



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY**

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

**CHLADÍCÍ JEDNOTKA PRO PROJEKT BARMAN**

REFRIGERATING UNIT FOR THE BARMAN PROJECT

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Bc. Ondřej Kupka

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. Jakub Arm

BRNO 2020

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Kybernetika, automatizace a měření**

Ústav automatizace a měřicí techniky

**Student:** Bc. Ondřej Kupka

**ID:** 174338 **Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2019/20

**NÁZEV TÉMATU:**

## Chladicí jednotka pro projekt Barman

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Pro projekt Barman navrhnete, realizujete a na modelu otestujete chladicí jednotku. Pomocí komunikačního rozhraní vhodného bude možné získat aktuální informace o jednotce a zadat požadavek na výrobu. Jednotka bude vybavena vhodným řídicím systémem, který zajistí dodávku chladu dle harmonogramu vytvořeného z požadavků nadřazených systémů.

- 1) Definujte požadavky na funkce a vlastnosti chladicí jednotky.
- 2) Navrhnete jednotku (procesní schéma, 3D model, elektro schéma).
- 3) Realizujete jednotku dle návrhu.
- 4) Navrhnete softwarové vybavení a model chladicí jednotky.
- 5) Otestujete funkčnost na modelu chladicí jednotky a vyhodnotte vlastnosti.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dietmar Schmid. Řízení a regulace pro strojírenství a mechatroniku. 420 s. Europa Sobotáles, 2005. ISBN 97880-86706-10-8.

**Termín zadání:** 3.2.2020

**Termín odevzdání:** 1.6.2020

**Vedoucí práce:** Ing. Jakub Arm

**doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.**  
předseda oborové rady

### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Cílem diplomové práce sestrojení chladicí jednotky, která se stane součástí projektu Barman. Práce popisuje proces od definice požadavků, přes návrh řešení, výběr komponentů, vytvoření podkladu v podobě procesního schématu, 3D modelu a v poslední části samotnou stavbu, včetně popisu problémů a jejich řešení. Druhá část práce se zabývá návrhem modelu jednotky a následně simulací chladicího procesu. Model byl v práci použit dvěma způsoby. Prvním jako simulace reálného procesu a ve druhém jako model pro regulaci, který predikuje vývoj v chladících okruzích. Poslední částí práce je vytvoření SW vybavení z hlediska regulace. Regulátor pro svou funkci využívá výsledků z modelu a zároveň je vybaven souborem pravidel. Ovládání a regulace systému bylo testováno na soustavě tvořené modelem, který simuloval reálný proces a zhodnocení výsledků je závěrem této práce.

## **Klíčová slova**

Chlazení, chladicí jednotka, řídicí systém, model, simulace, 3D model, procesní schéma

## **Abstract**

The aim of this master's thesis was to create cooling unit which will become part of project Barman. Thesis describes process from definition of requirements, proposal, selection of components, PI and D diagram and in the last chapter the construction work. In the second part describes design of cooling unit's model and simulation of cooling process. The last part of the thesis is describing software of the cooling unit and its results.

## **Keywords**

Cooling, cooling unit, control system, model, simulation, 3D model, PI diagram

## **Bibliografická citace**

KUPKA, Ondřej. Chladící jednotka pro projekt Barman. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/127022>. Diplomová práce.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Ing. Jakub Arm.



## Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Řídicí systém pro laboratorní model destilační kolony“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: .....  
.....  
(podpis autora)

## Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Jakobovi Armovi a konzultantovi Ing. Václavu Kaczmarczykovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: .....  
.....  
(podpis autora)

# Obsah

1	Úvod .....	14
2	Požadavky, funkce a vlastnosti chladící jednotky .....	15
3	Návrh chladící jednotky .....	16
3.1	Koncept.....	16
3.2	Použitý hardware .....	16
3.2.1	Chladící zařízení .....	16
3.2.2	Nemrznoucí kapalina.....	17
3.2.3	Rozvody potrubí .....	18
3.2.4	Čerpadlo.....	18
3.2.5	Frekvenční měnič.....	20
3.2.6	Expanzní nádoba .....	20
3.2.7	Tepelný výměník.....	21
3.2.8	Řídicí systém .....	22
3.2.9	Procesní instrumentace.....	22
3.3	Procesní schéma.....	23
3.4	3D Model.....	24
3.5	Elektro schéma .....	26
3.5.1	Výběr rozvaděče .....	26
4	Realizace chladící jednotky .....	27
4.1	Kostra chladící jednotky .....	28
4.2	Těsnění vodovodního šroubení.....	28
4.3	Primární okruh .....	29
4.4	Sekundární okruh .....	32
5	Model jednotky .....	35
5.1	Teplo a přenos tepla .....	35
5.1.1	Teplota .....	35
5.1.2	Teplo .....	36
5.1.3	Měrná tepelná kapacita .....	36
5.1.4	Chladící kapacita .....	36
5.1.5	Přenos tepla .....	36
5.2	Co je modelování?.....	41
5.3	Úrovně modelování.....	41
5.3.1	Technologická úroveň.....	41
5.3.2	Fyzikální úroveň.....	42
5.3.3	Matematická úroveň .....	42
5.3.4	Algoritmická úroveň .....	42
5.4	Cíle modelu.....	42

5.5	Slovní model vazebního grafu.....	43
5.6	Matematický model přestupu tepla.....	44
5.6.1	Zdroj chladu .....	44
5.6.2	Celkový koeficient přestupu tepla.....	45
5.6.3	Přestup tepla rozvody .....	46
5.6.4	Tepelné ztráty čerpadla.....	47
5.6.5	Přestup tepla výměníkem.....	47
5.6.6	Akumulace chladu v primárním okruhu .....	48
5.6.7	Akumulace chladu v sekundárním okruhu .....	48
5.7	Algoritmický model.....	49
5.8	Algoritmický model primárního okruhu .....	49
5.8.1	Funkční blok chladícího zařízení .....	49
5.8.2	Funkční blok pro výpočet $\Delta Q$ , $\Delta T$ .....	49
5.8.3	Funkční blok pro výpočet $Q_u$ .....	50
5.8.4	Funkční blok čerpadla.....	51
5.8.5	Funkční blok pro výpočet $h$ .....	52
5.8.6	Funkční blok primárního a sekundárního okruhu.....	54
6	Simulace .....	55
6.1	Co je simulace? .....	55
6.2	Simulace průtoku a tlaku v systému .....	55
6.3	Simulace jednotky .....	56
6.3.1	Nedeterministický cyklus výpočtu.....	57
6.3.2	Simulace.....	57
6.3.3	Průběhy simulace.....	58
6.3.4	Zhodnocení simulace .....	58
6.3.5	Výsledky simulace .....	58
7	Vybavení řídicí jednotky .....	61
7.1	Vývojové prostředí Mervis IDE .....	61
7.2	Komunikace .....	62
7.2.1	1-Wire.....	63
7.2.2	Modbus TCP/IP.....	63
7.2.3	Analogové vstupy/výstupy .....	63
7.2.4	Digitální vstupy/výstupy .....	64
8	SW vybavení řídicí jednotky.....	64
8.1	Kalorimetr .....	65
8.2	Regulace průtoku v sekundárním okruhu .....	66
8.3	Řídicí algoritmus.....	67
8.3.1	Manuální mód.....	67
8.3.2	Automatický mód – bez požadavků.....	68

8.3.3	Automatický mód – s požadavky .....	68
9	Otestování funkčnosti modelu a softwarového vybavení.....	71
9.1	Periodické spouštění modelu.....	71
9.2	Zhodnocení - Automatický mód – bez požadavků .....	72
9.3	Zhodnocení - Automatický mód – s požadavkem.....	73
10	Závěr .....	76
11	Literatura .....	78
	Seznam symbolů, veličin a zkratk.....	81
12	Příloha A – simulační schéma primárního okruhu .....	82

## Seznam obrázků

Obrázek 3-1 Čerpadlo primárního okruhu [17] .....	19
Obrázek 3-2 Čerpadlo sekundárního okruhu [19] .....	19
Obrázek 3-3 Frekvenční měnič .....	20
Obrázek 3-4 Expanzní nádoba [20] .....	21
Obrázek 3-5 Spirála výměníku .....	21
Obrázek 3-6 PLC Neuron M503 [21] .....	22
Obrázek 3-7 3D Model - Pohled zepředu .....	24
Obrázek 3-8 3D Model - Pohled z boku .....	24
Obrázek 3-9 3D Model - Pohled zvrchu .....	25
Obrázek 3-10 3D Model - Pohled 1 .....	25
Obrázek 3-11 3D Model - Pohled 2 .....	25
Obrázek 3-12 3D Model - Pohled 3 .....	26
Obrázek 3-13 3D Model - Pohled 4 .....	26
Obrázek 4-1 Profil konstrukce [22] .....	28
Obrázek 4-2 Uchycení měřícího řetězce .....	30
Obrázek 4-3 Jednotka z boku .....	31
Obrázek 4-4 Uchycení čerpadla primárního okruhu .....	31
Obrázek 4-5 Pohled ze předu na primární okruh .....	33
Obrázek 4-6 Pohled z boku .....	34
Obrázek 4-7 Upevnění bezokapových svorek .....	34
Obrázek 5-1 Vedení tepla rovinou stěnou [18] .....	38
Obrázek 5-2 Vedení tepla válcovou stěnou [18] .....	39
Obrázek 5-3 Slovní model vazebního grafu .....	44
Obrázek 5-4 Koeficient přestupu tepla válcovou stěnou .....	45
Obrázek 5-5 Schéma přestupu tepla .....	46
Obrázek 5-6 Funkční blok chladícího zařízení .....	49
Obrázek 5-7 Funkční blok pro výpočet $\Delta Q$ , $\Delta T$ .....	50
Obrázek 5-8 Funkční blok pro výpočet $QU$ .....	51
Obrázek 5-9 Funkční blok čerpadla .....	52
Obrázek 5-10 Funkční blok pro výpočet $h$ .....	52
Obrázek 5-11 Funkční blok pro výpočet Reynoldsova čísla .....	53
Obrázek 5-12 Funkční blok pro výpočet Prandltova čísla .....	53
Obrázek 5-13 Funkční blok pro výpočet Nusseltova čísla .....	53
Obrázek 5-14 Funkční blok pro výpočet koeficientu přestupu tepla .....	54
Obrázek 5-15 Funkční blok primárního a sekundárního okruhu .....	55
Obrázek 6-1 Simulace průtoku v potrubí .....	56
Obrázek 8-1 Funkční blok kalorimetru .....	66

Obrázek 8-2 Funkční blok regulátoru průtoku.....	67
Obrázek 8-3 Manuální režim ovládní.....	68
Obrázek 8-4 Diagram regulátoru .....	70

## Seznam tabulek

Tabulka 3-1 Kusovník rozvaděče.....	27
Tabulka 6-1 Naměřené časy simulací.....	59
Tabulka 6-2 Přepočtené naměřené časy simulací.....	59
Tabulka 6-3 Chyby simulací.....	59
Tabulka 7-1 Dostupné komunikační protokoly.....	62
Tabulka 8-1 Coily požadavku .....	69
Tabulka 8-2 Registry požadavku .....	69

## Seznam grafů

Graf 6-1 Simulace $T_{vz} = 100$ ms, $K_{oef} = 1$ .....	60
Graf 6-2 $T_{vz} = 100$ ms, $K_{oef} = 10$ .....	60
Graf 6-3 $T_{vz} = 100$ ms, $K_{oef} = 100$ .....	61
Graf 9-1 Periodické spouštění simulace.....	72
Graf 9-2 Automatický mód, bez časového limitu .....	73
Graf 9-3 Automatický mód, s limitem 30 minut.....	73
Graf 9-4 Automatický mód, bez časového limitu, s požadavkem .....	74
Graf 9-5 Automatický mód, s limitem 30 minut, s požadavkem.....	75



# 1 ÚVOD

Tato diplomová práce se zabývá konstrukcí mobilní chladicí jednotky pro projekt Barman. Popisuje návrh jednotky a následně její stavbu. Dále práce pojednává o návrhu modelu jednotky a simulaci, na které byl v poslední části systém a jeho SW vybavení testováno.

V první části práce jsou definovány požadavky, funkce a vlastnosti, kterých by měla jednotka dosáhnout. Další částí je výčet komponent a odůvodnění proč byly pro návrh vybrány. V poslední části návrhu jsou komponenty imaginárně složeny za pomoci procesního schématu, 3D modelu a elektro schématu. Poslední kapitolou praktické části je samotná stavba a popis průběhu včetně problémů, které se v průběhu vyskytly a jejich řešení.

Druhá část práce popisuje návrh a vytvoření modelu chladicí jednotky. Postup zahrnuje všechny čtyři úrovně modelování od technologické úrovně, přes fyzikální úroveň, kde je popsána teorie, která je použita pro matematickou úroveň a poslední fáze pojednává o algoritmické úrovni, která z matematické vychází. V závěru druhé části je model testován za pomoci simulace a výsledky jsou vyhodnoceny.

Poslední částí práce je SW vybavení jednotky. Jednotku je možné řídit manuálně, nebo přenechat řízení automatu, který reguluje teplotu dle požadované teploty zvolené uživatelem a to s ohledem, nebo bez ohledu na požadavky od zbylých jednotek z projektu Barman.

## 2 POŽADAVKY, FUNKCE A VLASTNOTI CHLADÍCÍ JEDNOTKY

Před samotným návrhem byly definovány požadavky, funkce a vlastnosti, které má chladicí jednotka splnit, aby se mohla stát plnohodnotnou součástí komplexního projektu Barman.

Požadavky se dají rozdělit na dvě části. První částí je procesní, tedy výroba a distribuce chladu do systému a druhou částí je komunikace, potažmo řídicí systém.

Požadavky na procesní část tvoří zároveň funkci a to vyrobit a dodat dostatečné množství chladu pro všechny subsystémy projektu Barman, tak aby splňovaly podmínky dané recepturami. Na výsledném produktu, čímž je nejčastěji alkoholický nápoj, se podílejí jednotky sodovač, postmix, zásobník alkoholu, zásobník ledu a další. Všechny jednotky vyžadují dodávku chladu, aby mohly zajistit kvalitní výstupní produkt, kterým je vychlazený nápoj.

Požadavkem na komunikaci bylo využití ethernetové rozhraní, které je v průmyslu běžně používáno a zároveň není omezeno na licenci, nebo výrobcem řídicího systému. Smyslem komunikace je naplnit cíle Průmyslu 4.0 a to tak, aby všechny jednotky mohly mezi sebou komunikovat. Myšlenkou této práce je, že chladicí jednotka bude dostávat informace o aktuálním stavu a budoucích požadavcích z každé dílčí jednotky, které budou použity pro predikci potřebného množství chladu, které může být připraveno v předstihu.

Z požadavků na jednotku vyplývají vlastnosti, které jsou zapotřebí pro splnění všech bodů.

Systém dodává chlad pro výrobu nápojů, určených k přímé konzumaci. Použitá chladiva tedy nesmí být pro člověka nebezpečná. Chlad je dodáván v závislosti na aktuálním stavu a budoucích požadavcích jednotlivých jednotek. Pro splnění dodávky je tedy zapotřebí zásobník, ve kterém bude chlad shromažďován. Zásobník, stejně tak chladicí výkon jednotky, jsou omezené veličiny. Regulovat dodávku chladu je však možné nejen teplotou, ale také rychlostí proudění chladicího média. Z tohoto důvodu je další vlastností plynule regulovatelný tok v distribučním chladícím okruhu. Pro schopnost regulace musí být jednotka vybavena vhodnou procesní instrumentací, která bude zapojena do řídicího systému, který bude splňovat požadavky na komunikaci. Výše zmíněné slouží jako zadání pro návrh chladicí jednotky, o kterém pojednává následující kapitola.

## 3 NÁVRH CHLADÍCÍ JEDNOTKY

Na základě předchozí kapitoly vzniklo zadání, které bude v této kapitole rozvinuto do konceptu a rozloženo na jednotlivé části, které budou rozebrány v podkapitolách.

### 3.1 Koncept

Chladicí jednotka se bude skládat ze 2 okruhů, primárního a sekundárního, které budou hermeticky odděleny. Pro přestup tepla bude využito tepelného výměníku a zásobníku pro uchování chladu.

Primární okruh bude plnit výrobní funkci a zajišťovat výrobu chladu. Bude se skládat z čerpadla, zdroje chladu, výměníku, expanzní nádoby a procesní instrumentace. Okruh bude zcela uzavřen bez možnosti připojit další části

Sekundární okruh bude plnit funkci distribuce chladu do systému. Bude se skládat z čerpadla s možností regulace, přetlakového ventilu, zásobníku, procesní instrumentace a bezodkapových spojek, které budou sloužit k připojení rozvodů chladicího systému projektu Barman.

Přestup tepla mezi systémy bude zajištěn pomocí výměníku tepla.

### 3.2 Použitý hardware

Na základě konceptu jsme definovali jednotlivé prvky, které budou systém tvořit. Tato podkapitola obsahuje krátký rozbor problematiky každého daného prvku, výběr konkrétního typu a konečné zhodnocení výběru pro danou aplikaci.

#### 3.2.1 Chladicí zařízení

Chladit znamená úmyslně snižovat teplotu a je to proces opačný k vytápění. Základní dělení chladicích zařízení může být dle fyzikálního principu přebírání tepla:

- chladičem, (kompresorové chlazení)
- Absorpční chlazení
- termoelektrická (Peltierův článek)

Pro potřeby chladicí jednotky je nejvhodnější použít chladicí zařízení s kompresorem, protože má největší účinnost z výše zmíněných principů.

Jako chladicí zařízení byla zvolena laboratorní lednice KR-30A [1] od firmy PolyScience. Toto chladicí zařízení je možné použít k dosažení nízké teploty v

okruhu s nechladičím čerpadlem, což je tento případ, ale také jako podpůrné zařízení okruhu s chladičím čerpadlem.

Série KR je navržena na maximální výkon chlazení po celou dobu běhu, tudíž regulaci teploty musí provádět externí zařízení. Pro případ výpadku regulačního orgánu nebo poruchy cirkulačního čerpadla musí být v okruhu nemrznoucí kapalina. Typ KR-30A je možné použít pro okruhy, kde se bude teplota média pohybovat v rozmezí  $-20\dots+40^{\circ}\text{C}$ . Překročení v obou směrech jej může nevratně poškodit. Na to je třeba myslet při volbě kapaliny, která lednicí bude procházet nebo cirkulovat v okruhu. Provedení je průtokové - tzn. neobsahuje ponornou sondu pro chlazení kapaliny v libovolné nádobě, ale dvojici přírub pro připojení do chladičeho okruhu. Napájení je  $230\text{ V}/50\text{ Hz}$  a příkon  $575\text{ W}$  při teplotě kapaliny  $20^{\circ}\text{C}$ . Lednici je nutno umístit na zem nebo dostatečně tuhou konstrukci (váha  $33\text{ kg}$ ) [2].

Pro účely aplikace je použita lednice dostatečná, avšak lepší variantou by byla lednice s vyšším chladičím výkonem, nižší maximální teplotou, s možností regulace teploty, na kterou je schopna médium schladit. Lednice KR-30A však byla součástí již od samého počátku bez možnosti změny.

## 3.2.2 Nemrznoucí kapalina

Cílem chladičí jednotky je ochladit kapalinu pod bod mrazu vody a proto nemůže být jako médium voda použita.

### 3.2.2.1 Primární okruh

Pro primární okruh bude použit jako nemrznoucí kapalina Fridex, což je nemrznoucí kapalina na bázi etylenglykolu. Kapalina se používá v průmyslu, v klimatizacích nebo v automobilech.

Výhodou je, že při silné koncentraci zamrzá až při  $-50^{\circ}\text{C}$  a zároveň se dá dle potřeby neomezeně zředit destilovanou vodou, čehož bude využito pro vytvoření směsi, která zamrzne při teplotě nižší než  $-30^{\circ}\text{C}$ , přičemž výkon chladičeho zařízení je  $-20^{\circ}\text{C}$ .

Nevýhodou fridexu je jeho jedovatost. Ohrožení na životě vzniká až při konzumaci většího množství, které má vysokou koncentraci. Fridex má však sladkou chuť a proto může k požití dojít bez povšimnutí. Proto je použit pouze v primárním okruhu, který nepřichází do styku s výsledným produktem – nápojem a je zároveň hermeticky oddělen od sekundárního okruhu.

### 3.2.2.2 Sekundární okruh

Pro sekundární okruh bude jako nemrznoucí kapalina použita solanka. Solanka je nasycený roztok soli ve vodě, v koncentraci kolem 20-23% soli.

Výhodou solanky je, že není jedovatá a zamrzá až kolem  $-20^{\circ}\text{C}$ .

Nevýhodou je její agresivní charakter, který je dán solí a může mít za následek oxidaci železných částí systému.

