



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
Fakulta strojní



# ANALÝZA CHLAZENÍ FORMY NA TVAROVÁNÍ OBALOVÉHO SKLA

## Diplomová práce

*Studijní program:* N2301 - Strojní inženýrství  
*Studijní obor:* 2302T010 - Konstrukce strojů a zařízení

*Autor práce:* **Bc. Jakub Kolouch**  
*Vedoucí práce:* doc. Ing. Tomáš Vít, Ph.D.



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jakub Kolouch**  
Osobní číslo: **S11000899**  
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Konstrukce strojů a zařízení**  
Název tématu: **Analýza chlazení formy na tvarování obalového skla**  
Zadávací katedra: **Katedra energetických zařízení**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Cílem práce je analýza chlazení formy pro tvarování obalového skla a provedení experimentů s vodním chlazením.

Práce by měla odpovídat následující struktuře:

1. Řešení prací, které se zabývají zvolenou problematikou.
2. Analýza procesu chlazení formy.
3. Návrh a provedení experimentů s vodním chlazením.
4. Analýza a diskuse výsledků.



Rozsah grafických prací: cca 15 stran

Rozsah pracovní zprávy: cca 45 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná

Seznam odborné literatury:

- [1] LIENHARDT, J., H., LIENHARDT, J., H., 2005. A Heat Transfer Textbook. Phlogiston Press, MIT.
- [2] RIEGER, F., ŠESTÁK, J., 1996. Přenos hybnosti, tepla a hmoty. Praha: ČVUT.
- [3] JENČÍK, J., VOLF, J., 2003, Technická měření. Praha: ČVUT.
- [4] BELDA, J., 1991. Sklářské stroje I. Liberec: VŠST.
- [5] SMRČEK, A., 1981. Strojní tvarování skla. Praha: SNTL.

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Tomáš Vít, Ph.D.  
Katedra energetických zařízení

Datum zadání diplomové práce: 25. února 2015  
Termín odevzdání diplomové práce: 26. května 2016

  
prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
děkan



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

V Liberci dne 25. února 2015

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. O právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

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

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

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

V Liberci 25. května 2015

Podpis.....

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat všem, kteří mi pomohli s tvorbou mé diplomové práce. Zvláště pak doc. Ing. Tomáši Vítovi, Ph.D. za konzultace, trpělivost a společnou práci, Ing. Pavlu Kryštůfkovi za konzultace, a dalším. Dále pak mému otci a matce za podporu při mých studiích.

Diplomová práce byla podpořena z projektu Technologické agentury České republiky č. TA03010852 – „Vývoj progresivního systému chlazení forem sklářského tvarovacího stroje“.

## **Abstrakt**

Úkolem této diplomové práce je zhodnotit možnosti optimalizace chlazení sklářských forem a provedení experimentu s vodním chlazením. V práci je uvedena teorie vlastností a zpracování skloviny, rozbor možných provedení, výpočty, numerická simulace, poznatky z měření a výkresová dokumentace. Měření bylo provedeno na experimentálním zařízení v místě firmy Sklostroj Turnov CZ.

### **Klíčová slova**

Forma, voda, chlazení, obalové sklo

## **Abstract**

The aim of this master thesis is to evaluate possibilities of the optimization of the cooling system for producing glass moulds and to execute the water cooling experiment. The work includes the theory of properties, processing molten glass, the analysis of possible implementation, calculations, numerical simulation and it is also introducing some information about the measurement and drawing documentation. Measurements were done on the experimental device at the company Sklostroj (Glass-machine) Turnov CZ.

