k vysoké základní hodnotě odporu se u nich dá zanedbat odpor přírodních vodičů, takže je stačí připojit k procesoru dvousvorkově.

Poslední a nejkomplikovanější část byla návrh, výroba a ověřovací měření kompletního modelu otopné soustavy. Tu jsem sestavil z vlastnoručně vyrobeného ohřívače, který se skládá z hliníkového kvádrů s otvory pro proudění vody a s topnými rezistory na povrchu, z cirkulačního čerpadla na 12 V, z modelu otopného tělesa tvořeného plechovým chladičem s ventilátorem a z vyrovnávací nádobky, sloužící převážně pro odvzdušnění.

Ověřovací měření potom ukázalo, že výsledek výpočtu korigovaného tepelného toku, který se počítá z hodnot korigovaných na skutečnou teplotu kapaliny, a výpočtu standardního tepelného toku, který se počítá ze standardních hodnot, se značně liší, a to až o 10 %. Z pohledu spotřebitele, který za naučovaný odběr tepla platí, je použití kalorimetru bez korekcí nevýhodné, protože zaplatí za větší než skutečně odebrané teplo. Jediná situace, kdy je možné takový kalorimetr použít, je v případě aplikace jako poměrové měřidlo. Když je takovýchto kalorimetrů více, tak měří každý s přibližně stejnou chybou, jejich údaje se pak ve finálním vyúčtování neuvažují jako absolutní hodnoty o odebraném teple, ale pouze jako dílky. Tyto dílky pak určují poměry, v jakých pak

odběratelé za teplo zaplatí, protože celkovou sumu neurčuje součet naměřených hodnot všech kalorimetrů, ale cena za energii, kterou odebral zdroj tepla, což bývá zpravidla elektřina nebo plyn.

# Zdroje

- [1] HAASZ, V. — SEDLÁČEK, M: Elektrická měření – Přístroje a metody. ČVUT Praha 1998. ISBN 80-01-02731-7
- [2] LandisGyr.cz: Ultrazvukový průtokoměr ULTRAHEAT Flow 2WR7 [online] [Cit. 1.10.2018] Dostupné z: [https://www.landisgyr.cz/webfoo/wp-content/uploads/2012/09/Katalogblatt\\_UH505-116d.pdf](https://www.landisgyr.cz/webfoo/wp-content/uploads/2012/09/Katalogblatt_UH505-116d.pdf)
- [3] Microchip Technology: ATmega328P datasheet. [online] [Cit. 3.5.2016] Dostupné z: [http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P\\_Datasheet.pdf](http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P_Datasheet.pdf)
- [4] MIKULČÁK J. a kol.: .Matematické, fyzikální a chemické tabulky. 3.vyd. Prometheus 1988. ISBN 80-85849-84-4
- [5] PROJEKT BONORUM: Měření průtoku ultrazvukovým průtokoměrem. [online] [Cit. 3.5.2017] Dostupné z: <http://projekt.bonorum.cz/sluzby/mereni-prutoku-ultrazvukovym-prutokomerem/>
- [6] PVK: Aktuální kvalita vody. [online] [Cit. 3.5.2017] Dostupné z: <http://www.pvk.cz/vse-o-vode/pitna-voda/-kvalita-vody/aktualni-kvalita-vody/>
- [7] MĚDĚNÉ ROZVODY: Tepelná roztažnost. [online] [Cit. 3.5.2017] Dostupné z: <http://medenerozvody.cz/tepelna-roztaznost>
- [8] THE ENGINEERING TOOLBOX: Water – Thermodynamic properties. [online] [Cit. 3.5.2017] Dostupné z: [http://www.engineeringtoolbox.com/water-thermal-properties-d\\_162.html](http://www.engineeringtoolbox.com/water-thermal-properties-d_162.html)
- [9] PHYSICS STACK EXCHANGE: Does specific heat change with pressure? [online] [Cit. 3.5.2017] Dostupné z: <https://physics.stackexchange.com/questions/100044/does-specific-heat-change-with-pressure-if-so-why>
- [10] TZBINFO: Teplota a její měření. [online] [Cit. 3.5.2017] Dostupné z: <http://vytapeni.tzb-info.cz/mereni-a-regulace/3115-teplota-a-jeji-mereni>
- [11] Elektrorevue.cz: Měření průtoku tekutin - principy průtokoměrů. [online] [Cit. 3.5.2017] Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01049/index.html>
- [12] ELIS PLZEŇ a.s.: Ultrazvukové průtokoměry kapalin. [online] [Cit. 3.5.2017] Dostupné z: <http://www.elis.cz/cs/produkty/ultrazvukove-prutokomery-kapalin.html>
- [13] ELEKTROREVUE: Měření průtoku tekutin – principy průtokoměrů. [online] [Cit. 3.5.2017] Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01049/index.html>
- [14] LINEAR TECHNOLOGY: LT6220/LT6221/LT6222 Datasheet. [online] [Cit. 3.1.2018] Dostupné z: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/622012fc.pdf>
- [15] Specification of Pt Thermal Sensor, Datasheet. [online] [Cit. 1.10.2017] Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.530-110.1.pdf>
- [16] TEXAS Instruments: LT1009 2.5-V Integrated Reference Circuit. [online] [Cit. 1.10.2018] Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lt1009.pdf>
- [17] JSComputers.cz: Technický popis radiátoru Alphacool NexXoS Xtreme I. [online] [Cit. 1.10.2018] Dostupné z: [http://www.jscomputers.cz/produkt/Alphacool\\_NexXoS\\_Xtreme\\_I\\_rev2.html?arg1=001053001003](http://www.jscomputers.cz/produkt/Alphacool_NexXoS_Xtreme_I_rev2.html?arg1=001053001003)
- [18] homeSOLAR: popis čerpadla-LP25-bezkartáčové. [online] [Cit. 1.10.2018] Dostupné z: <http://eshop.homesolar.cz/9/566/cerpadlo-lp25-bezkartacove.html>