### 3.2.3 Rozvody potrubí

Rozvody potrubí budou realizovány kombinací několika materiálů. Základem budou měděné fitinky se šroubením, které budou tvořit hlavní části rozvodů a zároveň v nich budou umístěny měřící řetězce procesní instrumentace. Tyto pevné celky budou pevně spojeny s konstrukcí a následně dle potřeby spojeny flexibilními hadičkami, nebo armovanými hadicemi. Dle potřeby může být použito plastové potrubí s návarky, které můžou být přes šroubení připojeny k měděným fitinkům.

### 3.2.4 Čerpadlo

Čerpadlo je zařízení, které dodává energii médiu, které jim protéká. Existuje celá řada principů, které jsou pro funkci čerpadla použity. Čerpadla můžeme rozdělit na objemová, odstředivá a proudová. Všechny typy jsou zpravidla poháněna motorem.

Práce si neklade za cíl rozebrat problematiku čerpadel, která je značně obsáhlá. Proto se zaměřím pouze na odstředivá čerpadla, která byla použita v obou okruzích.

Odstředivé čerpadlo je čerpadlo, které využívá účinek odstředivé síly ke zrychlení čerpaného média, které se následně zbrzdí v difuzoru. Zbrzděním se získaná kinetická energie přemění na tlakovou. Přeměna probíhá se ztrátou. Čerpadlo se skládá z oběžného kola s lopatkami, které se otáčí v spirálovité komoře [3].

Pro oba okruhy bylo zvoleno odstředivé čerpadlo a to z důvodu jednoduché konstrukce, nepoškození v případě ucpání potrubí a dostatečnému výkonu při nízkých pořizovacích nákladech.

#### 3.2.4.1 Primární okruh

Pro primární okruh bylo vybráno oběhové čerpadlo Werter TRIO 25-4-180 s možností manuální regulace průtoku (3 stupně). Čerpadlo bylo v době zadání již k dispozici a pro primární okruh bylo dostatečné. Výhodou čerpadla je, že je navrženo, aby pracovalo se směsí 50% glykolu, což bude směs primárního okruhu.

**Parametry čerpadla:**

Max. výtlačná výška 4 m  
Max. příkon 60 W



Obrázek 3-1 Čerpadlo primárního okruhu [17]

### 3.2.4.2 Sekundární okruh

Pro sekundární okruh bylo vybráno odstředivé čerpadlo MOUSE Q 60, které jsem vybral na základě dostatečného výkonu a konstrukčním charakteristikám. Hřídel čerpadla je z nerezové oceli, což je vhodný materiál při použití solanky jako oběhového média.

Vhodnější by bylo použít čerpadlo, které je celé z nerezové oceli. Na trhu jsou tato čerpadla k dostání, avšak cena je násobně vyšší, než u použitého čerpadla.

#### Parametry čerpadla:

Max. výtlačná výška 32 m  
Max. příkon 370 W  
Průtok 2100 l/h



Obrázek 3-2 Čerpadlo sekundárního okruhu [19]

### 3.2.5 Frekvenční měnič

Frekvenční měnič je zařízení, které mění vstupní proud s určitou frekvencí na výstupní elektrický proud s jinou frekvencí. Nejčastější použití frekvenčního měniče je pro plynulou regulaci otáček asynchronního motoru [4].

Frekvenční měnič bude použit pro regulaci otáček motoru čerpadla v sekundárním okruhu a tím regulaci toku oběhového média.

Použité čerpadlo má jednofázový vstup, avšak díky otevřené svorkovnici jsme schopni zapojení zaměnit a vytvořit třífázový motor. Úprava spočívá v odstranění kondenzátoru, který se stará o posunutí fáze o 90°. Postup není dokonalý, protože měnič počítá s posunem 120°. K danému řešení jsem přistoupil z důvodu použitého čerpadla. Pro tak malé čerpadlo jsem nenašel vhodnou alternativu, která by byla napájena třemi fázemi.

Pro aplikaci jsem zvolil měnič společnosti Nidec C200-01-2-00033-A-0,55kW. Specifický důvod pro výběr toho měniče není, protože na trhu je spousta měničů, které by splnili funkci zcela stejně. Důvod byl tedy praktický. Nidec má velice dobře zpracované prostředí pro nastavení měniče, kdy se uživatel snadno k měniči připojí USB převodníkem. Další výhodou je, že dealer sídlí v areálu Technologického parku a je možné ho v případě potřeby osobně navštívit a případnou podporu řešit osobně.



Obrázek 3-3 Frekvenční měnič

### 3.2.6 Expanzní nádoba

Expanzní nádoba zachycuje změny objemu vody v soustavě způsobené změnou teploty (zabraňuje tím zvětšení tlaku v soustavě). Udržuje přetlak v soustavě v požadovaných mezích. Voda se rozpíná díky objemové roztažnosti [5].

Pro primární okruh byla použita expanzní nádoba z automobilu Škoda Fabia. Rozměrově byla vhodná pro danou aplikaci a navíc je vyrobena z odolného materiálu, který odolá případné agresivitě nemrznoucí směsi.



Obrázek 3-4 Expanzní nádoba [20]

### 3.2.7 Tepelný výměník

Výměníky tepla se využívají pro předávání tepla všude tam, kde není možné předávat teplo přímo ze zdroje do spotřebiče. Typickými příklady jsou odlišné teplotnosné látky (nemrznoucí kapalina - voda, otopná voda - teplá voda, centrální zásobování teplem - topná voda v objektu, apod.)

Trubkové tepelné výměníky jsou jednoduchá zařízení sestávající z jedné nebo více stočených trubek, kde přestupní plochu tvoří vnější plášť této trubky. Typickým příkladem těchto výměníků jsou integrované tepelné výměníky v zásobnících teplé vody nebo v akumulčních nádržích. Tyto výměníky jsou jednoduché, mají malou tlakovou ztrátu (jedná se pouze o trubku) a jsou levné [6].

Trubkový výměník bude použit i v tomto projektu. Bude se skládat z nerezové spirály a akumulční nádrže. Nerezová spirála bude použita z výčepního zařízení pro chlazení piva a sodovek.



Obrázek 3-5 Spirála výměníku



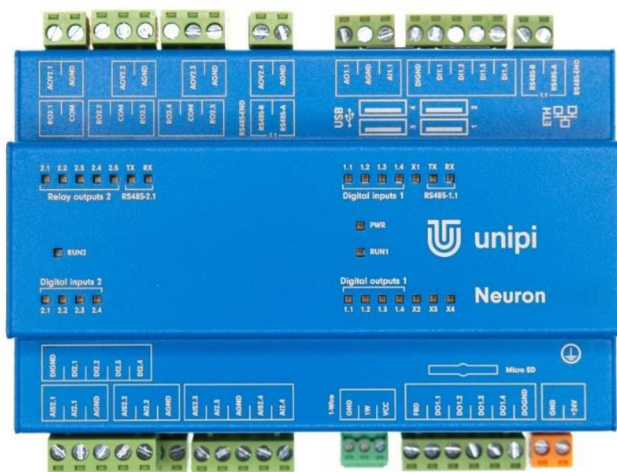
### 3.2.8 Řídicí systém

Jako řídicí systém bude sloužit programovatelný logický automat PLC (Programmable Logic Controller). Jedná se kompaktní počítač, který je obecně vybaven digitálními a analogovými vstupy/výstupy a komunikacemi, které můžou být na ethernetovém rozhraní (Modbus TCP/IP), nebo na sběrnice (RS485).

Pro aplikaci jsem se rozhodl použít PLC českého výrobce UniPi. Stejně jako u měniče by mohl být použit kterýkoliv jiný výrobce (Siemens, Schneider Electric), ale rozhodl jsem se tak, protože na rozdíl od velkých výrobců je jejich řešení zcela otevřené. Uživatel může využít vývojového prostředí Mervis IDE, ve kterém se programuje řídicí program ve strukturovaném textu, nebo funkčních blocích a Mervis IDE na základě toho vytvoří runtime, který aplikaci řídí. Druhou možností, která může být použita paralelně s runtimem je vytvoření skriptu v programovacím jazyce Python a otevírá se tak cesta k nestandardním řešením, která nejsou v uzavřených systémech možná.

Pro řízení bude použito PLC Neuron M503, které bylo k dispozici a zároveň splňuje požadavky na řídicí systém.

Podrobnější informace o vývojovém prostředí a práce s PLC je popsána v dalších kapitolách.



Obrázek 3-6 PLC Neuron M503 [21]

### 3.2.9 Procesní instrumentace

Kapitola procesní instrumentace popisuje snímače, které jsou v systému použity a to včetně zhodnocení vhodnosti a použitelnosti daných snímačů.

#### 3.2.9.1 Snímače teploty

Snímání teploty bude provedeno na 5 místech. Po dvou čidlech v každém okruhu a jedno čidlo pro snímání okolní teploty.

Dva snímače v chladících okruzích budou plnit dvě funkce. První je funkce samotného měření teploty. Teplotu je nutné znát jak pro regulaci, tak pro ochranu. Médium primárního okruhu je naddimenzováno, takže k zamrznutí dojít nemůže, ale mohlo by se poškodit chladící zařízení, které by nemělo chladit pod  $-20^{\circ}\text{C}$ . Sekundární okruh se solankou naopak zamrznout může. Některé zdroje udávají bod tuhnutí až  $-21^{\circ}\text{C}$ . Údaj jsem neověřil experimentem, ale protože se traduje, že teplota  $0^{\circ}\text{F}$  byla odvozena na základě bodu tuhnutí solanky a převod do stupňů celsia je přibližně  $-17^{\circ}\text{C}$ , budu počítat se strážlivým odhadem  $-15^{\circ}\text{C}$ .

Druhou funkcí a důvod nasazení dvou snímačů v každém okruhu je kooperace se snímačem průtoku. Snímače teploty jsou umístěny před a za zdroji chladu a společně se snímačem průtoku tvoří kalorimetr. Takto budu schopen spočítat energetické toky v systému a nepracovat pouze s teplotou.

V instalaci budou použité snímače DS18B20, které komunikují po sběrnici 1-Wire. Jedná se o ekonomickou variantu s chybou měření maximálně  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ . S ohledem na rozpočet se jedná o nejlepší volbu.

### **3.2.9.2 Snímače průtoku**

Snímače průtoku budou mít v systému stejně jako snímače teploty dvojí úlohu. Jednak snímat samotný průtok a zároveň společně se snímači teploty tvořit kalorimetr.

Snímače průtoku byly zakoupeny v Číně a nenesou žádné relevantní označení. Princip snímače je turbínkový a má přesnost  $\pm 5\%$  z maximálního rozsahu 25 l/min. Jedná se o ekonomickou variantu, která do budoucna může být nespolehlivá z důvodu agresivního media, které může narušit plasty, použité ve snímači. S ohledem na rozpočet se jednalo o nejlepší volbu.

### **3.2.9.3 Snímače tlaku**

Snímač tlaku bude mít informativní charakter. Nepředpokládám, že by v okruzích mohlo dojít k nárůstu nad 10 barů, což je maximální tlak dovolený pro nejslabší články v okruhu. Z mého pohledu by každý proces, který pracuje s kapalinami, které jsou nuceně hnány čerpadlem, měl být vybaven snímačem tlaku.

Bude použit manometr zakoupený v Číně, který nenesou označení a jediný známý údaj je rozsah, který by měl být 5 barů.

## **3.3 Procesní schéma**

Procesní, neboli liniové schéma, také označováno jako P&ID schéma (Piping & Instrumentation Diagrams), jsem vytvořil v programu WS CAD. Jedná se o placený program, avšak díky školní licenci, jsem mohl tento software využít.

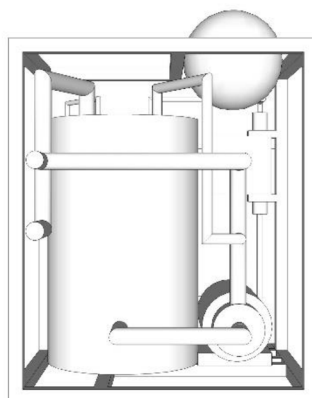
Procesní schéma se používá pro zjednodušení celého projektu na jednotlivé technologie, které jsou zaznamenány danou značkou, která může obsahovat zkratkovitý popis. Výsledkem je schéma, ve kterém se každý rychle umí zorientovat, pochopit závislosti a procesní umístění technologií. Vizualizace je také vhodná pro kontrolu, že proces je úplný a nechybí mu žádné části.

Procesní schéma je součástí této práce a nachází se v přílohách.

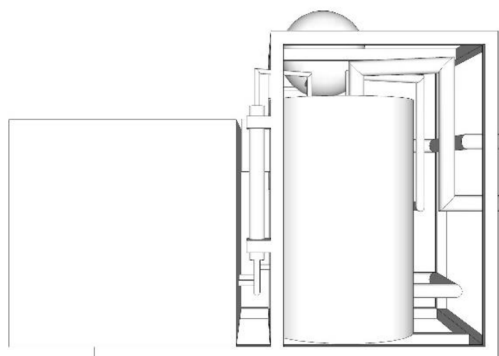
### 3.4 3D Model

Z procesního schématu vyplývá, jak budou komponenty vzájemně propojeny, avšak nedává žádnou představu o prostorové orientaci. Pro tento účel je možné vytvořit 2D výkresy z více pohledových stran, avšak s nástupem moderní výpočetní techniky jsou dnes standardem 3D modely.

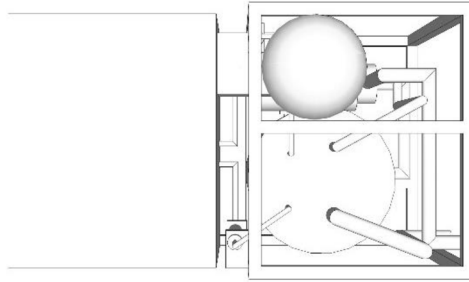
Jak je popsáno v kapitolách výše, před samotnou stavbou jednotky byly některé díly předem dány a některé jsem vybral dle specifikace. Měl jsem tedy rozměry základních prvků, ze kterých se jednotka bude skládat. Dále jsem věděl jaké typy rozvodů budou pro stavbu použity. Na základě těchto informací bylo možné vytvořit v první fázi náčrtky, které následně byly převedeny do 3D modelu.



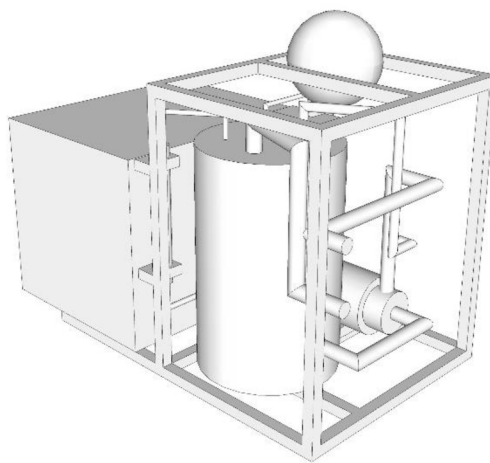
Obrázek 3-7 3D Model - Pohled zepředu



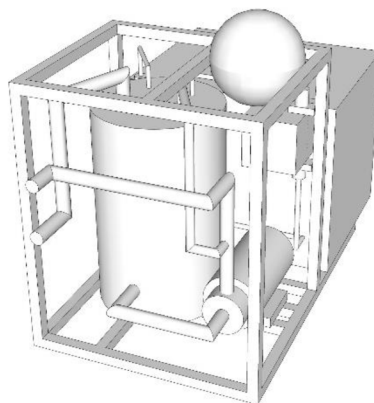
Obrázek 3-8 3D Model - Pohled z boku



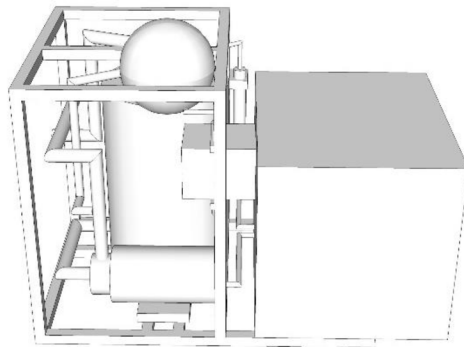
**Obrázek 3-9 3D Model - Pohled zvrchu**



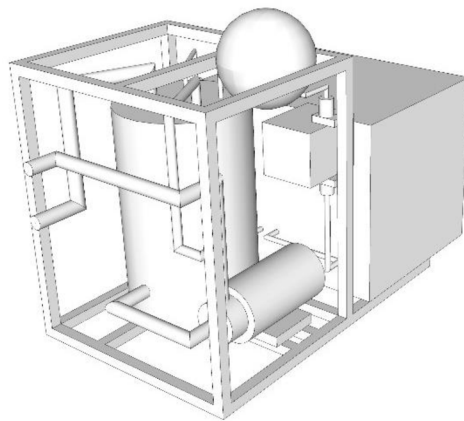
**Obrázek 3-10 3D Model - Pohled 1**



**Obrázek 3-11 3D Model - Pohled 2**



**Obrázek 3-12 3D Model - Pohled 3**



**Obrázek 3-13 3D Model - Pohled 4**

## **3.5 Elektro schéma**

Elektro schéma rozvaděče bylo vytvořeno v projektu ProfiCAD. Program je určený zejména pro elektro (silnoproud i slaboproud), je ale úspěšně využíván i pro hydraulické, pneumatické a jiné druhy technické dokumentace. Projekt rozvaděče je v příloze této práce.

Program ProfiCAD, má obsáhlou nápovědu, včetně instruktážních videí, ze kterých jsem při projekční činnosti čerpal. Musel jsem si například namalovat některé součástky, které nejsou součástí programu (PLC UniPi, PC konektor a další).

### **3.5.1 Výběr rozvaděče**

Na základě elektro schématu jsem spočítal počet standardizovaných pozic na DIN liště všech použitých součástek a zařízení. Na základě výpočtu jsem byl schopen

vybrat vhodnou rozvaděčovou skříň. Celkově je potřeba 37 pozic na DIN liště. Standardizovaný rozměr jedné pozice se rovná 17,5 mm. Celková potřebná délka tedy je 647,5 mm. Soupis pro výpočet je v tabulce níže a celkový soupis součástek, vygenerovaný.

Vybral jsem plastový rozvaděč značky P-BOX 4060, s rozměry 400x600x200 mm a stupněm krytí IP65.

Rozvaděč bude umístěn z boku jednotky a připevněn k hliníkovým profilům.

Typ	DIN pozice	Kusů	Počet kusů	Délka [mm]
PLC M503	8	1	8	140
Zdroj 24 VDC	2	1	2	35
Zdroj 12 VDC	2	1	2	35
1-WIRE HUB	3	1	3	52,5
Stykač	1	4	4	70
Jistič	1	1	1	17,5
Pojistky	0,5	6	3	52,5
Svorky	0,5	18	9	157,5
Měnič	5	1	5	87,5
			<b>Celkem</b>	<b>37</b>
				<b>647,5</b>

Tabulka 3-1 Kusovník rozvaděče

## 4 REALIZACE CHLADÍČÍ JEDNOTKY

Součástí zadání je realizace chladicí jednotky. Realizace proběhla v omezeném rozsahu z důvodu zamezení přístupu k jednotce. Bylo možné zkonstruovat celou jednotku a otestovat primární a sekundární okruh v provozu. V dalších podkapitolách bude postup konstrukce popsán, budou zmíněny problémy, které nastaly a jejich řešení.

Jednotka se skládá z primárního a sekundárního okruhu, které jsou propojeny výměníkem. V obou okruzích jsou čerpadla zajišťující průtok média. Sekundární okruh je opatřen přetlakovým ventilem, který v případě nárustu tlaku odvede tekutinu zpět do akumulární nádrže výměníku. Sekundární okruh je dále ukončený bezodkapovými spojkami, které slouží k připojení chladicí jednotky k zátěži, kterou tvoří sub systémy projektu Barman.

Během návrhu i konstrukce byl brán důraz na kompaktnost celého zařízení a jeho mobilitu. Celá jednotka váží přes 30 kg, ale díky platformě, která je vybavená pogumovanými kolečky je velice jednoduché s jednotkou pohybovat.

Pro praktické použití je třeba, aby bylo jednotku nejen snadno přemístit, ale také snadno připojit ke zbytku systému a připravit k používání. To je možné díky bezodkapovým spojkám, nálevce, která je součástí výměníku a slouží k naplnění sekundárního okruhu a expanzní nádobě, která vyrovnává tlak v primárním okruhu a zároveň se přes ní systém snadno plní.

## 4.1 Kostra chladicí jednotky

Kostra chladicí jednotky je vytvořena z hliníkového stavebnicového systému s šířkou profilu 40 mm. Kostra je tvořena platformou, ke které jsou uchyceny pogumovaná kolečka, která jsou vybavena brzdou. Platforma tvoří základ pro čtyři stejné nohy, které jsou spojeny vrchním rámem.

Stavebnicový systém byl použit pro svou modularitu a schopnost připevnit na strany cokoliv díky předpřipraveným drážkám.