### **Key words**

Mold, water, cooling, glass packaging

# Obsah

Úvod.....	13
<b>1. Problematika tvarování obalových skel.....</b>	<b>14</b>
1.1 Popis technologie.....	14
1.2 Fyzikálně chemické vlastnosti skloviny.....	15
1.2.1 Viskozita.....	16
1.2.2 Krystalizační schopnost.....	17
1.2.3 Měrná tepelná kapacita.....	18
1.2.4 Tepelná akumulační schopnost.....	19
1.2.5 Tepelná vodivost.....	19
1.2.6 Tepelná průteplivost (propustnost).....	20
1.3 Tepelné procesy při tvarování.....	20
1.3.1 Sdílení tepla mezi sklovinou a povrchem formy.....	22
<b>2. Návrh variant.....</b>	<b>23</b>
2.1 Požadované cíle optimalizace.....	23
2.2 Varianty řešení.....	23
2.2.1 Chlazení proudem vzduchu.....	23
2.2.2 Chlazení proudem upraveného vzduchu.....	24
2.2.3 Chlazení s obráceným proudem vzduchu.....	25
2.2.4 Chlazení kapalinou.....	25
2.2.5 Chlazení s fázovým přechodem.....	26
<b>3. Energetické zhodnocení navržených variant.....</b>	<b>28</b>
3.1 Množství odvedeného tepla a průměrný tepelný výkon.....	28
3.2 Chlazení proudem vzduchu.....	33
3.3 Chlazení proudem upraveného vzduchu.....	36
3.4 Chlazení kapalinou.....	41
3.5 Chlazení s fázovým přechodem.....	41

3.6 Výběr varianty.....	42
<b>4. Numerická simulace.....</b>	<b>43</b>
4.1 Tvorba sítě.....	43
4.2 Nastavení ploch modelu formy.....	43
4.3 Nastavení systému.....	46
4.4 Vypočítané hodnoty.....	47
4.5 Grafické znázornění výsledků.....	50
<b>5. Konstrukce zařízení.....</b>	<b>52</b>
5.1 Hydraulický okruh.....	52
5.2 Konstrukční uspořádání.....	54
5.3 Použité strojové prvky.....	55
5.3.1 Vstřikovací trysky.....	55
5.3.2 Čerpadlo.....	56
5.3.3 Plynový hořák.....	57
5.3.4 Pojezdový mechanismus.....	58
<b>6. Experiment s vodním chlazením.....</b>	<b>59</b>
6.1 Příprava.....	59
6.2 Měření.....	60
6.3 Zhodnocení měření.....	62
<b>7. Závěr.....</b>	<b>63</b>
<b>Literatura.....</b>	<b>65</b>



## Seznam obrázků

1. Závislost viskozity skla na teplotě.....	16
2. Krystalizační schopnost.....	18
3. Postup tvarování lahve.....	21
4. Povrchová teplota formy a skloviny na počátku a na konci tváření.....	22
5. Schéma chlazení proudem vzduchu.....	23
6. Schéma chlazení proudem upraveného vzduchu.....	24
7. Schéma chlazení s obráceným proudem vzduchu.....	25
8. Schéma chlazení kapalinou.....	26
9. Schéma chlazení s fázovým přechodem.....	27
10. Konečná forma.....	28
11. Časové znázornění výrobního cyklu.....	29
12. Síť modelu forny.....	44
13. Značení ploch modelu formy.....	45
14. Průběh přiváděného tepelného toku vstupujícího do formy.....	46
15. Průběh odváděného tepelného toku vystupujícího z formy.....	46
16. Měřicí místa.....	47
17. Graf vypočítaných teplot na vstupu a výstupu.....	48
18. Graf vypočítané teploty v Bodě 1.....	49
19. Graf vypočítané teploty v Bodě 2.....	49
20. – 28. Grafické znázornění časové změny teploty.....	50
29. Chladicí okruh (schéma).....	53
30. Experimentální stroj k simulaci chlazení sklářské formy.....	54
31. Tryska TX.60 se zobrazením rozstříku.....	55
32. Výkonová křivka čerpadel řady NGX.....	56
33. Čerpadlo NGX.....	56
34. Dvojitý plynový hořák.....	57
35. Lineární jednotka.....	58
36. Převodovka.....	58
37. Servomotor.....	58

38. Místa opatřená termočlánky.....	59
39. Časování cyklů ohřívání a chlazení.....	60
40. Graf naměřených hodnot.....	61
41. Graf naměřených hodnot (porovnání hloubek).....	61
42. Tepelné vlny procházející formou (sonda 3).....	62

## **Seznam tabulek**

1. Přehled středních měrných tepelných kapacit běžných sklovin.....	19
2. Přehled hodnot tepelné akumulační schopnosti běžných sklovin.....	19
3. Přehled tepelných vodivostí běžných sklovin.....	20