- [19] vitecpower.com: VMA Vitec DC DC Converter. [online] [Cit. 1.10.2018] Dostupné z:  
[http://www.vitecpower.com/wp-content/uploads/2011/10/VMA\\_Vitec\\_dc\\_conversion\\_dc-dc\\_converter.pdf](http://www.vitecpower.com/wp-content/uploads/2011/10/VMA_Vitec_dc_conversion_dc-dc_converter.pdf)
- [20] STMicroelectronics: Precision micropower shunt voltage. [online] [Cit. 1.10.2018] Dostupné z:  
<http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/f3/bc/c2/cc/f2/dd/48/2b/DM00028684.pdf/files/DM00028684.pdf/jcr:content/translations/en.DM00028684.pdf>
- [21] GME.cz: Drátový rezistor RD 4R7 25W 5%. [online] [Cit. 1.10.2018] Dostupné z:  
<https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.114-314.1.pdf>
- [22] Mathias Wilhelm's pages on Arduino: Arduino Dashboard 2.0. [online] [Cit. 1.10.2018] Dostupné z:  
<http://www.mathias-wilhelm.de/arduino/projects/arduino-dashboard/>



## Zdroje obrázků

- Obr. 1: [https://www.engineeringtoolbox.com/docs/documents/309/water-density-temperature-pressure\\_2.png](https://www.engineeringtoolbox.com/docs/documents/309/water-density-temperature-pressure_2.png) [cit. 2017-05-06]
- Obr. 2: vlastní, graf
- Obr. 3: vlastní, graf
- Obr. 4: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01049/image019.jpg> [cit. 2017-05-06]
- Obr. 5: [https://automatizace.hw.cz/files/images/image/smallindukcni\\_prutokomery1.png](https://automatizace.hw.cz/files/images/image/smallindukcni_prutokomery1.png) [cit. 2016-05-06]
- Obr. 6: <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F4/F4k45-o481.gif> [cit. 2017-05-06]
- Obr. 7: <https://static.webshopapp.com/shops/097528/files/068112736/image.jpg> [cit. 2017-05-06]
- Obr. 8: <https://cdn.svetsoucastek.cz/images/0/4c6c79f7f2320262/2/termistor-ntc-epcos-b57164k0102k.JPG> [cit. 2017-05-06]
- Obr. 9: vlastní
- Obr. 10: [https://cdn-reichelt.de/bilder/web/xxl\\_ws/A300/ARDUINO\\_UNO\\_DIP\\_01.png](https://cdn-reichelt.de/bilder/web/xxl_ws/A300/ARDUINO_UNO_DIP_01.png) [cit. 2018-05-06]
- Obr. 11: <http://www.pokorny-vodomery.cz/static/gallery/produkty/ultrazvukovy-prutokomer-2wr7-se-zavitovym-pripojenim-27/main-ultrazvukovy-prutokomer-se-zavitovym-pripojenim.jpg> [cit. 2018-05-07]
- Obr. 12: vlastní
- Obr. 13: [https://automatizace.hw.cz/files/story\\_automat/10535/aktivni\\_mustek.gif](https://automatizace.hw.cz/files/story_automat/10535/aktivni_mustek.gif) [cit. 2018-05-07]
- Obr. 14: [https://eluc.kr-olomoucky.cz/uploads/images/21210/content\\_iScAAAAASUV.png](https://eluc.kr-olomoucky.cz/uploads/images/21210/content_iScAAAAASUV.png) [cit. 2018-05-07]
- Obr. 15: vlastní, vytvořeno v prostředí Altium Designer
- Obr. 16: vlastní, vytvořeno v prostředí Altium Designer
- Obr. 17: vlastní, fotografie
- Obr. 18: vlastní
- Obr. 19: vlastní
- Obr. 20: <http://eshop.homesolar.cz/upload/foto/cerpadlo-lp25-bezkartacove-3203-2.jpg> [cit. 2018-04-06]
- Obr. 21: <http://eshop.homesolar.cz/upload/foto/lp25-3208-2.jpg> [cit. 2018-04-06]
- Obr. 22: [http://www.jscomputers.cz/files/artefacts/41834/147\\_0.jpg](http://www.jscomputers.cz/files/artefacts/41834/147_0.jpg) [cit. 2018-04-06]
- Obr. 23: vlastní, snímek obrazovky
- Obr. 24: vlastní, fotografie
- Obr. 25: vlastní, oscilogram
- Obr. 26: vlastní, snímek obrazovky
- Obr. 27: vlastní, graf
- Obr. 28: vlastní, graf

