

**České vysoké učení technické v Praze**

**Fakulta strojní**

Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky

Studijní program: Konstruování podporované počítačem



Akumulace tepelné energie za využití stavových  
změn

Accumulation of Thermal Energy Using State Changes of the  
Accumulation Substance

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vedoucí práce: Ing. Pavel Sláma, Ph.D.

Zpracoval: Tomáš Doležal



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Doležal** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **468803**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky**  
Studijní program: **Strojírenství**  
Studijní obor: **Konstruování podporované počítačem**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Akumulace tepelné energie za využití stavových změn akumulční látky**

Název bakalářské práce anglicky:

**Accumulation of Thermal Energy Using State Changes of the Accumulation Substance**

Pokyny pro vypracování:

- a/ Proveďte stručnou rešerši týkající se latentních akumulátorů tepla s důrazem na typy konstrukcí akumulátorů a materiály látek, používaných pro ukládání tepla.
- b/ Popište motivaci k použití latentních akumulátorů tepla, také v porovnání s akumulací bez fázové změny.
- c/ Vypočítejte sdílené teplo v akumulátoru a navrhnete měřící zařízení pro ověření vypočtených hodnot a navrhnete postup zkoušek pro měření na tomto zařízení.
- d/ Proveďte měření přestupu tepla v různých provozních režimech akumulátoru a porovnejte toto měření s vypočtenými hodnotami.
- e/ V neposlední řadě navrhnete akumulátor o výkonu 100kW a kapacitě 150kWh na úrovni sestavného výkresu, jehož konstrukce a provozní parametry budou respektovat vypočtené a naměřené hodnoty.
- f/ Podrobně popište a diskutujte získané výsledky.

Seznam doporučené literatury:

dle doporučení vedoucího práce

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Pavel Sláma, Ph.D., ústav mechaniky tekutin a termodynamiky FS**

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

Datum zadání bakalářské práce: **29.04.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **30.07.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

Ing. Pavel Sláma, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Michal Schmirler, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta



# Anotační list

*Název práce:* **Akumulace tepelné energie za využití stavových změn**  
*Title:* **Accumulation of Thermal Energy Using State Changes of the Accumulation Substance**

*Autor:* Tomáš Doležal  
*Akademický rok:* 2020/2021  
*Studijní program:* (B2341) Strojírenství  
*Studijní obor:* (3901R051) Konstruování podporované počítačem  
*Ústav:* Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky  
*Druh práce:* Bakalářská práce  
*Vedoucí práce:* Ing. Pavel Sláma. Ph.D.

*Klíčová slova:* *Akumulace tepla, PCM, akumulátor, teplo, fázová přeměna*  
*Keywords:* *Heat accumulation, PCM, heat accumulator, heat, phase change*

*Abstrakt:* *Tato práce se zabývá akumulací tepla za stavové změny látek. Práce uvádí čtyři typy koncepcí latentních akumulátorů. Dále práce zahrnuje návrh měřicího zařízení pro stanovení součinitele přestupu tepla, výrobu tohoto zařízení, a následné měření. Později je v práci toto měření zpracováno a vyhodnoceno. Na základě vypočtených a naměřených dat je v práci navržen latentní akumulátor.*

*Abstract:* *This work deals with heat accumulation during phase change of materials. The work presents four types of concepts of latent accumulators. Furthermore, the work includes the design of a measuring device for determining the heat transfer coefficient, the production of this device, and subsequent measurement. Later in the work this measurement is processed and evaluated. Based on the calculated and measured data, a latent accumulator is designed in this work.*

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího bakalářské práce Ing. Pavla Slámy, Ph.D., s využitím literárních zdrojů uvedených v seznamu použité literatury.

V Praze dne .....

.....

Tomáš Doležal

## **Poděkování**

Rád bych tímto poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Pavlu Slámovi, Ph.D. za rady v problematice tohoto tématu, odborné vedení a čas, který mi věnoval při řešení školních záležitostí. Dále bych rád poděkoval týmu pracujícím na projektu Latentní ukládání tepla ve formě tepla nebo chladu v mezidenním cyklu, TK02030042, a týmu techniků v laboratoři, kteří mi velice pomohli při sestavování měřícího zařízení. Nakonec bych chtěl poděkovat rodině a přátelům za velikou podporu během studia.

# Obsah

---

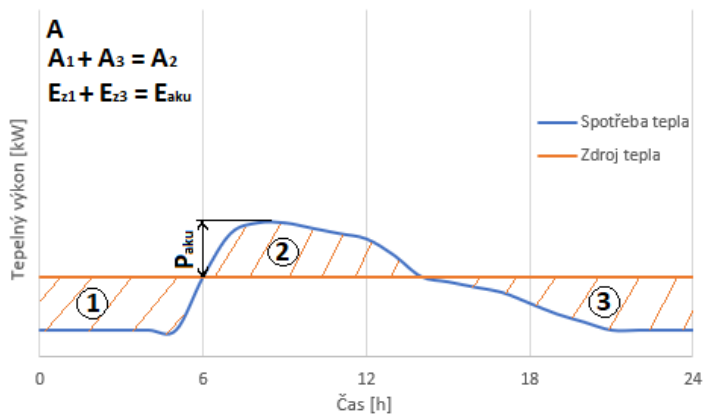
1. Úvod .....	10
2. Akumulace tepla .....	11
2.1. Typová řešení .....	12
2.1.1. Typ A: Akumulátor složený z několika nádrží umístěných v lodním kontejneru (Tvar pouzdra PCM - koule).....	13
2.1.2. Typ B: Akumulátor stacionární (Teplonosná látka prochází několikrát ohýbaným potrubím) .....	14
2.1.3. Typ C: Akumulátor stacionární (Tvar pouzdra PCM - svislé potrubí) .....	15
2.1.4. Typ D: Akumulátor laboratorní (Podélné potrubí) .....	16
3. Druhy médií.....	17
3.1. Teplonosná média .....	17
3.2. Akumulační média .....	17
3.2.1. Organické látky .....	17
3.2.2. Anorganické látky .....	19
3.2.3. Eutektika.....	20
3.3. Galium .....	21
4. Tepelné izolace .....	22
4.1. Minerální izolace .....	22
4.2. Polystyrenové izolace .....	22
4.3. Pěnové sklo.....	23
4.4. Izolace z obnovitelných surovin .....	24
4.5. Izolace PUR, PIR a fenolická pěna.....	24
5. Návrh akumulátoru .....	26



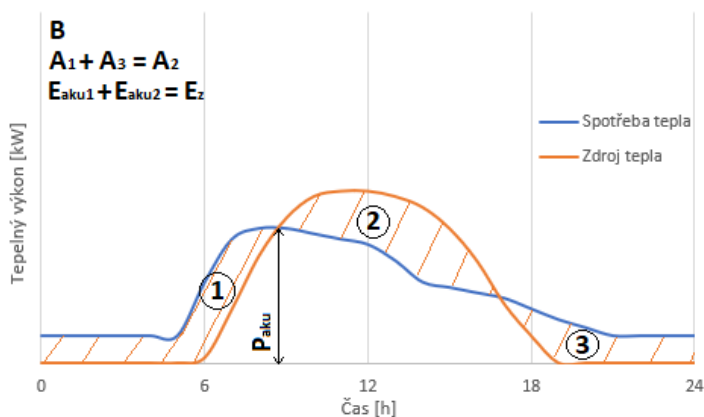
5.1.	Součinitel přestupu tepla .....	26
5.1.1.	Měřicí zařízení .....	27
5.1.2.	Výroba měřicího zařízení.....	28
5.1.3.	Výpočet rychlosti proudu vody z průtoků .....	30
5.1.4.	Součinitel přestupu tepla nucenou konvekcí pro proudění v trubkách.....	33
5.1.5.	Součinitel přestupu tepla přirozenou konvekcí pro svislou stěnu .....	36
5.1.6.	Použitá měřidla a zařízení .....	38
5.1.7.	Postup zkoušek.....	40
5.1.8.	Naměřená data .....	40
5.1.9.	Zpracování získaných dat .....	47
5.1.10.	Nejistoty .....	52
5.2.	Návrh akumulátoru na základě parametrizace akumulčních pouzder podle zadané kapacity .....	55
6.	Vyhodnocení a rekapitulace výsledků .....	59
7.	Závěr .....	61
	Použitá literatura .....	62
	Seznam příloh .....	65

# 1. Úvod

V běžném provozu se setkáváme s nepravidelným odběrem tepla. Je obvyklé, že během léta jsou spotřeby tepla nižší než během zimy, stejně tak spotřeby tepla v noci se často liší od spotřeb tepla ve dne. Tepelné zdroje jsou dimenzovány na maximální spotřeby a v době nižšího odběru dochází k nevyužití této vyrobené tepelné energie. Akumulace tepelné energie v dnešní době značně pomáhá toto nevyužití tepla uskladnit pro pozdější využití. Příklady tohoto pozdějšího využití mohou být vykrytí vyšších spotřeb, než na co byla navržena tepelná jednotka, a tím dodání potřebného tepelného výkonu do tepelného okruhu, nebo zařazení akumulátoru do tepelného okruhu s tím, že naakumulované teplo bude využíváno současně se zdroji tepelné energie, a tím finančně ulehčí situaci právě při výběru takového zdroje. Akumulace tepla také řeší problém tepelných jednotek s nepravidelnou dodávkou tepla, jako např. solární kolektory. Ve dne je možné toto teplo akumulovat, a v noci pokrývat spotřebu z akumulace. Instalaci akumulátoru je možné významně zlepšit provoz tepelných zdrojů z energetického, ekonomického i ekologického hlediska.



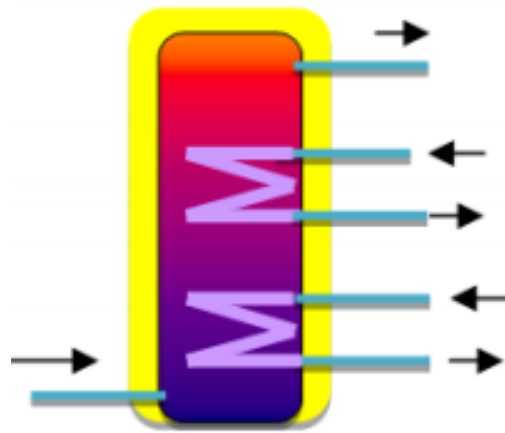
Obr. 1 Vyznačení ploch pro akumulaci tepla v kombinaci se zdrojem tepla s konstatním tepelným výkonem



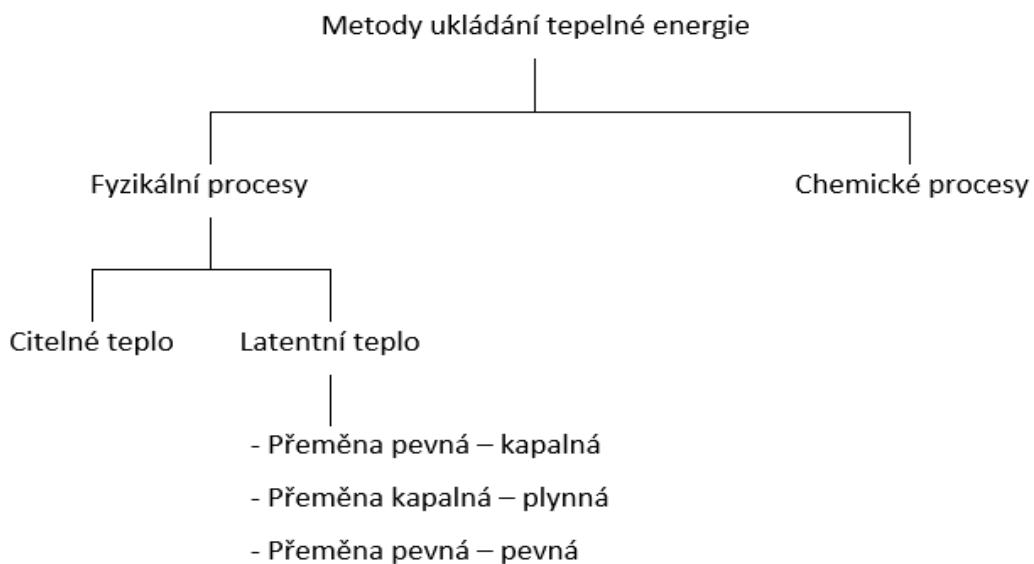
Obr. 2 Vyznačení ploch pro akumulaci tepla v kombinaci se zdrojem tepla s proměnlivým tepelným výkonem

## 2. Akumulace tepla

Princip akumulace je založen na ukládání přebytečné tepelné energie do akumulární látky, kde přenos této energie zprostředkovává látka teplotonosná. Akumulátory lze rozdělit na základě principu akumulace. První typ je akumulátor založený na principu zásobníku vody, který dokáže pojmout množství energie, které je rovno součinu hmotnosti, měrné tepelné kapacity vody akumulární a rozdílu teplotních hladin. Tento typ akumulátoru se také nazývá kalorický. [1]



Obr. 3 Kalorický akumulární zásobník [1]



Obr. 4 Metody možného ukládání tepelné energie [2]

Jiným typem je akumulátor na principu ukládání latentního tepla, jehož nabíjení probíhá přibližně za konstantní teploty a táním akumulární náplně dochází k uložení dodané energie z teplotonosné látky. Množství energie, které je tento typ akumulátoru schopný pojmout, je rovno součtu tepla latentního a citelného

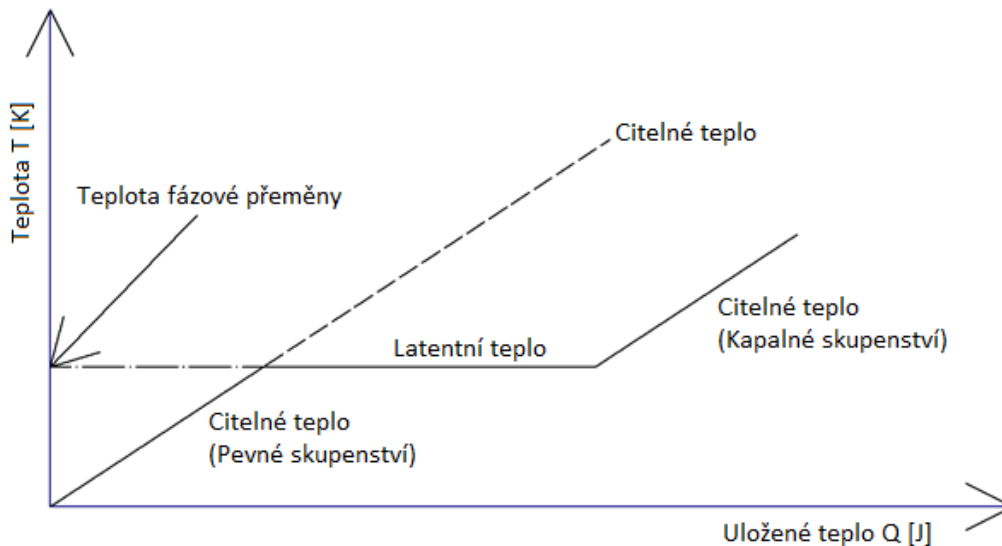
$$Q = Q_{cit_p} + L + Q_{cit_k} \cdot [2] \quad (1)$$

Na obr. 5 lze tento jev pozorovat graficky. Latentní teplo je energie potřebná ke skupenské změně materiálu. Děj probíhá při konstantní teplotě a je roven součinu hmotnosti a měrného skupenského tepla tání

$$L = m \cdot l. [2] \quad (2)$$

U citelného tepla je množství uložené energie dáno součinem tepelné kapacity, a rozdílem teplot akumulací látky při daném ději

$$Q_{cit} = C \cdot \Delta T = m \cdot c \cdot \Delta T. [2] \quad (3)$$



Obr. 5 Graf zobrazující ukládání tepla během latentní přeměny [2]

Pro název této akumulací náplně se používá PCM (z anglického Phase Change Material). Konstrukční řešení latentního akumulátoru lze pojmout dvěma způsoby. Prvním způsobem je uložení PCM materiálu do menších zásobníků, které budou obtékány teplotonosnou látkou. V druhém způsobu jsou v nádrži umístěny trubky, kterými protéká teplotonosná látka a akumulací látka tyto trubky obklopuje. Geometrie nádrže, trubek i zásobníků se může lišit v závislosti na kapacitě, výkonu a jiných vlivech. Hlavní rozdíl mezi kalorickým a latentním akumulátorem je ten, že ve srovnání s vodou vyžaduje PCM o 40% menší objem akumulací nádrže pro stejné množství akumulovaného tepla. [3]

## 2.1. Typová řešení

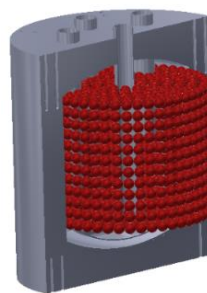
Typ zásobníku může záležet na konkrétním zadání a specifikovaném účelu použití. Od velkého stacionárního zásobníku s ohýbaným potrubím teplotonosné látky uvnitř, až po několik menších zásobníků kaskádově umístěných za sebou v lodním kontejneru pro případný převoz. Zvolená geometrie a materiál zásobníku akumulací látky a nádrže, ve které jsou tyto zásobníky uloženy, má vliv na proudící teplotonosné médium, a tím se ovlivňuje celkový výkon akumulátoru jako takového.

### 2.1.1. Typ A: Akumulátor složený z několika nádrží umístěných v lodním kontejneru (Tvar pouzdra PCM - koule)

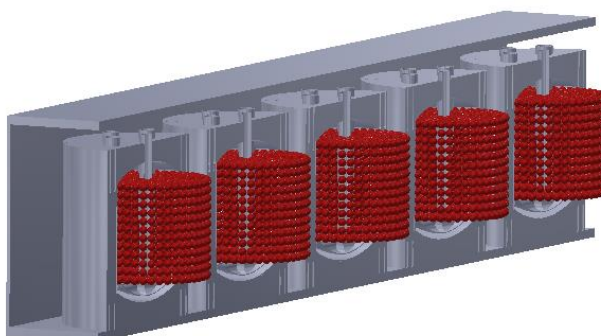
Typ A pracuje se změnou teplotních hladin a každá tato změna probíhá v jednotlivé nádrži. Uvnitř nádrže se nachází velké množství koulí o dvou různých rozměrech, složených z pouzdra a akumulční látky. Prouděním teplotnosné látky kolem těchto koulí dochází k předávání teplotné energie. Typ akumulční látky v každé nádrži se liší v závislosti na dané teplotní hladině.