Obrázek 4-1 Profil konstrukce [22]

## 4.2 Těsnění vodovodního šroubení

Vzhledem k počtu spojů, které se v systému nacházejí, bylo třeba zvážit, jak spoje utěsnit. Těsnění musí odolávat teplotám v rozpětí -20°C až 30 °C, což jsou předpokládané teploty, kterým může být systém vystaven. Variant, jak těsnit vodovodní šroubení, je v zásadě pět:

- Spoje s gumovým těsněním
- Koudel
- Teflonová páska
- Těsnicí vlákno

- Tekuté těsnění

První pokusy jsem provedl s teflonovou páskou. Její výhodou je nízká cena, ale nevýhod je hned několik. První nevýhodou je nutná zkušenost pro vytvoření kvalitního spoje. Bylo potřeba četných pokusů, abych vytvořil kvalitní spoj, který by odolal zkoušce, kdy jsme spoj připojili ke stlačenému vzduchu a ponořili pod vodu. Další nevýhodou je nemožnost korekce vytvořeného spoje. Po utěsnění již není možné se závitem pootočit zpět pro případné vyrovnání, jinak je těsnost nevratně porušena a člověk může začít znovu.

Po těchto neúspěšných pokusech jsem se rozhodl zvolit dražší variantu v podobě tekutého těsnění. Jedná se modrou tekutinu husté konzistence, která se nanese do vnitřního i vnějšího závitu. Těsnost je zabezpečena po několika minutách a plné vytvrzení spoje trvá několik hodin. Se spojem se dá pootočit bez ztráty těsnosti a hlavní výhodou je nepoměrná jednoduchost k ostatním řešením. Vyšší cena se vrátí hned při prvním netěsném spoji, protože čas a námaha spojená s opravou snadno vyváží vyšší náklady. Pokud bude čtenář někdy řešit těsnění vodovodního šroubení, tak vřele doporučuji využít tohoto řešení.

Zbylé možnosti těsnění vodovodního šroubení mají podobné nedostatky jako teflonová páska a proto nebyly ani testovány.

Posledním druhem je použití spoje s gumovým těsněním, což je nejjednodušší způsob těsnění vodovodního spoje za pomoci gumového kroužku, který přilehne na rovné plochy obou spojovaných částí. K tomu ale musejí být konce šroubení uzpůsobeny, musejí mít hladké dosedací plochy, mezi které se gumové těsnění vkládá.

Dostatečným utažením šroubení se gumové těsnění zmáčkne a vytvoří vodotěsný spoj. Používá se, pokud vyžadujeme snadné rozebírání a používá téměř všude, kde ke spojení slouží převlečná matice [7].

Tento způsob jsem použil na několika místech a to hlavně z důvodu možnosti danou část snadno rozebrat a poté zase složit.

### **4.3 Primární okruh**

Primární okruh se skládá z chladícího zařízení, čerpadla, rozvodů, expanzní nádoby a nerezové spirály, která slouží pro přestup tepla mezi primárním a sekundárním okruhem výměníku.



Pro snímače jsem se rozhodl vytvořit měřící potrubí. Potrubí je tvořeno snímačem průtoku a dvěma T fitinky. Do prvního jsem použil nerezovou jímku pro snímač teploty a druhý posloužil přímo pro snímač tlaku. Zamýšlený snímač tlaku bohužel z Číny nedorazil včas a proto jsem provizorně použil ručičkový manometr s rozsahem 10 barů. Měřící řetězec je umístěn za chladícím zařízením. Druhý snímač teploty je za čerpadlem, před chladícím zařízením. Poloha snímačů tvoří pomyslný vstup a výstup ze systému a jsem schopen dopočítat rozdíl teplot a díky průtokoměru tok energie.

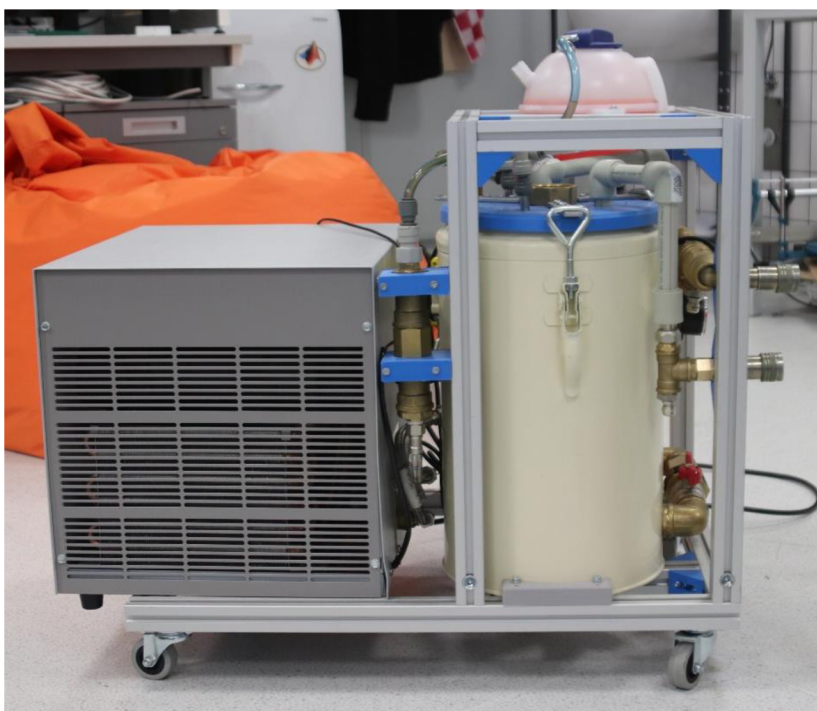


**Obrázek 4-2 Uchycení měřícího řetězce**

Měřící potrubí je uchyceno ke kostře jednotky za pomoci 3D výtisků, které pochází ze 3D tiskárny a byly vytvořeny na míru projektu.

Z měřícího potrubí pokračuje okruh do nerezové spirály, která je umístěna uvnitř akumulární nádoby primárního okruhu a společně tvoří výměník. Za nerezovou spirálou je expanzní nádoba, která tvoří nejvyšší bod primárního okruhu a díky víčku slouží také k plnění primárního okruhu. Na expanzní nádobu navazuje průtokové čerpadlo a na jeho výstupu je T fitinka, ve kterém je umístěna nerezová

jímka a čidlo teploty. Z čidla teploty je vyvedena armovaná hadice do chladícího zařízení, čímž je okruh uzavřen.



**Obrázek 4-3 Jednotka z boku**



**Obrázek 4-4 Uchycení čerpadla primárního okruhu**

Konstrukce primárního okruhu se obešla bez větších komplikací.

Prvním problémem bylo samotné plnění okruhu, kde se původně s expanzní nádobou nepočítalo, ale ukázalo se, že systém nepůjde naplnit bez vzduchových bublin, aniž by byla expanzní nádoba použita. I přes následné použití expanzní nádoby byl problém systém zavodnit. Domněnka, že bude stačit naplnit expanzní nádobu tekutinou a zavodněné čerpadlo již bude distribuovat kapalinu do zbytku systému, se ukázala jako milná. Bylo třeba vytvořit podtlak a nasát kapalinu do celého systému. Díky mírné jedovatosti bylo možné vyvinout podtlak ústy a nasát tekutinu skrz okruh. Řešení tedy bylo v celku jednoduché, avšak při použití toxického média by mohlo znamenat velký problém, protože vyvinout potřebný podtlak je až překvapivě problematické.

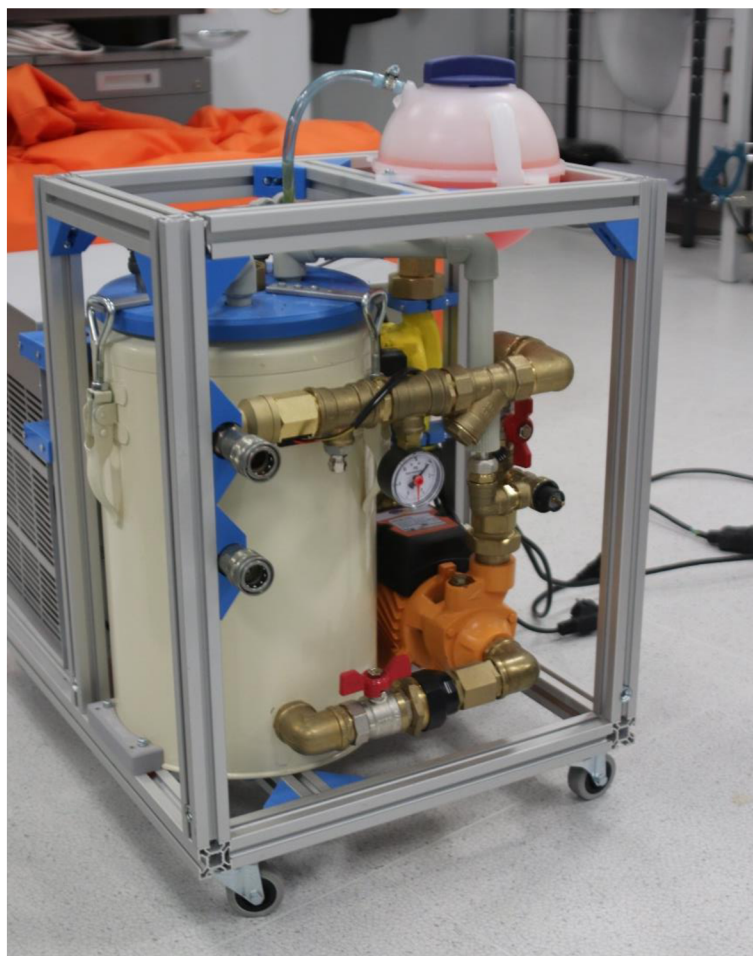
Druhým problémem byla těsnost jednoho spoje. Při počtu spojů v celém systému se jednalo o očekávaný problém a ukázala se zde konstrukční výhoda použitých převlečných matic v některých částech systému. Oprava tak byla velice jednoduchá, protože potrubí může být snadno a rychle rozpojeno v místě s převlečnou maticí, která není těsněna přes závit, ale gumovým těsněním a tedy rozebíratelná.

## 4.4 Sekundární okruh

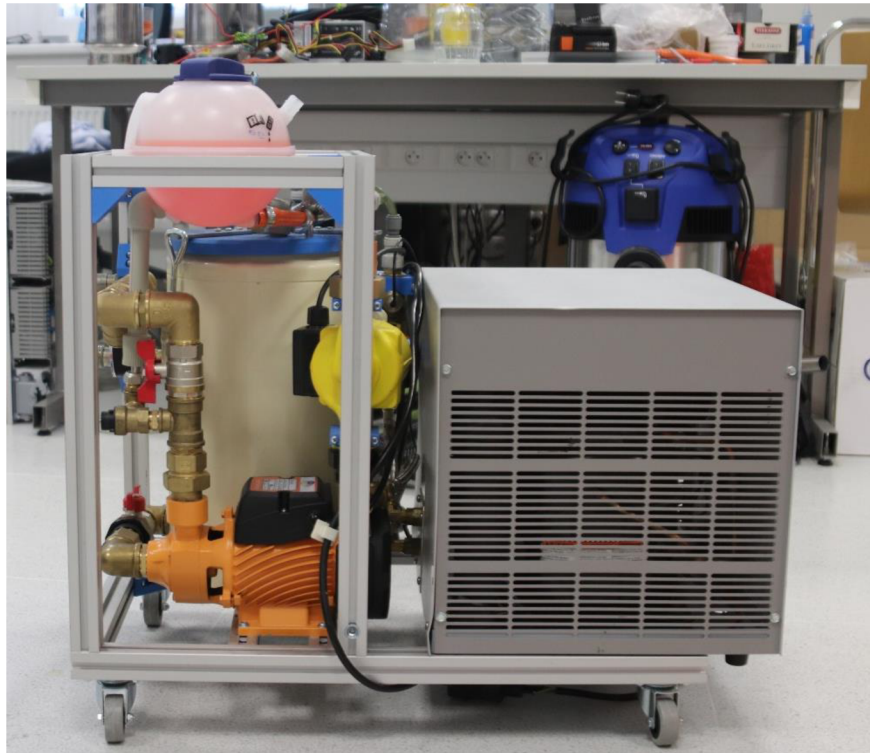
Sekundární okruh se skládá z akumulární nádrže, která slouží také jako výměník, z čerpadla, přetlakového ventilu, který při nárustu tlaku odvádí vodu zpět do akumulární nádrže, měřící instrumentace a bezodkapových spojů, přes které se systém připojuje k dalším jednotkám projektu Barman. V tomto okruhu není zapotřebí expanzní nádoba, protože její funkci plní akumulární nádrž.

Během stavby sekundárního okruhu bylo před měřící řetězec přidáno sítko a to ze dvou důvodů. Prvním je samotná filtrace pevných částí a druhá prodloužení souvislé rovné části před měřícím řetězcem. V okruhu byl použit turbínkový snímač průtoku, který je určen pro měření laminárního průtoku. V praxi používaný poměr říká, že před měřením by měla být souvislá část o stejném průměru, délky troj až čtyř násobku průměru. Tuto konstrukční vlastnost systém splňuje a sítko navíc můžeme považovat jako laminátor.

Uchycení jednotlivých částí ke kostře bylo za pomoci výtisků z 3D tiskárny, které byly navrhnuté na míru.



**Obrázek 4-5 Pohled ze předu na primární okruh**



**Obrázek 4-6 Pohled z boku**



**Obrázek 4-7 Upevnění bezokapových svorek**

## 5 MODEL JEDNOTKY

Modelování a simulace jsou velmi užitečné nástroje, díky kterým můžeme dělat předpovědi, odhadovat dopad různých zásahů do systémů a lépe plánovat budoucí akce. Kromě těchto konkrétních výsledků jsou však modely velmi důležité i na mentální úrovni – pouhá práce s modely výrazně ovlivňuje náš způsob myšlení a nahlížení na svět. Modely nás nutí jasně formulovat naše mlhavé představy. Simulace nás konfrontují s důsledky těchto představ [8].

Pro získání modelu jsem musel nejdříve obšírně prozkoumat tepelné systémy, kde jsem našel souvislosti v podobě definic a vzorců. Dostal jsem mlhavou představu jak by systém mohl fungovat. Dalším krokem bylo model navrhnout, k tomuto účelu jsem se rozhodl použít vazební grafy. Díky jejich vlastnosti analogie s dalšími fyzikálními systémy, jsem byl schopen konfrontovat své myšlenky, předpoklady a vytvořit zpětné vazby, na základě čehož jsem mohl pochopit danou problematiku do hloubky a zároveň vytvořit daný model.

Další podkapitoly budou popisovat proces, který jsem popsal výše. Od základního přehledu a rešerše tepelných systémů, termodynamiky, přes teorii vazebních grafů až po spojení vědomostí s praktickými poznatky v model chladicí jednotky a jeho simulaci, která je naprogramována ve Strukturovaném textu a je součástí této práce.

### 5.1 Teplo a přenos tepla

Kapitola popisuje použité vzorce, vztahy a jejich význam. Slouží také jako rešerše pro matematický model, který bude podrobněji rozebrán dále.

#### 5.1.1 Teplota

Teplota je projev toho, že částice hmoty kmitají. Čím více kinetické energie částice mají, tím rychleji kmitají a my vnímáme, že hmota je nějak "horká" nebo studená. Teplota je stavová veličina, tzn. že můžu říci, že v tomto časovém okamžiku má těleso určitou teplotu. Teplotu můžeme měřit v různých stupnicích (Celsiova, Kelvinova, Fahrenheitova).



## 5.1.2 Teplo

Teplo je forma energie, které si mezi sebou vyměňují tělesa o různých teplotách. Teplo je svým způsobem forma práce - rychlejší částice teplejší látky narážejí do částic pomalejší látky a předávají jí tak svou kinetickou energii.

Na rozdíl od teploty je teplo veličinou dějovou, nikoliv stavovou, protože z logiky věci, teplo popisuje určitý děj, nikoliv stav. Jednotkou tepla je Joule a značíme jej  $Q$ .

## 5.1.3 Měrná tepelná kapacita

Je zjevné, že těleso po obdržení tepla zvyšuje svou teplotu (pokud nemění skupenství). Na to, abychom zjistili, jak se teplota změní, potřebujeme znát ještě jednu veličinu a to měrnou tepelnou kapacitu.

Měrná tepelná kapacita  $C$  nám říká, kolik tepla je potřeba k ohřátí 1 kg látky o 1 °C. Jedná se o materiálovou konstantu, každá látka ji má jinou a většinou ji musíme dohledat v tabulkách. Přes tuto veličinu můžeme teplo  $Q$  k ohřátí tělesa o hmotnosti  $m$  vyjádřit jako [9]:

$$Q = m \cdot C \cdot (\Delta T) \quad [W] \quad (5.1)$$

$m$	[kg]	hmota
$C$	[kJ/kg K]	měrná tepelná kapacita
$\Delta T$	[K]	rozdíl teplot

## 5.1.4 Chladící kapacita

Chladící kapacita udává v jaké míře je chladící zařízení schopné odstraňovat teplo. Jednotkou je watt, ale pro účely této práce využijeme převodu na Joule, kde 1 J = 1 W [10]

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot C \cdot (\Delta T) \quad [W] \quad (5.2)$$

$\dot{m}$	[kg/s]	průtok
$C$	[kJ/kg K]	měrná tepelná kapacita
$\Delta T$	[K]	rozdíl teplot

## 5.1.5 Přenos tepla

Přenos tepla probíhá mezi systémem a okolím, mezi nimiž existuje teplotní rozdíl. Proces přenosu tepla se uskutečňuje třemi mechanismy: vedením, prouděním a zářením. Vedení odkazuje na přenos tepla napříč médii. Konvekce označuje tepelný přenos, ke kterému dojde mezi povrchem tělesa a pohyblivou tekutinou.

Zářením se předává teplo pomocí elektromagnetických vln, které emitují všechny povrchy s konečnou teplotou [11].

Obecně se dá vyjádřit přenos tepla rovnicí prostupu tepla, kde součinitel prostupu tepla  $k$  je převrácená hodnota součtu odporů látek a součtem převrácených hodnot součinitelů přestupu tepla médií [12]:

$$\dot{Q} = k \cdot S \cdot \Delta T \quad [\text{W}] \quad (5.3)$$

$k$	$[\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}]$	součinitel prostupu tepla
$\Delta T$	$[\text{K}]$	teplotní rozdíl
$S$	$[\text{m}^2]$	velikost teplosměnné plochy

$$h = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\alpha_i} + \sum_{j=1}^n R_j} \quad [\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}] \quad (5.4)$$

$h$	$[\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}]$	součinitel přestupu tepla
$R$	$[\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}]$	odpor proti vedení tepla

#### 5.1.5.1 Přenos tepla vedením

Vedením tepla, nebo-li kondukcí se rozumí přechod tepla od částic s vyšší energií k částicím s nižší. Čím má částice vyšší energii, tím má i vyšší teplotu a čím větší je teplotní gradient mezi dvěma částicemi, tím sousední molekuly více kolidují a dochází k intenzivnějšímu přenosu tepla vedením. Tato energie souvisí s každým náhodným translačním, vnitřním a vibračním pohybem molekul [12].

Tento proces přenosu tepla je popsán Fourierovým zákonem: hustotu tepelného toku (kolik tepelné energie projde metrem čtverečným plochy za vteřinu) - v závislosti na okolních podmínkách.

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{S} = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad (5.5)$$

Lambda ve Fourierově zákoně představuje tepelnou vodivost, tedy schopnost materiálu vést teplo vedením  $[\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}]$ . Záporné znaménko nám říká, že tepelný tok má vždy opačný směr, než tepelný gradient. Teplo se tedy šíří z místa o vyšší teplotě do místa o nižší teplotě.

Člen s derivací říká, že hustota tepelného toku je přímo úměrná tepelnému gradientu. Jinými slovy čím prudčeji stoupá teplota v materiálu, tím větší má tepelný tok hustotu. Když už hovoříme o tepelném toku, tak ten nám udává množství tepelné energie v čase, která projde danou plochou [9].