Obr. 29: vlastní, graf  
Obr. 30: vlastní, graf  
Obr. 31: vlastní, graf  
Obr. 32: vlastní, graf  
Obr. 33: vlastní, graf  
Obr. 34: vlastní, graf  
Obr. 35: vlastní, graf  
Obr. 36: vlastní, graf  
Obr. 37: vlastní, graf  
Obr. 38: vlastní, graf  
Obr. 39: vlastní, graf

## Struktura přiloženého CD

Diplomová práce		Diplomová práce ve formátu pdf
Zdrojový kód		Zdrojový kód projektu kalorimetru
Naměřená data		MS Excel s naměřenými průběhy
Datasheety	AtMEGA 328P	Datasheet procesoru
	LT6221	Datasheet operačního zesilovače
	LT1009	Datasheet napěťové reference
	Landis Gyr 2WR7	Datasheet průtokoměru
	LM4041	Datasheet napěťové reference
	Dashboard	Program pro zobrazení dat ze sériové linky
	PT1000	Datasheet teplotních čidel

## Přílohy

Příloha 2 Naměřené hodnoty průběhu 24 l/h, teplotní cyklus 30-50-30 °C .....	67
Příloha 3 Naměřené hodnoty průběhu 84 l/h, teplotní cyklus 30-50-30 °C .....	68
Příloha 4 Naměřené hodnoty průběhu 123 l/h, teplotní cyklus 30-50-30 °C.....	69
Příloha 5 Naměřené hodnoty průběhu 144 l/h, teplotní cyklus 30-50-30 °C.....	70
Příloha 6 Naměřené hodnoty průběhu 174 l/h, teplotní cyklus 30-50-30 °C.....	71
Příloha 7 Naměřené hodnoty průběhu 24 l/h, teplotní cyklus 30-70-30 °C .....	72

**Příloha 2 Naměřené hodnoty průběhu 24 l/h, teplotní cyklus 30-50-30 °C**

t (min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T1 - T2 (°C)	Q (Wh)	Q' (Wh)	Qo (Wh)
0,3	31,8	28,9	2,9	0	0	1,35
1,5	33	29,4	3,6	1,05	1,18	7,56
2,0	33,98	29,85	4,13	1,69	1,95	10,08
3,1	36,66	31,23	5,43	3,2	3,67	15,62
3,9	38,43	32,4	6,03	4,2	4,86	19,66
5,1	40,93	34	6,93	6,2	7,12	25,53
6,1	42,57	35,56	7,01	7,96	9,1	30,56
7,2	44,76	37,62	7,14	10,17	11,62	36,27
8,2	46	39	7	11,77	13,44	41,14
9,4	47,7	40,3	7,4	14,62	16,66	47,51
10,4	49,04	41,1	7,94	16,17	18,43	52,21
11,6	50,5	41,9	8,6	19,6	22,3	58,6
11,7	50,6	42	8,6	19,6	22,31	58,75
12,1	50,5	42,24	8,26	20,44	23,3	58,75
13,1	49,5	42,4	7,1	22,02	25,12	58,75
15,8	44,5	40,4	4,1	25,8	29,5	58,75
17,1	42	38,4	3,6	27,34	31,15	58,75
20,0	37,15	34,18	2,97	30,05	34,3	58,75
20,7	35,9	32,7	3,2	30,55	34,85	58,75
22,5	33,97	30,75	3,22	32,35	36,95	58,75
23,8	32,8	29,4	3,4	33,4	38,2	58,75
25,7	31	27,65	3,35	35,05	40,1	58,75
25,9	31	27,7	3,3	35,38	40,45	58,75