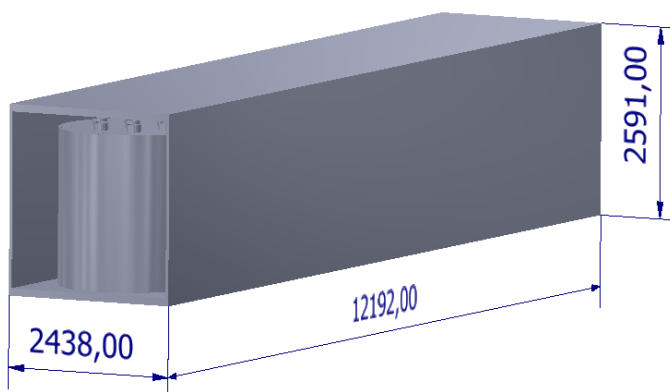
Obr. 6 Akumulační nádrž Typu A



Obr. 7 Řez akumulační nádrží Typu A



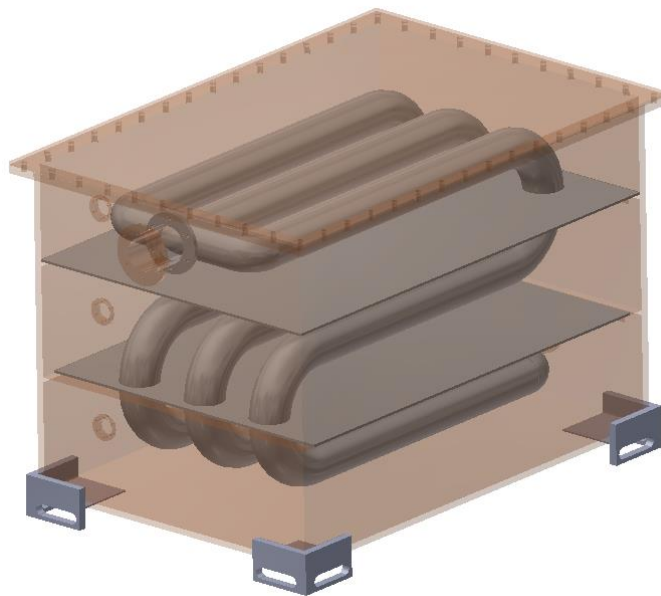
Obr. 8 Akumulační nádrže umístěné v lodním kontejneru (v řezu)



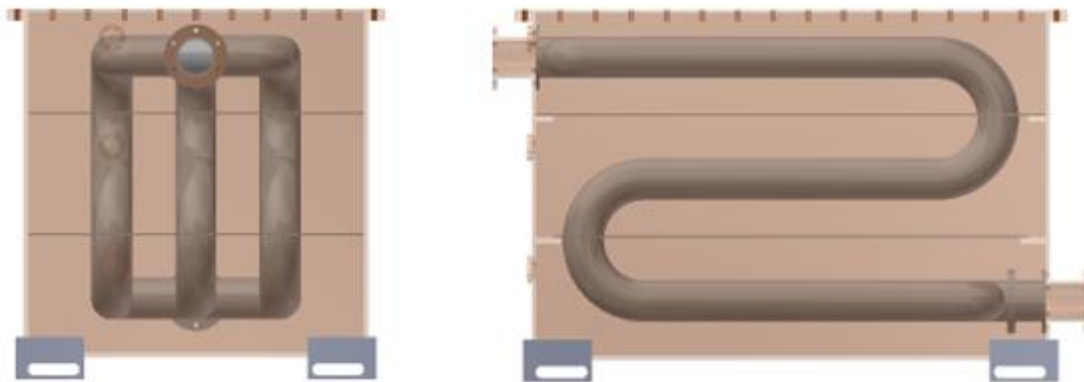
Obr. 9 Rozměry lodního kontejneru [4]

### 2.1.2. Typ B: Akumulátor stacionární (Teplonosná látka prochází několikrát ohýbaným potrubím)

Akumulátor tohoto typu je složen z plastové nádrže, ve které jsou v různých výškách příruby pro nalití akumulčních látek, která je ukotvena na pilířích zasazených v zemi. Uvnitř nádrže se nachází v různých výškových hladinách PCM látky pro akumulaci. Tyto výšky odpovídají teplotním hladinám pro nabíjení. Do duté nádrže se vrchem spustí systém ohýbaného potrubí s deskami pro oddělení PCM látky, který bude ukotvený na víku nádrže. Protékáním teplonosné látky v potrubí se přes jeho stěny přenáší teplo do látek akumulčních a dochází k nabíjení.



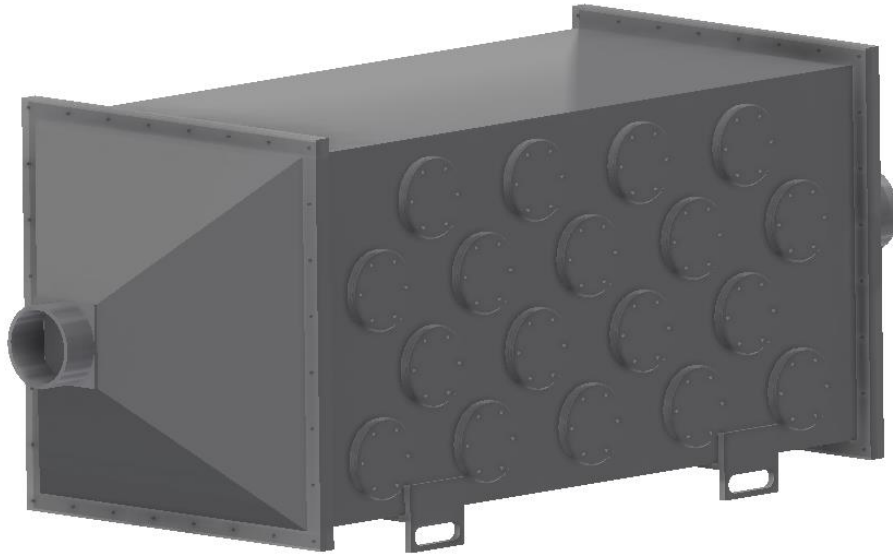
Obr. 10 Izometrický pohled na akumulátor Typu B



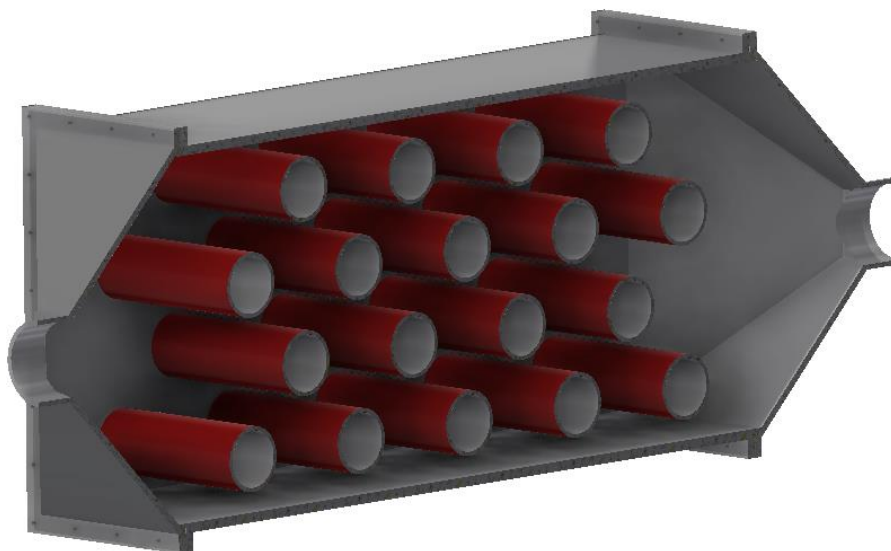
Obr. 11 Čelní a boční pohled na akumulátor Typu B

### 2.1.3. Typ C: Akumulátor stacionární (Tvar pouzdra PCM - svislé potrubí)

Tento typ akumulátoru se skládá z kovové nádrže ve tvaru kvádrů, kde jsou trubky umístěny horizontálně k tekoucímu proudu teplotně nosné látky. Umístění potrubí, obsahující PCM materiál, je v souladu s návrhem potrubí pro výměňkové systémy. Výhodou takového typu akumulátoru je snadná výměna PCM látky v horizontálně umístěném potrubí bez potřeby rozebrání celé nádrže. Nevýhodou je právě tvar nádrže, ve které dochází k nepříznivým hydraulickým jevům.



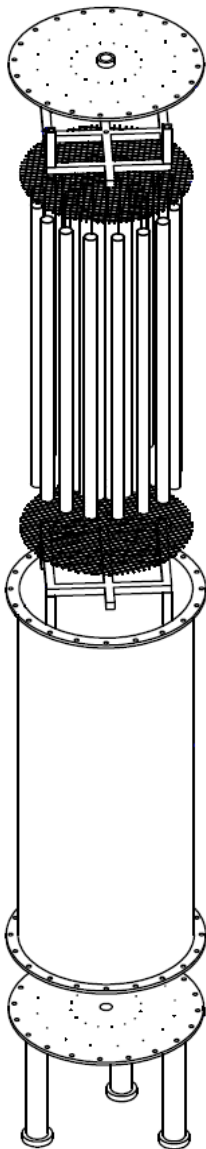
Obr. 12 Pohled na akumulátor Typu C



Obr. 13 Řez akumulátorem Typu C

#### 2.1.4. Typ D: Akumulátor laboratorní (Podélné potrubí)

Akumulátor typu D je reálný prototyp a nachází se v laboratořích fakulty strojní ČVUT a byl sestaven v rámci projektu Latentní ukládání tepla ve formě tepla nebo chladu v mezidenním cyklu, TK02030042. Je složen z kovové nádrže, uvnitř které se nachází soustava podélně postavených nerezových trubek, ve kterých je uložen PCM materiál. Trubky jsou obtékány v meziprostoru vodou. Tento prototyp se stále nachází ve fázi vývoje a je dále zdokonalován.



Obr. 14 Sestava laboratorního akumulátoru



Obr. 15 Skutečný akumulátor postavený v prostorách laboratoře Ústavu mechaniky tekutin a termodynamiky



## 3. Druhy médií

---

V této kapitole se zabýváme hlavně dvěma druhy médií. Jedním je teponosné médium, které zajišťuje přenos tepla v systému. Druhým médiem je médium akumulční, které je schopno tepelnou energii do sebe uložit právě ve fázové přeměně.

### 3.1. Teponosná média

Za teponosnou látku či médium se v běžné praxi považuje voda. Nejčastěji teplotně upravená užitková voda, např. demineralizovaná, a to do teplot až 100 °C v beztlakových systémech. Výhodou tohoto řešení je stejnoměrný, velkoplošný přenos tepla a také možnost centrálního uspořádání zdroje. V tlakových systémech lze k přenosu použít také páru až do cca 200 °C. Dále lze využít pro vyšší teploty organických teponosných médií, která jsou zejména výhodná pro jejich vlastnosti, spočívající v možnosti využití beztlakových systémů. Nejčastěji jsou tato média ropné oleje, které jsou použitelné za teplot 300-350 °C a krom přenosu tepla také mohou zajišťovat promazání mechanických částí systému a poskytují antikorozi ochranu. [5]

### 3.2. Akumulační média

Akumulační látky (PCM) lze v základu rozdělit na 3 kategorie. Organické, anorganické látky a eutektika. Hlavními vlastnostmi takovýchto materiálů by měla být schopnost akumulace velkého množství latentního tepla (tepla přijatého či uvolněného při stavové změně), dobrá tepelná vodivost, odolnost vůči okolním vlivům, měly by vykazovat sourodost tání, chemickou stálost, minimální přechlazení a neměly by být toxické.

#### 3.2.1. Organické látky

Mezi tyto látky se řadí sloučeniny s parafíny a bez parafínů. U těchto materiálů lze pozorovat dlouhou cyklickou stálost a teplotní stabilitu bez fázové separace a u krystalizace s minimálním nebo žádným přechlazením. Teplotně se pohybují od 0 °C do 200 °C. Sloučeniny bez parafínů jsou estery, glykoly, mastné kyseliny a alkoholy. Velmi často disponují schopností akumulovat velké množství latentního tepla, ale mají velmi nízkou tepelnou vodivost, jsou nestálé při vyšších teplotách, hořlavé a toxické. [2]

Tab. 1 Příklady parafinů [2]

Materiál	Teplota tání [°C]	Entalpie tání [kJ/kg]	Tepelná vodivost [W/(m · K)]	Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]
<i>n</i> – Tetradecane $C_{14}H_{30}$	6	230	0,21 (pevná)	760 (kapalná, 20 °C)
<i>n</i> – Eicosane $C_{20}H_{42}$	38	283	-	779 -
Polyethylene $C_nH_{2n+2}$ , kde <i>n</i> až do 100000	110-135	200	-	- 870 - 940 (pevná, 20 °C)

Tab. 2 Příklady mastných kyselin [2]

Materiál	Teplota tání [°C]	Entalpie tání [kJ/kg]	Tepelná vodivost [W/(m · K)]	Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]
Kyselina laurová $CH_3(CH_2)_{10}COOH$	42 - 44	178	0,147 (kapalná, 50 °C)	870 (kapalná, 50 °C) 1007 (pevná, 24 °C)
Kyselina myristová $CH_3(CH_2)_{12}COOH$	58	186, 204	0,17 (pevná)	861 (kapalná, 55 °C) 990 (pevná, 24 °C)
Kyselina palmitová $CH_3(CH_2)_{14}COOH$	61, 64	185, 203	-	850 (kapalná, 65 °C) 989 (pevná, 24 °C)

Tab. 3 Příklady alkoholů [2]

Materiál	Teplota tání [°C]	Entalpie tání [kJ/kg]	Tepelná vodivost [W/(m · K)]	Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]
<i>Xylitol</i> $C_5H_7(OH)_5$	94	263	-	-
				1500 (pevná, 20 °C)
<i>Erythritol</i> $C_4H_6(OH)_4$	120	340	0,326 (pevná, 140 °C)	1300 (kapalná, 140 °C)
			0,733 (pevná, 20 °C)	1480 (pevná, 20 °C)
<i>Galactitol</i> $C_6H_8(OH)_6$	188	351	-	-
				1520 (pevná, 20 °C)

### 3.2.2. Anorganické látky

Nejčastějšími látkami v této kategorii jsou hydráty soli a kovy. Nízká cena hydrátů soli je velmi velkou výhodou využívání této akumulární látky v praxi. Tyto anorganické materiály mají také dobrou schopnost akumulovat velké množství latentního tepla a jejich tepelná vodivost je až vyšší než u látek organických. Nevýhodou hydrátů soli je špatná tepelná stabilita, problémy se stálostí a veliký vliv přechlazení. Změna objemu je u hydrátů soli do 10 %. U kovů může být problém s velikou objemovou hmotností. [2]

Tab. 4 Příklady hydrátů soli [2]

Materiál	Teplota tání [°C]	Entalpie tání [kJ/kg]	Tepelná vodivost [W/(m · K)]	Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]
$CaCl_2 \cdot 6H_2O$	29,30	171,19	0,540 (kapalná, 39 °C)	1562 (kapalná, 32 °C)
			1,088 (pevná, 23 °C)	1710 (pevná, 25 °C)
$Ba(OH)_2 \cdot 8H_2O$	78	265,28	0,653 (kapalná, 86 °C)	1937 (kapalná, 84 °C)
			1,255 (pevná, 23 °C)	2180 (pevná)
$MgCl_2 \cdot 6H_2O$	117	165,169	0,570 (kapalná, 120 °C)	1450 (kapalná, 120 °C)
			0,704 (pevná, 110 °C)	1569 (pevná, 20 °C)

Tab. 5 Příklad y solí [2]

Materiál	Teplota tání [°C]	Entalpie tání [kJ/kg]	Tepelná vodivost [W/(m · K)]	Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]
<i>LiNO<sub>3</sub></i>	254	360	0,58 (kapalná)	1780 (kapalná)
			1,37 (pevná)	2140 (pevná)
<i>NaCl</i>	800	492	-	2160
<i>KF</i>	857	452	-	2370

Tab. 6 Příklad y kovů [2]

Materiál	Teplota tání [°C]	Entalpie tání [kJ/kg]	Tepelná vodivost [W/(m · K)]	Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]
Galium	29,77	80,1	33 - 41	5904
Bi – Cd – In (eutektikum)	61	25	-	-
Bi – Pb – In (eutektikum)	70	29	-	-

### 3.2.3. Eutektika

Eutektikum vzniká směsí dvou látek, kdy při procesu tuhnutí krystalizují souběžně. Eutektika mají výhodu v chemické stabilitě, nevýhodou jsou však korozivní vlastnosti. U eutektik na bázi voda – sůl může být problém v možné separaci při změně fáze. Objemová roztažnost při procesu tání a tuhnutí je kolem 5-10 %. [2]

Tab. 7 Příklady Eutektik voda – sůl [2]

Materiál	Teplota tání [°C]	Entalpie tání [kJ/kg]	Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]
$Al(NO_3)_3(30,5\% \text{ hm.})/H_2O$	-30,6	131	1283 (kapalná)
			1251 (pevná)
$NaCl(22,4\% \text{ hm.})/H_2O$	-21,6	222	1165 (kapalná)
			1108 (pevná)
$KCl(19,5\% \text{ hm.})/H_2O$	-10,7	283	1126 (kapalná)
			1105 (pevná)
$H_2O$	0	333	998 (kapalná, 20 °C)
			917 (pevná, 0 °C)

### 3.3. Galium

Ve své práci uvažuji jako akumulční látku galium. Galium je kov s protonovým číslem 31, který má teplotu tání 29,77 °C a teplotu vypařování 2024 °C. Jeho krystalická mřížka je ortorombická. Objevil ho v roce 1875 francouzský chemik Paul-Émile Lecoq de Boisbaudran. Galium a jeho sloučeniny jsou využívány především v elektronice. [6]

Tab. 8 Vlastnosti galia [6] [7] [8] [9] [10]

Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	5904
Entalpie tání [kJ/kg]	80,1
Entalpie vypařování [kJ/kg]	3984
Měrná tepelná kapacita (pevná, 25 °C) [J/(kg · K)]	373*
Měrná tepelná kapacita (kapalná, 35 °C) [J/(kg · K)]	407*
Koeficient tepelné roztažnosti [K <sup>-1</sup> ] (0-100 °C)	$18,3 \cdot 10^{-6}$
Koeficient tepelné vodivosti [W/(m · K)] (0-100 °C)	33 - 41

\*Hodnoty jsou vypočítány na základě [10]

## 4. Tepelné izolace

---

Důležitým aspektem celé konstrukce akumulární nádrže je zadržet teplo uvnitř tak, aby nedocházelo k přenosu do okolního prostředí. To je zajištěno správně zvolenou kombinací tepelných izolací o různých součinitelích tepelné vodivosti. Tím je zpomalen šíření tepla skrze konstrukci a snižují se tepelné ztráty. Izolací existuje mnoho typů, lišících se materiálem, na základě kterého jsou pak rozděleny do různých kategorií.