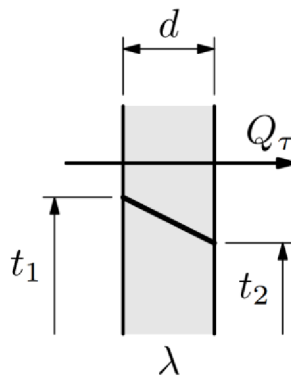


### 5.1.5.2 Vedení tepla rovinou stěnou

Fourierův zákon má podobu diferenciální rovnice. Jejím vyřešením získáme hustotu tepelného toku při známém rozdílu teplot na površích stěny a její tloušťce [18].

$$\dot{q} = \lambda \cdot \frac{\Delta T}{\delta} \quad [W] \quad (5.6)$$

$\lambda$	[W/m·K]	tepelná vodivost (fyzikální vlastnost látky)
$\delta$	[m]	tloušťka tělesa ve směru tepelného toku



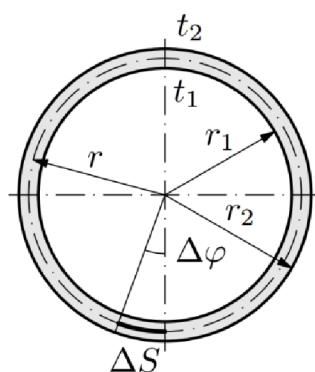
Obrázek 5-1 Vedení tepla rovinou stěnou [18]

### 5.1.5.3 Vedení tepla válcovou stěnou

Pokud se teplo přenáší vedením skrze válcovou stěnu, klasicky např. trubkou, tak se při průchodu tepla mění plocha, kterou teplo prochází. Rovnice hustoty tepelného toku dostává jinou podobu a mění se i její jednotka. Tepelný tok se zde vztahuje na jeden metr délky trubky. Tím pádem hustota tepelného toku a tepelný tok se vypočítají:

$$\dot{Q} = 2\pi L \lambda \cdot \frac{T_2 - T_1}{\delta \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad [W] \quad (5.7)$$

$r_1$	[m]	vnitřní poloměr potrubí
$r_2$	[m]	vnější poloměr potrubí



Obrázek 5-2 Vedení tepla válcovou stěnou [18]

#### 5.1.5.4 Přenos tepla prouděním

Proudění tepla nebo-li přenos tepla konvekcí probíhá mezi jakýmkoliv povrchem a tekutinou kolem něho proudící, kde povrch a tekutina mají rozdílnou teplotu [11]. Konvekční režim je složen ze dvou mechanismů. Difúzní pohyb nebo-li kondukce je způsoben náhodným molekulárním pohybem, obdobně jako u přenosu tepla vedením. Druhý mechanismus zvaný advekce, či agregátní pohyb je přenos tepla způsoben hromadným proudem tekutiny v přítomnosti teplotního gradientu. Difúzní část dominuje v těsné blízkosti povrchu, kdy je rychlost tekutiny velmi nízká a teplo je přenášeno pouze vedením. Příspěvek v důsledku hromadného pohybu tekutiny vzniká strháváním z volného proudu do mezní vrstvy a následně přeneseno mimo tuto vrstvu [12].

Tento proces tepelného toku popisuje Newtonův ochlazovací zákon:

$$\dot{Q} = h \cdot S \cdot (T_w - T_\infty) \quad [W] \quad (5.8)$$

$h$	[W/m <sup>2</sup> · K]	součinitel přestupu tepla
$T_w$	[K]	teplota obtékaného povrchu
$T_\infty$	[K]	teplota tekutiny v dostatečné vzdálenosti od povrchu
$S$	[m <sup>2</sup> ]	povrch obtékaného tělesa

Přenos tepla konvekcí může být klasifikován podle chování proudícího média na konvekci nucenou, přirozenou a kombinovanou.

#### 5.1.5.5 Součinitel přestupu tepla

Součinitel přestupu tepla  $\alpha$  je veličina, která mi dává informaci, kolik tepla se předá mezi 1 m<sup>2</sup> plochy (popř. 1m trubky) a kapalinou při teplotním rozdílu jeden Kelvin. Tato veličina je závislá na geometrii úlohy, typu proudění a tekutiny. V tomto videu se budeme učit s ní pracovat a ne ji určovat [13].

K výpočtu součinitele přestupu tepla se využívá tzv. Buckinghamova  $\pi$ -teorému, kde lze součinitel vyjádřit pomocí 3 bezrozměrných kritérií:

**Nusseltovo kritérium** – poměr přenosu tepla prouděním a vedením, kde  $Nu = f(Re, Pr)$

$$Nu = \frac{h \cdot L}{\lambda} \quad [-] \quad (5.9)$$

$h$	[W/m <sup>2</sup> ·K]	součinitel přestupu tepla
$L$	[m]	charakteristický rozměr tělesa
$\lambda$	[W/m·K]	teplotní vodivost

**Reynoldsovo kritérium** – podíl setrvačných a vazkých sil tekutiny na tomto kritériu závisí i způsob proudění, je-li  $Re < 2000$  jedná se o laminární proudění, je-li  $Re > 4000$  jedná se o turbulentní proudění [23].

$$Re = \frac{u \cdot L}{\nu} \quad [-] \quad (5.10)$$

$u$	[m/s]	rychlost proudící tekutiny
$\nu$	[m <sup>2</sup> /s]	kinematická viskozita

**Prandtlovo kritérium** – poměr hybnostní a tepelné difúze (pro většinu látek lze získat z tabulek)

#### 5.1.5.6 Nucená konvekce

Nucenou konvekci dochází ke stavu, kdy proudící tekutina je donucena k toku kolem teplosměnného povrchu nejen vlivem rozdílu teplot, ale např. ventilátorem či čerpadlem. Nusseltovo kritérium má tvar závislý vždy na dané situaci [11,12].  
Střední Nusseltovo kritérium v laminárním režimu:

$$Nu_L = 0,664 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,33} \quad [-] \quad (5.11)$$

Podmínky platnosti:  $Re < 5 \cdot 10^5$  ;  $0,6 \leq Pr \leq 50$

Střední Nusseltovo kritérium pro turbulentní proudění:

$$Nu_T = 0,037 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,33} \quad [-] \quad (5.12)$$

Podmínky platnosti:  $Re < 8 \cdot 10^8$  ;  $0,6 \leq Pr \leq 50$

### 5.1.5.7 Přirozená konvekce

Přirozená konvekce nastane, pokud je proudění tekutiny kolem teplosměnného povrchu způsobeno pouze vlivem rozdílu teplot média s povrchem a vztlakovými silami na úkor rozdílem hustot vlivem teplotní změny v tekutině. Proud tedy není hnán další silou, jejímž zdrojem je například čerpadlo, nebo ventilátor.

## 5.2 Co je modelování?

Obecně řešeno, modelování je proces reprezentování určitého konceptu, fyzikálního jevu, nebo reálného objektu za použití abstraktního popisu, který může využívat matematických symbolů, ale samotné modelování není matematickým popisem limitováno. V dalších podkapitolách bude postup, kterým si budu přetvářet slovní popis na jednotlivé dílčí části popsané schématickými popisy, fyzikálními zákony a konečným výstupem bude matematická formulace, která popíše fyzikální chování systému a poslouží jako základ simulace [14].

Zásadou při tvorbě modelu by mělo být, zaměřit se na účel a celé modelování maximálně zjednodušit, tedy: Nemodelovat systém, modelovat problém.

*Všechno by mělo být tak jednoduché, jak je to jen možné, ale ne jednodušší.*

(A. Einstein)

V prvním kroku by měl být jasně určen účel modelu a potom se snažit udržovat model co nejjednodušší. Takto docílíme, aby nám model dal odpovědi na otázky, na které se ptáme, ale na druhou stranu nesmíme zapomínat k jakému zjednodušení došlo a mít na paměti, že pracujeme s modelem a ne s realitou [8].

## 5.3 Úrovně modelování

Níže bude popsány jednotlivé úrovně modelování a to včetně příkladů použití v této práci.

### 5.3.1 Technologická úroveň

Na této úrovni konstruujeme architekturu systému za pomoci jednoduchých dílčích celků (čerpadlo, spirála, potrubí). Dostáváme normalizovaný schématický popis – technologické schéma. Jedná se o jednoduchý popis systému, který ale nebere v potaz fyzikální jevy, které v systému budou probíhat a model se na

základě tohoto popisu nedá verifikovat. V této práci budeme uvažovat model na technologické úrovni procesní schéma.

### **5.3.2 Fyzikální úroveň**

Na této úrovni se pro popis používá energie v systému a fyzikální jevy. Příkladem je přestup tepla, akumulace tepla a teplo samotné (energie). Proměnné použité v modelu mají fyzikální význam (energie, výkon, tok). V našem systému můžeme uvažovat energii hydraulickou a tepelnou. Hydraulická však bude zanedbána. V této práci budeme uvažovat model fyzikální úrovně jako slovní model vazebního grafu.

### **5.3.3 Matematická úroveň**

Základními stavebními kameny na této úrovni jsou matematické operátory jako jsou integrátory a algebraické funkce. Matematický model je reprezentován matematickými rovnicemi. Hlavní výhodou tohoto modelu je jeho univerzálnost. Matematika má stejný význam na celém světě a použitelná na všechny obory fyziky. V této práci budeme matematicky popisovat přestup tepla (Fourierův zákon), akumulaci tepelné energie v kapalině a další.

### **5.3.4 Algoritmická úroveň**

Algoritmická úroveň je přímo spjata s informačními technologiemi a popis systému závisí na použitém přístupu. V našem případě bude použito jako výpočetní člen PLC a model bude vytvořen v prostředí Mervis IDE za pomoci strukturovaného textu a funkčních bloků.

Na této úrovni se určuje, jak bude model počítán. Výsledný model se dá uvažovat stejně jako model matematický. Pro modelování by měly být v maximální míře použity integrátory (sumátory) a v omezené, nebo žádné míře derivační členy, protože spočítat integraci (sumaci) je daleko snazší, než počítat derivaci.

V našem případě je daleko jednodušší určit teplotu ze sumace tepelného toku než z derivace teploty [15].

## **5.4 Cíle modelu**

Práce nebyla směrem vytvoření modelu a simulace od začátku směřována, ale okolnosti nás donutily udělat změny z důvodu zamezení přístupu k chladicí jednotce.

Cílem práce není model a jeho simulace. Cílem je vytvořit reálnou jednotku a k ní řídicí systém. Jednotka je již zkonstruována, avšak k ní není přístup. Tento problém by teoreticky mohl nastat i v praxi. Proto vznikla myšlenka vytvořit digitální dvojče, které mi dá možnost vytvořit a otestovat řídicí systém, regulátor a další části. Díky zvoleného postupu jsem schopen splnit cíle zadání v zadaném termínu.

Cílem modelu tedy je maximální robustnost a funkčnost. Abych toho docílil, rozhodl jsem se model zjednodušit a zanedbat vše co jsem schopen zanedbat při udržení fyzikální podstaty systému. V dalších kapitolách bude vysvětleno, co a proč bylo záměrně zanedbáno a jak byla teorie upravena, tak aby vyhovovala účelu, který jsem stanovil.

Model bude implementován ve vývojovém prostředí Mervis IDE. Důvod zvolení této platformy, je využití modelu pro následnou regulaci, která bude zabezpečovat PLC Neuron M503, které je programovatelné právě z Mervis IDE.

## 5.5 Slovní model vazebního grafu

Slovní model vazebního grafu reprezentuje jednotlivé komponenty, které tvoří systém. Jedná se o kompaktní popis, který nese informaci o složení reálného systému (objekty reálného světa) a relace mezi nimi (v našem případě teplota a tepelný tok).

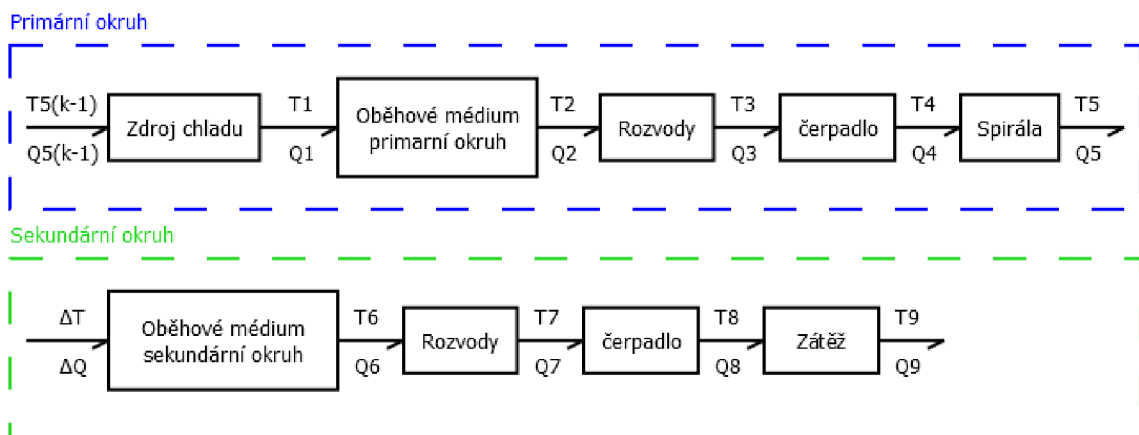
K modelu jsem přistoupil, abych jasně definoval jednotlivé části a jejich spojení. Jednoduchost modelu mi dala možnost si systém snadno představit jako jednotlivé části a zkoumat, jak na sebe vzájemně působí, jaké toky energií se mohou objevit a co bude důležité pro naplnění cílů.

Výsledná úvaha je, že modelována bude pouze tepelná soustava a nebude vytvořen hybridní model tepelné a hydraulické soustavy. Naopak bude tepelná soustava rozšířena o objemový průtok, který bude schován jako konstanta ve veličině toku tepla  $Q$ . Tuto úvahu jsem vytvořil na základě znalosti přibližné rychlosti průtoku v systému ze simulace tlaku a rychlosti průtoku v systému.

Tepelný tok nahradím uvažovaným nuceným tepelným tokem, což je kapalina o známé teplotě, pohybující se v systému známou rychlostí. Pokud znám kapalinu, její objem a teplotu, znám i energii, kterou nese. Na druhé straně znám výkon chladicího zařízení a jsem schopen spočítat, o kolik stupňů ochladí daný objemový průtok kapaliny, jsem schopný spočítat kolik energie bude ztraceno do okolí, kolik energie bude ztraceno chlazením čerpadla a kolik energie bude předáno mezi primárním a sekundárním okruhem. Jsem schopen namodelovat tok tepelné energie v celém systému a tedy simulovat samotný proces chlazení. To je cílem modelu a proto můžu zanedbat nepřesnosti, které budou dány změnami

tlaku při ohřevu kapaliny, turbulentním prouděním v rozvodech a další jevy, které v reálném systému nastanou.

Shrnutí úvahy je následující. Vytvořím jednoduchý, robustní model, který zcela splní mé požadavky – možnost vývoje a testování řídicího systému.



Obrázek 5-3 Slovní model vazebního grafu

## 5.6 Matematický model přestupu tepla

Matematický model se skládá ze zdroje chladu (chladicí zařízení), akumulace chladu (oběhové médium primárního a sekundárního okruhu) a tepelných odporů v podobě rozvodů, čerpadla a dalších jednotek.

### 5.6.1 Zdroj chladu

Chladicí výkon je známý z technického listu chladicího zařízení [1]. Chladicí výkon se zmenšuje se snižující teplotou oběhového média. Dále známe průtok v primárním okruhu a měrnou kapacitu oběhového média. Z rovnice (5.2) jsme tedy schopni spočítat rozdíl teplot mezi vstupem a výstupem z chladicího okruhu.

Směrnici přímkou, která bude funkcí chladicího výkonu, spočítám z bodů [-10 °C, 200 W] a [20 °C, 575 W], což jsou katalogové údaje.

$$f(x) = 12,5x + 375 \quad [\text{W}] \quad (5.13)$$

Výsledný rozdíl teplot tedy bude výsledkem rovnice:

$$\Delta T = \frac{f(T_{in})}{\dot{m} \cdot C} \quad [\text{K}] \quad (5.14)$$

$\dot{m}$	[kg/s]	průtok
$C$	[kJ/kg K]	měrná tepelná kapacita
$\Delta T$	[K]	rozdíl teplot
$T_{in}$	[K]	teplota na vstupu
$f(T_{in})$	[W]	směrnice přímky závislosti chladícího výkonu na $T_{in}$

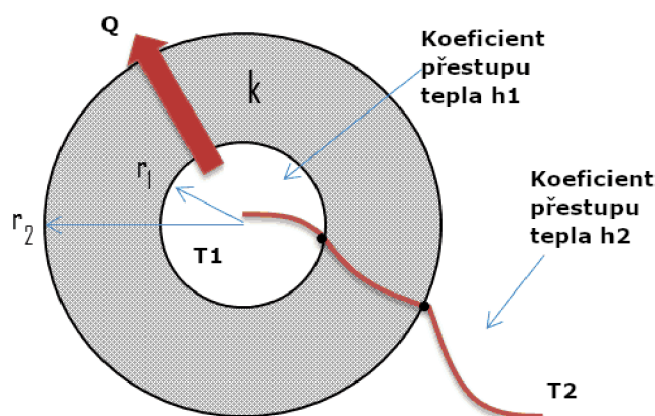
## 5.6.2 Celkový koeficient přestupu tepla

Pro model použijí v praxi používaný celkový koeficient přestupu tepla, který se používá pro systémy, kde se kombinuje, kondukce i konvekce. Analogie je s Newtonovým zákonem chlazení. Tvar rovnice je:

$$Q = U \cdot \Delta T \quad [\text{W/m}^2] \quad (5.15)$$

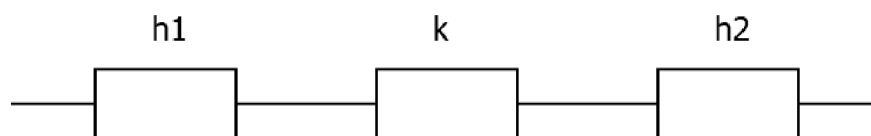
$Q$	[W/m <sup>2</sup> ]	hustota tepelného toku
$U$	[W/m <sup>2</sup> K]	celkový koeficient přestupu tepla
$\Delta T$	[K]	rozdíl teplot

Jako příklad poslouží přestup tepla média, které putuje uvnitř potrubí a předává svou energii skrze stěny potrubí okolnímu prostředí. Na přestupu se bude podílet teplotní koeficient přestupu tepla mezi kapalinou a stěnou, tepelný odpor stěny a koeficient přestupu tepla mezi stěnou a okolím. Celkový koeficient přestupu tepla bude součtem jednotlivých koeficientů. Plátí zde analogie s odporem v elektrickém okruhu, takže si můžeme vše představit jako jednoduché zapojení odporů v sérii.



Obrázek 5-4 Koeficient přestupu tepla válcovou stěnou





Obrázek 5-5 Schéma přestupu tepla

Rozepsaný vzorec pro výše zobrazený příklad bude následující:

$$Q = \frac{\pi(T_1 - T_2)}{\frac{1}{2 \cdot r_1 \cdot h_1} + \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2 \cdot k} + \frac{1}{2 \cdot r_2 \cdot h_2}} \quad [\text{W/m}] \quad (5.16)$$

$T_1$	[K]	teplota média
$T_2$	[K]	teplota okolí
$r_1$	[m]	vnitřní poloměr
$r_2$	[m]	vnější poloměr
$h_1$	[W/m <sup>2</sup> ]	koeficient přestupu tepla mezi médiem a stěnou
$h_2$	[W/m <sup>2</sup> ]	koeficient přestupu tepla mezi médiem a stěnou
$k$	[W/m K]	tepelná vodivost materiálu stěny

### 5.6.3 Přestup tepla rozvody

Rozvody systému budou způsobovat tepelné ztráty přestupem tepla z chladícího média do okolí. Výsledkem modelu je ztrátový tepelný tok do okolí.

Pro výpočet bude použit celkový koeficient přestupu tepla, tedy rovnici (5.16). V tomto případě budou neznámé koeficienty přestupu tepla  $h_1$  a  $h_2$ . V dalších kapitolách bude rozebráno, jakým způsobem, jsem došel k výsledným hodnotám.

#### 5.6.3.1 Koeficient přestupu tepla $h_1$

Koeficient přestupu tepla  $h_1$  vyjadřuje přestup tepla mezi chladící kapalinou v primárním okruhu a stěnou potrubí, přičemž se jedná o nucenou konvekci, kapalina je hnána čerpadlem.

Koeficient přestupu tepla  $h_1$  se dá získat více způsoby. Já použiji rovnici pro výpočet Nusseltova kritéria pro potrubí (5.9), ze které si můžu koeficient

jednoduše vytknout. Abych zjistil hodnotu Nusseltova čísla použiji dobře známou Duttus-Boelterovu rovnici:

$$Nu_T = 0,037 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,33} \quad [-] \quad (5.17)$$

Pro výpočet potřebuji Reynoldsovo kritérium a Prandltovo kritérium. Kritéria spočítám na základě rovnice (5.10) pro Reynoldsovo kritérium a rovnice (5.11) pro Prandltovo kritérium. Vyčíslení rovnice bude provedeno v kapitole simulace.

Po dosazení dostanu hodnotu Nusseltova kritéria a můžu vytknout koeficient přestupu tepla:

$$h = \frac{\lambda \cdot Nu}{L} \quad [-] \quad (5.18)$$

### 5.6.3.2 Celkový koeficient přestupu tepla

Po výpočtu koeficientu přestupu tepla  $h_1$ , můžu dosadit do rovnice (5.16) i zbylé hodnoty. Koeficient přestupu tepla mezi stěnou a okolím, můžu najít v tabulkách a má hodnotu  $13,1 \text{ [W/(m}^2 \text{ K)]}$ [24].

a tepelnou vodivost mosazi, která má hodnotu  $120 \text{ [W/(m K)]}$ . [25]

Mám tedy k dispozici všechny proměnné a můžu vyčíslit celkový koeficient.