Příloha 3 Naměřené hodnoty průběhu 84 l/h, teplotní cyklus 30-50-30 °C

t (min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T1 - T2 (°C)	Q (Wh)	Q' (Wh)	Qo (Wh)
0,3	30,2	29,9	0,3	0,02	0,03	1,35
0,9	31,5	30,1	1,4	0,63	0,9	4,7
1,8	32,6	31,9	0,7	2,6	3,1	8,9
2,7	36,1	34,8	1,3	4,1	4,8	13,4
3,4	38	37,1	0,9	5,4	6,3	17,3
4,6	40,4	39,1	1,3	7,4	8,6	23,4
5,7	42,7	41,1	1,6	9,3	10,6	28,7
7,1	45,2	43,2	2	12,8	14,6	35,9
8,6	47,3	45,5	1,8	16,5	18,9	43,2
9,5	48,8	47,2	1,6	18,9	21,7	47,8
10,8	50,4	48,6	1,8	22,1	25	54,4
10,9	50,6	48,6	2	22,2	25,2	55
12,1	49,3	47,9	1,4	23,8	27,2	55
14,0	45,4	44	1,4	28,4	32,3	55
15,7	42,6	42	0,6	30,4	34,6	55
17,3	40,3	39,3	1	32,5	36,8	55
18,5	38,6	38	0,6	33,9	38,4	55
19,3	37,9	37,2	0,7	34,3	38,8	55
22,2	34,9	34,7	0,2	35,68	40,3	55
23,2	34	33,5	0,5	36	40,6	55
26,7	31,3	31	0,3	37,7	42,7	55

Příloha 4 Naměřené hodnoty průběhu 123 l/h, teplotní cyklus 30-50-30 °C

t (min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T2 - T1 (°C)	Q (Wh)	Q' (Wh)	Qo (Wh)
0,3	30,25	29,91	0,34	0,03	0,05	1,23
0,6	30,24	29,83	0,41	0,06	0,18	2,76
1,0	30,9	29,94	0,96	0,35	0,7	4,44
1,2	31,32	29,97	1,35	0,7	1,15	5,36
1,6	32,13	30,65	1,48	1,83	2,35	7,34
2,0	33,06	32,06	1	2,65	3,3	9,33
2,9	34,3	33,6	0,7	3,73	4,46	13,15
3,2	34,8	33,8	1	4,15	4,88	14,68
4,0	36	35,3	0,7	4,88	5,79	18,34
5,7	37,94	37,2	0,74	6,64	7,76	26,13
6,9	39,06	38,22	0,84	8,42	9,8	31,8
8,0	40,1	39,2	0,9	9,37	10,83	36,52
11,5	42,5	41,06	1,44	14,75	16,76	53,56
12,1	43	41,7	1,3	15,5	17,87	56,92
13,9	43,9	42,7	1,2	18,33	21,15	65,82
14,0	43,9	42,8	1,1	18,44	21,25	65,99
15,7	41	40,02	0,98	20	22,85	65,99
16,9	37,7	36,7	1	21,8	25,04	65,99
20,2	33,24	32,34	0,9	26,01	29,62	65,99
21,4	31,2	30,6	0,6	26,5	30,3	65,99
22,5	30,03	29,4	0,63	26,7	30,7	65,99

Příloha 5 Naměřené hodnoty průběhu 144 l/h, teplotní cyklus 30-50-30 °C

t (min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T1 - T2 (°C)	Q (Wh)	Q' (Wh)	Qo (Wh)
0,3	29,6	29	0,6	0,04	0,04	1,35
0,7	30,3	29,4	0,9	0,86	0,98	3,7
1,5	31,8	30,4	1,4	3,38	4,1	7,4
2,0	33,2	32,4	0,8	5,1	6,1	9,9
3,4	36	35,3	0,7	7,4	8,6	17,3
4,8	38,2	37,3	0,9	10,6	12,3	24,4
6,7	40,5	39,2	1,3	14,6	16,8	33,6
8,2	42,3	41,7	0,6	17	19,4	41,5
9,4	43,1	42,6	0,5	18	20,5	47,4
11,7	44,2	43,4	0,8	25,5	28,7	58,8
13,2	45,3	44,6	0,7	27,8	31,3	66,6
14,4	45,4	44,6	0,8	28,5	32,3	72,5
15,5	46	44,7	1,3	32,1	37,6	78,2
16,7	46,1	44,8	1,3	35,7	42,3	83,9
18,0	46,2	44,8	1,4	36	42,6	84
19,3	40,3	39,8	0,5	40,3	47,9	84
21,2	36,5	35,9	0,6	42,9	50,8	84
23,1	33,6	33,3	0,3	45,5	53,9	84
24,4	31,9	31,6	0,3	46,8	55,5	84
25,8	30,6	30,2	0,4	49,2	58	84