### 4.1. Minerální izolace

Minerální izolace je materiál vyrobený z jemných vláken minerálního původu. Rozděluje se na kamennou či skelnou izolaci podle materiálu, ze kterého je vyráběna. Má vynikající tepelněizolační vlastnosti, je hydrofobní, nehořlavá, pohlcuje zvuk a nenapadají ji žádné houby, plísňe či paraziti. [11]

Tab. 9 Příklad minerálních izolací [11]

Typ	Součinitel tepelné vodivosti $\lambda$ [ $W/(m \cdot K)$ ]	Faktor difúzního odporu $\mu$ [-]	Objemová hmotnost $\rho$ [ $kg/m^3$ ]
Kamenná vlna (desky nebo role)	0,035 ÷ 0,045	1 ÷ 2	30 ÷ 100
Skelná vlna (desky nebo role)	0,030 ÷ 0,045	1	15 ÷ 35
Kamenná vlna (rozvlákněná)	0,040 ÷ 0,050	1	30 ÷ 100
Skelná vlna (rozvlákněná)	0,035 ÷ 0,045	1	35

### 4.2. Polystyrenové izolace

Tento druh izolací je charakterizován polymerací styrenu a je následně většinou rozřezán do bloku pro další použití. Má vynikající termoizolační vlastnosti a cenu. Nevýhodou je jeho hořlavost, kvůli které je nezbytné přidání retardérů hoření pro zajištění samovolného uhašení. [12]

Tab. 10 Příklady polystyrenových izolací [12]

Typ	Součinitel tepelné vodivosti $\lambda [W/(m \cdot K)]$	Faktor difúzního odporu $\mu [-]$	Objemová hmotnost $\rho [kg/m^3]$
Expandovaný polystyren (bílý)	0,040	20 ÷ 100	15 ÷ 40
Expandovaný polystyren (grafitový)	0,030 ÷ 0,033	20 ÷ 100	10 ÷ 40
Expandovaný polystyren (rozvolněný)	0,040 ÷ 0,045	2 ÷ 4	27
Expandovaný polystyren vyráběný do forem (perimetr)	0,034	50 ÷ 150	20 ÷ 40
Extrudovaný polystyren (XPS)	0,030 ÷ 0,038	180	30 ÷ 150
Vysokopevnostní polystyren (kompaktní)	0,035 ÷ 0,060	100	100 ÷ 400

### 4.3. Pěnové sklo

Pěnové sklo je vyráběno zpěněním skelné hmoty uhlíkovým prachem, který se za tepla mění na oxid uhličitý. Do finálních rozměrů se zchlazený blok upravuje řezáním či broušením. Výhodou pěnového skla je absolutní difúzní uzavřenost materiálu a relativně vysoká únosnost v tlaku. [13]

Tab. 11 Příklady pěnového skla [13]

Typ	Součinitel tepelné vodivosti $\lambda [W/(m \cdot K)]$	Faktor difúzního odporu $\mu [-]$	Objemová hmotnost $\rho [kg/m^3]$
Bloky z pěnového skla	0,040 ÷ 0,060	materiál zcela parotěsný	120 ÷ 190
Štěrk z pěnového skla	0,075	zrna parotěsná, zásyp jako celek zcela prodyšný	150 ÷ 180

#### 4.4. Izolace z obnovitelných surovin

Izolace z obnovitelných surovin se vyznačují především vysokou akumulací tepla při současném zachování nízkého součinitele prostupu tepla. Výhodou je nízká ekologická stopa. Nevýhodou je vyšší cena. [14]

Tab. 12 Příklady izolací z obnovitelných surovin [14]

Typ	Součinitel tepelné vodivosti $\lambda$ [ $W/(m \cdot K)$ ]	Faktor difúzního odporu $\mu$ [-]	Objemová hmotnost $\rho$ [ $kg/m^3$ ]
Dřevovláknité izolace (desky)	0,039 ÷ 0,045	1 ÷ 2	50
Dřevovláknité izolace (desky)	0,040 ÷ 0,055	5 ÷ 10	250 ÷ 300
Dřevovláknitá foukaná izolace	0,045 ÷ 0,055	1 ÷ 2	30 ÷ 45
Technické konopí	0,045	1 ÷ 2	30 ÷ 100
Celulózná izolace (suchá aplikace)	0,040 ÷ 0,050	1 ÷ 3	30 ÷ 60
Celulózná izolace (mokrý aplikace)	0,045 ÷ 0,055	1 ÷ 3	40 ÷ 50
Ovčí vlna	0,045	1 ÷ 2	13 ÷ 30

#### 4.5. Izolace PUR, PIR a fenolická pěna

Polyuretanová pěna PUR a polyisokianurátová pěna PIR jsou velmi účinné tepelné izolace. Mají velmi jemnou strukturu pórů. Fenolická pěna je vyráběna stříkáním fenolformaldehydových pryskyřic do bloků, které se následně řezou na desky a oboustranně opatřují skelným vláknem či reflexní hliníkovou fólií. Oproti PUR a PIR má lepší termoizolační vlastnosti a reakci na oheň. [15]



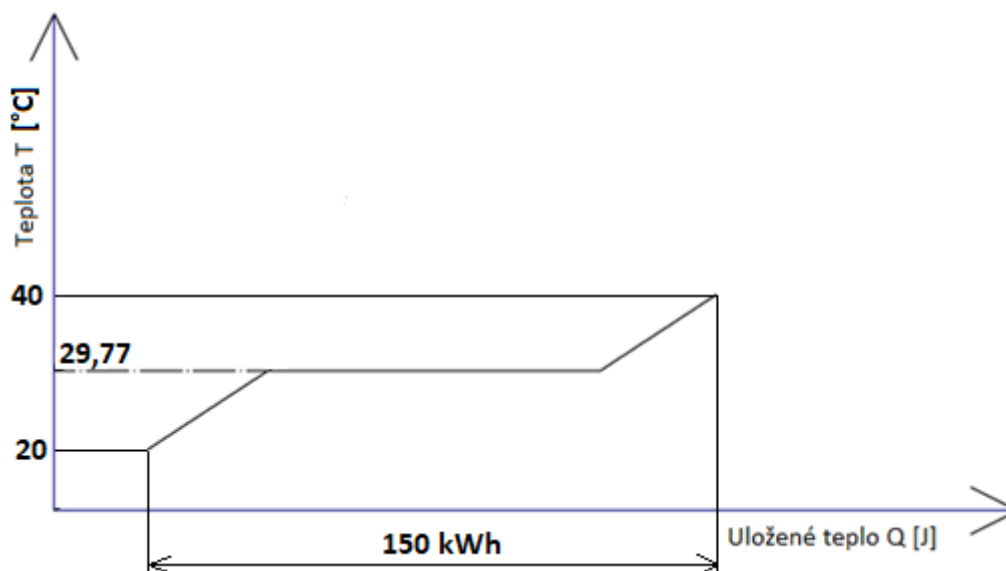
Tab. 13 Příklady PUR, PIR a fenolické pěny [15]

Typ	Součinitel tepelné vodivosti $\lambda$ [ $W/(m \cdot K)$ ]	Faktor difúzního odporu $\mu$ [–]	Objemová hmotnost $\rho$ [ $kg/m^3$ ]
PUR a PIR (desky)	0,022 ÷ 0,075	dle konkrétního složení kompozitu	30 ÷ 100
Fenolická pěna	0,021 ÷ 0,024	35	35
Polyuretanová pěna PUR (stříkaná, litá)	0,033 ÷ 0,045	30 ÷ 100	30 ÷ 100
Polyisokyanurátová pěna PIR (stříkaná, litá)	0,021 ÷ 0,023	35	30 ÷ 100

## 5. Návrh akumulátoru

V této kapitole se budu zabývat výpočty akumulátoru pro koncepční návrh typu D. Důvodem je již reálně sestavený akumulátor v rámci projektu Latentní ukládání tepla ve formě tepla nebo chladu v mezidenním cyklu, TK02030042, na kterém již delší dobu pracuje tým z Ústavu mechaniky tekutin a termomechaniky. Na tomto akumulátoru se poté dají mnou vypočtené výsledky případně ověřit. K dalšímu ověření také bude sloužit mnou navržený přípravek na nepřímé změření součinitele přestupu tepla  $\alpha$  od protékající vody, který se nachází na vnější stěně akumuláčnických trubíc.

Ve svém návrhu akumulátoru uvažuji teplotní hladiny 20 °C na vstupní linii, a požaduji 40 °C na linii výstupní. Fázová přeměna akumuláčnické látky, galia, probíhá při 29,77 °C. Sdílené teplo budu počítat pro režim vybíjení při fázové změně, tedy v ideálním případě bude teplotní spád vody v akumulátoru 20 °C na vstupní linii, a 29,77 °C na linii výstupní.



Obr. 16 Vyznačení teplotních hladin pro mnou navrhovaný akumulátor při zadané kapacitě

Celkové sdílené teplo v akumulátoru pak bude vypočteno na základě získaných dat z měření, a dalších výpočtů provedených v následujících kapitolách. Teoreticky bude spočteno na základě vzorce

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c \cdot (t_{v1} - t_{v2}) = k_v \cdot l \cdot (t_{ok1} - t_{ok2}). \quad (4)$$

### 5.1. Součinitel přestupu tepla

Součinitel přestupu tepla vzniká při konvektivním přenosu tepla, tedy přenosu tepla prouděním. Dochází k tomu tak například při styku kapaliny nebo plynu s pevnou stěnou. Při tom dochází k ochlazování, nebo ohřívání tenké vrstvy při stěně. Konvektivní

přenos tepla se rozlišuje na přirozený (volná konvekce), nebo nucený. Vzniklý rozdíl teplot vrstev pak způsobuje přirozené proudění. Pokud vytvořím proudění látky nuceným oběhem za pomoci čerpadla nebo ventilátoru, jsem takto schopen zvýšit i výměnu tepla, odtud nucená konvekce. Vztah popisující tyto jevy se nazývá Newtonův ochlazovací zákon a je dán rovnicí

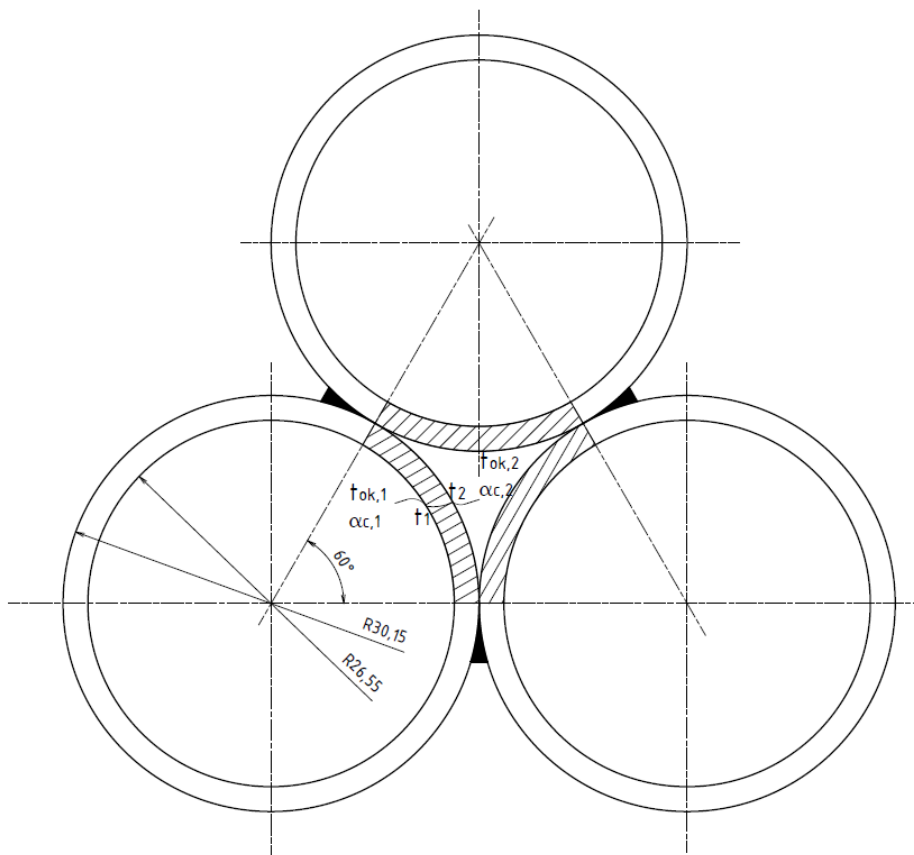
$$\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot \Delta t. [16] [17] [18] [18] \quad (5)$$

### 5.1.1. Měřicí zařízení

Pro měření součinitele přestupu tepla jsem navrhl měřicí zařízení, které je dílčí částí akumulátoru, skládající se ze svařené trojice trubek. Měření součinitele přestupu tepla probíhá nepřímo, tzn. musí se vypočítat z jiných naměřených veličin. Měřicí zařízení se skládá ze dvou okruhů, kde jedním okruhem probíhá ohřátá voda za „konstantní“ teploty skrze trojici potrubí. Druhý okruh je tvořen malým prostorem mezi potrubím, kterým protéká voda studená, kde vstup je napojen na vodovodní řád, a výstup pryč do kanálu. Měření teplot probíhá na obou okruzích, kde na teplém okruhu slouží ke kontrole dodržení teploty, tedy že na vstupu i výstupu je stejná hodnota, a na studeném okruhu mi rozdíl teplot na vstupu a výstupu udává celkový předaný výkon, který mi dále slouží k výpočtům. Na základě předpokladu rovnosti tepelných toků jsem pak schopný vypočítat součinitel přestupu tepla  $\alpha_2$  uvnitř trojúhelníkového prostoru.



Obr. 17 Izometrický pohled na měřicí zařízení v programu Autodesk Inventor



Obr. 18 Vyznačení ploch pro přestup tepla, naznačení přestupu tepla a geometrie trubek

### 5.1.2. Výroba měřícího zařízení

Při výrobě jsem použil tři trubky z nerezové oceli 1.403 podélně svařované hladké. Ty byly svařeny dle výkresu EXP-ALFA-005. Rozměry jedné trubky jsou průměr  $D = 60,3 \text{ mm}$ , tloušťka stěny je  $s = 2 \text{ mm}$  a délka  $l = 700 \text{ mm}$ . Na zakončení trubek byly přivařeny zátky s hrdlem pro pozdější připojení rozvodu vody. Hrdla měly vyřezán trubkový závit G3/8.



Obr. 19 Svazek svařených trubek



Obr. 20 Čelní pohled na svazek

Pro rozvod vody do trubek jsem použil měděné potrubí, kolena a T-kusy od firmy Viega. Tyto kusy se napevno spájeli dohromady cínem.



Obr. 21 Pohled na měděné rozvody



Obr. 22 Spájené rozvody

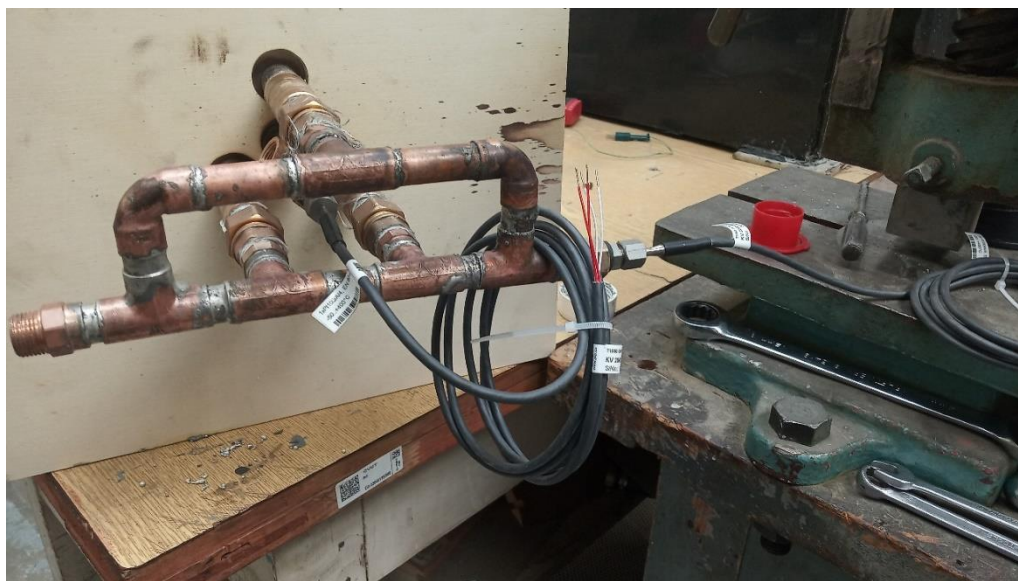
Pro osazení teploměru jsem použil šroubení s kleštinou pro snímače bez ochranné armatury, která má uvnitř kuželku. Po vsazení teploměru do díry a dotažením matice se kuželka zdeformuje a ukotví teploměr na místě. Zároveň deformací dojde k utěsnění, aby nedocházelo k nechtěnému úniku vody v okolí teploměru.



Obr. 23 Šroubení pro osazení teploměru



Obr. 24 Šroubení namontované v měděných rozvodech

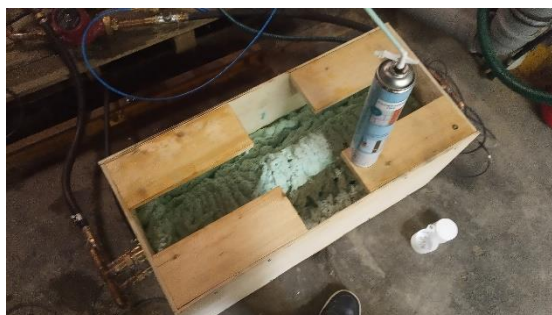


Obr. 25 Umístění teploměru v zařízení

Celé zařízení jsem poté uzavřel do dřevěné krabice, a volné prostory zaplnil polyuretanovou pěnou pro zajištění dostatečné izolace a tím i co nejnižší tepelné ztráty.



Obr. 26 Svazek potrubí nachystán pro zaizolování



Obr. 27 Izolace měřícího zařízení v dřevěné bedně

### 5.1.3. Výpočet rychlosti proudu vody z průtoků

Z protokolů vytvořených v rámci projektu Latentní ukládání tepla ve formě tepla nebo chladu v mezidenním cyklu, TK02030042, jsem si vyžádal technické parametry, naměřené průtoky a teploty na reálném akumulátoru, a týmem mi byly poskytnuty. Díky těmto informacím jsem si spočítal Reynoldsova čísla, a ta použil k výpočtu průtoků vhodných pro geometrii uvnitř měřícího zařízení. Naměřené hodnoty, které pro své výpočty budu používat, jsou uvedeny v Tab. 14. Vybral jsem minimální a maximální průtok, který se v poskytnutém měření nacházel a průtokem středním jsem nazval takový průtok, který v měření odpovídal hodnotě mezi maximálním a minimálním. Teplotou střední nazývám teplotu vypočtenou ze vstupní a výstupní hodnoty uváděné v měření k příslušnému průtoku. Indexy 1, 2, 3 v Tab. 14 znázorňují typy jednotlivých průtoků v pořadí minimální, střední a maximální.

Tab. 14 Naměřené průtoky z protokolu pro projekt TK02030042 [20]

i	Průtok [l/min]	Teplota t [°C]		
		vstup	střední	výstup
1	7,641	25,43	40,11	54,79
2	30,104	25,48	40,22	54,96
3	45,625	25,63	40,28	54,92

Nádrž akumulátoru má průměr 400 mm a akumulační trubky v ní mají průměr 30 mm o délce 800 mm. Akumulačních trubek se v akumulátoru nachází 143. Pro získání Reynoldsova čísla si spočítám rychlost, kterou proud vody skrze akumulátor protéká. Tuto rychlost získám z podílu

$$v_i = \frac{\dot{V}_i}{A_{celková}}, \quad (6)$$

kde  $A_{celková}$  znázorňuje rozdíl mezi plochou nádrže akumulátoru, a plochou trubek v něm. Plocha všech trubek je rovna

$$A_{trubky} = 143 \cdot \pi \cdot r_{trubky}^2 = 143 \cdot \pi \cdot 0,015^2 = 0,1011 \text{ m}^2. \quad (7)$$

Nádrž má plochu rovnu

$$A_{nádrž} = \pi \cdot r_{nádrž}^2 = \pi \cdot 0,2^2 = 0,1257 \text{ m}^2. \quad (8)$$

Odečtením těchto ploch dostanu celkovou plochu, kterou protéká voda skrze akumulátor. Tato plocha je rovna

$$A_{celková} = A_{nádrž} - A_{trubky} = 0,1257 - 0,1011 = 0,0246 \text{ m}^2. \quad (9)$$

Po dosazení minimálního průtoku  $\dot{V}_1$  do vzorce (10) vychází rychlost

$$v_1 = \frac{\dot{V}_1}{A_{celková}} = \frac{7,641 \cdot 10^{-3}}{0,0246} = 0,0052 \text{ m/s}. \quad (10)$$

V Tab. 15 je uveden zbytek vypočtených rychlostí z průtoků.