## Seznam použitých symbolů

$\eta$	$Pa \cdot s$	dynamická viskozita
$T$	$K$	termodynamická teplota
$t$	$^{\circ}C$	teplota
$\nu$	$m^2 / s$	kinematická viskozita
$c$	$J / (kg \cdot K)$	měrná tepelná kapacita
$E$	$J / (K \cdot m^2 \cdot s^{1/2})$	tepelná akumulční schopnost
$\rho$	$kg / m^3$	hustota
$\lambda$	$W / (m \cdot K)$	součinitel tepelné vodivosti
$m$	$kg$	hmotnost
$t$	$s$	čas
$Q$	$J$	teplo
$S$	$m^2$	plocha
$c$	$W / (m^2 \cdot K^4)$	součinitel záření
$\varepsilon$	1	emisivita
$d_u$	$m$	určující rozměr
$t_u$	$^{\circ}C$	určující teplota
$Gr$	1	Grashofovo číslo
$g$	$m / s^2$	tíhové zrychlení
$\gamma$	$1 / K$	izobarický součinitel objemové roztažnosti
$Pr$	1	Prandtlovo číslo
$Nu$	1	Nusseltovo číslo
$\alpha$	$W / (m^2 \cdot K)$	součinitel přestupu tepla
$P$	$W$	výkon
$p$	$Pa$	tlak
$c_p$	$J / (kg \cdot K)$	měrná tepelná kapacita izobarická
$\varphi$	1	relativní vlhkost

$d$	$kg_p / kg_{sv}$	poměrná vlhkost vlhkého vzduchu
$i$	$J / kg_{sv}$	entalpie
$d$	$m$	průměr
$l$	$m$	délka
$A$	$m^2$	plocha
$n$	1	počet kanálů
$\lambda$	1	součinitel třecích ztrát
$\xi$	1	součinitel místních ztrát
$\chi$	1	Poissonova konstanta
$r$	$J / (kg \cdot K)$	specifická plynová konstanta
$\dot{m}$	$kg / s$	hmotnostní průtok
$c$	$m / s$	rychlost proudění
$a$	$m / s$	rychlost zvuku
$M$	1	Machovo číslo
$\eta$	1	účinnost
$V$	$m^3$	objem
$\dot{V}$	$m^3 / s$	objemový průtok
$c$	1	počet cyklů
$l$	$m$	délka
$i$	1	převodový poměr
$M$	$N \cdot m$	převodový poměr
$n$	$ot / min$	otáčky

## Úvod

V každém odvětví průmyslové výroby je neodmyslitelnou součástí pokroku vývoj nových technologií. Ty nám napomáhají k dosažení lepší kvality, hospodárnosti, produktivity, nebo všech těchto aspektů současně. Jinak tomu není ani v případě zaběhnutých a osvědčených výrobních procesů (v našem případě výroba skleněných lahví), neboť téměř každý výrobní krok či strojní prvek může být optimalizován.

Tato práce je zaměřena na úpravu chladicího systému sklářských forem. Jak bude popsáno níže, proces chlazení úzce souvisí s délkou jednotlivých fází výroby a tím i s celkovou produktivitou. Ta je jedním z hlavních cílů optimalizace. Zároveň je žádoucí tohoto zlepšení dosáhnout, aniž by se zvýšila energetická náročnost. Je pravděpodobné, že toho nebude moci být dosaženo pouhou úpravou stávající technologie, a že bude nutné přijít s novým technickým uzpůsobením.

Vedle těchto nejdůležitějších požadavků je zároveň žádoucí dosáhnout snížené hladiny hluku na pracovišti a v ideálním případě znovu využít teplo odvedené z formy. Užitím těchto inovací nesmí být narušena spolehlivost provozu linky.

První část této práce se zabývá teorií vlastností sklovin a možnostmi jejich zpracování. V druhé části jsou popsány jednotlivé varianty řešení s rozborem jejich kladů a záporů. Třetí část se zabývá výpočty energetické náročnosti jednotlivých variant a dává nám obraz, jakým směrem se ubírat při výběru. V předposlední části nalezneme numerickou simulaci věnovanou vybrané variantě. Poslední část je zaměřena na popis konstrukce, získané poznatky z praktických měření a celkové zhodnocení.