Příloha 6 Naměřené hodnoty průběhu 174 l/h, teplotní cyklus 30-50-30 °C

t (min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T1 - T2 (°C)	Q (Wh)	Q' (Wh)	Q <sub>o</sub> (Wh)
0,3	29,9	28,5	1,4	0,49	0,53	1,52
1,0	31,2	30,1	1,1	3,77	4,39	5,22
2,0	33,7	33	0,7	6,6	7,7	10,3
3,0	35,5	34,6	0,9	8,7	10,1	15
4,3	37,6	37	0,6	11,54	13,23	21,8
5,6	39,3	38,9	0,4	12,5	14,5	28,1
6,8	41	40,7	0,3	14,7	17,1	36,1
8,1	41,9	41,4	0,5	15,9	18,3	39,8
9,2	42,7	42	0,7	16,3	20	46,2
10,2	43,5	43,1	0,4	18,7	21,8	51,4
11,9	44,3	44	0,3	22,3	25,2	60,6
13,2	44,9	44,2	0,7	24,9	28	66,7
14,3	44,8	44,1	0,7	26,6	30,1	67,5
15,5	40,6	40,2	0,4	28,6	32,4	67,5
16,5	38,1	37,6	0,5	29,9	33,9	67,5
17,4	36,7	36,1	0,6	31,4	35,9	67,5
18,8	34,4	33,7	0,7	33,9	38,8	67,5
19,7	32,9	32,4	0,5	36,4	41,3	67,5
21,5	31,2	30,4	0,8	38,4	44	67,5
22,8	30,2	29,6	0,6	40,8	47,4	67,5

Příloha 7 Naměřené hodnoty průběhu 24 l/h, teplotní cyklus 30-70-30 °C

t (min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T1 - T2 (°C)	Q (Wh)	Q' (Wh)	Qo (Wh)
0,2	23,2	22,6	0,6	0	0	1
0,9	31,1	29,8	1,3	0,27	0,37	4,8
1,7	32,5	30	2,5	0,7	0,9	8,6
2,9	35,3	32,7	2,6	2	2,4	14,7
4,4	38,9	35,8	3,1	3,47	4,1	22,8
5,1	40,3	37,3	3	4,36	5,1	26
6,3	42,2	38,9	3,3	5,8	6,7	32,4
7,0	43,8	40,1	3,7	6,66	7,7	36,3
9,5	47,4	43,1	4,3	11,1	12,6	48,8
11,4	49,7	46	3,7	14,1	16,1	58,4
12,6	51,5	46,8	4,7	16,2	18,5	64,9
13,6	52,4	47,7	4,7	17,6	20,2	70
16,0	56,4	52,3	4,1	21,1	24,4	82,3
17,3	59,3	54,4	4,9	22,1	25,6	88,8
18,5	61,8	57,1	4,7	23,3	27	94,8
20,2	65,3	59,8	5,5	26,3	30,6	103,9
22,6	69,6	64,8	4,8	31,4	36,4	116,2
22,9	70,2	65	5,2	32,1	37,3	117,5
23,0	70,1	65,1	5	32,2	37,5	117,7
23,6	70,9	65,2	5,7	33,1	38,4	117,7
24,2	69,2	62,3	6,9	34,5	40,2	117,7
24,9	67,1	59,3	7,8	36,3	42,3	117,7
25,4	64	57	7	38,6	44,9	117,7
27,0	59,8	51,2	8,6	43,6	50,8	117,7
28,3	55,5	48,6	6,9	47,6	55,6	117,7
30,6	49,6	43,2	6,4	53,6	62,4	117,7
32,5	45,6	40,8	4,8	57,11	66,4	117,7
34,5	42,3	37,8	4,5	61	70,8	117,7
36,0	39,5	36	3,5	63,1	73,2	117,7
38,9	36,2	33,7	2,5	66,3	76,9	117,7
40,8	34,5	32,8	1,7	67,8	78,5	117,7
42,2	32,9	32	0,9	68,4	79,2	117,7
44,1	31,8	30,5	1,3	69	80	117,7
46,1	30,5	29,7	0,8	69,7	80,9	117,7