Tab. 15 Vypočítané rychlosti z průtoků

i	$v$ [m/s]
1	0,0052
2	0,0204
3	0,0309

Reynoldsova kritéria spočítám podle vzorce

$$Re_{i,t} = \frac{2 \cdot v_i \cdot r_{trubky}}{\nu_t}. \quad (11)$$

V Tab. 16 uvádím veličiny charakterizující vlastnosti vody při různých teplotách, které poté použiji k výpočtu Reynoldsových čísel pro rychlosti uvedené v Tab. 15 .

Tab. 16 Vlastnosti vody při dané teplotě [22]

Teplota $t$ [°C]	Kinematická viskozita $\nu$ [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
25	$0,884 \cdot 10^{-6}$
40	$0,658 \cdot 10^{-6}$
55	$0,517 \cdot 10^{-6}$

Dosazením do rovnice (12) vychází Reynoldsovo číslo pro minimální průtok a teplotu 25 °C

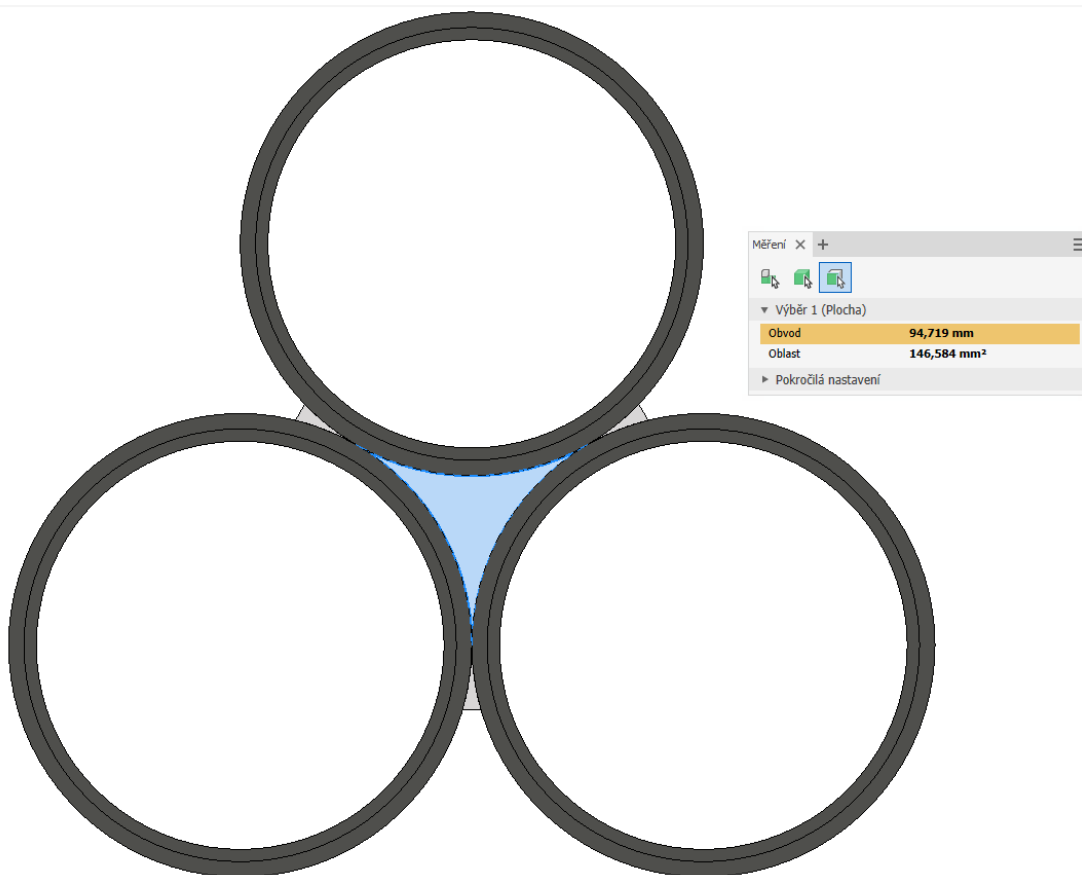
$$Re_{1,25} = \frac{2 \cdot v_1 \cdot r_{trubky}}{\nu_{25}} = \frac{2 \cdot 0,0052 \cdot 0,015}{0,884 \cdot 10^{-6}} = 175,81 \quad (12)$$

Výsledky pro zbylá Reynoldsova kritéria uvádím v Tab. 17.

Tab. 17 Reynoldsova kriteria pro vypočtené rychlosti a dané teploty

i	Re [-]		
	25 °C	40 °C	55 °C
1	175,81	236,19	300,60
2	692,64	930,54	1184,32
3	1049,75	1410,30	1794,93

Pro další postup potřebuji určit hydraulický průměr uvnitř měřícího zařízení. Pro ten potřebuji zjistit plochu obrazce, kterou bude protékat voda, a jeho vnitřní obvod omočený vodou. Tyto údaje lze vidět na Obr. 28.



Obr. 28 Obsah a obvod vnitřního prostoru mezi trubkami

Hydraulický průměr zjistím ze vzorce

$$d_H = \frac{4 \cdot A_{obr}}{O_{obr}} = \frac{4 \cdot 146,584}{94,719} = 6,19 \text{ mm.} \quad (13)$$

Rychlost proudu vody skrze obrazec pro různé teplotní hladiny daného průtoku pak dostanu z následující rovnice, kde

$$v_{imz,t} = \frac{Re_{i,t} \cdot \nu_t}{d_H}. \quad (14)$$



Dosažením do rovnice (15) pak rychlost proudu vody pro danou teplotu vychází jako

$$v_{1mz,25} = \frac{Re_{1,25} \cdot v_{25}}{d_H} = \frac{175,81 \cdot 0,884 \cdot 10^{-6}}{6,19 \cdot 10^{-3}} = 0,0251 \text{ m/s.} \quad (15)$$

V Tab. 18 uvádím výsledky pro zbylé rychlosti proudu.

Tab. 18 Výsledné rychlosti pro vnitřní prostor mezi trubkami

i	$v_{mz} \text{ [m/s]}$		
	25 °C	40 °C	55 °C
1	0,0251	0,0251	0,0251
2	0,0989	0,0989	0,0989
3	0,1499	0,1499	0,1499

U výsledků v Tab. 18 lze pozorovat, že rozdíl teplot nemá prakticky žádný vliv na proudění vody, a tedy můžu uvedené rychlosti považovat za konstantní. Výsledný průtok skrze obrazec se spočítá jako

$$\dot{V}_{imz} = v_{imz} \cdot A_{obr}. \quad (16)$$

Výsledný minimální průtok vnitřním prostorem měřicího zařízení je tedy po dosažení do rovnice (17) roven

$$\dot{V}_{1mz} = v_{1mz} \cdot A_{obr} = 0,0251 \cdot 146,584 \cdot 10^{-6} = 3,680 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}. \quad (17)$$

Výsledné orientační hodnoty průtoků pro měření skrze vnitřní prostor měřicího zařízení uvádím v Tab. 19.

Tab. 19 Výsledné průtoky určené pro měření na měřícím zařízení

i	$\dot{V}_{imz} \text{ [m}^3/\text{s]}$
1	$3,680 \cdot 10^{-6}$
2	$14,499 \cdot 10^{-6}$
3	$21,974 \cdot 10^{-6}$

#### 5.1.4. Součinitel přestupu tepla nucenou konvekcí pro proudění v trubkách

Součinitel přestupu tepla je teoreticky možné určit pomocí kritériálních rovnic, které v mém případě budou sloužit pro ověření experimentu. Pro laminární režim za konstantní teploty stěny platí, že

$$\overline{Nu}_d = 1,55 \cdot Pe_{d,l}^{*1/3} \cdot \chi \cdot \varepsilon_L \text{ pro } Pe_{d,l}^* \geq 20 \quad (18)$$

nebo

$$\overline{Nu}_d = \left[ 3,66 + \frac{0,0668 \cdot Pe_{d,l}^*}{1 + 0,04 \cdot Pe_{d,l}^{*2/3}} \right] \cdot \chi \cdot \varepsilon_L \text{ pro } Pe_{d,l}^* \leq 250 \quad (19)$$

kde

$$\overline{Nu}_d = \frac{\bar{\alpha}_k \cdot d}{\lambda}; \quad Pe_{d,l}^* = Pe_d \cdot \frac{d}{l} = \frac{\bar{v} \cdot d^2}{a \cdot l}. \quad (20)$$

Z udaných rozsahů platností vztahů (18) a (19) plyne, že v rozmezí  $20 \leq Pe_{d,l}^* \leq 250$  lze použít obě rovnice. U úloh, kde se  $Pe_{d,l}^*$  pohybuje ve výše uvedeném rozsahu, použijeme při  $Pe_{d,l}^* \approx 10^2$  vztahu (18) a při  $Pe_{d,l}^* \approx 10^1$  výrazu (19).

Opravný součinitel na dynamický počáteční úsek  $\varepsilon_L = 1$  v případě, že před sledovaným úsekem trubky je dostatečná délka vytvoření parabolického rozložení rychlosti. Jinak pro  $Re_{d,l}^* > 10$  platí

$$\varepsilon_L = 0,60 \cdot Re_{d,l}^{*1/7} \cdot \left(1 + \frac{2,5}{Re_{d,l}^*}\right) \quad (21)$$

kde

$$Re_{d,l}^* = Re_d \cdot \frac{d}{l} = \frac{\bar{v} \cdot d^2}{\nu \cdot l}. \quad (22)$$

K určení teplotního součinitele  $\chi$  se u kapalin využívá dynamické viskozity. Rovnice pro výpočet teplotního součinitele je pak rovna

$$\chi = \left(\frac{\eta}{\eta_p}\right)^{0,14}. \quad (23)$$

Charakteristická teplota, při které se dosazují hodnoty  $\lambda, a, \eta, \nu$  se rovná

$$t_{ch} = t_p - \frac{\Delta t_L}{2}. \quad (24)$$

Střední logaritmický rozdíl teplot  $\Delta t_L$  se spočítá na základě rovnice

$$\Delta t_L = \frac{\Delta t_0 - \Delta t_l}{\ln \frac{\Delta t_0}{\Delta t_l}}, \quad (25)$$

kde  $\Delta t_0 = (t_p - \bar{t}_0)$  a  $\Delta t_l = (t_p - \bar{t}_l)$ . [16]

Mé měřicí zařízení má velmi atypický tvar vnitřního prostoru mezi trubkami, a tedy za průměr  $d$  budu v rovnicích dosazovat průměr hydraulický  $d_H$  spočtený z rovnice (13). Teploty pro určení charakteristické teploty si pro tento teoretický výpočet zvolím na základě vybíjecího cyklu mého navrhovaného akumulátoru. Jejich správnost a přesnost bude později experimentálně ověřena.

Tab. 20 Mnou určené teploty pro výpočet

$t_p = t_2$ [°C]	28,5
$\bar{t}_0 = t_{v1}$ [°C]	20
$\bar{t}_l = t_{v2}$ [°C]	28

Příklad výpočtu provedu pouze pro první vypočtenou rychlost  $\bar{v}_{1mz}$  z Tab. 18. Výsledky pro zbylé rychlosti z Tab. 18 pak uvedu do vlastních tabulek.

Vypočítám si charakteristickou teplotu z rovnice (24) pro pozdější odečtení příslušných veličin určující vlastnosti vody pro danou teplotu.

$$\begin{aligned}
t_{ch} &= t_p - \frac{\overline{\Delta t_L}}{2} = t_p - \frac{1}{2} \cdot \frac{(t_p - \bar{t}_0) - (t_p - \bar{t}_l)}{\ln \frac{(t_p - \bar{t}_0)}{(t_p - \bar{t}_l)}} = t_2 - \frac{1}{2} \cdot \frac{(t_2 - t_{v1}) - (t_2 - t_{v2})}{\ln \frac{(t_2 - t_{v1})}{(t_2 - t_{v2})}} = \\
&= 29 - \frac{1}{2} \cdot \frac{(29 - 20) - (29 - 28)}{\ln \frac{(29 - 20)}{(29 - 28)}} = 27,09 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (26)
\end{aligned}$$

Pro tuto teplotu jsem odečetl vlastnosti vody, viz Tab.21, potřebné pro další výpočet.

Tab. 21 Vlastnosti vody při charakteristické teplotě

$\lambda$ [W/(m · K)]	0,6099
$a$ [m <sup>2</sup> /s] · 10 <sup>-6</sup>	0,147
$\eta$ [Pa · s] · 10 <sup>-6</sup>	842,156
$\nu$ [m <sup>2</sup> /s] · 10 <sup>-6</sup>	0,850

Reynoldsovo kritérium tak spočítám podle vzorce (11) pro ověření laminárního proudění.

$$Re_{d_H} = \frac{\bar{v} \cdot d_H}{\nu} = \frac{0,0251 \cdot 0,00619}{0,850 \cdot 10^{-6}} = 183 \quad (27)$$

Jako další si spočítám kritérium  $Pe_{d,l}^*$ , abych zjistil, kterou z rovnic (18) nebo (19) použiji pro další výpočty.

$$Pe_{d,l}^* = \frac{\bar{v} \cdot d_H^2}{a \cdot l} = \frac{0,0251 \cdot 0,00619^2}{0,147 \cdot 10^{-6} \cdot 0,7} = 9,35 \quad (28)$$

Z teorie vím, že pokud je výsledek v rozsahu  $Pe_{d,l}^* \leq 250$ , použiji pak pro výpočet Nussetova kritéria vzorec (19).

Dále provedu kontrolu, zda je zapotřebí oprava na dynamický počáteční úsek  $\varepsilon_L$ . Tuto podmínku ověřím výpočtem

$$Re_{d,l}^* = \frac{\bar{v} \cdot d^2}{\nu \cdot l} = \frac{0,0251 \cdot 0,00619^2}{0,850 \cdot 10^{-6} \cdot 0,7} = 1,62 \quad (29)$$

Podmínka v tomto případě vyhovuje, neboť  $Re_{d,l}^* < 10$ , a proto  $\varepsilon_L = 1$ .

Výpočet pro teplotní součinitel provedu dosazením do rovnice (23). Dynamická viskozita na povrchu potrubí  $\eta_p$  je v tomto případě rovna  $\eta_p = 693,242 \cdot 10^{-6}$  Pa · s. Po dosazení je teplotní součinitel roven

$$\chi = \left( \frac{\eta}{\eta_p} \right)^{0,14} = \left( \frac{842,156}{693,242} \right)^{0,14} = 1,03 \quad (30)$$

Dosazením všech vypočtených hodnot do rovnice (19) vychází Nussetovo kritérium

$$\begin{aligned}
\overline{Nu}_d &= \left[ 3,66 + \frac{0,0668 \cdot Pe_{d,l}^*}{1 + 0,04 \cdot Pe_{d,l}^*} \right] \cdot \chi \cdot \varepsilon_L = \left[ 3,66 + \frac{0,0668 \cdot 9,35}{1 + 0,04 \cdot 9,35} \right] \cdot 1,03 \cdot 1 = \\
&= 5,93 \quad (31)
\end{aligned}$$

Střední součinitel přestupu tepla ve vnitřním prostoru měřícího zařízení je přes kritériální rovnice roven

$$\bar{\alpha}_k = \frac{\bar{Nu}_d \cdot \lambda}{d_H} = \frac{5,93 \cdot 0,6099}{6,19 \cdot 10^{-3}} = 583,87 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (32)$$

Tab. 22 Výsledek součinitele přestupu tepla pro rychlost  $\bar{v}_{2mz}$

$\bar{v}_{2mz} [\text{m/s}]$	0,0989
$Re_{d_H} [1]$	720
$Pe_{d,l}^* [1]$	37
$Re_{d,l}^* [1]$	6,37
$\varepsilon_L [1]$	1
$\chi [1]$	1,03
$\bar{Nu}_d [1]$	7,18
$\bar{\alpha}_k [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$	707,45

Tab. 23 Výsledek součinitele přestupu tepla pro rychlost  $\bar{v}_{3mz}$

$\bar{v}_{3mz} [\text{m/s}]$	0,1499
$Re_{d_H} [1]$	1062
$Pe_{d,l}^* [1]$	56
$Re_{d,l}^* [1]$	9,65
$\varepsilon_L [1]$	1
$\chi [1]$	1,03
$\bar{Nu}_d [1]$	7,69
$\bar{\alpha}_k [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$	757,53

### 5.1.5. Součinitel přestupu tepla přirozenou konvekcí pro svislou stěnu

Při vybíjení akumulátoru uvažují pro součinitel přestupu tepla uvnitř akumulčního zásobníku vliv přirozené konvekce od rozdílu teplot mezi jádrem zásobníku a stěnou zásobníku. Střední součinitel přestupu tepla  $\bar{\alpha}_k$  u svislých stěn i válců se počítá z rovnice

$$\bar{Nu}_l = C \cdot Ra_l^n \quad (33)$$

kde

$$\bar{Nu}_l = \frac{\bar{\alpha}_k \cdot l}{\lambda}; Ra_l = Gr_l \cdot Pr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot l^3}{\nu^2} \cdot Pr. \quad (34)$$

a za předpokladu laminárního proudění je  $\bar{Nu}_l$  rovno

$$\bar{Nu}_l = 0,68 + \frac{0,670 \cdot Ra_l^{1/4}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr}\right)^{9/16}\right]^{4/9}}, Ra_l \leq 10^9 \quad (35)$$

Charakteristickou teplotou je aritmetický průměr teploty tekutiny  $t_\infty$  a teploty stěny  $t_p$

$$t_{ch} = \frac{t_\infty + t_p}{2}. \quad (36)$$

Při výpočtu kritéria  $Ra_l$  se také používá výpočet teplotní difference ze vztahu

$$\Delta t = t_\infty - t_p. \quad (37)$$

Teplota  $t_\infty = t_{ok1}$  je teplota jádra akumulční látky, a teplota  $t_p = t_1$  je teplota vnitřní stěny akumulčního zásobníku. Teplotu jádra volím jako teplotu latentní přeměny, protože předpokládám, že zde teplota zůstane ustálena nejdéle. Na základě tepelných vlastností galia předpokládám rychlý přestup tepla, a volím tak teplotu stěny jen o něco nižší, než je teplota jádra. [21]

Tab. 24 Mnou zvolené teploty pro výpočet

$t_\infty = t_{ok1} [^\circ C]$	29,77
$t_p = t_1 [^\circ C]$	28,77

Charakteristickou teplotu vypočítám dosazením teplot do rovnice (36) jako

$$t_{ch} = \frac{t_\infty + t_p}{2} = \frac{29,77 + 28,77}{2} = 29,27 \text{ } ^\circ C \quad (38)$$

Teplotní difference  $\Delta t$  pro dosazení do Rayleighova kritéria je rovna

$$\Delta t = 29,77 - 28,77 = 1 \text{ } ^\circ C \quad (39)$$

Teplotní difference je stejná i v Kelvinově stupnici.