# 1. Problematika tvarování obalových skel

## 1.1 Popis technologie

Výrobky označované jako obalové sklo zahrnuje: obalové sklo nápojové, konzervové, farmaceutické sklo, reagenční lahve, drobné a velké obalové sklo apod. Pro automatickou výrobu těchto skel se používá celá řada výrobních strojů různé konstrukce umožňující výrobu obalových skel různou technologií. Obalová skla jsou převážně vyráběna těmito technologiemi [1]:

- lisováním
- lisofoukáním
- dvakrátfoukáním

Všechny tyto technologie jsou založeny na možnosti ovládnutí průběhu tuhnutí skloviny v závislosti na konečném tvaru výrobku. Pro určité způsoby tvarování se zpravidla volí sklovina o různém chemickém složení, zaručujícím potřebné fyzikální vlastnosti a dovolující v potřebném časovém rozsahu ovládat chlazením její viskozitu v jednotlivých fázích tvarování výrobku.

Dá se tedy tvrdit, že intenzita ochlazování formy je z hlediska technologie důležitým parametrem; příslušnou tvarovací technologii nelze bezpečně zvládnout bez podrobné znalosti tepelně technických dějů.

Tvarování obalového skla v automatické výrobě se provádí v kovových formách; počet a typ forem je určen tvarovací technologií. V zásadě je možno tvarovací technologie (podle počtu forem potřebných pro zhotovení jednoho výrobku) rozdělit na technologie tvarovací:

- jednostupňové
- vícestupňové

Typickým případem užití jednostupňové technologie je lisování. Tvar výrobku je zhotoven pomocí razníku, který přesně dávkovaný objem skloviny vytvaruje během jedné operace uvnitř negativu formy.

Naproti tomu lisofoukání a dvakrátfoukání jsou technologie dvoustupňové; konečný tvar výrobku je získán až ve druhém kroku. Uvnitř první formy (přední) je vytvarována baňka s hrdlem, která se dále přesouvá do formy druhé (konečné), kde je

získán konečný tvar výrobku. Při užití technologie lisofoukání je tvar baňky v přední formě vytvořen lisováním, u dvakrát foukání se v přední i konečné formě k tvarování využívá stlačeného vzduchu. K získání konečného tvaru je tedy vždy užito technologie vyfukování.

Tyto vícestupňové technologie vždy probíhají tak, že v prvním kroku je již získán konečný tvar hrdla, který nám dále slouží k manipulaci polotovaru mezi výrobními pozicemi [1].

Z tohoto popisu tedy plyne, že uvnitř forem probíhají hlavně tyto děje:

- a) mechanické tvarování
- b) odvod tepla (z výrobku musí být odvedeno přesně dané množství tepla, které zaručí, že se při další manipulaci výrobek nezbortí vlivem vysoké viskozity, nebo že se ve sklovině neobjeví praskliny zapříčiněné nízkou teplotou při tvarování).

## 1.2 Fyzikálně chemické vlastnosti skloviny

Na fyzikální vlastnosti skloviny uplatňující se při tvarování má největší vliv především teplota a chemické složení. Protože tvarování je v podstatě regulované ochlazování skloviny, budou mít na tvarování přímý vliv ty fyzikální vlastnosti, které ovlivňují rychlost chladnutí skloviny [1] [2].