### 5.6.4 Tepelné ztráty čerpadla

Pro výpočet tepelných ztrát, vycházím z normy pro elektromotory ČSN EN 600034-30 a účinnosti IE1 (standartní účinnost) a odhaduji účinnost na 80 %. Dle výkonu použitého čerpadla odhaduji, že ztráty v motoru, které se promění na ztrátový tepelný výkon činí 15 %. Tepelný výkon čerpadla je tedy 0,15 krát výkon čerpadla. Po dosazení do rovnice (5.15) dostávám vzorec, ze kterého spočítám oteplení kapaliny při průtoku čerpadlem.

### 5.6.5 Přestup tepla výměníkem

Výměník tvoří nerezová spirála s délkou 6 m, která je ponořena do akumulární nádrže sekundárního okruhu. Použiji zde stejný postup výpočtu jako při přestupu tepla rozvody do okolí, s tím rozdílem, že koeficient přestupu tepla do okolí nahradím tabulkovou hodnotou pro přestup tepla mezi nerezí a vodou. Koeficient je tabulková hodnota vyčíslena na  $280 \text{ [W/(m}^2 \text{ K)]}$ .

### 5.6.6 Akumulace chladu v primárním okruhu

Akumulaci chladu v primárním okruhu budu uvažovat pouze oběžné médium, kterým je etylenglykol naředěný destilovanou vodou v poměru 50:50 a v objemu 2,5 litru.

Pro výpočet budu vycházet z měrné tepelné kapacity  $C_p$ . Ta říká, kolik energie, je potřeba ke změně dané kapaliny o jeden stupeň celsia. Jako reference bude sloužit okolní teplota, tedy pokud má kapalina stejnou teplotu, jako je teplota okolí, je její tepelná energie nulová. Teplotu bude snižovat chladicí zařízení o definovaném chladícím výkonu a dále bude chlad předáván do okolí, čerpadlu a do sekundárního okruhu.

Matematický model se tedy skládá ze sumátoru, který sumuje chladicí výkon v jednotlivých krocích a jednotlivé přestupy tepla. K sumátoru se přičte aktuální tepelná kapacita v systému. Z celkové kapacity, známé měrné kapacity média a hmotnosti média jsem schopen spočítat rozdíl teploty média vůči teplotě okolí, která slouží jako reference.

$$C_{k+1} = \sum_{i=1}^n \Delta Q_{i_k} + C_k \quad [J] \quad (5.20)$$

C	[J]	celková energie v kapalině
$Q_c$	[W]	výkon chladicího zařízení
$Q_n$	[W]	n-tý celkový přestup tepla

$$\Delta T_k = \frac{C}{C_p \cdot m} \quad [K] \quad (5.21)$$

$C_p$	[J/kg K]	měrná tepelná kapacita
m	[kg]	hmotnost média

### 5.6.7 Akumulace chladu v sekundárním okruhu

Akumulace chladu v sekundárním okruhu, bude uvažována také pouze v oběžném médiu. Oběžné médium je solanka s objemem 10 litrů.

Výpočet bude obdobný jako u primárního okruhu (rovnice (5.20))s tím rozdílem, že zdrojem chladu bude hliníková spirála, která tvoří výměník. Zdrojem bude tedy celkový přestup tepla mezi chladicí kapalinou primárního okruhu, spirálou a chladicí kapalinou sekundárního okruhu.

## 5.7 Algoritmický model

Algoritmický model převádí matematický zápis do zápisu ve vybraném programovacím jazyce.

Programovací jazyk jsem zvolil strukturovaný text společně s grafickým programovacím jazykem funkčních bloků. Funkční bloky budou použity pouze pro lepší přehlednost, avšak veškerý funkční kód bude zapsán ve strukturovaném textu.

Jako vývojové prostředí bude použit Mervis IDE, která z programu vytvoří runtime, který bude nahrán do PLC pro následnou simulaci.

## 5.8 Algoritmický model primárního okruhu

Primární okruh se skládá z chladícího zařízení, rozvodů, čerpadla a spirály. Model vytvořený v prostředí Mervis IDE se skládá z několika částí v podobě funkčních bloků, které budou v podkapitolách představeny.

### 5.8.1 Funkční blok chladícího zařízení

Funkční blok na základě vstupní proměnné  $rT_{in}$ , která definuje teplotu na vstupu a stavu zařízení vypočítá a předá na výstup chladící výkon, dle rovnice (5.13). Pokud je proměnná  $xStav$  zařízení v log. nule, tak je chladící výkon také roven nule. Výstupní proměnná  $rQu$  udává energii, kterou chladící zařízení předalo do systému.



Obrázek 5-6 Funkční blok chladícího zařízení

### 5.8.2 Funkční blok pro výpočet $\Delta Q$ , $\Delta T$

Tento funkční blok na základě vstupů, realizuje výpočet celkové energie (tepla), která byla předána a tím i změnu teploty média, na výstupu z počítané části. Funkční blok realizuje rovnici hustoty tepelného toku v potrubí (5.20), jejímž výsledkem je  $\Delta Q$ , tedy rozdíl tepla, které přestoupilo například v rozvodech z média do okolí.

Vstup  $\Delta T$ , což je opět rovnice (5.21), avšak doplněna o měrnou kapacitu. Díky této úpravě jsem schopen spočítat rozdíl teplot mezi vstupem a výstupem. Příkladem na rozvodech je vstupní teplota, která se na základě předaného tepla mezi médiem a okolí liší na vstupu a výstupu.

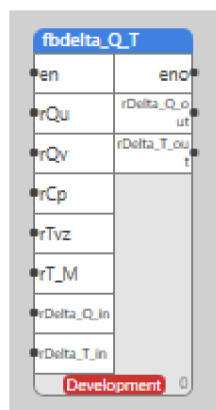
Funkční blok je navržen tak, aby byl použitelný pro všechny zdroje a odpory, které dodávají, nebo odjímají teplo ze systému. Je tedy výstupem všech dalších funkčních bloků, které mají na výstupu koeficient přestupu tepla, nebo chladicí výkon.

Další vstupy slouží pro ovlivnění simulace. Vstup  $rT\_M$  je veličina pro časovou transformaci. Vstup  $rQv$  udává objemový průtok v dané komponentě, ke které je blok přiřazen. Do bloku simulace vstupu objemový průtok čerpadla a ten je přepočten dle jednotlivých průměrů potrubí.

### Časová transformace

Výpočet rovnic probíhá v reálném čase. Často se však stává, že reálný čas, ve kterém probíhá dynamika reálného systému, je příliš dlouhý, např. u tepelných systémů mohou přechodové děje trvat hodiny. Tak dlouhá doba výpočtu by významně snižovala výhody, které má simulace oproti reálným experimentům. Výsledky je tedy třeba v tomto případě zrychlit. Čas  $T$ , který probíhá během simulace, se nazývá strojový čas. Čas  $t$ , který probíhá v reálném systému se nazývá reálný čas. Vztah mezi těmito časy je charakterizován měřítkem času  $M_t$  [16]

$$T = M_t t \quad [s] \quad (5.22)$$



Obrázek 5-7 Funkční blok pro výpočet  $\Delta Q$ ,  $\Delta T$

### 5.8.3 Funkční blok pro výpočet $Q_u$

Funkční blok na základě vstupních hodnot počítá celkový koeficient přestupu tepla v potrubí a to až pro 3 vrstvy. Počet vrstev se určuje konstantou na vstupu a v těle funkčního bloku je čas, který rozhoduje, pro kolik vrstev bude rovnice (5.16)

upravena. Funkční blok je připraven pro obecný výpočet jakéhokoliv potrubí, takže je použit pro výpočty rozvodů a spirály, ale dá se použít obecně kdekoliv.

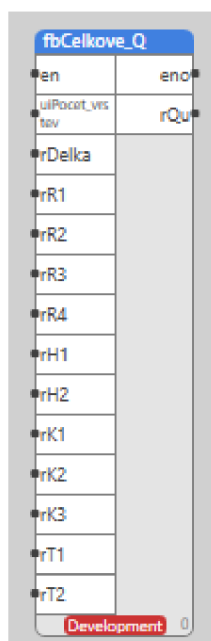
Vstupní veličiny  $rRx$  udávají poloměry vrstev a to v pořadí  $rR1$  je vnitřní poloměr první vrstvy a  $rR2$  je vnější poloměr první vrstvy a zároveň vnější poloměr druhé vrstvy. Takto jsou definovány zbylé vrstvy.

Vstupní veličiny  $rKx$  udávají tepelnou vodivost materiálu jednotlivých vrstev.

Vstupní veličiny  $rHx$  udávají koeficient přestupu tepla mezi vrstvami.  $rH1$  je tedy koeficient přestupu tepla mezi médiem a stěnou první vrstvy a  $rH2$  je koeficient přestupu mezi vnější stranou první vrstvy a okolím, nebo další vrstvou, v případě více vrstev.

Vstupy  $T1$  a  $T2$  jsou teploty, mezi kterými k přestupu tepla dochází.  $T1$  je tedy teplota média a  $T2$  je teplota okolí za poslední vrstvou. V případě této teploty je teplota okolí brána jako referenční vůči celému systému.

Výstup  $rQu$  udává celkovou energii, která se danou komponentou předala.



Obrázek 5-8 Funkční blok pro výpočet QU

## 5.8.4 Funkční blok čerpadla

Funkční blok pro čerpadlo počítá na výstup ztrátový výkon, který se mění na teplo, při chodu čerpadla. Jedná se zde o jednoduchý odhad, který na základě nominálního výkonu čerpadla a jeho účinnosti vypočítá tepelný výkon, podobně jako u chladícího zařízení, avšak zde je výkon konstantní. Blok byl pro jednoduchost použit i pro zátěž, která je na výstupu ze sekundárního okruhu.

Blok byl zjednodušen a ztráty jsou realizovány pouze pokud je čerpadlo v aktivním stavu. Pokud je vypnuto, ztráty jsou nulové, přestože by samovolně do okolí v případě rozdílu teplot energie přecházela.

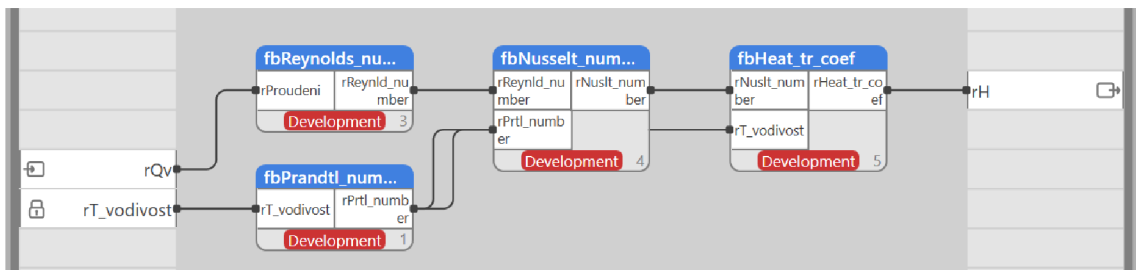


Obrázek 5-9 Funkční blok čerpadla

### 5.8.5 Funkční blok pro výpočet h

Funkční blok se skládá z dalších tří funkčních bloků, na základě kterých se spočítá koeficient přestupu tepla. Tento koeficient je třeba spočítat například v rozvodech, kde neznáme koeficient přestupu tepla mezi médiem a stěnou potrubí.

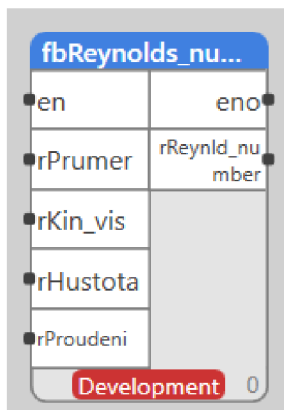
Funkční blok se skládá z následujících funkčních bloků:



Obrázek 5-10 Funkční blok pro výpočet h

#### 5.8.5.1 Funkční blok pro výpočet Reynoldsova čísla

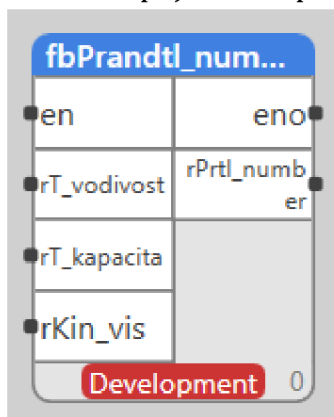
Funkční blok realizuje výpočet rovnice (5.10) a to zejména na základě tabulkových konstant. Jedinou proměnou, která do bloku vstupuje, je rychlost proudění v systému. Zbylé proměnné jsou konstanty, které jsou dosazeny do rovnice.



Obrázek 5-11 Funkční blok pro výpočet Reynoldsova čísla

### 5.8.5.2 Funkční blok pro výpočet Prandltova čísla

Tento funkční blok realizuje výpočet dle rovnice (5.11) a to pouze na základě tabulkových konstant. Do bloku nevstupuje žádná proměnná.



Obrázek 5-12 Funkční blok pro výpočet Prandltova čísla

### 5.8.5.3 Funkční blok pro výpočet Nusseltova čísla

Funkční blok realizuje výpočet Nusseltova čísla na základě hodnot Prandltova a Reynoldsova čísla, což jsou vstupy do tohoto bloku a výpočet se provede na základě rovnice (5.17).

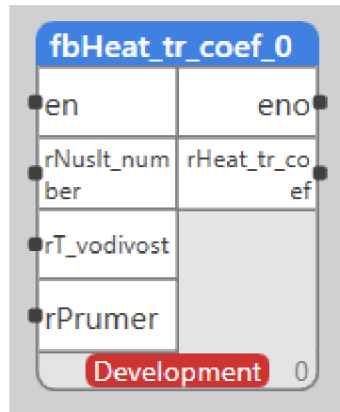


Obrázek 5-13 Funkční blok pro výpočet Nusseltova čísla



#### 5.8.5.4 Funkční blok pro výpočet koeficientu přestupu tepla

Další rovnice pro výpočet Nusseltova čísla (5.9) zahrnuje také koeficient přestupu tepla. Rovnici jsem tedy upravil do tvaru (5.18) a vytknul koeficient přestupu tepla  $h$ . Díky výpočtu Nusseltova čísla cestou popsanou výše jsem schopen dosadit za všechny proměnné a dostávám konečný výsledek.

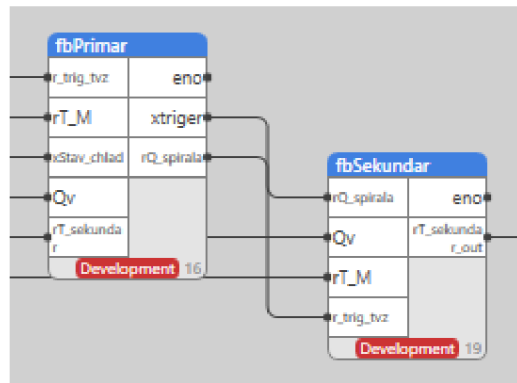


Obrázek 5-14 Funkční blok pro výpočet koeficientu přestupu tepla

#### 5.8.6 Funkční blok primárního a sekundárního okruhu

Pro přehlednost jsem rozdělil primární a sekundární okruh do dvou funkčních bloků, které ale nesplňují obecnost a nedají se použít v jiné aplikaci, jedná se opravdu pouze o zvýšení přehlednosti, které použiji v následné simulaci.

Oba bloky mají mezi sebou vazby, což je vidět již ve slovním popisu vazebního grafu. Z bloku primárního okruhu vystupuje tepelný tok, který indikuje, kolik tepelné energie je předáno mezi okruhy za pomoci výměníku, který je realizován spirálou. Výpočet je však závislý na teplotě média v sekundárním okruhu a může tak vzniknout problém. Řešení je v nastavení počátečních podmínek. PLC program je vykonáván vždy sekvenčně (od vrchu dolů), není tedy možné, aby nastal problém, že se budu počítat s budoucími hodnotami. Omezením naopak je, že výpočet aktuálního kroku bude proveden na základě teploty v sekundárním kroku v kroku minulém. Vzhledem k časovým konstantám systému, které budou odhadem minimálně minuty a předpokládané vzorovací frekvenci 200 ms, můžu tuto skutečnost zanedbat.



Obrázek 5-15 Funkční blok primárního a sekundárního okruhu

## 6 SIMULACE

V dalších podkapitolách je popsána simulace průtoku a tlaku v systému a dále simulace procesu chlazení jednotky a jejich částí.

### 6.1 Co je simulace?

Simulace je experiment, prováděný na modelu z algoritmické úrovně. Simulace jsou numerické experimenty prováděny s modely, které mohou být vykonávány na počítači. Použitý programovací jazyk použitý pro modelování je nazývaný modelovací jazyk. Prací uživatele je přepsat matematický model do algoritmického modelu za pomoci daného jazyku.

Experiment (simulace) se může lišit dle použitého modelovacího jazyku. Kód napsaný uživatelem, je ve většině případů zkompileován a je vytvořena verze, které je hardware schopen rozumět (strojový text). Různé kompilátory mohou mít různou kvalitu zkompileovaného kódu a ta se odráží na výsledcích, které vstupují zpět do modelu. Může takto dojít například k chybě v zaokrouhlení [14].

### 6.2 Simulace průtoku a tlaku v systému

Díky návrhu rozvodů jsem dostal představu o maximálním a minimálním průměru, který bude použit v rozvodech. Pro výběr čerpadla bylo třeba určit hrubou představu, jak výkonná čerpadla budou potřeba.

Na základě tohoto požadavku jsem vytvořil v programu MS Excel jednoduchý simulátor, který na základě charakteristiky čerpadla, požadovaného průtoku, maximálních a minimálních průměrů potrubí, je schopen vyhodnotit, zda bude tlačný výkon dostatečný (kladné výsledky), nebo nedostatečný (výsledky záporné, nebo blízké nule)

Pro simulaci bylo použito Bernoulliho rovnice a převodních vztahů, mezi objemem, tlakem a časem. Výsledný simulátor je součástí přílohy této práce.

$$\frac{1}{2} \cdot v_1^2 + \frac{p_1}{\rho} = \frac{1}{2} \cdot v_2^2 + \frac{p_2}{\rho} \quad [-] \quad (6.1)$$

Simulace je rozdělena do dvou částí. V první části uživatel zadá objemový průtok čerpadla a ve druhé tlak, kterým čerpadlo tlačí medium v systému.

Do simulace byly vloženy charakteristiky čerpadel primárního a sekundárního okruhu a proto uživatel vybírá pouze z daného rozsahu, což je také rozsah čerpadla dle specifikace.

Další hodnoty, které uživatel zadává, jsou hustota média v oběhu a nejmenší/největší průměr v rozvodech.

Výsledkem je rychlost proudění v potrubích s minimálním a maximálním průměrem a tlak v potrubí, které bylo zvoleno, je potrubí 2 (průměr 2).

Vzhledem k tomu, že tlak se dá zapsat v různých jednotkách (mH<sub>2</sub>O, Pa) stejně tak průtok (m<sup>3</sup>/s, l/min), bylo třeba hodnoty sjednotit. Pro normalizaci tlaku jsem použil jednotku Pascal (Pa) a rychlost proudění v metrech za sekundu (m/s).

Výpočet tlaku a průtoku v potrubí dle Bernoulliho rovnice									
Výpočet pro čerpadlo - MOUSE Q 60									
Vstupní hodnoty - výpočet dle objemového průtoku					Vstupní hodnoty - výpočet dle tlaku				
Název	Označení	Hodnota	Jednotka	Rozsah	Název	Označení	Hodnota	Jednotka	Rozsah
Objemový průtok	Q1	20	[l/min]	[0-50]	Objemový průtok	Q1	39,929	[l/min]	
Tlak 1	p1	18,169	[mH <sub>2</sub> O]		Tlak 1	p1	4	[mH <sub>2</sub> O]	[0,25-4]
Hustota	hustota	990	[kg/m <sup>3</sup> ]		Hustota	hustota	990	[kg/m <sup>3</sup> ]	
Diametr 1	d1	0,025	[m]		Diametr 1	d1	0,025	[m]	
Diametr 2	d2	0,015	[m]		Diametr 2	d2	0,01	[m]	
<b>Mezivýpočty</b>					<b>Mezivýpočty</b>				
Obsah 1	S1	0,00049	[m <sup>2</sup> ]		Obsah 1	S1	0,00049	[m <sup>2</sup> ]	
Obsah 2	S2	0,00018	[m <sup>2</sup> ]		Obsah 2	S2	7,9E-05	[m <sup>2</sup> ]	
Tlak 1 - konverze	p1	178,177	[kPa]		Tlak 1 - konverze	p1	39,2266	[kPa]	
<b>Výpočet</b>					<b>Výpočet</b>				
Rychlost 1	v1	0,67908	[m/s]		Rychlost 1	v1	1,35575	[m/s]	
Rychlost 2	v2	1,88634	[m/s]		Rychlost 2	v2	8,47345	[m/s]	
Tlak 2	p2	176644	[Pa]		Tlak 2	p2	4595,79	[Pa]	
Tlak 2	p2	18,0127	[mH <sub>2</sub> O]		Tlak 2	p2	0,46864	[mH <sub>2</sub> O]	

Obrázek 6-1 Simulace průtoku v potrubí

### 6.3 Simulace jednotky

Simulace je experiment prováděný na modelu z algoritmické úrovně, která je popsána v dané kapitole. Výpočty modelu jsou prováděny na PLC Neuron M503.