Tab. 25 Doplnující hodnoty pro výpočet (Dynamická viskozita galia [9])

Dynamická viskozita $\eta [Pa \cdot s]$	$1,81 \cdot 10^{-3}$
Gravitační zrychlení $g [m/s^2]$	9,81

Kinematickou viskozitu si dopočítám podle vzorce

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} = \frac{1,81 \cdot 10^{-3}}{5904} = 0,307 \cdot 10^{-6} \text{ } m^2/s \quad (40)$$

Rayleighovo kritérium si spočítám dosazením hodnot do vzorce (34) tak, že

$$\begin{aligned} Ra_l = Gr_l \cdot Pr &= \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot l^3}{\nu^2} \cdot \frac{\nu}{a} = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot l^3}{\nu \cdot a} = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot l^3 \cdot \rho \cdot c_p}{\nu \cdot \lambda} = \\ &= \frac{9,81 \cdot 18,3 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 0,7^3 \cdot 5904 \cdot 375,221}{0,306 \cdot 10^{-6} \cdot 35,4} = 1,26 \cdot 10^7 \end{aligned} \quad (41)$$

Podmínku  $Ra_l \leq 10^9$  pro výpočet Nussetova kritéria jsem tímto výpočtem splnil, a tedy mohu dosadit do rovnice (.). Po dosazení vychází Nussetovo kritérium jako

$$\overline{Nu}_l = 0,68 + \frac{0,670 \cdot Ra_l^{\frac{1}{4}}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right]^{\frac{4}{9}}} = 0,68 + \frac{0,670 \cdot Ra_l^{\frac{1}{4}}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{\frac{c_p \cdot \eta}{\lambda}}\right)^{\frac{9}{16}}\right]^{\frac{4}{9}}}$$

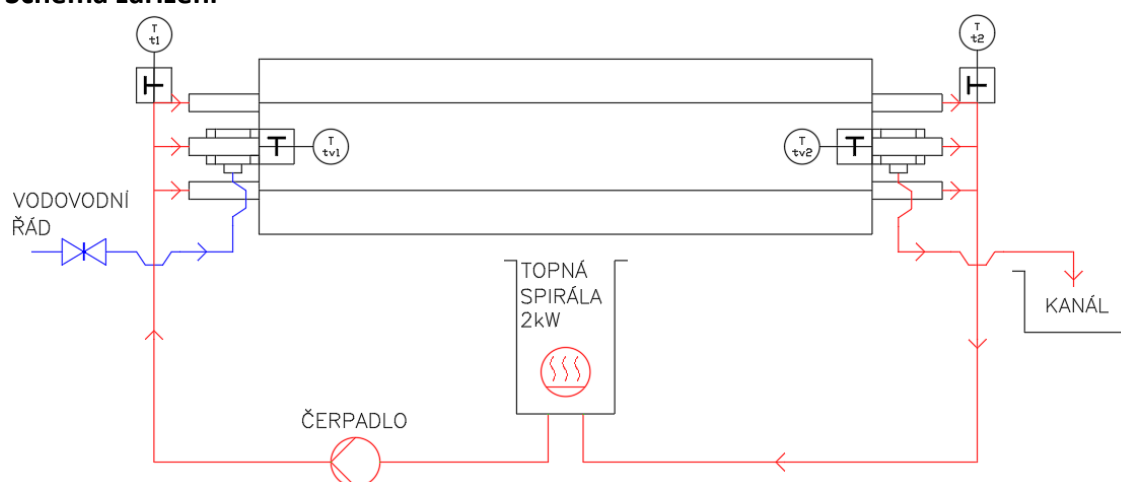
$$= 0,68 + \frac{0,670 \cdot (1,26 \cdot 10^7)^{\frac{1}{4}}}{\left[ 1 + \left( \frac{0,492}{\frac{375,221 \cdot 1,81 \cdot 10^{-3}}{35,4}} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{4}{9}}} = 7,09 \quad (42)$$

Součinitel přestupu tepla pro vnitřní prostor potrubí je tedy výpočtem přes kritériální rovnice roven

$$\bar{\alpha}_k = \frac{\overline{Nu}_l \cdot \lambda}{l} = \frac{7,09 \cdot 35,4}{0,7} = 358,33 \text{ W}/(m^2 \cdot K) \quad (43)$$

### 5.1.6. Použitá měřidla a zařízení

#### Schéma zařízení



Obr. 29 Schéma měřidla

#### Teploměr JSP Pt100/A/4 EN60751 T1060 Flexitemp



Obr. 30 Teploměr JSP Pt100/A/4

- Třída přesnosti dle ČSN EN 60751  
Tolerance:  $\pm(0,15 + 0,002 \cdot t)$
- Vnitřní vedení: 4 – vodič
- Vnější průměr stonku: 3 mm
- Elektrický izolační odpor: min 100 MΩ dle ČSN 61515, při teplotě  $(20 \pm 15) ^\circ C$ , max 80% relativní vlhkosti
- Měřící proud: doporučený 0,1 až 1 mA, maximální 3 mA
- Měřící rozsah snímače: -100 až +450 °C (třída přesnosti A)

## Čerpadlo Aquart 25/4/180



- Typ čerpadla: Oběhové
- Napětí: 230 V
- Výtlak: 4 m
- Jmenovitý příkon: 72/53/38 W
- Maximální průtok: 48 l/min
- Teplota kapaliny: 10 – 100 °C
- Maximální provozní tlak: 1 MPa

Obr. 31 Čerpadlo Aquart 25/4/180

## Topná spirála



Obr. 32 Topná spirála

- Výkon: 2 kW
- Měď

## Odměrný válec, stopky (průtok)



Obr. 33 Odměrný válec

- Rozsah: 250 ml
- Dílek: 2 ml

## Základna pro převodníky (NI cDAQ - 9178), Převodník pro platinové odporové teploměry (NI 9217)



Obr. 34 Převodník s připojenými teploměry v základně

- Počet kanálů: 4 kanály pro analogový vstup
- Rozsah měření: Teplota -200 až +850 °C  
Odpor 0 až 400 Ω

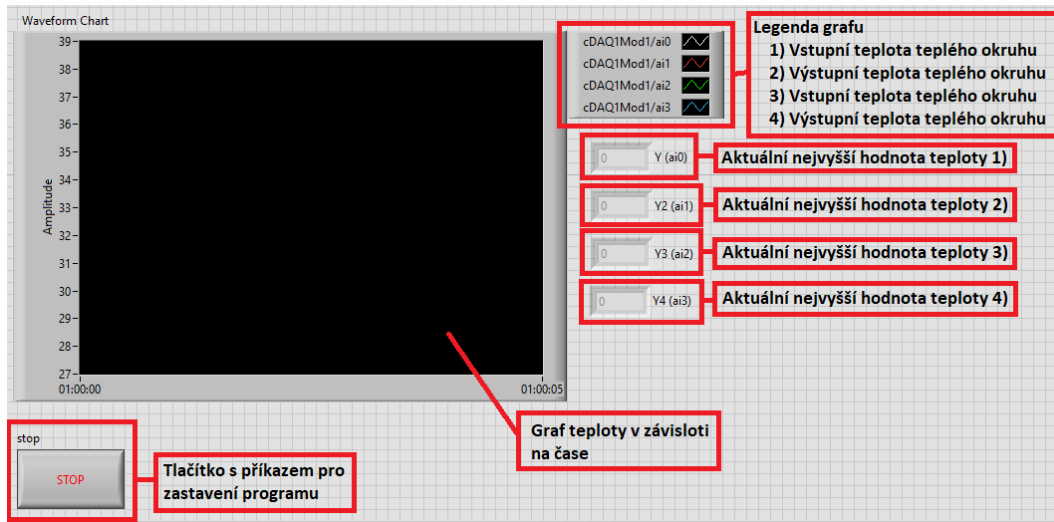
Tab. 26 Přesnost převodníku při měření

Měřená hodnota	Typický (25 °C)	Maximálně (-40 až 70 °C)
-200 až 150 °C	0,15 °C	0,35 °C
150 až 850 °C	0,20 °C	1,00 °C

### 5.1.7. Postup zkoušek

Při měření na měřicím zařízení jsem postupoval následujícím způsobem.

- 1) Spustil jsem čerpadlo a topnou spirálu teplého okruhu tak, aby docházelo k postupnému ohřívání celého systému na požadovanou počáteční teplotu, kterou jsem si nastavil okolo 35 - 38 °C.
- 2) Studený okruh jsem spustil otevřením kohoutku vodovodního řádu, a tím nechal vodu protékat prostorem mezi trubkami.
- 3) Pomocí odměrného válce a stopek jsem si nastavil přibližný průtok podle orientačních hodnot spočítaných průtoků v Tab. 19. Poté jsem provedl 10 měření tak, abych co nejvíce eliminoval vnesenou chybu při odečítání hodnot z odměrného válce, a spouštění a zastavování stopek při měření času.
- 4) K měření teplot v trubkách jsem používal program NI LabVIEW, díky kterému jsem byl schopen vidět probíhající změny, a tak čekat na ustálení systému.



Obr. 35 Popis programu pro měření v LabVIEW

- 5) Ustálení jsem v měření poznal podle konstantní přímky na grafu, a kolísání okolo jedné hodnoty v rámečku pro aktuální číselnou hodnotu.
- 6) Po zastavení programu jsem si data vyextrahoval do programu MS Excel pro další zpracování.
- 7) Pro každý jednotlivý průtok jsem provedl 3 měření teplot, kdy po každém tomto měření jsem zvedl teplotu teplého okruhu přibližně o 3 - 6 °C.
- 8) Po doměření teplot pro jeden konkrétní průtok jsem teplý okruh ochladil na počáteční teplotu, a celý proces zopakoval pro další průtok.

### 5.1.8. Naměřená data

Z důvodu množství naměřených dat budou úplné tabulky s naměřenými teplotami a objemy s časy uvedeny pouze v příloze 11 na CD. Zde uvádím již zprůměrované hodnoty naměřených teplot, objemů a časů dané zkoušky.



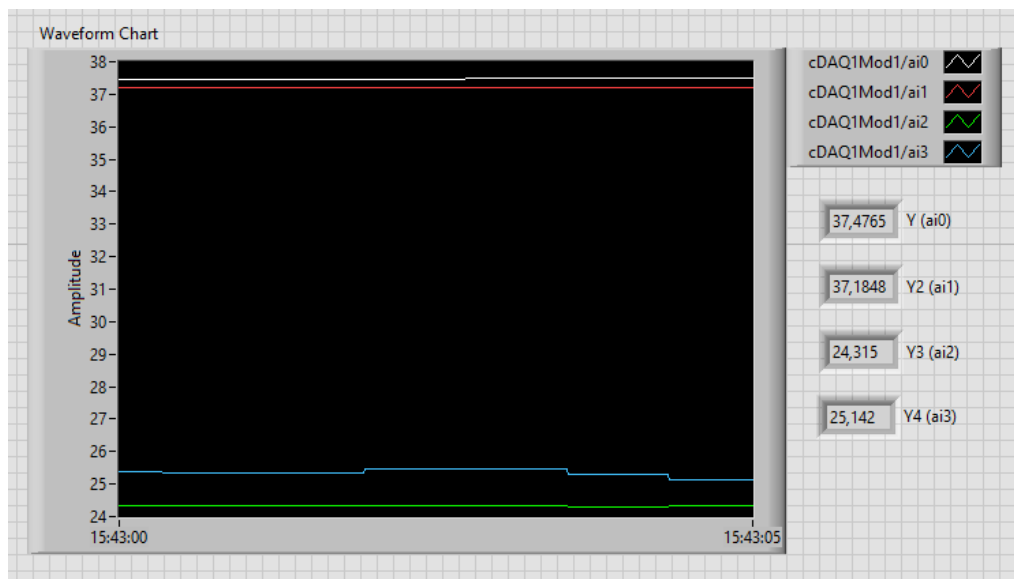
## 1. Zkouška

Tab. 27 Naměřený objem a čas pro 1. zkoušku

Odměrný válec [ml]	Čas [s]
238,4	10,994

Tab. 28 Naměřené teploty 1. měření

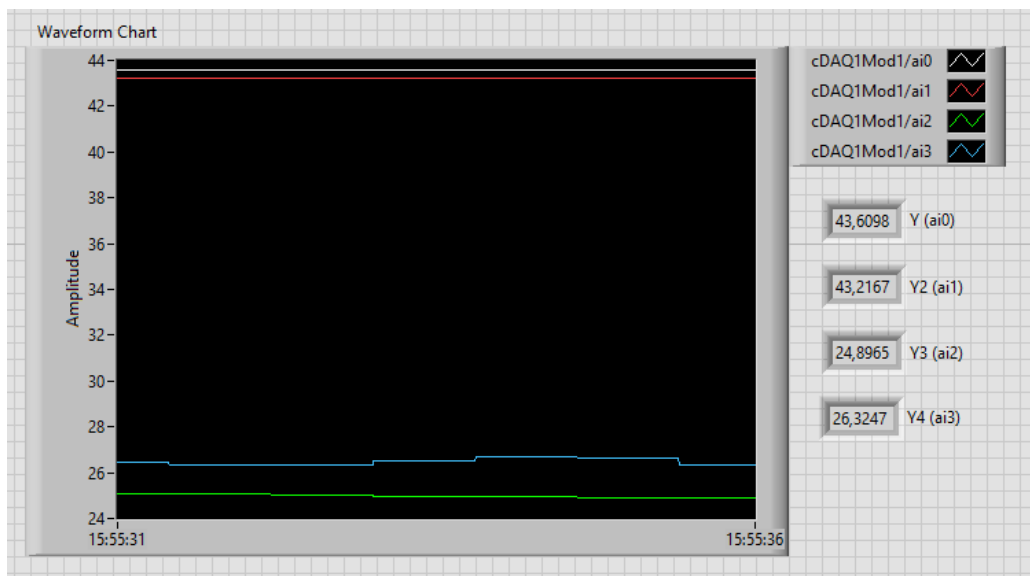
Vstupní teplota teplého okruhu $t_{t1}$ [°C]	37,476
Výstupní teplota teplého okruhu $t_{t2}$ [°C]	37,186
Vstupní teplota studeného okruhu $t_{v1}$ [°C]	24,333
Výstupní teplota studeného okruhu $t_{v2}$ [°C]	25,351



Obr. 36 Graf 1. měření

Tab. 29 Naměřené teploty 2. měření

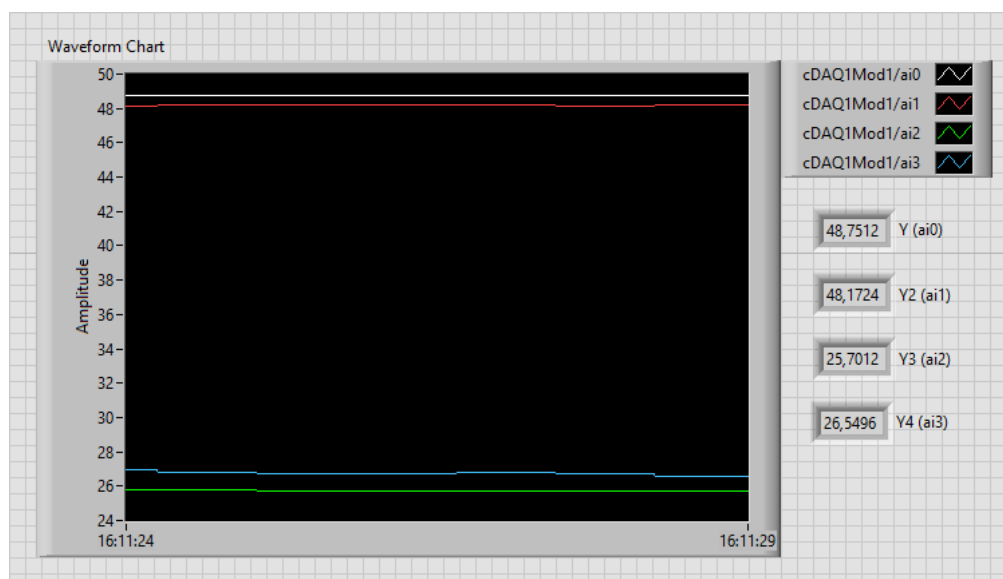
Vstupní teplota teplého okruhu $t_{t1}$ [°C]	43,607
Výstupní teplota teplého okruhu $t_{t2}$ [°C]	43,216
Vstupní teplota studeného okruhu $t_{v1}$ [°C]	24,973
Výstupní teplota studeného okruhu $t_{v2}$ [°C]	26,471



Obr. 37 Graf 2. měření

Tab. 30 Naměřené teploty 3. měření

Vstupní teplota teplého okruhu $t_{t1}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	48,749
Výstupní teplota teplého okruhu $t_{t2}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	48,174
Vstupní teplota studeného okruhu $t_{v1}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	25,724
Výstupní teplota studeného okruhu $t_{v2}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	26,736



Obr. 38 Graf 3. měření

## 2. Zkouška

Kvůli rozdělení této zkoušky do dvou dnů jsem také naměřil dvě sady průtoků.