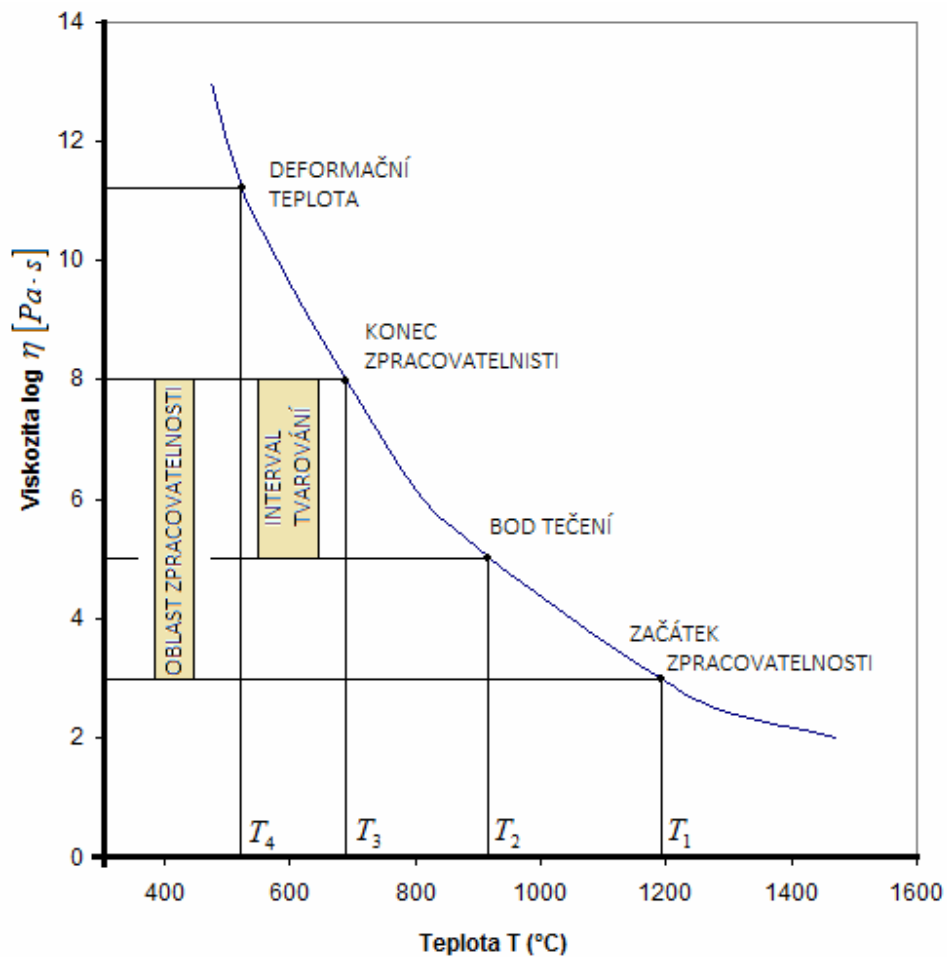
Při tvarování skel jsou důležité tyto vlastnosti:

- Viskozita
- Krystalizační schopnost
- Povrchové napětí
- Hustota
- Měrná tepelná kapacita
- Tepelná akumulační schopnost
- Tepelná vodivost
- Tepelná propustnost ( průteplivost )

Dále budou zmíněny pouze ty vlastnosti, které souvisí s naší problematikou.

### 1.2.1 Viskozita

Se stoupající teplotou přechází sklo ze skelného (tuhého) stavu do stavu metastabilního, přestává být látkou, která se jeví jako tuhá a stává se postupně plastickou až tekutou – stává se tedy sklovinou. Mírou plastičnosti skloviny a schopností téci je viskozita. Ta se začne u skel projevovat při teplotách přibližně od 500 °C. V celém rozsahu viskozit se sklo chová jako Newtonovská kapalina, tj. rychlost deformace je při kterékoliv teplotě přímo úměrná napětí, které deformaci působí. Funkční závislost viskozity na teplotě je znázorněna viskozitní křivkou [1].



Obr. 1 – Závislost viskozity skla na teplotě



Při tvarování skel se jednotlivé výrobní operace provádějí pouze při určitých viskozitách (v intervalech viskozit). Viskozitní křivka je znázorněna na (Obr. 1), kde jsou dále znázorněny důležité body, oblast zpracovatelnosti a interval tvarování.