Cílem je simulovat průběh chlazení, přestupu tepla mezi primárním a sekundárním okruhem, tepelné ztráty. Simulace bude použita v dalších kapitolách této práce, pro simulaci reálného procesu a pro regulátor teploty v systému.

### 6.3.1 Nedeterministický cyklus výpočtu

PLC provádí svou činnost v cyklu. Na začátku cyklu si načte vstupy, dále začne provádět program sekvenčně od začátku do konce a po dokončení programu zapíše hodnoty na vstupy.

Délka tohoto cyklu je proměnlivá a nedá se dopředu říci, jak dlouho bude trvat průběh dalšího cyklu. Systém je tedy nedeterministický.

Délku trvání výpočtu jsem tedy potřeboval normalizovat. Vyšel jsem z doby trvání cyklu, která je v průměru 0,009 sekundy a v maximech se pohybuje okolo 0,013 sekundy. Abych měl jistotu, že výpočet proběhne vždy za stejnou dobu, určil jsem minimální délku simulace na 0,1 sekundy.

Do simulace jsem přidal generátor pulsů, který má proměnnou periodu nastavitelnou uživatelem a za něj vložil trigger, který reaguje na náběžnou hranu a je aktivní po dobu jednoho cyklu PLC. Výstup z triggeru je zapojen do funkčního bloku primárního okruhu a je zapojen do prvního vnořeného funkčního bloku, kterým je chladicí zařízení. Blok je aktivní, pouze pokud na vstupu pro trigger je log. 1. Za prvním funkčním blokem je další, který má také vstup pro trigger, ten ale již není z generátoru, ale právě z přechozího funkčního bloku a čeká tedy, až bude proveden předchozí funkční blok. Takto jsou zapojeny všechny funkční bloky až po poslední.

Výsledkem této úpravy je, že sice nevím, jak rychle výpočet proběhl, ale bezpečně mohu říct, že proběhl jednou za 100 ms.

### 6.3.2 Simulace

Do simulace vstupují proměnné, které budou při následném použití s reálným modelem měřeny, nebo ovládány. Jedná se o měření teploty (vnější, primární a sekundární okruh), měření průtoku v obou okruzích, stav chladicího zařízení a čerpadel.

Uživatel nastavuje rychlost vzorkování simulace s limitem do 100 ms a dále konstantu, která násobí hodnoty v integrátorech a urychluje tak průběh simulace. Tato funkce je popsána v kapitole algoritmického modelu.

Výstupem je simulovaná teplota primárního a sekundárního okruhu. Tyto hodnoty jsou i na vstupu do simulace, avšak z důvodu inicializace. Model bude sloužit také pro následné řízení systému a díky jeho schopnosti urychlit výpočet až

100x, bude predikovat budoucí hodnoty vývoje. Při inicializaci se natáhnou hodnoty ze vstupů a dále se s nimi nebude pracovat až do ukončení simulace.

Dalším výstupem je uložená energie v primárním a sekundárním okruhu, která se počítá na základě vzorce (5.20) a bude také použita pro řízení systému, kde počítám s požadavky na chlazení od dalších jednotek. Princip je popsán v další kapitole, avšak základem je, že jednotka zadá požadavek na množství tepla v Joulech a čas, za jak dlouho bude tuto energii potřebovat.

### 6.3.3 Průběhy simulace

Simulaci jsem testoval pro různé scénáře, ale základní otázka byla, zda se výsledky budou shodovat při simulaci v reálném čase a v čase strojovém, který byl urychlen. Provedl jsem vícero měření, avšak pro účely práce jsem vybral 4 průběhy.

Nastavení prvního průběhu odpovídalo reálnému času. Vzorkovací frekvenci jsem nastavil na 1 s a násobící koeficient na 1.

Druhý průběh byl 10x urychlen za pomoci zmenšení vzorkovací frekvence na 100 ms, což je také výpočetní limit pro PLC.

Třetí průběh byl 100x urychlen a to za nastavení vzorkovací frekvence 100 ms a s hodnotou násobícího koeficientu 10.

Čtvrtý průběh byl 1000x urychlen a to za nastavení vzorkovací frekvence 100 ms a s hodnotou násobícího koeficientu 100.

### 6.3.4 Zhodnocení simulace

Z grafů se dá na první pohled vyčíst několik hodnot, které použiji pro srovnání. Prvním bodem pro srovnání bude teplota 5 °C v primárním okruhu. V okolí tohoto bodu se vývoj teploty láme a průběh už není lineární.

Druhý bod, který použiji pro srovnání, je -19,5°C. Maximální chladicí výkon chladícího zařízení je -20 °C. Záměrně volím hodnotu o půl stupně nižší, protože při urychlení simulace se hraniční hodnoty lišily v délce simulace.

Pro zhodnocení budu hledat časy, kdy daných bodů jednotlivé simulace dosáhly, a dále dobu trvání chlazení v intervalu  $<25^{\circ}\text{C} ; 5^{\circ}\text{C} >$  a  $<5^{\circ}\text{C} ; -15^{\circ}\text{C} >$ .

### 6.3.5 Výsledky simulace

Pro zhodnocení jsem musel v konečném důsledku zvolit hodnoty, které se blíží hodnotám, které jsem si vytyčil a to z důvodu simulace, která byla 1000x urychlena a celé měření obsahuje pouze 20 hodnot.

Výsledky jsem vnesl do dvou tabulek. První tabulka obsahuje naměřené časy a druhá tabulka obsahuje naměřené časy vynásobené koeficientem, o který bylo měření urychleno.

Z grafů jsem již dopředu předpokládal, že simulace bude vykazovat velkou chybu, při velkém urychlení a to hlavně v intervalu teplot  $<25^{\circ}\text{C} ; -6,75^{\circ}\text{C} >$  pro primární okruh, kde je charakteristika velmi prudká a vzorkovací frekvence 100 ms nebude dostatečná. Výsledky tento předpoklad dokládají a pro urychlení 1000x je chyba 18 %, přičemž pro urychlení 100x je chyba pouze 1 % na stejném rozsahu. Chyby v intervalu  $<-6,75^{\circ}\text{C} ; -19,38^{\circ}\text{C} >$  jsou menší, avšak v tomto případě je přesnost dokonce lepší pro měření, které bylo 1000x urychleno.

Z měření, grafů a výpočtů tedy vyplývá, že simulace je schopna urychlit svůj výpočet až 100x a v případě potřeby až 1000x, ale to pouze v omezeném rozsahu od cca  $-5^{\circ}\text{C}$  v primárním okruhu, kdy je chladicí výkon snížen a charakteristika není příliš strmá.

	6,13 °C	-19,38 °C	$<25^{\circ}\text{C} ; -6,75^{\circ}\text{C} >$	$<-6,75^{\circ}\text{C} ; -19,38^{\circ}\text{C} >$
<b>x1</b>	1115	18158	5025	12936
<b>x10</b>	109	1802	505	1297
<b>x100</b>	10	178	50	129
<b>x1000</b>	1	18	6	13

Tabulka 6-1 Naměřené časy simulací

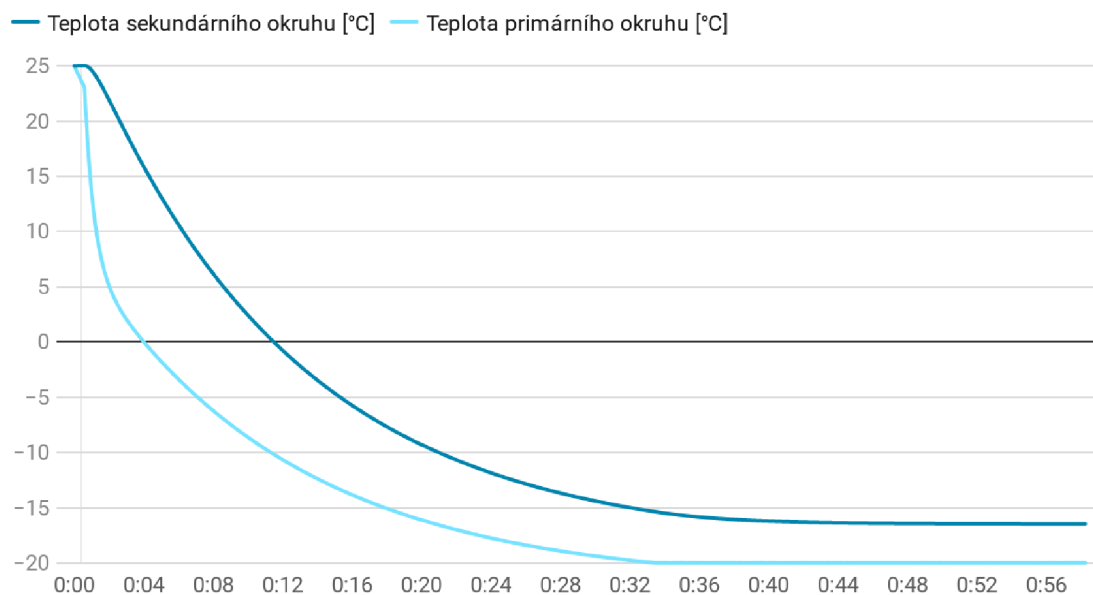
	6,13 °C	-19,38 °C	$<25^{\circ}\text{C} ; -6,75^{\circ}\text{C} >$	$<-6,75^{\circ}\text{C} ; -19,38^{\circ}\text{C} >$
<b>x1</b>	1115	18158	5025	12936
<b>x10</b>	1090	18020	5050	12970
<b>x100</b>	1000	17800	5000	12900
<b>x1000</b>	1000	18000	6000	13000

Tabulka 6-2 Přepočtené naměřené časy simulací

	Chyba $<6,13^{\circ}\text{C} ; -6,75^{\circ}\text{C} >$ [%]	Chyba $<-6,75^{\circ}\text{C} ; -19,38^{\circ}\text{C} >$ [%]
<b>x1</b>	0,00	0,00
<b>x10</b>	0,50	0,26
<b>x100</b>	-0,50	-0,28
<b>x1000</b>	19,40	0,49

Tabulka 6-3 Chyby simulací

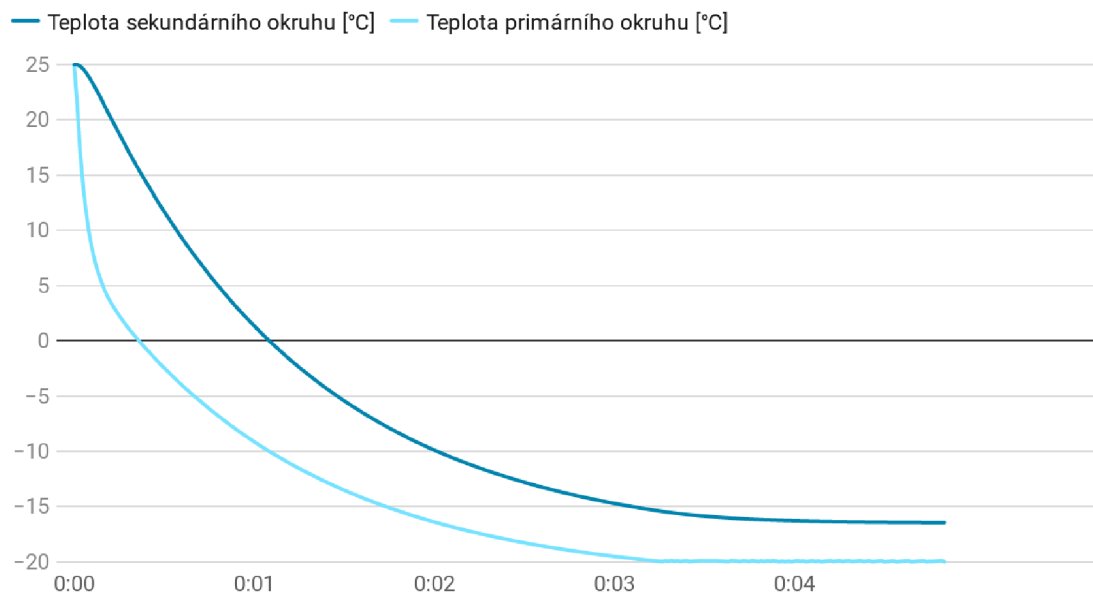
## Simulace Tvz = 100 ms, Koef = 1, [min]



Vytvořeno nástrojem Datawrapper

**Graf 6-1 Simulace Tvz = 100 ms, Koef = 1**

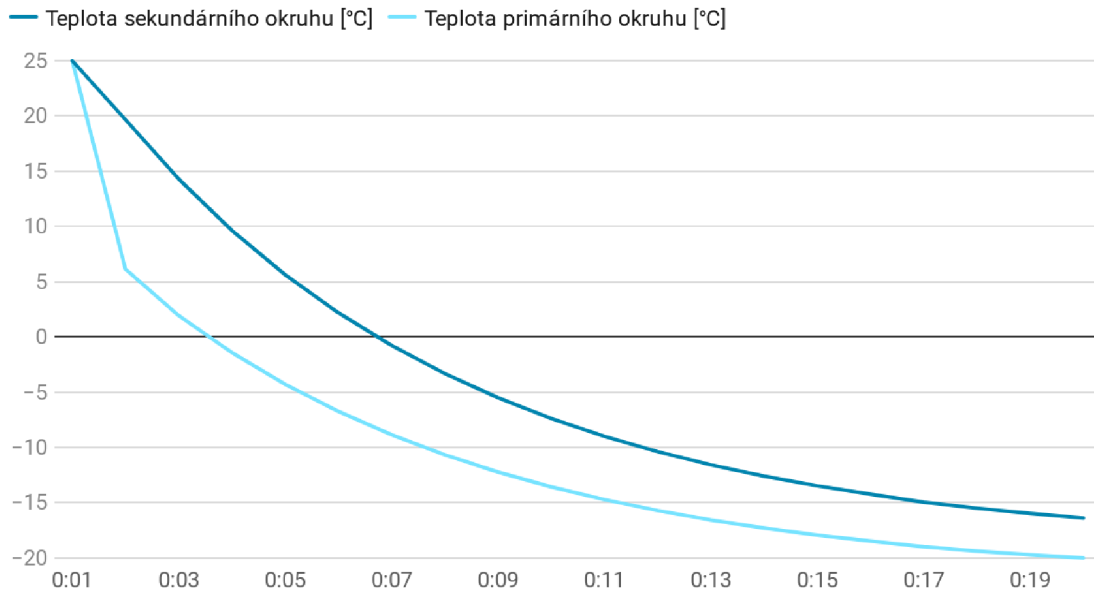
## Simulace Tvz = 100 ms, Koef = 10, [min]



Created with Datawrapper

**Graf 6-2 Tvz = 100 ms, Koef = 10**

## Simulace Tvz = 100 ms, Koef = 100, [s]



Created with Datawrapper

Graf 6-3 Tvz = 100 ms, Koef = 100

## 7 VYBAVENÍ ŘÍDICÍ JEDNOTKY

### 7.1 Vývojové prostředí Mervis IDE

Mervis IDE (Integrated Development Environment) je nástroj pro programování a konfigurování regulátorů v řídicích systémech. Pro definování řídicí logiky nabízí dva základní jazyky definované normou IEC 61131-3 a to funkční bloky (FUPLA) a strukturovaný text (ST).

#### Funkční bloky (FUPLA)

FBD (označováno rovněž i jako FUPLA) je programovací jazyk založený na předpřipravených blocích kódu, kdy každý blok plní určitou funkci. Bloky jsou vybaveny vlastními vstupy (měřená teplota, signál spínače apod.) a výstupy (pokyn k sepnutí, regulace výkonu apod.). Samotnou řídicí logiku pak vytvoříte v přehledném grafickém rozhraní jednoduchým spojováním bloků a proměnných. Mervis IDE je vybaveno rozsáhlou knihovnou již hotových funkčních bloků - kromě



matematických operací (součet, násobení, porovnání) zde naleznete i řídicí smyčky (hystereze, trojcestné ventily aj.), čítače, časové funkce a mnoho dalšího. Práci s FBD si proto rychle osvojí i uživatelé bez hlubších znalostí programování.

### Strukturovaný text (ST)

Jazyk ST je založen na strukturovaném textu, se kterým lze i velmi složité funkce vyjádřit několika řádky textového kódu. Jde tak o vhodnou volbu především pro zkušené uživatele programující rozsáhlé projekty. V případě potřeby je také možné pomocí ST tvořit vlastní funkční bloky.

### HMI editor (Human Machine Interface)

Kromě samotné logiky dané aplikace je v Mervis IDE možné vytvářet i grafické uživatelské rozhraní pro lokální webové stránky na PLC a pro vzdálený dispečink Mervis SCADA. Takto vytvořené rozhraní poskytuje komfortní přehled dané technologie s možností ovládání všech jejích funkcí. K tomuto účelu je editor vybaven rozsáhlou kolekcí přepínačů, indikátorů, textových polí, nastavitelných časových plánů a dalších prvků. V editoru jednotlivé prvky rozmístíte prostým přetažením myši, díky širokým možnostem nastavení pak můžete každý grafický prvek přizpůsobit na míru. Do editoru rovněž můžete nahrát vlastní obrázky a ikony. K hotovým rozhraním lze následně přistupovat na počítači, tabletu i chytrém telefonu pomocí běžného webového prohlížeče [26].

## 7.2 Komunikace

PLC Unipi jsou schopny komunikovat s celou řadou protokolů. Přehled komunikačních protokolů jsem sepsal do přehledné tabulky.

Protokol	Klient	Server
Modbus TCP	Ano	Ano
Modbus RTU	Ano	Ano
1-Wire	Ano	—
SSCP	Ano	Ano
M-Bus	Ano	Ne
Jablotron 100	Ano	—
IEC 62056-21	Ano	Ne
AMiT DB-Net/IP	Ano	Ne
BACnet	Ano	Ano

Tabulka 7-1 Dostupné komunikační protokoly

### 7.2.1 1-Wire

1-Wire je sběrnice navržená firmou Dallas Semiconductor Corp. pro komunikaci zařízení nízkou datovou rychlostí, signalizaci i napájení. 1-Wire je podobná ke sběrnici I<sup>2</sup>C, jen s nižší datovou propustností a delším dosahem. Obvykle je používána pro komunikaci s malými levnými zařízeními jako jsou termometry a další různá zařízení.

Sběrnice má jeden řídicí obvod (master) a jeden či více ovládaných zařízení (slave). Všechny obvody jsou zapojeny jednak na společnou zem, jednak paralelně na společný datový vodič. Tento datový vodič je připojen přes odpor cca 5k na napájecí napětí a "zdvihá" tak sběrnici do log. 1 [27].

Pro měření teplot jsou použity jímkové snímače s komunikací 1-Wire. Snímačů je celkem 5 a k PLC budou připojeny přes 1-Wire HUB. Každý snímač bude mít délku maximálně v řádu desítek až stovek centimetrů. Připojením do HUBu vznikne hvězdicová topologie, při které by neměla celková délka sběrnice přesáhnout 100 metrů, což je v mém případě bez problému splněno.

### 7.2.2 Modbus TCP/IP

Protokol MODBUS/TCP představuje v dnešních dnech faktický standard. Rozšiřuje známý protokol MODBUS pro PLC, vytvořený v roce 1979. Zvláštní výhoda pro uživatele spočívá v jednoduchosti a v úspornosti protokolu MODBUS, která zaručuje velice rychlý přenos dat v sítích typu Ethernet. Standardizovaná struktura dat rovněž umožňuje komunikaci mezi zařízeními různých výrobců.

MODBUS TCP zajišťuje komunikaci dle modelu klient/server. Jediným požadavkem je to, aby se všechny uzly nacházely ve stejném rozsahu IP adres [28].

Komunikační protokol Modbus TCP bude použit pro komunikaci s dalšími jednotkami, které budou zadávat požadavky na chlazení. Projekt barman využívá komunikaci OPC UA, ta ale bohužel není PLC Unipi podporována, proto jsem zvolil Modbus TCP, který považuji za zavedený standard pro připojení k jakémukoliv dalšímu průmyslovému zařízení.

### 7.2.3 Analogové vstupy/výstupy

V průmyslu mohou být hodnoty ze snímače nebo měřicího zařízení přenášeny pomocí standardizovaných analogových signálů, napětového 0-10 V, nebo proudového 4-20 mA.

Pomocí analogového výstupu bude řízen frekvenční měnič, který bude řídit otáčky čerpadla sekundárního okruhu.

#### **7.2.4 Digitální vstupy/výstupy**

Digitální vstupy PLC pracují v naprosté většině případů s napětím 24 VDC. V systému budou použity pro vyčítání zpětných vazeb od stykačů a k čítání pulsů z průtokoměru s pulzním výstupem.