Tab. 31 Naměřený objem a čas pro 2. zkoušku první den

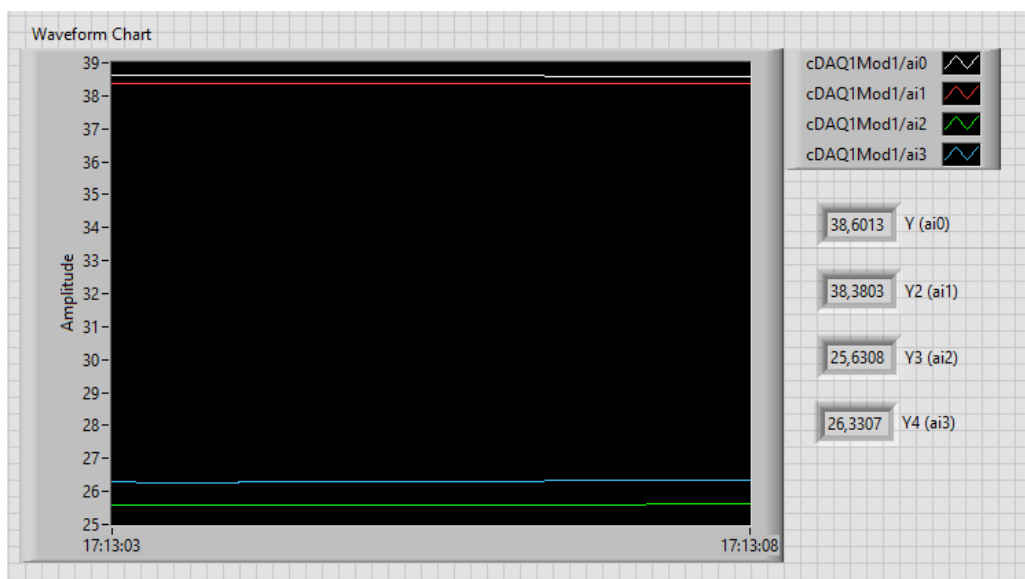
Odměrný válec [ml]	Čas [s]
237,7	17,742

Tab. 32 Naměřený objem a čas pro 2. zkoušku druhý den

Odměrný válec [ml]	Čas [s]
245,9	18,371

Tab. 33 Naměřené teploty 1. měření

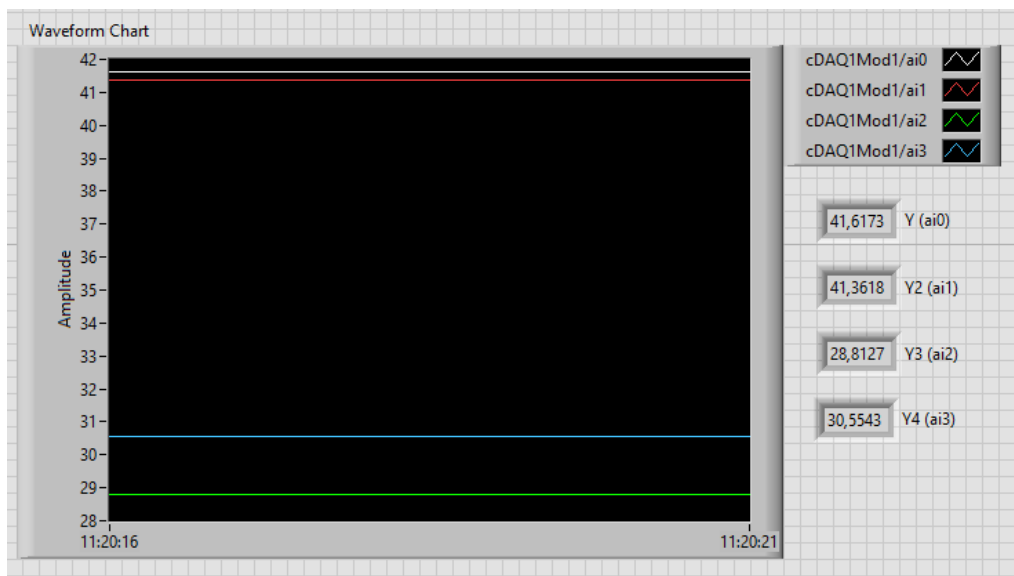
Vstupní teplota teplého okruhu $t_{t1}$ [°C]	38,604
Výstupní teplota teplého okruhu $t_{t2}$ [°C]	38,379
Vstupní teplota studeného okruhu $t_{v1}$ [°C]	25,595
Výstupní teplota studeného okruhu $t_{v2}$ [°C]	26,306



Obr. 39 Graf 1. měření

Tab. 34 Naměřené teploty 2. měření

Vstupní teplota teplého okruhu $t_{t1}$ [°C]	41,616
Výstupní teplota teplého okruhu $t_{t2}$ [°C]	41,360
Vstupní teplota studeného okruhu $t_{v1}$ [°C]	28,813
Výstupní teplota studeného okruhu $t_{v2}$ [°C]	30,560



Obr. 40 Graf 2. měření

Tab. 35 Naměřené teploty 3. měření

Vstupní teplota teplého okruhu $t_{t1}$ [°C]	46,171
Výstupní teplota teplého okruhu $t_{t2}$ [°C]	45,835
Vstupní teplota studeného okruhu $t_{v1}$ [°C]	29,659
Výstupní teplota studeného okruhu $t_{v2}$ [°C]	32,201



Obr. 41 Graf 3. měření

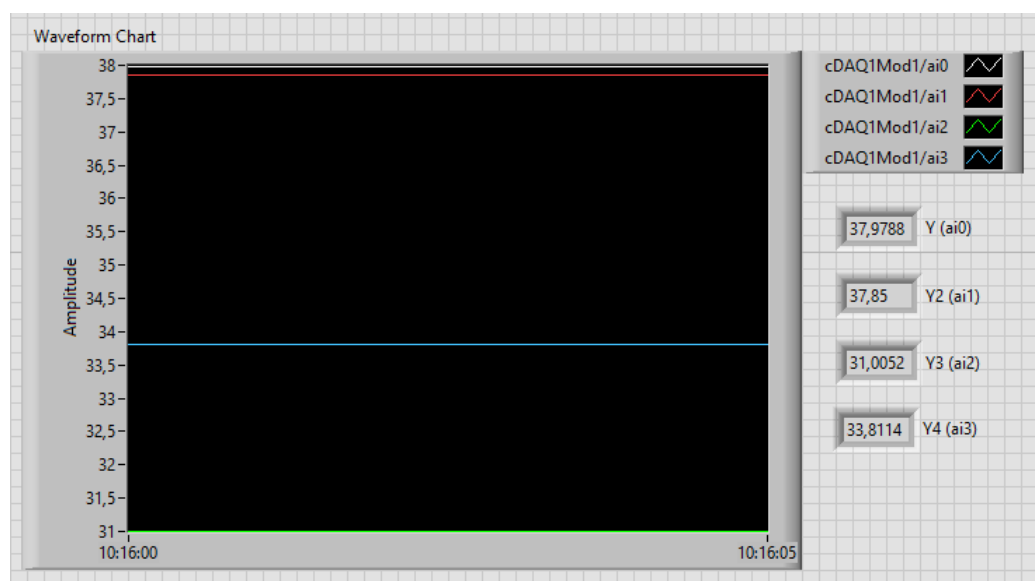
### 3. Zkouška

Tab. 36 Naměřený objem a čas pro 3. zkoušku

Odměrný válec [ml]	Čas [s]
243,4	60,811

Tab. 37 Naměřené teploty 1. měření

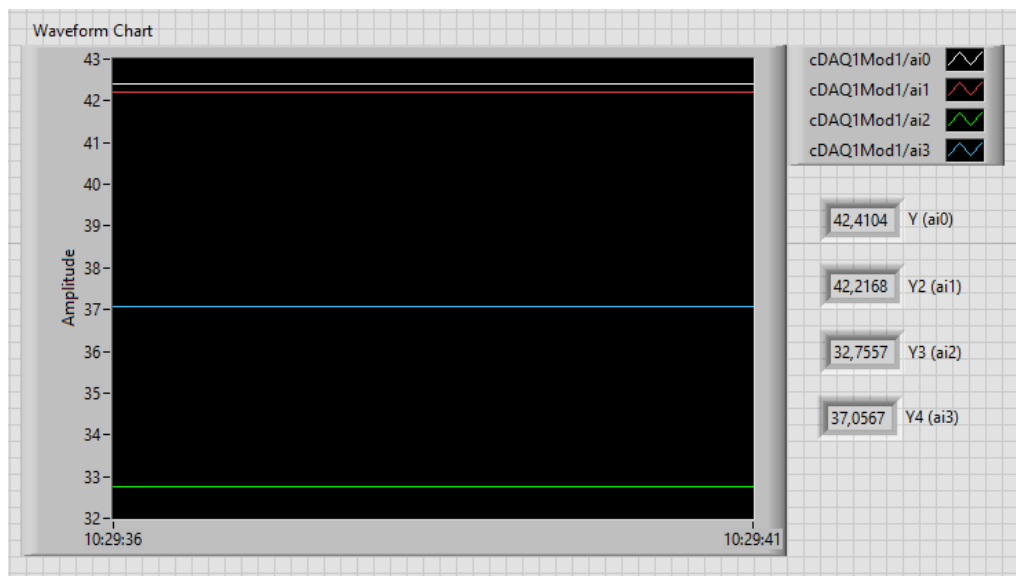
Vstupní teplota teplého okruhu $t_{t1}$ [°C]	37,980
Výstupní teplota teplého okruhu $t_{t2}$ [°C]	37,849
Vstupní teplota studeného okruhu $t_{v1}$ [°C]	31,005
Výstupní teplota studeného okruhu $t_{v2}$ [°C]	33,806



Obr. 42 Graf 1. měření

Tab. 38 Naměřené teploty 2. měření

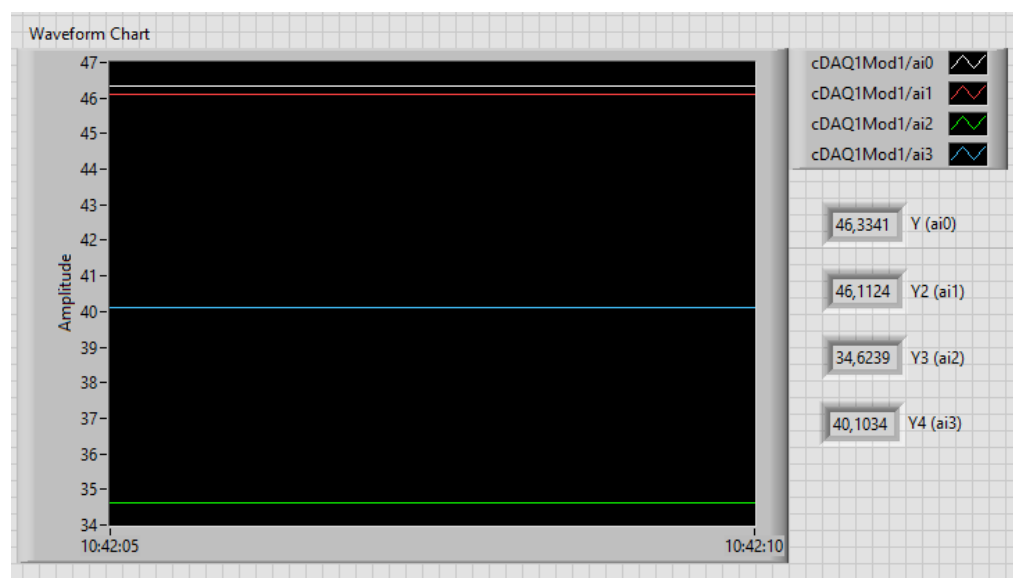
Vstupní teplota teplého okruhu $t_{t1}$ [°C]	42,410
Výstupní teplota teplého okruhu $t_{t2}$ [°C]	42,219
Vstupní teplota studeného okruhu $t_{v1}$ [°C]	32,760
Výstupní teplota studeného okruhu $t_{v2}$ [°C]	37,060



Obr. 43 Graf 2. měření

Tab. 39 Naměřené teploty 3. měření

Vstupní teplota teplého okruhu $t_{t1}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	46,337
Výstupní teplota teplého okruhu $t_{t2}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	46,115
Vstupní teplota studeného okruhu $t_{v1}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	34,628
Výstupní teplota studeného okruhu $t_{v2}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	40,114



Obr. 44 Graf 3. měření

### 5.1.9. Zpracování získaných dat

Koeficient přestupu tepla jsem ze získaných dat zpracovával na základě rovnosti hustoty tepelných toků studeného a teplého okruhu. Hustota tepelného toku roste směrem ke středu válce, neboť odpovídající plocha se zmenšuje. Aby se nemusela vyjadřovat závislost  $q = f(r)$ , uvádí se u válcové plochy místo hustoty tepelného toku  $q$  tepelný tok [16]

$$P = -\lambda \cdot \frac{dt}{dr} \cdot S. \quad (44)$$

Plocha, skrze kterou teplo z teplého okruhu v mém měřícím okruhu prochází stěnami do okruhu studeného viz Obr. 18, je rovna

$$S = 3 \cdot \frac{\pi}{3} \cdot r \cdot l \quad (41)$$

Po dosazení plochy do rovnice (44) a separaci proměnných vypadá výpočet tepelného toku skrze stěnu jako

$$P \cdot \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{r} \cdot dr = -\lambda \cdot \pi \cdot l \cdot \int_{t_1}^{t_2} dt \quad (42)$$

$$P \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} = \lambda \cdot \pi \cdot l \cdot (t_1 - t_2) \quad (43)$$

$$P = \frac{\lambda \cdot \pi \cdot l \cdot (t_t - t_2)}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (44)$$

Množství tepelného toku přijatého studeným okruhem je rovno

$$P = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta T = \dot{m} \cdot c \cdot (t_{v2} - t_{v1}). \quad (45)$$

Porovnáním rovnice (44) a (45) dopočítám teplotu  $t_2$ , která se nachází na povrchu stěn trubek ve vnitřním prostoru měřícího zařízení.

$$\dot{m} \cdot c \cdot (t_{v2} - t_{v1}) = \frac{\lambda \cdot \pi \cdot l \cdot (t_t - t_2)}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (46)$$

$$\dot{m} \cdot c \cdot (t_{v2} - t_{v1}) \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} = \lambda \cdot \pi \cdot l \cdot t_t - \lambda \cdot \pi \cdot l \cdot t_2 \quad (47)$$

$$t_2 = t_t - \frac{\dot{m} \cdot c \cdot (t_{v2} - t_{v1}) \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}}{\lambda \cdot \pi \cdot l} \quad (48)$$

Za předpokladu, že v teplém okruhu je udržována konstantní teplota, a okruh již dostatečně prohřál systém potrubí, může se teplota celého teplého okruhu považovat za teplotu na vnitřní stěně potrubí  $t_1$ . Při mém měření však k jistým tepelným ztrátám docházelo, a teplota na vstupu teplého okruhu se mírně odlišovala od teploty výstupní. Tyto rozdíly se většinou pohybovaly v rozmezí chyby samotného měřidla, a proto jsem naměřené teploty mezi sebou zprůměroval, a s touto střední teplotou teplého okruhu

pak dále počítal. Pro Fourierovu povrchovou podmínku platí při tepelném toku skrze válcovou stěnu, že

$$q_l = 3 \cdot \frac{\pi}{3} \cdot r_2 \cdot \alpha_2 \cdot (t_2 - t_{ok,2}), \quad (49)$$

kde  $q_l$  je veličina nazývaná lineární hustota tepelného toku, což je tepelný tok vztažený na jednotku délky. Lineární hustotu tepelného toku lze spočítat jako

$$q_l = \frac{P}{l} = \frac{\lambda \cdot \pi \cdot (t_1 - t_2)}{\ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{\dot{m} \cdot c \cdot (t_{v2} - t_{v1})}{l}. \quad (50)$$

Součinitel přestupu tepla studeného okruhu na vnějším povrchu potrubí uvnitř měřícího zařízení je roven

$$\alpha_2 = \frac{q_l}{\pi \cdot r_2 \cdot (t_2 - t_{ok,2})}, \quad (51)$$

kde  $t_{ok,2}$  je v mém případě proměnná teplota kvůli ohřívajícímu se studenému okruhu, a tedy součinitel přestupu tepla se v celém průřezu vnitřního prostoru od vstupu až po výstup mění.

## 1. Zkouška

Při první zkoušce jsem naměřil data k vyhodnocení průtoku viz Tab. 27. Hodnoty objemu a času jsem zprůměroval pro výpočet výsledného průtoku, který vyšel jako

$$\dot{V} = V/\tau = 238,4/10,994 = 1,30 \text{ l/min} = 21,685 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}. \quad (52)$$

Následující ukázkou výpočtu provedu pro první měření teplot viz Tab. 28 u první zkoušky. Výsledky zbylých měření této zkoušky (viz Tab. 41, Tab. 42), ale i následujících zkoušek, již uvedu do vlastních tabulek.

Množství tepelného toku ve studeném okruhu přijatého od okruhu teplého bylo rovno

$$P = \dot{m} \cdot c \cdot (t_{v2} - t_{v1}) = \dot{V} \cdot \rho_{voda} \cdot c_{voda} \cdot (t_{v2} - t_{v1}) =$$

$$= 21,69 \cdot 10^{-6} \cdot 1000 \cdot 4180 \cdot (298,50 - 297,48) = 92,29 \text{ W} \quad (53)$$

Teplota  $t_2$  na vnější straně potrubí, vnitřní straně prostoru obtékaného studeným okruhem, je rovna

$$t_2 = t_1 - \frac{\dot{m} \cdot c \cdot (t_{v2} - t_{v1}) \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}}{\lambda \cdot \pi \cdot l} =$$

$$= 310,48 - \frac{0,022 \cdot 4180 \cdot (298,50 - 297,48) \cdot \ln \frac{0,03015}{0,02655}}{30 \cdot \pi \cdot 0,7} = 310,30 \text{ K} \quad (54)$$

Lineární hustota tepelného toku válcovou stěnou byla rovna

$$q_l = \frac{\lambda \cdot \pi \cdot (t_1 - t_2)}{\ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{30 \cdot \pi \cdot (310,48 - 310,30)}{\ln \frac{0,03015}{0,02655}} = 131,85 \text{ W/m} \quad (55)$$

$$q_l = \frac{\dot{m} \cdot c \cdot (t_{v2} - t_{v1})}{l} = \frac{0,022 \cdot 4180 \cdot (298,50 - 297,48)}{0,7} = 131,85 \text{ W/m} \quad (56)$$



Součinitel přestupu tepla byl pro teplotu  $t_{ok,2} = t_{v1}$  roven

$$\alpha_2 = \frac{q_l}{\pi \cdot r_2 \cdot (t_2 - t_{ok,2})} = \frac{131,85}{\pi \cdot 0,03015 \cdot (310,30 - 297,48)} = 108,58 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (57)$$

Tab. 40 Výslední součinitelé přestupu tepla pro dané teploty  $t_{ok,2}$  pro 1. měření

$t_{ok,2}$ [K]	$\alpha_2$ [W/(m <sup>2</sup> · K)]
297,48	108,58
297,99	113,07
298,50	117,95

Výsledný střední součinitel přestupu tepla vyšel pro první měření

$$\alpha_{2s} = 113,203 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (58)$$

Tab. 41 Výsledný střední součinitel přestupu tepla pro 2. měření

$P$ [W]	$t_2$ [K]	$q_l$ [W/m]
135,83	316,30	194,04
$t_{ok,2}$ [K]	$\alpha_2$ [W/(m <sup>2</sup> · K)]	
298,12	112,70	
298,87	117,55	
299,62	122,83	
$\alpha_{2s}$ [W/(m <sup>2</sup> · K)]		
117,695		

Tab. 42 Výsledný střední součinitel přestupu tepla pro 3. měření

$P$ [W]	$t_2$ [K]	$q_l$ [W/m]
91,79	321,43	131,13
$t_{ok,2}$ [K]	$\alpha_2$ [W/(m <sup>2</sup> · K)]	
298,87	61,36	
299,38	62,77	
299,89	64,25	
$\alpha_{2s}$ [W/(m <sup>2</sup> · K)]		
62,79		

## 2. Zkouška

Tab. 43 Výsledný střední součinitel přestupu tepla pro 1. měření

$\dot{V} [m^3/s] \cdot 10^{-6}$	$P [W]$	$t_2 [K]$	$q_l [W/m]$
13,40	39,82	311,56	56,89
$t_{ok,2} [K]$		$\alpha_2 [W/(m^2 \cdot K)]$	
298,74		46,85	
299,10		48,18	
299,46		49,60	
$\alpha_{2s} [W/(m^2 \cdot K)]$			
48,21			

Tab. 44 Výsledný střední součinitel přestupu tepla pro 2. měření

$\dot{V} [m^3/s] \cdot 10^{-6}$	$P [W]$	$t_2 [K]$	$q_l [W/m]$
13,39	97,74	314,45	139,62
$t_{ok,2} [K]$		$\alpha_2 [W/(m^2 \cdot K)]$	
301,96		118,06	
302,84		126,94	
303,71		137,26	
$\alpha_{2s} [W/(m^2 \cdot K)]$			
127,42			