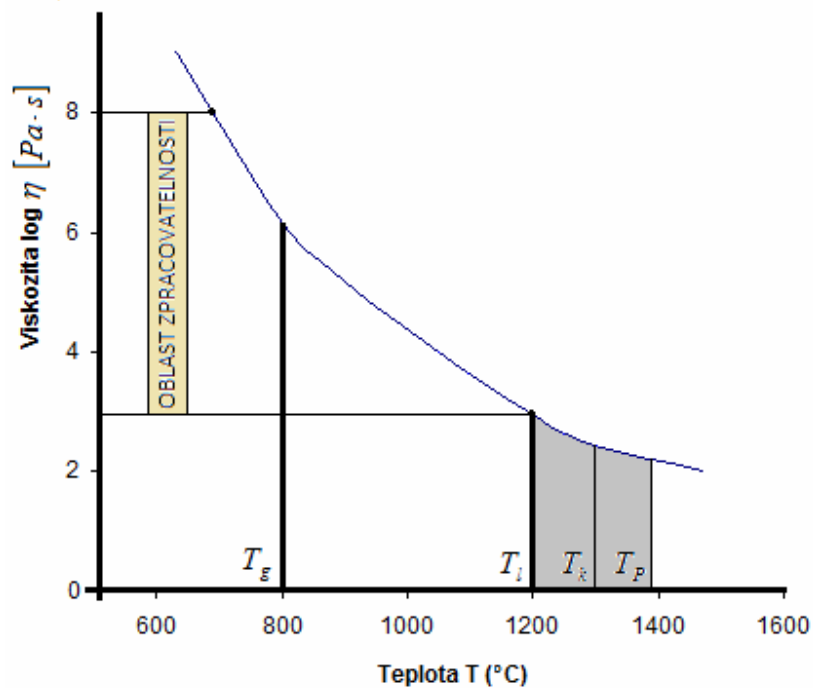
$\eta_1 = 10^3 Pa \cdot s$	$T_1$ - Začátek zpracovatelnosti sklovin, tvorba dávky skloviny.
$\eta_2 = 10^5 Pa \cdot s$	$T_2$ - Bod tečení – začátek mechanického tvarování ve formě.
$\eta_3 = 10^8 Pa \cdot s$	$T_3$ - Konec zpracovatelnosti – při mechanickém působení pod touto teplotou by docházelo k popraskání skloviny (sklovina ztrácí plastičnost).
$\eta_3 = 10^{11} Pa \cdot s$	$T_4$ - Deformační bod – pod touto teplotou se výrobek dále nebude deformovat.

Oblast mezi teplotami ( $T_1, T_3$ ) se nazývá oblast zpracovatelnosti a odpovídají jí hodnoty viskozity ( $\eta_1, \eta_3$ ). Obdobně oblast mezi teplotami ( $T_2, T_3$ ) se nazývá interval tvarování a odpovídají mu hodnoty viskozity ( $\eta_2, \eta_3$ ).

### 1.2.2 Krystalizační schopnost

V určitém intervalu teplot a při dostatečně dlouhé době setrvání v tomto rozmezí může dojít k tzv. odskelnění. Pro tento děj je důležitá teplota liquidus a teplota transformace. Nad hranicí teploty liquidus již nedochází ke krystalizaci a sklovina je v celém objemu roztavena (bez jakýchkoliv krystalů); naopak pod teplotou transformace již nevzniká riziko odskelnění, (vlastnosti skloviny se zde výrazně mění a nemůžeme ji dále brát ani jako tekutinu, ani jako látku tuhou). Tyto teploty jsou ovlivněny chemickým složením skloviny. U běžných typů obalových skel je tento interval 800 – 1200°C, což přibližně odpovídá intervalu zpracovatelnosti (Obr.2). Z tohoto důvodu je nutné, aby byla teplota

skloviny před přivedením do formy udržována na teplotě vyšší, než je teplota liquidus. Tvarovací proces pak musí probíhat dostatečně rychle, aby při překračování zmíněného teplotního pásma nedošlo ke krystalizaci [1] [3].



Obr. 2 – Krystalizační schopnost

$T_g$  - Teplota transformace

$T_l$  - Teplota liquidus

$T_k$  - Teplota kapky – teplota uvnitř příváděcího kanálu

$T_p$  - Teplota v pracovním prostoru tavící pece

### 1.2.3 Měrná tepelná kapacita

Střední měrná tepelná kapacita  $c$  je závislá na chemickém složení; stoupá s teplotou. K výpočtu těchto kapacit při kalorimetrických měřeních se nejlépe osvědčila měrná tepla vypočítaná podle faktorů Sharp a Ginthera. S výjimkou olovnatých a barnatých skel platí tyto faktory s přesností  $\pm 1\%$ . V (tab. 1) jsou uvedeny hodnoty měrných tepelných kapacit pro několik charakteristických sklovin [2].

Tab. 1 – Přehled středních měrných tepelných kapacit běžných sklovin

Sklovina	Střední měrné teplo 20-t $J/(kg \cdot K)$ pi teplotě ( $^{\circ}C$ )			
	20-400	20-500	20-600	20-700
Bílá obalová či tabulová	1000	1060	1080	1100
Boritokřemičitá	1010	1045	1075	1100
Olovnatá s 30% PbO	790	830	880	930
Barnatá s 10% BaO	910	950	970	1030
Hnědé vysokohlinité	980	1020	1050	1080

#### 1.2.4 Tepelná akumuláční schopnost

Tepelná akumuláční schopnost je další vlastností výrazně ovlivňující děj tuhnutí. Má největší vliv na transport tepla ze skloviny do formy. Zpravidla se počítá dle vztahu  $E = \sqrt{c\lambda\rho}$ , do kterého se dosazuje střední měrná tepelná kapacita, hustota při pokojové teplotě a tepelná vodivost. Vypočítané hodnoty jsou uvedeny v (tab. 2) [2].