Digitální výstupy slouží k spínání aktivních prvků a to nejčastěji přes relé, které je ovládáno digitálním výstupem a na základě něj spíná zátěž. Digitální výstup může být tranzistorový nebo reléový. Hlavním rozdílem je rychlost spínání a rozsah spínaného napětí a proudu.

## **8 SW VYBAVENÍ ŘÍDICÍ JEDNOTKY**

Logika řídicího systému je naprogramována ve vývojovém prostředí Mervis IDE. Stejně jako u algoritmického modelu jednotky jsem použil funkčních bloků a strukturovaného textu.

Program pro ovládání a řízení jednotky se bude skládat ze 3 bloků, přičemž může být vždy aktivní pouze jeden. Níže budou jednotlivé bloky krátce představeny a podrobně popsány v samostatných podkapitolách.

### **Manuální mód**

Manuální mód slouží zejména pro fázi ožívování, testování a k servisním zásahům. Manuální mód není ošetřen ochranami a je zcela na uživateli, které prvky a jak dlouho budou aktivní.

Ovládání manuálního módu je chráněno přístupovým oprávněním a přihlašovací údaje má k dispozici pouze osoba proškolená.

### **Automatický mód – bez požadavků**

Program obsahuje dva řídicí bloky, prvním je Automatický mód bez požadavků. Požadavky jsou myšleny od zbylých jednotek. Mód slouží pro běžný provoz bez komunikace mezi jednotlivými komponentami a cílem regulace je udržovat žádanou teplotu. Mód je vybaven ochranami, které zabrání například zapnutí/vypnutí pokud neuplynula minimální doba.

Mód je přístupný pro všechny uživatele, avšak pouze ze strany monitoringu. Pro zásah do hodnot určených pro regulaci, například žádaná hodnota, musí být uživatel přihlášen.

### Automatický mód – s požadavky

Druhý řídicí blok, který funguje automaticky, bere v potaz požadavky na dodání tepelné energie v čase od dalších jednotek z projektu Barman. Pokud žádné požadavky nepřicházejí, chová se jako automatický mód bez požadavků.

## 8.1 Kalorimetr

Kalorimetrická rovnice popisuje tepelnou výměnu těles tvořících izolovanou soustavu, pro kterou platí zákon zachování energie – tedy veškeré teplo, které při výměně jedno těleso odevzdá, druhé těleso přijme. Navíc se předpokládá, že nedochází ke změně druhu energie, tzn. tepelná energie se nemůže změnit např. v mechanickou energii, a také, že látky jsou chemicky netečné, takže nevzniká žádné teplo z chemických reakcí [29].

Kalorimetrická rovnice:

$$Q_1 = Q_2 \quad [-] \quad (8.1)$$

Princip kalorimetru jsem si pro svůj účel upravil následující úvahou. Jediným zdrojem hybnosti v systému je čerpadlo, můžu tedy uvažovat, že v místech, kde se měří teplota, je stejný průtok, protože jímky se snímači mají stejný průměr. Změny v průtoku dané turbulentním prouděním, můžu zanedbat, protože jsou umístěny na konci měřících řetězců, kde je proudění již laminární (do jisté míry).

Z úvahy tedy vychází, že průtok a tedy objem látky je v obou měřených místech stejný. Měřená látka je také stejná, z čehož vyplývá i stejná měrná tepelná kapacita. Zváším rozepsanou kalorimetrickou rovnici:

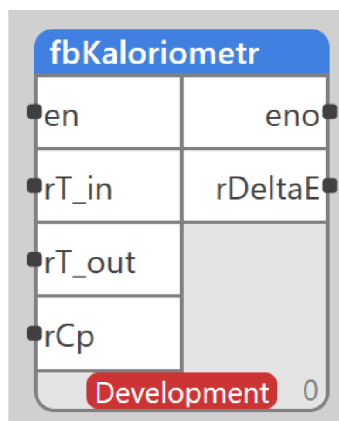
$$m_1 \cdot c_1(t_1 - t) = m_2 \cdot c_2(t_2 - t) \quad [-] \quad (8.2)$$

Z výše uvedeného můžu tvrdit, že hmotnosti i měrné tepelné kapacity se rovnají. Rozdílné jsou tedy pouze teploty na obou stranách rovnice. Toho jsem využil a na základě rovnice pro měrnou tepelnou kapacitu (5.1) provedl následující úpravu.

$$Q = C \cdot (\Delta T) \quad [J] \quad (8.3)$$

Q	[J]	rozdíl tepelné energie mezi vstupem a výstupem
C	[kJ/kg K]	měrná tepelná kapacita
$\Delta T$	[K]	rozdíl teplot vstupu a výstupu

Výsledkem je funkční blok, do nějž vstupuje teplota měřená před a za chladícím zařízením a výsledkem je rozdíl teplot a tedy i energie, která přestoupila ať už ztrátově vedením, nebo cíleně do jednotek, které jsou chlazeny.



Obrázek 8-1 Funkční blok kalorimetru

## 8.2 Regulace průtoku v sekundárním okruhu

Možnost řídit průtok je pouze v sekundárním okruhu a to za pomoci frekvenčního měniče, který řídí otáčky čerpadla. Řídicí systém je připojen k frekvenčnímu měniči za pomoci analogového výstupu 0-10 V

Smyslem řízení průtoku je snížit ztráty v rozvodech ve chvíli, kdy jsou připojené jednotky bez požadavku a dosáhly požadované provozní teploty.

Princip regulátoru je následující. Výkon čerpadla je tím vyšší, čím větší je rozdíl mezi měřenou teplotou na vstupu a výstupu do výměníku. Tento princip vychází z následující úvahy. Celkový přestup tepelné energie se počítá dle rovnice (5.16). Pokud si rovnici zasadím do kontextu chladící jednotky, zjistím, že jedinou dynamickou veličinou je rozdíl teplot. Všechny ostatní veličiny jsou konstanty, které jsou dány konstrukcí, materiálem a dalšími veličinami, které se však nemohou měnit. Dalším krokem úvahy je, že energie přestupuje postupně, tedy po celé délce ať už rozvodu nebo jednotkou, která je chlazená. Výsledkem této úvahy je, čím rychlejší bude průtok, tím větší bude přestup tepla.

Pokud jsou všechny požadavky na chlad od okolních jednotek splněny, znamená větší průtok pouze větší tepelné ztráty.

Jako regulátor jsem použil PI regulátor, který je v knihovně Mervis IDE. Žádaná hodnota je 0 a měřená hodnota je rozdíl teplot mezi vstupem a výstupem. Akční veličina je výkon čerpadla. Minimum a maximum výkonu je ohraničeno a to z důvodu principu čerpadla – odstředivé čerpadlo. Z principu je zřejmé, že čerpadlo

nemůže operovat v plném rozsahu otáček, protože od určité míry se odstředivá síla zmenší natolik, že přestane čerpat. Tento parametr jsem bohužel neměl možnost změřit a proto jej stanovuji na 70 % celkového výkonu. Čerpadlo bude vždy čerpat, alespoň na minimální otáčky a to z důvodu zjištění změny teploty, která mohla nastat.



Obrázek 8-2 Funkční blok regulátoru průtoku

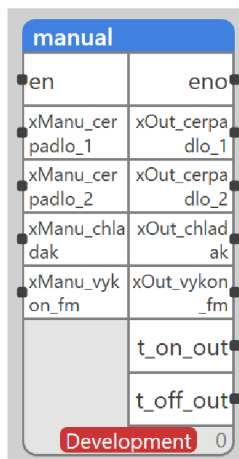
## 8.3 Řídicí algoritmus

Řídicí algoritmus jsem rozdělil do 3 módů, kdy může být aktivní v jeden okamžik vždy pouze jeden. Jednotlivé módy jsou popsány v následujících podkapitolách.

### 8.3.1 Manuální mód

Manuální mód je velice jednoduchý funkční blok, který kopíruje stavy ze vstupu na výstup. Slouží pro servisní zásahy a testování a může ho používat pouze proškolený uživatel a to z důvodu, že v něm nejsou připraveny žádné ochrany. Ochrany jsou potřeba z důvodu zamrznutí primárního nebo sekundárního okruhu a hlavně z důvodu dodržování časových intervalů při zapnutí a vypnutí chladicího zařízení.

Blok je vybaven motohodinami, které zobrazují čas, po jaký bylo chladicí zařízení v provozu, nebo naopak po jakou dobu bylo vypnuté. Tyto údaje pomáhají obsluze, aby dodržovala časové intervaly, avšak je může v případě potřeby porušit.



Obrázek 8-3 Manuální režim ovládání

### 8.3.2 Automatický mód – bez požadavků

Automatický mód bez požadavků pracuje na základě průměrných hodnot, které zaznamenal Kalorimetr. Každou minutu program vzorkuje rozdíl energie, který v systému nastal a ukládá do registru o délce 30. Z průměru hodnot se dále počítá spotřeba chladu, kterou systém má. Díky tomuto údaji jsem schopen predikovat, kdy se systém může vypnout. Minimální čas pro vypnutí je půl hodina. Minimální čas je nastavitelný uživatelem a systém rozhoduje následovně. Pokud má systém energetickou rezervu v sekundárním okruhu, která pokryje průměrnou hodnotu na spotřebu po dobu půl hodiny nebo násobku této hodnoty, chladicí zařízení se vypne po nastavenou dobu.

Pokud se chladicí zařízení vyplo, zapne se po splnění dvou podmínek. Hlavní podmínkou je, že chladicí zařízení bylo vypnuto po čas delší než půl hodiny a druhou, že teplota v sekundárním okruhu stoupla nad teplotu žádanou, která je nastavitelná uživatelem.

### 8.3.3 Automatický mód – s požadavky

#### 8.3.3.1 Požadavek na chlad

Požadavek na chlad mohou vystavit jednotky, ze kterých se projekt Barman skládá. Může to být například sodovač, který potřebuje chlad pro chlazení sody, která je použita v recepturách pro výrobu drinků.

Požadavek je předán do řídicí jednotky po komunikaci Modbus TCP/IP. Jednotka má přidělenou adresu a komunikuje přes daný rámec.

1	Coil	main.Simulace.\$fbPozadavek\$. \$xVystaven\$
2	Coil	main.Simulace.\$fbPozadavek\$. \$xSplnen\$

**Tabulka 8-1 Coily požadavku**

1	Holding Register	main.Simulace.\$fbPozadavek\$. \$iCas_dodani\$	int
2	Holding Register	main.Simulace.\$fbPozadavek\$. \$rE_chlad\$	real
3	Holding Register	main.Simulace.\$fbPozadavek\$. \$rKoef_e\$	real

**Tabulka 8-2 Registry požadavku**

Ve chvíli, kdy jednotka vydá nový požadavek, musí nastavit bit  $xVystaven$  do logické jedničky. Tento bit je přiveden do logické nuly, poté co na něj systém zareaguje a začne s ním pracovat.

Pokud systém vyhodnotí, že je schopen požadavek splnit, na základě simulace, je bit  $xSplnen$  v logické jedničce, pokud přijde nový požadavek, je bit resetován na logickou nulu, pokud systém není schopen požadavek splnit, bit zůstává v logické nule.

Registr Čas dodání, dává systému informaci za kolik minut od aktivování bitu  $xVystaven$ , má být požadavek splněn.

Registr  $rE\_chlad$  dává informaci, kolik tepelné energie bude jednotka v daném čase potřebovat. Údaj je v Joulech a vypočítá se na základě počtu stupňů, o který má být tekutina zchlazena, objemu tekutiny a měrné tepelné kapacity.

Registr  $rKoef\_e$  je celkový koeficient přestupu tepla dané jednotky a vstupuje do simulace.

### 8.3.3.2 Princip řízení jednotky na základě modelu

Regulovat teplotu v systému je možné pouze vypnutím chladícího zařízení. Jeho vypnutí a zapnutí je však spojeno podmínkou, že po zapnutí musí jednotka být v provozu minimálně půl hodiny a po vypnutí, musí být vypnutá taktéž alespoň půl hodiny.

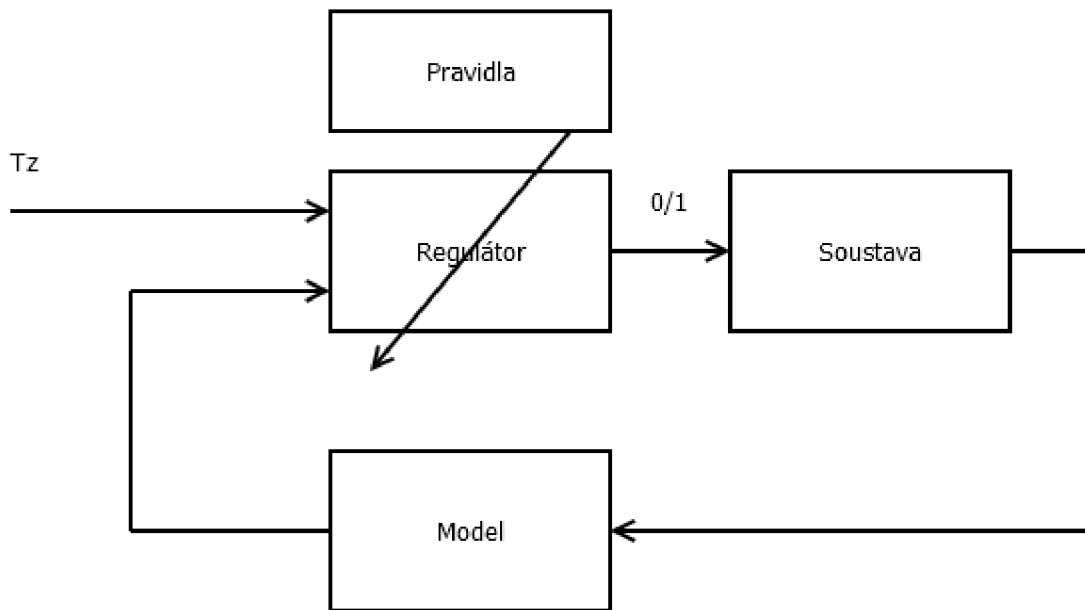
Tyto vlastnosti téměř znemožňují regulaci, protože systém nechladí pouze pro udržení žádané veličiny, ale musí počítat také s nárazovou změnou odběru tepla v podobě například vložení nové lahve s tekutinou o pokojové teplotě.

Pro vyřešení problému jsem se rozhodl využít modelu, který je popsán v předchozích kapitolách této práce.

Rozhodl jsem se použít dva modely, kdy první slouží k zapnutí chladící jednotky a druhý naopak k jejímu vypnutí. Oba modely vstupují do regulátoru, který rozhoduje, zda bude chladící zařízení zapnuto, nebo vypnuto. Toto rozhodnutí závisí na žádané teplotě ( $T_{vz}$ ), která je nastavitelná a to buď pouze uživatelem, nebo na základě přijatých požadavků. Součástí regulátoru jsou



pravidla, která omezují čas, po který musí být chladicí zařízení ve stavu sepnuto, nebo vypnuto. Výše uvedeno vizualizuje blokový diagram níže.



Obrázek 8-4 Diagram regulátoru

### 8.3.3.3 Model pro zapnutí chladicí jednotky

Model je aktivní pouze pokud je chladicí jednotka vypnutá. Pracuje periodicky a bere v potaz žádanou hodnotu teploty sekundárního okruhu a požadavky, které jsou kladeny dalšími jednotkami.

Princip je následující. Pokud je chladicí systém vypnutý, je s periodou dvou minut prováděna simulace, která je 100x urychlena. Simulovaný čas tedy odpovídá 3 hodinám a 15 minutám. Počáteční podmínky simulace je aktuální stav systému tedy energie v primárním a sekundárním okruhu a zapnuté chladicí zařízení. Simulace předvídá pravděpodobný vývoj při zapnutém zařízení a sleduje, kdy a zda musí být chladicí jednotka spuštěna, aby teplota nepřekročila žádanou teplotu, a aby v systému bylo připraveno dostatek energie pro zadané požadavky.

Zadaný požadavek se hodnotí následovně. Z požadavku systém ví, kdy má být chlad připraven a dále kolik energie bude zapotřebí. Díky znalosti objemu a kapacitě chladicího média jsem schopen jednoduše spočítat, o kolik musí být teplota sekundárního okruhu snížena, aby bylo pro požadavek připraveno dostatek chladu.

#### 8.3.3.4 Model pro vypnutí chladicí jednotky

Model funguje velmi podobně jako model pro zapnutí jednotky s tím rozdílem, že simulace počítá s vypnutým chladicím zařízením. Model je aktivní, pouze pokud je chladicí zařízení aktivní a to déle než půl hodiny. Při simulaci se rozhoduje, zda vývoj teploty při vypnutí systému na půl hodiny a déle, nebude znamenat nesplnění požadavku, nebo zvýšení teploty sekundárního okruhu nad žádanou hodnotu.

#### 8.3.3.5 Scénář použití modelu pro zapnutí chladicí jednotky

Postup demonstruji na následujícím příkladu.

$$E_P = m_P \cdot C_p \cdot \Delta T = 2 \cdot 4186 \cdot (25 - 7) = 142\,324 \text{ J} \quad (8.4)$$

$$E_S = m_S \cdot C_p \cdot \Delta T = 12 \cdot 4186 \cdot (25 - 7) = 904\,146 \text{ J} \quad (8.5)$$

$$\Delta T_S = \frac{E_P + E_S}{m_S \cdot C_p} = \frac{142\,324}{12 \cdot 4186} = 2,83 \text{ }^\circ\text{C} \quad (8.6)$$

První výpočet udává, kolik energie  $E_P$  je zapotřebí k ochlazení dvoulitrové nádoby s vodou z pokojové teploty na  $7 \text{ }^\circ\text{C}$ . Druhý výpočet udává, kolik energie je potřeba k ochlazení 12 litrů solanky, která tvoří nemrznoucí kapalinu sekundárního okruhu a  $7 \text{ }^\circ\text{C}$  je žádaná teplota. Poslední výpočet říká o kolik stupňů je třeba předchladit sekundární okruh, aby měl v rezervě dostatek energie pro ochlazení dvou litrové nádoby s vodou. Pokud tedy chci mít v systému dostatek energie, musí být teplota v sekundárním okruhu v čase plnění požadavku alespoň na úrovni  $4,17 \text{ }^\circ\text{C}$ , jinak by požadavek nemusel být splněn.

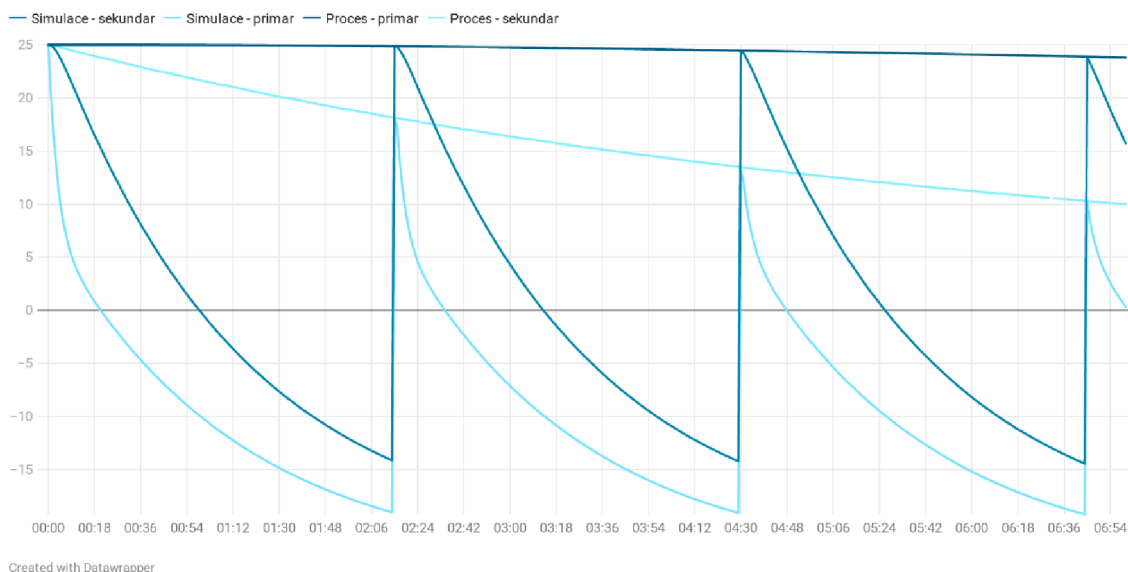
## 9 OTESTOVÁNÍ FUNKČNOSTI MODELU A SOFTWAREHO VYBAVENÍ

### 9.1 Periodické spouštění modelu

První testování mělo za cíl zjistit, zda navržený funkční blok realizuje zadanou funkci. Úlohou je, aby periodicky spouštěl simulaci, která bude trvat 120 sekund, bude 100x urychlena a při každém novém cyklu začne simulovat od aktuálních teplot, které jsou měřeny v procesu.

Jak je vidět z grafu níže, blok funguje dle předpokladu.