Tab. 45 Výsledný střední součinitel přestupu tepla pro 3. měření

$\dot{V} [m^3/s] \cdot 10^{-6}$	$P [W]$	$t_2 [K]$	$q_l [W/m]$
13,39	142,19	318,89	203,13
$t_{ok,2} [K]$		$\alpha_2 [W/(m^2 \cdot K)]$	
302,81		133,46	
304,08		144,92	
305,35		158,53	
$\alpha_{2s} [W/(m^2 \cdot K)]$			
145,63			

### 3. Zkouška

Tab. 46 Výsledný střední součinitel přestupu tepla pro 1. měření

$\dot{V} [m^3/s] \cdot 10^{-6}$	$P [W]$	$t_2 [K]$	$q_l [W/m]$
4,00	46,87	310,97	66,96
$t_{ok,2} [K]$		$\alpha_2 [W/(m^2 \cdot K)]$	
304,16		103,68	
305,56		130,48	
306,96		175,98	
$\alpha_{2s} [W/(m^2 \cdot K)]$			
136,71			

Tab. 47 Výsledný střední součinitel přestupu tepla pro 2. měření

$\dot{V} [m^3/s] \cdot 10^{-6}$	$P [W]$	$t_2 [K]$	$q_l [W/m]$
4,00	71,95	315,33	102,78
$t_{ok,2} [K]$		$\alpha_2 [W/(m^2 \cdot K)]$	
305,91		115,25	
308,06		149,36	
310,21		212,14	
$\alpha_{2s} [W/(m^2 \cdot K)]$			
158,91			

Tab. 48 Výsledný střední součinitel přestupu tepla pro 3. měření

$\dot{V} [m^3/s] \cdot 10^{-6}$	$P [W]$	$t_2 [K]$	$q_l [W/m]$
4,00	91,77	319,20	131,10
$t_{ok,2} [K]$		$\alpha_2 [W/(m^2 \cdot K)]$	
307,78		121,19	
310,52		159,50	
313,26		233,19	
$\alpha_{2s} [W/(m^2 \cdot K)]$			
171,29			

Ze zpracovaných naměřených hodnot lze vidět, že se značně odlišují od teoreticky vypočtených součinitelů přestupu tepla. Při výpočtu přes kritériální rovnice může hrát velkou roli vnitřní prostor měřícího zařízení. Kritériální rovnice většinou počítají s rozměry hladké trubky, kdežto já v rovnicích používám hydraulický průměr vnitřního prostoru. U měření mohla být nedostatkem nedostatečně dlouhá časová osa, kterou jsem měl nastavenou na 5 sekund. Na grafu tedy stav teplot mohl vypadat ustáleně v této časové periodě, ale v dlouhodobějším měřítku přestup tepla stále probíhal. Při dalším výzkumu a měření bych tedy použil delší periodu měření, a také použil výkonnější čerpadlo teplého okruhu pro lepší srovnání teploty vstupní a výstupní teplého okruhu. Dalším nedostatkem se ukázalo napojení studeného okruhu na vodovodní řád. Při měření jsem zpozoroval, že vodovodní řád byl lehce zavzdušněn, a tento fakt také mohl měření lehce ovlivnit. Vylepšením by tedy bylo odvzdušnění mezi vodovodním řádem a vstupem do zařízení tak, aby nedocházelo k ovlivnění měření, a průtok zůstal více ustálen.

### 5.1.10. Nejistoty

Nejistota typu A se nechá spočítat jako výběrová směrodatná odchylka aritmetického průměru podle vzorce

$$u_A(x) = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n - 1)} \left( \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \right)^2}, \quad (59)$$

kde za  $x$  dosazují všechny měřené veličiny a  $n$  je počet měření. V mém případě to byly všechny naměřené teploty, odečtený objem z odměrného a měřený čas.

Nejistota typu B se určí buď odhadem podle vzorce

$$u_B(z_j) = \frac{z_{jmax}}{k}. \quad (60)$$

Veličina  $z_{jmax}$  je odhad hodnoty změn (odchylek) od jmenovité hodnoty měřené veličiny, jejíž překročení je málo pravděpodobné a  $k$  je koeficient podle rozdělení pravděpodobnosti.

Pokud při měření používám certifikovaná měřící zařízení, nejistota typu B se určí z rovnice

$$u_B(z_j) = \frac{U}{k_r}, \quad (61)$$

kde  $U$  je rozšířená nejistota, daná právě údajem z certifikátu, a  $k_r$  je koeficient rozšíření. Výsledná standardní nejistota pro měřenou veličinu je pak rovna

$$u_C(x) = \sqrt{u_A^2(x) + u_B^2(x)}. \quad (62)$$

Kombinovaná standardní nejistota pro výpočet nepřímo měřené veličiny se pak spočítá jako

$$u(z) = \sqrt{A_x^2 \cdot u_C^2(x) + A_y^2 \cdot u_C^2(y)}, \quad (63)$$

kde  $A_{x,y}$  je koeficient citlivosti, počítán jako

$$A_x = \frac{\partial z}{\partial x}, A_y = \frac{\partial z}{\partial y}. \quad (64)$$

Ukázku výpočtu nejistot zde uvedu pouze pro 1. zkoušku a 1. měření v ní. Pro všechny zbylá měření jsou výsledky uvedeny v příloze 11. Aritmetický průměr objemu a času z naměřených dat vyšel jako

$$\bar{V} = \frac{V_1 + \dots + V_{10}}{10} = \frac{239 + \dots + 244}{10} = 238,4 \text{ ml} \quad (65)$$

$$\bar{\tau} = \frac{\tau_1 + \dots + \tau_{10}}{10} = \frac{11,49 + \dots + 11,26}{10} = 10,994 \text{ s} \quad (66)$$

Nejistota typu A tedy vyšla pro objem i čas jako

$$u_A(V) = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \left( \sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V}) \right)^2} =$$

$$= \sqrt{\frac{1}{10 \cdot (10-1)} \left( (239 - 238,4) + \dots + (244 - 238,4) \right)^2} = 0,806 \text{ ml} \quad (67)$$

$$u_A(\tau) = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \left( \sum_{i=1}^n (\tau_i - \bar{\tau}) \right)^2} =$$

$$= \sqrt{\frac{1}{10 \cdot (10-1)} \left( (11,49 - 10,994) + \dots + (11,26 - 10,994) \right)^2} = 0,076 \text{ s} \quad (68)$$

Nejistotu typu B jsem řešil jako odhad odchylek. Pro odměrný váleček jsem uvažoval odchylku 0,2 ml, neboť 1 dílek na měřidle byl 2 ml. Pro čas jsem uvažoval jako odchylku reakční dobu člověka, a to 0,25 sekund. Za  $k$  budu dosazovat  $\sqrt{3}$ , tedy budu uvažovat rovnoměrné rozdělení.

$$u_B(V) = \frac{V_{max}}{k} = \frac{0,2}{\sqrt{3}} = 0,115 \text{ ml} \quad (69)$$

$$u_B(\tau) = \frac{\tau_{max}}{k} = \frac{0,25}{\sqrt{3}} = 0,144 \text{ s} \quad (70)$$

Kombinovaná nejistota pro objem a čas jsem spočítal jako

$$u_C(V) = \sqrt{u_A^2(V) + u_B^2(V)} = \sqrt{0,806^2 + 0,115^2} = 0,814 \text{ ml} \quad (71)$$

$$u_C(\tau) = \sqrt{u_A^2(\tau) + u_B^2(\tau)} = \sqrt{0,076^2 + 0,144^2} = 0,163 \text{ s} \quad (72)$$

Pro nejistotu nepřímo měřeného průtoku si nyní spočítám koeficienty citlivosti jako

$$A_V = \frac{\partial \dot{V}}{\partial V}, A_\tau = \frac{\partial \dot{V}}{\partial \tau}, \quad (73)$$

kde

$$A_V = \frac{\partial \dot{V}}{\partial V} = \frac{1}{\bar{\tau}} = \frac{1}{10,944} = 0,09 \text{ s}^{-1} \quad (74)$$

$$A_\tau = \frac{\partial \dot{V}}{\partial \tau} = \bar{V} \cdot \left(-\frac{1}{\bar{\tau}^2}\right) = 238,4 \cdot \left(-\frac{1}{10,944^2}\right) = -1,97 \text{ ml/s}^2. \quad (75)$$

Výsledná kombinovaná standardní nejistota pro průtok je tedy rovna

$$u(\dot{V}) = \sqrt{A_V^2 \cdot u_C^2(V) + A_\tau^2 \cdot u_C^2(\tau)} = \sqrt{0,09^2 \cdot 0,814^2 + (-1,97)^2 \cdot 0,163^2} = 0,33 \text{ ml/s} \quad (76)$$

Výsledný průtok pro 1. zkoušku je roven

$$\dot{V} = 21,68 \pm 0,33 \text{ ml/s} = (21,68 \pm 0,33) \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}. \quad (77)$$

Pro výpočet nejistot teplot a posléze nepřímo měřené veličiny součinitele přestupu tepla uvedu příklad pouze pro jednu teplotu a jednoho součinitele. Celý proces výpočtu pro ostatní teploty byl obdobný, a všechny zbylé hodnoty jsou plně spočítány v příloze...

Nejistotu typu A jsem spočítal stejně jako v předchozím případě, a to ze vzorce (59) jako

$$u_A(t_{v1}) = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \left( \sum_{i=1}^n (t_{v1i} - \bar{t}_{v1}) \right)^2} = \sqrt{\frac{1}{500 \cdot (500-1)} ((24,347 - 24,333) + \dots + (24,315 - 24,333))^2} = 0,00059 \text{ }^\circ\text{C} \quad (78)$$

Nejistotu typu B jsem řešil pro měřidlo Pt100, tak i pro převodník. Měřidlo Pt100 má přesnost měření dle ČSN 60751  $\pm(0,15 + 0,002 \cdot t)$   $^\circ\text{C}$ . Převodník analogového signálu má podle katalogu při rozsahu měření  $(-200 \div 150)$   $^\circ\text{C}$  přesnost  $\pm 0,35$   $^\circ\text{C}$ . Při rovnoměrném rozdělení jsem tedy nejistotu typu B pro měřidla spočítal jako

$$u_B(\text{Pt100}) = \frac{0,15 + 0,002 \cdot \bar{t}_{v1}}{k} = \frac{0,15 + 0,002 \cdot 24,333}{\sqrt{3}} = 0,1147 \text{ }^\circ\text{C}, \quad (79)$$

$$u_B(\text{Př}) = \frac{0,35}{k} = \frac{0,35}{\sqrt{3}} = 0,2021 \text{ }^\circ\text{C}. \quad (80)$$

Kombinovaná nejistota pro  $t_{v1}$  je rovna

$$u_C(t_{v1}) = \sqrt{u_A^2(t_{v1}) + u_B^2(\text{Pt100}) + u_B^2(\text{Př})} = \sqrt{0,00059^2 + 0,1147^2 + 0,2021^2} = 0,2324 \text{ }^\circ\text{C} \quad (81)$$

Stejný postup jsem provedl pro teplotu výstupní studeného okruhu  $t_{v2}$ , a teplotu teplého okruhu  $t_t$ . Zde uvedu jen výsledky nejistot pro tyto teploty, protože budou potřeba dále pro výpočet nejistoty nepřímo měřené veličiny.

$$u_C(t_{v2}) = 0,2330 \text{ }^\circ\text{C} \quad (82)$$

$$u_C(t_t) = 0,2401 \text{ }^\circ\text{C} \quad (83)$$

Tytéž hodnoty platí pro mé měření i v Kelvinově stupnici.

Pro nejistotu nepřímo měřeného součinitele přestupu tepla pro vstupní teplotu si určím koeficienty citlivosti jako

$$A_{t_t} = \frac{\partial \alpha}{\partial t_t}, A_{t_{v1}} = \frac{\partial \alpha}{\partial t_{v1}}, A_{t_{v2}} = \frac{\partial \alpha}{\partial t_{v2}}, \quad (84)$$

kde

$$A_{t_t} = \frac{\partial \alpha}{\partial t_t} = -\frac{q_l}{\pi \cdot r_2 \cdot t_t^2} = -0,0144 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^2) \quad (85)$$

$$A_{t_{v1}} = \frac{\partial \alpha}{\partial t_{v1}} = \frac{q_l}{\pi \cdot r_2 \cdot \dot{m} \cdot c \cdot t_{v1}^2 \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} - \frac{\lambda \cdot \pi \cdot l}{t_{v1}^2}} = 0,0015 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^2) \quad (86)$$

$$A_{t_{v2}} = \frac{\partial \alpha}{\partial t_{v2}} = \frac{q_l}{\pi \cdot r_2 \cdot \dot{m} \cdot c \cdot t_{v2}^2 \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} - \frac{\lambda \cdot \pi \cdot l}{t_{v2}^2}} = 0,0894 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^2) \quad (87)$$

Výsledná kombinovaná standardní nejistota pro součinitel je poté rovna

$$\begin{aligned} u(\alpha) &= \sqrt{A_{t_t}^2 \cdot u_c^2(t_t) + A_{t_{v1}}^2 \cdot u_c^2(t_{v1}) + A_{t_{v2}}^2 \cdot u_c^2(t_{v2})} = \\ &= \sqrt{(-0,0144)^2 \cdot 0,2401^2 + 0,0015^2 \cdot 0,2324^2 + 0,0894^2 \cdot 0,2330^2} = \\ &= 0,021 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \end{aligned} \quad (88)$$

Výsledný součinitel přestupu tepla pro vstupní teplotu studeného okruhu pro 1. měření v 1. zkoušce je roven

$$\alpha_{21} = (108,58 \pm 0,02) \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (89)$$

## 5.2. Návrh akumulátoru na základě parametrizace akumuláčnických pouzder podle zadané kapacity

Svůj návrh akumulátoru jsem parametrizoval na základě zadané kapacity. Ta má být rovna 150 kWh. Změnou průměrů, délek a počtů akumuláčnických pouzder jsem takto měl na určené teplotní hladině při vybíjení akumulátoru dosáhnout výkonu 100 kW. Nejdříve jsem si určit, jaké množství galia bych potřeboval pro uskladnění 150 kWh energie. Vycházel jsem ze vzorce (1) tak, že jsem si vyjádřil hmotnost jako

$$Q_{kap} = Q_{cit_p} + L + Q_{cit_k} \quad (90)$$

$$Q_{kap} = m_g \cdot c_{pg} \cdot (t_f - t_{v1}) + m_g \cdot \Delta l_g + m_g \cdot c_{kg} \cdot (t_{v2} - t_f) \quad (91)$$

$$m_g = \frac{Q_{kap}}{c_{pg} \cdot (t_f - t_{v1}) + \Delta l_g + c_{kg} \cdot (t_{v2} - t_f)} \quad (92)$$

Tab. 49 Hodnoty pro dosažení do vzorce (92)

$Q [J]$	$540 \cdot 10^6$
$c_p [J/(kg \cdot K)]$	373,038
$c_k [J/(kg \cdot K)]$	406,641
$\Delta l [J/kg]$	80100
$t_f [K]$	302,92
$t_{v1} [K]$	293,15
$t_{v2} [K]$	313,15

Po dosažení hodnot do rovnice (92) vychází hmotnost

$$m_g = \frac{540 \cdot 10^6}{373,038 \cdot (302,92 - 293,15) + 80100 + 406,641 \cdot (313,15 - 302,92)} = 6143 \text{ kg} \quad (93)$$

Celkový objem galia je roven

$$V_g = \frac{m_g}{\rho_g} = \frac{6143}{5904} = 1,040 \text{ m}^3 \quad (94)$$

Ve svém akumulátoru budu pro uložení akumulární látky používat 1027 trubic o vnitřním poloměru  $r_1 = 0,0138 \text{ m}$  a vnějším  $r_2 = 0,0167 \text{ m}$ . Pro celkové uložení trubic v akumulátoru budu používat šesti úhelníkovou geometrii, z důvodu podobnosti k tvaru mnou navrženého měřicího zařízení, a jasně daného počtu mezer mezi trubicemi pro konkrétní počet trubic. Délka jedné trubice pro daný objem a počet všech trubic je rovna

$$l_{celk} = \frac{V_g}{n_{trub} \cdot \pi \cdot r_1^2} = \frac{1,040}{1027 \cdot \pi \cdot 0,0138^2} = 1739,11 \text{ m} \quad (95)$$

Výsledek z rovnice (95) je celková délka jedné trubky, která by byla schopna uchovat celkový objem galia z rovnice (94). Při počtu 1027 trubic se pak celkový objem rozprostře, a délka jedné trubice tak je

$$l_{1trub} = \frac{l_{celk}}{n_{trub}} = \frac{1739,11}{1027} = 1,693 \text{ m} \quad (96)$$

Pro výpočet počtu trubic tak, aby byl vždy výsledný tvar uložených trubic pravidelný šesti úhelník, jsem použil rovnici posloupnosti takovou, že když bude jedna trubice uprostřed, tedy nultá řada  $a_0 = 1$ , počet trubic se v každé řadě okolo ní zvedne na základě vztahu

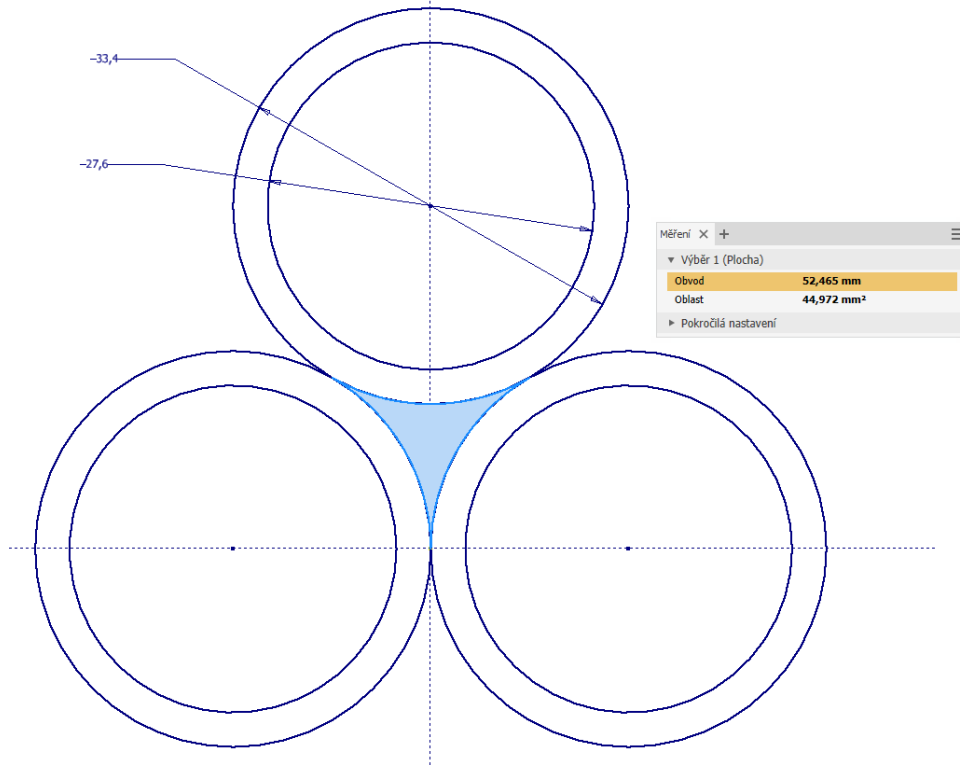
$$a_n = (a_{n-1} + 6 \cdot n), \quad \text{kde } n = 1, 2, \dots, \infty. \quad (97)$$

Pro určení sdíleného tepla v akumulátoru ve vybíjecím cyklu jsem si jako výstupní teplotu určil  $t_{vv2} = 28 \text{ }^\circ\text{C}$ . Rychlost vody v akumulátoru jsem určil stejným způsobem, jako v rovnici (14), tedy přes známost Reynoldsova čísla, kinematické viskozity a hydraulického průměru. Pro hydraulický průměr si musím určit obsah a obvod vnitřního prostoru mezi trubkami.