Tab. 2 - Přehled hodnot tepelné akumuláční schopnosti běžných sklovin

Sklovina	Tepelná akumuláční schopnost $J/(K \cdot m^2 \cdot s^{1/2})$ pi teplotě ( $^{\circ}C$ )			
	400	500	600	700
Bílá obalová či tabulová	1940	2060	2140	2240
Boritokřemičitá	1830	1840	1830	1920
Olovnatá s 40% PbO	1380	1500	1630	1750
Barnatá s 21% BaO	2200	2250	2260	2290

#### 1.2.5 Tepelná vodivost

Tepelná vodivost je důležitou fyzikální veličinou při přenosu tepla. Samotná kondukční tepelná vodivost  $\lambda$  je při zvýšených teplotách velmi špatně měřitelná, neboť se zde značně uplatňuje sálavá složka. Pro případ tvarování skla má tato veličina největší význam v rozmezí 400 až 800  $^{\circ}C$ . Dá se říci, že tepelná vodivost se mění s chemickým složením; v závislosti na teplotě přibližně lineárně stoupá, přičemž vliv chemického složení je značný, vliv teploty malý. Pro představu jsou v (tab. 3) uvedeny hodnoty  $\lambda$  některých běžných sklovin [1] [2].

Tab. 3 - Přehled tepelných vodivostí běžných sklovin

Sklovina	Tepelná vodivost $W/(m \cdot K)$ pi teplotě ( °C )			
	400	500	600	700
Bílá obalová či tabulová	1,5-1,7	1,6-1,8	1,7-2,3	1,8-2,7
Boritokřemičitá	1,3-1,8	1,4-1,9	1,4-2	1,5-2,3
Olovnatá s 40% PbO	0,8	0,9	1	1,1
Barnatá s 21% BaO	1,5	1,6	1,6	1,7

### 1.2.6 Tepelná průteplivost (propustnost)

Sklo podle chemického složení (hlavně podle obsahu barvicích kysličníků železa, chromu a niklu) propouští sálavé teplo. Tato vlastnost je příčinou toho, že při vyšších teplotách může být značné množství tepla sdíleno ve skle sáláním. Dá se říci, že sklo je neprůteplivé pro záření s vlnovou délkou nad  $4,5 \mu m$ . Pod touto vlnovou délkou dochází k intenzivnímu propouštění sálavého tepla. Míra propustnosti je popsána součinitelem absorpce  $k$ . Čím je tento součinitel menší, tím lépe sklo teplo propouští. Jeho hodnota je prakticky neměnná mezi teplotami 18 až 600 °C, poté skokově poklesne a dále v rozmezí 800 až 1000 °C se drží na přibližně stejné hodnotě. U některých skel se tento součinitel s teplotou téměř nemění [1].

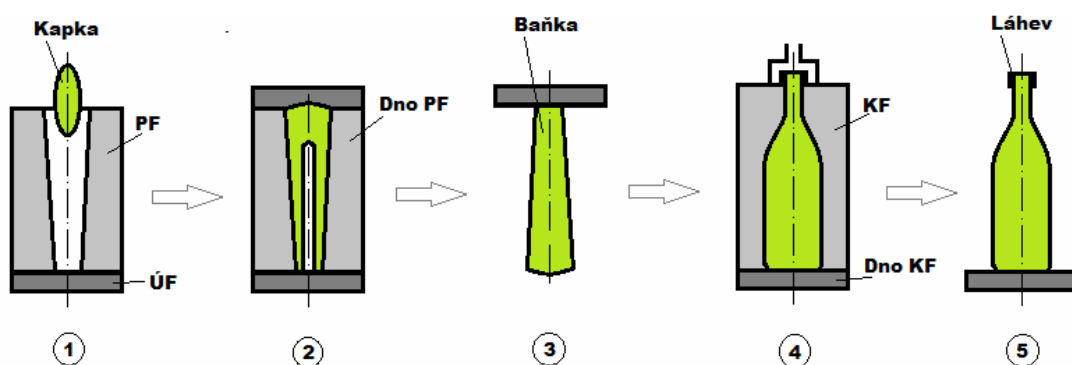
### 1.3 Tepelné procesy při tvarování

Bylo uvedeno, že tvarování je regulovaná změna viskozity v průběhu tvarovacího procesu a zároveň změna tvaru skloviny. Časová změna viskozity přímo souvisí s množstvím odvedeného tepla z výrobku a rychlostí ochlazování.