### Periodické spouštění simulace



Graf 9-1 Periodické spouštění simulace

## 9.2 Zhodnocení - Automatický mód - bez požadavků

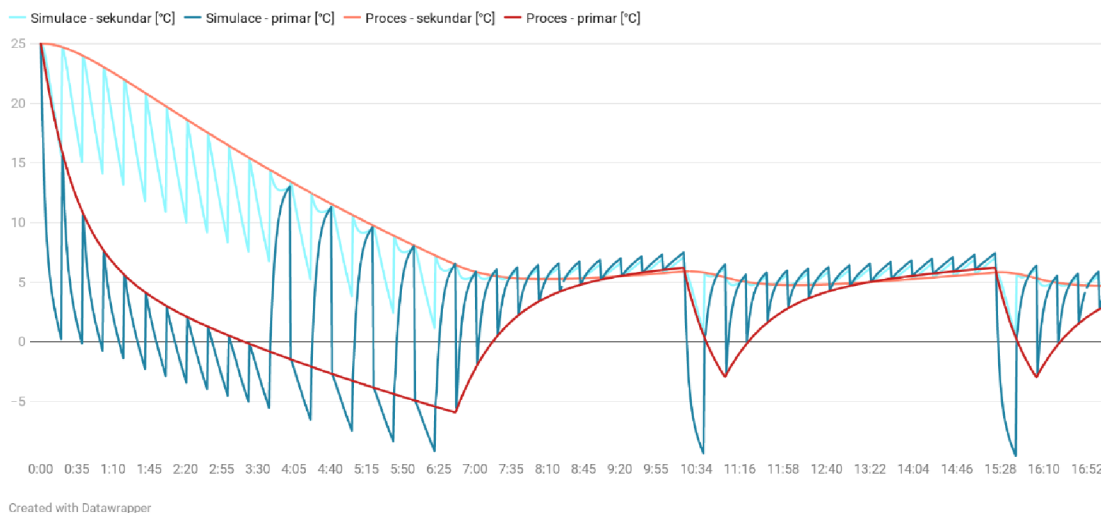
Funkční blok automatického módu, který řídí zapínání a vypínání jsem testoval jednak bez limitu, který omezuje vypnutí a zapnutí chladícího zařízení na časový limit 30 minut a poté s časovým limitem.

Porovnání grafů jasně ukazuje, že časová limitace téměř znemožňuje regulaci teploty. Při regulaci bez limitu teplota v sekundárním okruhu oscilovala v rozmezí do 2 °C a teplota v primárním okruhu oscilovala v rozmezí 10 °C. V porovnání s regulací s limitem 30 minut, kde teplota v sekundárním okruhu oscilovala o 7 °C a teplota v primárním okruhu o 15 °C.

Měření bylo provedeno na modelu, kde model procesu byl 10x urychlen a simulace 100x ve srovnání s reálným časem.

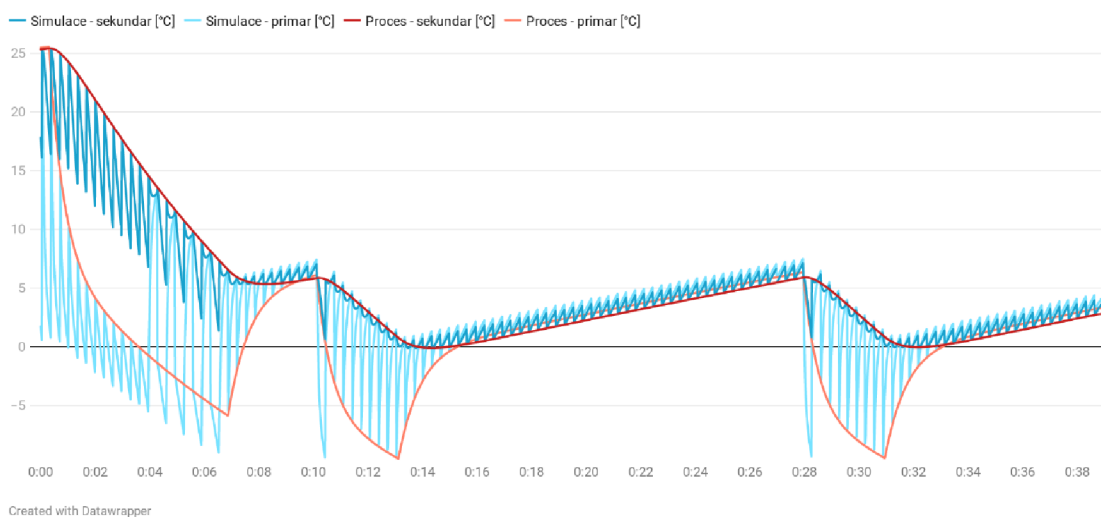
Na grafu, popisujícím automatický mód s limitem, je dobře vidět přesnost simulace, která byla urychlena. Simulace vypočítala předvídané minimum teploty, které by měl primární okruh za půl hodiny dosáhnout a z grafu je vidět, že teplota procesu dané hodnoty dosáhla.

### Automatický mód - bez limitu



Graf 9-2 Automatický mód, bez časového limitu

### Automatický mód - s limitem 30 min



Graf 9-3 Automatický mód, s limitem 30 minut

## 9.3 Zhodnocení - Automatický mód - s požadavkem

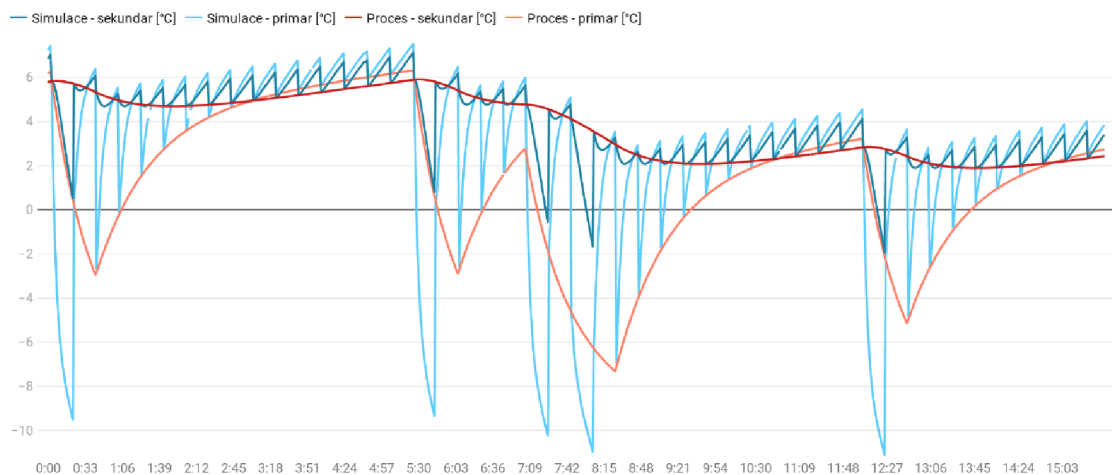
Funkční blok automatického módu, který bere v potaz požadavky od systému v podobě množství energie, která je k ochlazení potřebná a přepočítá ji na změnu teploty chladicího média v sekundárním okruhu.

Blok jsem opět testoval s limitem 30 minut a bez limitu. Testování bych označil za redundantní, protože potvrdilo předpoklad, že časový limit stěží dovoluje systém řádně regulovat. Pokud požadavek přijde v časové oblasti, ve které je chladicí systém vypnutý, je jasné, že systém po dobu této periody nemůže reagovat a splnění požadavku tedy spočívá pouze na čase, kdy byl zadán a kdy má

být splněn. Pokud splnění požadavku je vyžadováno v brzké době od zadání, dá se říct, že záleží pouze na stavu systému, ve kterém se zrovna nachází. Jestli požadavek přišel. Na druhou stranu, pokud je splnění požadavku vyžadováno za delší dobu, například 2 a více hodiny, systém bude schopen dodat potřebný chlad, ale vzhledem k omezení na vypnutí a zapnutí bude muset žádanou hodnotu přenastavit daleko dříve, aby zajistil, že v okruhu bude dostatek chladu i v případě, že chladicí zařízení bude vypnuté ve chvíli, kdy se požadavek začne splňovat.

Závěrem tedy je, že žádaná hodnota, by měla být nastavena tak, aby i v systému bylo dostatek energie i v případě, že požadavek přichází po vypnutí chladicího zařízení, a systém musí čekat. Pokud budu vycházet ze scénáře, kdy požadavek je na 2 litry tekutiny o pokojové teplotě, což se rovná energii v sekundárním okruhu, která se dá vyjádřit jaké rozdíl teplot  $2,83\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Žádaná teplota by tedy měla být stabilně udržována na hodnotě  $7 - 2,83^{\circ}\text{C}$ .

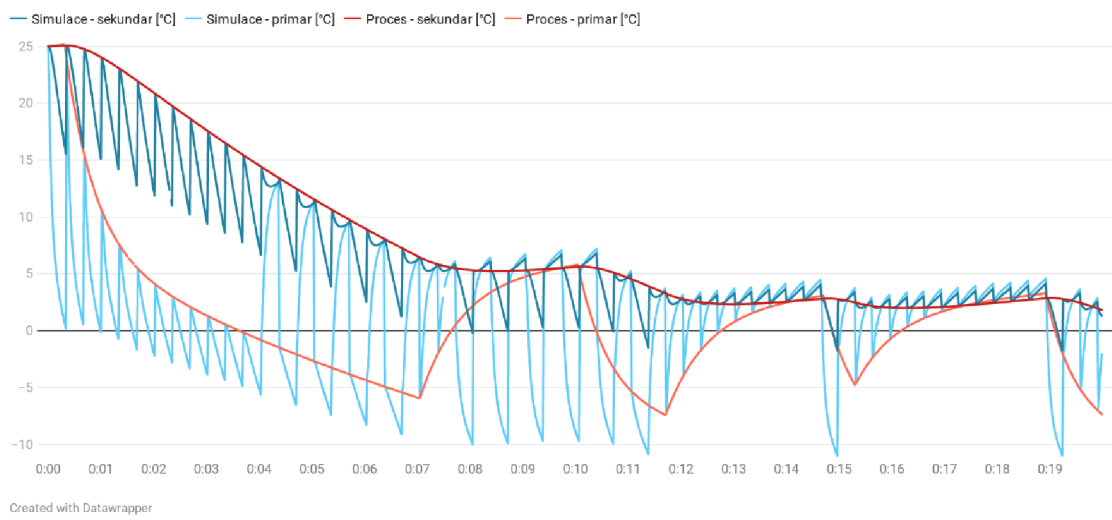
#### Automatický mód - bez limitu - s požadavkem



Created with Datawrapper

**Graf 9-4 Automatický mód, bez časového limitu, s požadavkem**

### Automatický mód - s požadavkem- s limitem 30 min



**Graf 9-5 Automatický mód, s limitem 30 minut, s požadavkem**

## 10 ZÁVĚR

Tato diplomová práce popisuje postup práce od návrhu, kompletaci a následné testování jak jednotky samotné, tak jejího modelu a SW vybavení.

V prvním kroku byly definovány požadavky na základě kterých byly navrženy jednotlivé senzory, akční členy a komponenty včetně kritérií pro výběr a odůvodnění proč byl daný díl zvolen. Dalším krokem bylo vytvoření procesního schématu, za kterým následoval 3D model jednoty a schéma rozvaděče. Na základě vzniklých podkladů, byla jednotka skládána. Tento proces probíhal postupně a průběžně se objevovaly problémy, kvůli kterým bylo nutné původní návrh modifikovat. Kompletní elektronika měla být svedena do jednoho rozvaděče, avšak z důvodu omezení přístupu k jednotce nebyla tato část dokončena a elektroinstalace zůstává ve stavu návrhu a schémata rozvaděče. Ze stejného důvodu bylo provedeno pouze povrchní testování bez měření, kdy se pouze vyzkoušelo, zda jednotlivé komponenty plní svou funkci a jednotka je schopna provozu. Toto testování proběhlo úspěšně z pohledu základní funkčnosti.

Dále byl řešen model jednotky, jehož cílem bylo následně simulovat systém chlazení. Postupně byly řešeny všechny čtyři úrovně modelování od technologické úrovně, přes fyzikální úroveň, kde je popsána teorie a řešerše tepelných systémů, která je použita pro matematickou úroveň a poslední fáze pojednává o algoritmické úrovni, která byla programována ve strukturovaném textu a jako editor byl použit Mervis IDE. Model je jednoduchý a neklade si za cíl detailně kopírovat chování zařízení. Hlavním cílem bylo vytvořit model, na který bude schopen simulovat děje v jednotce a zároveň bude schopen simulaci urychlit oproti reálnému času. Simulace výše uvedené splnila a byla použitelná pro urychlení děje až 1000x oproti reálnému času.

V poslední části byl řešen software pro práci s modelem. Byl definován postup volby modelu, se kterým uživatel pracuje. Dále bylo vytvořeno rozhraní pro komunikaci mezi jednotkami a módy pro řízení jednotky. Módy jsou 3 a to manuální, automatický bez požadavku a automatický s požadavky. Automatický mód používá pro řízení model, který byl použit pro samotnou simulaci. Z výsledků, kterých bylo simulací získáno, plyne, že časové omezení chodu jednotky značně limituje možnosti regulace. Pro srovnání bylo provedeno měření s omezením a bez omezení. Při regulaci bez limitu teplota v sekundárním okruhu oscillovala v rozmezí do 2 °C a teplota v primárním okruhu oscillovala v rozmezí 10 °C. V porovnání s regulací s limitem 30 minut, kde teplota v sekundárním okruhu oscillovala o 7 °C a teplota v primárním okruhu o 15 °C. V kontextu s výpočtem (8.6), kde je vyčíslena hodnota rozdílu teplot, který je potřebný pro vytvoření rezervy pro ochlazení 2 litrů nápoje vyplývá, že jen samotný časový limit pro minimální dobu běhu předpřipraví dostatek chladu pro více než 4 litry nápoje. Z výsledku tedy vyplývá, že systém je po ukončení minimální doby spuštění natolik podchlazen, že se může opět vypnout.

Práce se bohužel v průběhu musela značně odchýlit od původního záměru, kterým byla plně funkční jednotka, která bude připravena pro komunikaci s dalšími subsystemy projektu Barman. Jednotka je v provozuschopném stavu, bez elektroinstalace, avšak veškeré podklady pro dokončení jsou připraveny. Z pohledu SW vybavení byl definován koncept i rámce. Byl zvolen řídicí systém, komunikační protokoly, nedefinován rámec komunikace a naprogramován řídicí algoritmus, který může pracovat v několika módech. Změnou od zadání bylo vytvoření modelu jednotky a následná simulace, na které byl řídicí systém testován.



# 11 LITERATURA

- [1] PolyScience Katalog [online]. 05-2006 [cit. 2011-12-20]  
[http://www.laboplus.pl/images/stories/katalogi/Circulator\\_Catalog.pdf](http://www.laboplus.pl/images/stories/katalogi/Circulator_Catalog.pdf)
- [2] CHLAD, Petr Řídicí systém pro laboratorní model destilační kolony: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2012. 98 s. Vedoucí práce byl Ing. Radek Štohl, Ph.D.
- [3] Odstředivé čerpadlo. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Odstředivé\\_čerpadlo](https://cs.wikipedia.org/wiki/Odstředivé_čerpadlo)
- [4] Frekvenční měnič. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Měnič\\_frekvence](https://cs.wikipedia.org/wiki/Měnič_frekvence)
- [5] Expanzní nádoba. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Expanzní\\_nádoba](https://cs.wikipedia.org/wiki/Expanzní_nádoba)
- [6] Tepelné výměníky [online]. [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: <https://www.regulus.cz/cz/vymeniky-tepla>
- [7] Těsnění vodovodního šroubení [online]. [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: <https://www.novinky.cz/bydleni/jak-na-to/clanek/pet-variant-tesneni-vodovodniho-sroubeni-351017>
- [8] PLÁNEK, Radek. Modelování a simulace komplexních systémů [online]. 2011. Brno [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: <http://www.radekpelanek.cz/dokumenty/ms-web.pdf>
- [9] Teplo, teplota, měrná tepelná kapacita [online]. [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: <https://onlineschool.cz/fyzika/teplo-teplota-merna-tepelna-kapacita/>
- [10] Cooling capacity. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Cooling\\_capacity](https://en.wikipedia.org/wiki/Cooling_capacity)

- [11] INCROPERA, Frank P. Fundamentals of heat and mass transfer. 6th ed. New York: John Wiley, 2007, 997 s. : il. ISBN 0-471-45728-0.
- [12] SUCHÁNKOVÁ, Lenka. Tepelné ztráty kotle na biomasu [online]. Brno, 2019 [cit.2020-03-28]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116006>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojího inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Ing. Petr Kracík, Ph.D.
- [13] BALÁŠ, Marek. Kotle a výměníky tepla. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-214-4770-7.
- [14] BORUTZKY, Wolfgang. Bond Graph Modelling of Engineering Systems: Theory, Applications and Software Support. 1. Springer-Verlag New York, 2011. ISBN 978-1-4419-9368-7.
- [15] THOMA, J. a B. B. OULD BOUAMAMA. Modelling and Simulation in Thermal and Chemical Engineering: A Bond Graph Approach. 1. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2000. ISBN 978-3-662-04181-9.
- [16] Prof. Ing. František Šolc, CSc. a Prof. Ing. Pavel Václavek, Ph.D. Modelování a simulace [online]. 2019, 8.5.2019 [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <https://docs.google.com/viewer?a=v&pid=sites&srcid=dnV0YnluY3p8Ym1vZHxneDo3ZWlzMjhkYzF0VWVjODAy>
- [17] Werter-trio-25-4-180. In: *Cerpadlabezstarosti* [online]. [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <https://www.cerpadlabezstarosti.cz/obehova-cerpadla/1062-werter-trio-25-4-180>
- [18] VOLF, Ivo, Miroslava JAREŠOVÁ a Miroslav OUHRABKA. Přenos tepla: Studijní text pro řešitele FO a ostatní zájemce o fyziku. Fyzikální olympiáda [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <http://fyzikalniolympiada.cz/texty/texttz.pdf>
- [19] MOUSE Q 60. In: <https://www.aquacup.cz/p-mouse-q-60> [online]. 2019 [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <https://www.aquacup.cz/p-mouse-q-60>
- [20] Expanzní nádoba.  
In: <https://www.skodashop.cz/data/shared/files/products/820651/1339>

- 064687\_Z--znam-cel---obrazovky-7.6.2012-122330.jpg [online]. 2019 [cit. 2020-05-10]. Dostupné z:  
[https://www.skodashop.cz/data/shared/files/products/820651/1339064687\\_Z--znam-cel---obrazovky-7.6.2012-122330.jpg](https://www.skodashop.cz/data/shared/files/products/820651/1339064687_Z--znam-cel---obrazovky-7.6.2012-122330.jpg)
- [21] Unipi M503. In: *Www.unipi.technology* [online]. 2019 [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <https://www.unipi.technology/unipi-neuron-m523-p320?categoryId=9>
- [22] Profil konstrukce. In: *Www.askmt.com* [online]. 2019 [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: [https://www.askmt.com/mbfile-web\\_menu\\_system\\_40\\_2-151.jpg](https://www.askmt.com/mbfile-web_menu_system_40_2-151.jpg)
- [23] *Reynolds Number for Pipe Flow* [online]. In: . [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <https://www.nuclear-power.net/nuclear-engineering/fluid-dynamics/reynolds-number/reynolds-number-for-pipe-flow/>
- [24] Overall Heat Transfer Coefficients for Fluids - Heat Exchanger Surface Combinations [online]. In: . 2003 [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: [https://www.engineeringtoolbox.com/overall-heat-transfer-coefficients-d\\_284.html](https://www.engineeringtoolbox.com/overall-heat-transfer-coefficients-d_284.html)
- [25] Tepelná vodivost. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Tepelná vodivost](https://cs.wikipedia.org/wiki/Tepeln%C3%A1_vodivost)
- [26] Mervis. In: *Www.unipi.technology* [online]. [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <https://www.unipi.technology/cs/produkty/mervis-43>
- [27] 1-Wire. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/1-Wire>
- [28] MODBUS. In: *Www.wago.com* [online]. [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <https://www.wago.com/cz/modbus>
- [29] Kalorimetrická rovnice. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Kalorimetrická rovnice](https://cs.wikipedia.org/wiki/Kalorimetrick%C3%A1_rovnice)

# Seznam symbolů, veličin a zkratek

PLC	Programmable Logic Controller – Programovatelný logický automat
SW	Software
HW	Hardware
Modbus	Komunikační protokol používaný v průmyslu
1Wire	Komunikační protokol používaný pro komunikaci se snímači
IDE	Integrated Development Environment – vývojové studio
ST	Strukturovaný text – programovací jazyk používaný pro práci s PLC
Trigger	Označení funkce, která reaguje pulsem v délce jednoho cyklu PLC na nástupnou, nebo sestupnou hranu signálu na vstupu
FB	Funkční blok

# 12 PŘÍLOHA A – SIMULAČNÍ SCHÉMA PRIMÁRNÍHO OKRUHU