Střední teplota, pro kterou budu odečítat vlastnosti vody je rovna

$$t_s = \frac{(t_{v1} + t_{vv2})}{2} = \frac{(20 + 28)}{2} = 24 \text{ }^\circ\text{C} = 297,15 \text{ K} \quad (98)$$





Obr. 45 Obsah a obvod prostoru mezi trubkami v mnou navrhovaném akumulátoru

Hydraulický průměr jednoho meziprostoru v akumulátoru je tedy roven

$$d_H = \frac{4 \cdot A_{mp}}{O_{mp}} = \frac{4 \cdot 44,972}{52,465} = 3,42 \text{ mm.} \quad (99)$$

Tento hydraulický průměr mi charakterizuje prostor, kterým bude voda protékat okolo potrubí. Pro výpočet rychlosti proudu budu za Reynoldsovo kritérium dosazovat hodnotu  $Re = 237$ , a za kinematickou viskozitu  $\nu = 0,945 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ . Rychlost proudu vody v meziprostorech je tedy rovna

$$v_{aku} = \frac{Re_z \cdot \nu_{aku}}{d_{Hcelk}} = \frac{237 \cdot 0,945 \cdot 10^{-6}}{0,00342} = 6,53 \cdot 10^{-2} \text{ m/s} \quad (100)$$

Průtok jedním prostorem tak vychází roven

$$\dot{V} = A \cdot v = 2,94 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} \quad (101)$$

Sdílené teplo na jednu akumulární trubici je tak rovno

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{trub} &= \dot{V} \cdot \rho \cdot c \cdot (t_{vv2} - t_{v1}) = 2,94 \cdot 10^{-6} \cdot 997,6 \cdot 4180 \cdot (28 - 24) = \\ &= 97,996 \text{ W} \end{aligned} \quad (102)$$

Pro celkové sdílené teplo v celém akumulátoru vynásobím rovnicí (102) celkovým počtem trubíc

$$\dot{Q}_{celk} = \dot{Q}_{trub} \cdot n_{trub} = 97,996 \cdot 1027 = 100624,093 \text{ W} \quad (103)$$

Z tohoto výsledku vypočítám tepelný tok  $q_l$ , díky kterému si poté určím teploty na stěně akumulárních trubíc. Tepelný tok přes všechny akumulární trubice je roven

$$q_l = \frac{\dot{Q}_{celk}}{l \cdot n} = \frac{100624,093}{1,693 \cdot 1027} = 57,87 \text{ W/m} \quad (104)$$

Z Fourierovi povrchové podmínky platí pro vedení tepla ve válcové stěně platí rovnice

$$t_{ok,1} - t_1 = \frac{q_l}{2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot \alpha_{c,1}}, \quad (105)$$

$$t_1 - t_2 = \frac{q_l}{2 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}, \quad (106)$$

$$t_2 - t_{ok,2} = \frac{q_l}{2 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot \alpha_{c,2}}. \quad (107)$$

Po úpravě dostávám sadu rovnic pro výpočet neznámých veličin. Z rovnice (107) si vypočítám teplotu  $t_2$ , a tu dosadím do rovnice (106). Z té si dopočítám teplotu  $t_1$  na vnitřní straně akumulčních trubíc. Dosazením do poslední rovnice získám neznámý součinitel přestupu tepla na vnitřní straně akumulčních trubíc. Teplotu  $t_{ok,2}$  volím jako teplotu střední  $t_s$  (98) a za součinitel přestupu tepla  $\alpha_{c,2}$  volím součinitel vypočítaný ze 3. zkoušky 1. měření (Tab. 46).

$$t_2 = \frac{q_l}{2 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot \alpha_{c,2}} + t_{ok,2} = \frac{57,87}{2 \cdot \pi \cdot 0,0167 \cdot 136,71} + 297,15 = 301,18 \text{ K} \quad (108)$$

$$t_1 = \frac{q_l}{2 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} + t_2 = \frac{57,87}{2 \cdot \pi \cdot 30} \cdot \ln \frac{0,0167}{0,0138} + 301,18 = 301,24 \text{ K} \quad (109)$$

$$\begin{aligned} \alpha_{c,1} &= \frac{q_l}{2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot (t_{ok,1} - t_1)} = \\ &= \frac{57,87}{2 \cdot \pi \cdot 0,0138 \cdot (302,92 - 301,24)} = 397,92 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \end{aligned} \quad (110)$$

Parametrizací poloměrů akumulčního zásobníku a počtem těchto zásobníků se mi podařilo docílit hodnoty součinitele přestupu tepla  $\alpha_{c,1}$  blízké součiniteli přestupu tepla spočítanému pomocí kritériálních rovnic. Výpočet tepelného toku přes stěnu trubice určím z rovnice

$$\begin{aligned} \dot{Q}_v &= k_v \cdot l \cdot (t_{ok1} - t_{ok2}) = \frac{2 \cdot \pi \cdot (t_{ok1} - t_{ok2}) \cdot l}{\frac{1}{r_1 \cdot \alpha_{c,1}} + \frac{\ln \left( \frac{r_2}{r_1} \right)}{\lambda} + \frac{1}{r_2 \cdot \alpha_{c,2}}} = \\ &= \frac{2 \cdot \pi \cdot (302,92 - 297,15) \cdot 1,693}{\frac{1}{0,0138 \cdot 397,92} + \frac{\ln \left( \frac{0,0167}{0,0138} \right)}{30} + \frac{1}{0,0167 \cdot 136,71}} = 97,996 \text{ W} \end{aligned} \quad (111)$$

Celkový tepelný výkon přes stěny všech trubíc je roven

$$\dot{Q}_{celkv} = \dot{Q}_v \cdot n_{trub} = 97,996 \cdot 1027 = 100642,093 \text{ W} \quad (112)$$

Akumulační nádrž, do které akumulční trubice o daných rozměrech uložím, má vnitřní průměr  $d_1 = 1235,8 \text{ mm}$ , vnější průměr  $d_2 = 1247,8 \text{ mm}$  a výšku  $h = 2000 \text{ mm}$ . Prázdná místa v nádrži, kde se akumulční trubice nenachází, budou vyplněna izolací. Aby nedocházelo k velkým hydraulickým ztrátám v místě zúžení před vstupem teplotné látky do prostoru akumulčních trubíc, nebo naopak při rozšíření nad výstupem z prostoru akumulčních trubíc do volného prostoru nad nimi, bude po celé délce uvnitř nádrže přivařením ocelových desek kopírován tvar šestiúhelníku, který udává svazek všech trubíc.

## 6. Vyhodnocení a rekapitulace výsledků

Teoreticky jsem spočítal na základě kritériálních rovnic součinitele přestupu tepla pro nucenou konvekci pro proudění v trubkách. Spočítal jsem ho pro vnitřní prostor mezi trubicemi protékáný vodou pro tři zjištěné rychlosti. Údaje pro získání rychlostí pro tento výpočet, ale i další výpočty pro určení průtoku v měřícím zařízení, mi byly poskytnuty formou protokolů s naměřenými daty týmem zabývajícím se projektem Latentní ukládání tepla ve formě tepla nebo chladu v mezidenním cyklu, TK02030042. Tito součinitelé byli po výpočtu rovni

Tab. 50 Součinitelé přestupu tepla spočítání pomocí kritériálních rovnic

i	$\bar{v}_{imz}$ [m/s]	$\bar{\alpha}_k$ [W/(m <sup>2</sup> · K)]
1	0,0251	583,87
2	0,0989	707,45
3	1,499	757,53

Dále jsem spočítal součinitel přestupu tepla přirozenou konvekci pro svislou stěnu, která odpovídá vnitřní stěně akumulčního zásobníku. Za předpokladu užití galia jako akumulční látky vyšel součinitel přestupu tepla roven

$$\bar{\alpha}_k = 358,33 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)} \quad (113)$$

Navrhl jsem měřící zařízení, které bylo podrobně popsáno v kapitole 5.1.1. a 5.1.2. Dále v příloze jsou přiloženy všechny výrobní a sestavné výkresy k měřícímu zařízení. Postup zkoušek jsem popsal v kapitole 5.1.7. Vypočítané střední součinitele přestupu tepla a průtoky z měření uvádím i s jejich nejistotami v Tab. 51.

Tab. 51 Součinitelé přestupu tepla zjištění měřením

1. Zkouška	Součinitel přestupu tepla $\alpha_{2s}$ [W/(m <sup>2</sup> · K)]	Průtok $\dot{V}$ [m <sup>3</sup> /s] · 10 <sup>-6</sup>
1. Měření	(113,20 ± 0,02)	(21,68 ± 0,33)
2. Měření	(117,70 ± 0,04)	
3. Měření	(62,80 ± 0,02)	
2. Zkouška		
1. Měření	(48,21 ± 0,02)	(13,40 ± 0,24)
2. Měření	(127,42 ± 0,01)	(13,39 ± 0,31)
3. Měření	(145,63 ± 0,06)	
3. Zkouška		
1. Měření	(136,71 ± 0,06)	(4,00 ± 0,03)
2. Měření	(158,91 ± 0,10)	
3. Měření	(171,29 ± 0,12)	

Z porovnání vypočtených a naměřených hodnot lze pozorovat, že se dosti liší. Nepřesnosti mohou být způsobeny tím, že kritériální rovnice jsou často odvozeny pro

hladkou trubku, kdežto já pro výpočet uvažuji atypický tvar meziprostoru. Další nepřesnosti vznikali při měření, kde jsem měl nastavenou krátkou časovou periodu měření, a to 5 sekund. Děj v zařízení na grafu mohl vypadat ustáleně, ale při větším časovém měřítku mohla být celková neustálenost systému vidět lépe. Dalším nedostatkem byl rozdíl teplot na teplé linii zařízení. Teoreticky měl tento rozdíl být nulový, avšak při mém měření se tento rozdíl pohybuje v minimálním měřitelném pásmu měřidla. Pro příští měření bych tedy použil výkonnější čerpadlo pro zajištění většího průtoku, a tím menší teplotní difference.

Sdílené teplo mnou navrženého akumulátoru jsem spočítal v kapitole 5.2. na základě parametrizace akumulčních trubic tak, aby bylo respektováno měření a výpočty součinitelů přestupu tepla. Sdílené teplo v akumulátoru bylo rovno

$$\dot{Q} = 100642,093 \text{ W}.$$

Tohoto sdíleného tepla uvnitř navrženého akumulátoru bylo dosaženo za použití 1027 akumulčních trubic o vnitřním poloměru  $r_1 = 0,015 \text{ m}$  a vnějším  $r_2 = 0,0178 \text{ m}$ . Sestavný výkres mnou navrženého akumulátoru je uveden v příloze 10.

## 7. Závěr

---

Největší motivací pro akumulaci tepla je pozdější spotřeba nevyužitého tepla a tím tedy úspora energie. Tepelné zdroje jsou většinou dimenzovány na maximální spotřebu a v době nižšího odběru tím dochází k nevyužití této vyrobené tepelné energie. Naopak existují zdroje s nepravidelnou dodávkou energie, kdy může být největší množství energie dodáno právě v době nízké spotřeby. Akumulační zásobníky mohou toto teplo uložit pro pozdější využití v čase, kdy je to potřeba.

Na základě rešerše týkající se latentních akumulátorů jsem navrhl tři koncepční typy akumulátorů. Typ A, který používal akumulaci zásobníky typu koule, a měl by být navržen tak, aby se dal převážet v lodním kontejneru nákladní dopravou. Typ B, který byl stacionární, a používal velkou akumulaci nádrž, která byla rozdělena na tři sekce. Každá sekce obsahovala jiný PCM materiál na základě teplotních hladin každé sekce. Teplonosná látka protékala systémem potrubí umístěným přímo v PCM. Typ C jsem navrhl na základě možnosti provádět výpočty ve stylu výměníků tepla z již známých a ověřených metod. Jednou z dalších myšlenek pro tento typ také byla jednoduchá výměna PCM v případě potřeby. Dále jsem dohledal různé typy akumulací látek, které se dělí na organické, anorganické a eutektika, a nejčastější typy izolačních materiálů.

Navrhl jsem měřící zařízení pro nepřímé měření součinitele přestupu tepla. Na tomto zařízení jsem poté ověřil teoreticky vypočítané součinitele přestupu tepla za pomoci kritériálních rovnic. Navrhl jsem postup zkoušek, které zahrnovali měření průtoku studeného okruhu zařízení, a měření teplot na studeném a teplém okruhu tak, aby z těchto měření bylo dosažením do odvozených rovnic možné získat dané součinitele přestupu tepla.

Provedl jsem měření podle navržených postupů zkoušek a dospěl k jistým výsledkům. Celkově jsem provedl tři zkoušky, kdy jsem pro každou zkoušku provedl tři měření teplot a jedno měření průtoku. Následně jsem tyto výsledky měření porovnal s teoretickými výpočty.

Navrhl jsem akumulátor na základě zadaného tepelného výkonu 100kW a kapacity 150kWh. Tento návrh jsem provedl na základě zjištěných vypočtených a naměřených hodnot. Celkové sdílené teplo akumulátoru vypočítané na základě parametrizace odpovídalo danému zadání.

Získané výsledky jsem porovnal a diskutoval s tím, že jsem zjistil jisté nedostatky měřícího zařízení, které by mohly být napraveny v navazujících pracích.

## Použitá literatura

---

- [1] KABRHEL, Michal. Akumulace tepla: Thermal energy storage. V Praze: České vysoké učení technické, 2011. ISBN 978-80-01-04913-6.
- [2] MEHLING, Harald a Luisa F. CABEZA. Heat and cold storage with PCM: an up to date introduction into basics and applications. Berlin: Springer-Verlag, 2008. ISBN isbn978-3-540-68556-2.
- [3] Michał Turski, Kinga Nogaj, Robert Sekret. The use of a PCM heat accumulator to improve the efficiency of the district heating substation, Energy, Volume 187, 2019, ISSN 0360-5442, ScienceDirect. ScienceDirect [online]. Copyright © [cit. 29.07.2021]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544219315579>
- [4] Kontejner – Wikipedie. [online]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Kontejner>
- [5] Teplonosné kapaliny | Technický týdeník. TT | Technický týdeník [online]. Copyright © Business Media CZ Nádražní 32, 150 [cit. 16.12.2019]. Dostupné z: [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/teplonosne-kapaliny\\_12088.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/teplonosne-kapaliny_12088.html)
- [6] Gallium - online catalogue source - supplier of research materials in small quantities - Goodfellow. Supplier of materials for research and development - Goodfellow [online]. Copyright © Goodfellow 2008 [cit. 16.12.2019]. Dostupné z: <http://www.goodfellow.com/E/Gallium.html>
- [7] Technical data for the element Gallium in the Periodic Table. The Photographic Periodic Table of the Elements [online]. Dostupné z: <https://periodictable.com/Elements/031/data.html>
- [8] Gallium - Thermal Conductivity. Periodic Table of Elements [online]. Copyright © 2019 periodic [cit. 16.12.2019]. Dostupné z: <https://www.periodic-table.org/Gallium-thermal-conductivity/>
- [9] The material properties of pure Gallium, used in the simulations | Download Table. ResearchGate | Find and share research [online]. Copyright © ResearchGate 2019. All rights reserved. [cit. 16.12.2019].

- Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/The-material-properties-of-pure-Gallium-used-in-the-simulations\\_tbl1\\_239815568](https://www.researchgate.net/figure/The-material-properties-of-pure-Gallium-used-in-the-simulations_tbl1_239815568)
- [10] Gallium. Welcome to the NIST WebBook [online]. Copyright © [cit. 29.07.2021]. Dostupné z: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C7440553&Mask=2>
- [11] Minerální izolace [online]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/tepelne-izolace/298-mineralni-izolace>
- [12] Polystyrenové izolace [online]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/tepelne-izolace/297-polystyrenove-izolace>
- [13] Pěnové sklo [online]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/tepelne-izolace/300-penove-sklo>
- [14] Izolace z obnovitelných surovin [online]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/tepelne-izolace/301-izolace-z-obnovitelnych-surovin-drevo-celuloza-konopi-ovci-vlna-slama>
- [15] Izolace PUR, PIR a fenolická pěna [online]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/tepelne-izolace/299-izolace-pur-pir-a-fenolicka-pena>
- [16] RĚDR, Miroslav. Základy tepelné techniky: celost. vysokošk. učebnice pro hutnické fakulty. Praha: SNTL, 1991. ISBN 80-03-00366-0.
- [17] Fyzikální olympiáda – Aktuality [online]. Copyright © [cit. 29.07.2021]. Dostupné z: <http://fyzikalniolympiada.cz/texty/texttz.pdf>
- [18] Domovské stránky uživatelu [online]. Copyright ©yT [cit. 29.07.2021]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~kovarikp/TM/cviceni/sdileni.pdf>
- [19] Sdílení tepla [online]. [cit. 29.07.2021]. Dostupné z: <https://old.vscht.cz/uchi/ped/chi/chi.ii.ulohy.k11.sdileni.tepla.pdf>
- [20] Soubor naměřených dat projektu Technologické agentury České republiky, Latentní ukládání tepla ve formě tepla nebo chladu v mezidenním cyklu, TK02030042. Datové uložení projektu. Datum měření: 2.7.2020
- [21] INCROPERA, Frank. Fundamentals of Heat and Mass transfer. V USA, 2011. ISBN 13 978-0470-50197-9

- [22] Tepelné vlastnosti vody při tlaku nasycení. TZB-Nejnavštěvovanější odborný portál pro stavebnictví a technická zařízení budov [online]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/7-tepelne-vlastnosti-vody-pri-tlaku-nasyceni>
- [23] Linear interpolation calculator. [online]. Dostupné z: <https://www.johndcook.com/interpolator.html>
- [24] Akumulace tepelné energie při skupenských změnách látek. TZB-Nejnavštěvovanější odborný portál pro stavebnictví a technická zařízení budov [online]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/1005-akumulace-tepelne-energie-pri-skupenskych-zmenach-latek>
- [25] JANNA, William S. Engineering heat transfer. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, c2009. Heat transfer (Boca Raton, Fla.). ISBN 978-1-4200-7202-0.



## Seznam příloh

---

Příloha 1 – Výkres EXP – ALFA 001

Příloha 2 – Výkres EXP – ALFA 002

Příloha 3 – Výkres EXP – ALFA 003

Příloha 4 – Výkres EXP – ALFA 004

Příloha 5 – Výkres EXP – ALFA 005

Příloha 6 – Výkres EXP – ALFA 006

Příloha 7 – Výkres EXP – ALFA 007

Příloha 8 – Výkres EXP – ALFA 008

Příloha 9 – Výkres EXP – ALFA 009

Příloha 10 – Výkres AKU - 001

Příloha 11 – Soubor MS Excel – Měření a zpracování výsledků.xlsx