Obecně se proces dvoustupňového tvarování dá popsat takto:

Po naplnění přední formy dávkou skloviny o určité viskozitě, vyplní sklovina pod působením vnějších sil dutinu přední formy. Teplo se začne okamžitě odvádět styčnou plochou a na povrchu skloviny se vytvoří „nosná vrstva“ o vysoké viskozitě, která drží tvar i po vyjmutí polotovaru z přední formy a je tak důležitá k dalšímu technologickému

kroku. Po otevření formy dojde k tzv. „zpětnému prohřátí“, kdy teplo uzavřené uvnitř baňky prochází sklem směrem k povrchu, který následně zvýší svou teplotu a viskozita poklesne; polotovár je připraven k dalšímu zpracování. Účelem ZP je tedy získat tepelně homogenní baňku. Doba, po kterou se polotovár nachází mimo formu nazýváme „doba zpětného prohřátí“. Teplo procházející z vnitřních vrstev skloviny k vnějším se předává částečně vedením a při těchto teplotách rovněž i výrazně radiací. Celý proces je zobrazen na (Obr. 3) [1].



Obr. 3 – Postup tvarování lahve

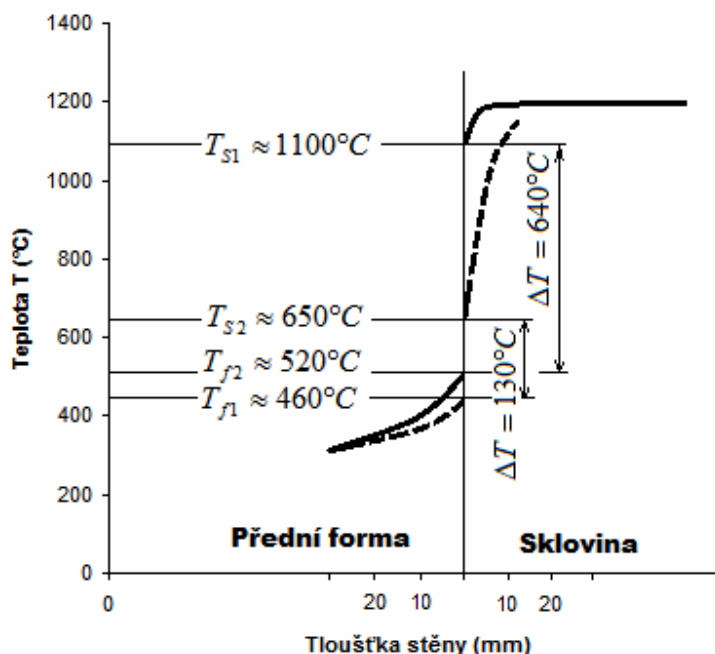
ÚF – ustní forma, PF – přední forma, KF – konečná forma

- 1) plnění přední formy
- 2) tvarování v přední formě
- 3) přenesení baňky z přední do konečné formy
- 4) tvarování v konečné formě
- 5) chlazení hotového výrobku na odstávce

Přední forma musí odejmout sklovině jistou část tepla a ochladit okrajové vrstvy tak, aby povrch baňky byl pro následující předání do konečné formy dostatečně tuhý. Konečná forma dává výrobku konečný tvar a ochladí sklovinu natolik, aby se výrobek nedeformoval na odstávce. Teplota vnitřního povrchu přední formy má vyšší teplotu než teplota vnitřního povrchu formy konečné. Konečná forma musí odvádět teplo z výrobku pomaleji, aby při překročení transformační teploty nedošlo ke vzniku drobných povrchových trhlinek. Má se za to, že povrch výrobků je tím kvalitnější, čím vyšší je teplota konečné formy. Naproti tomu tvarování v přední formě má podstatný vliv na rozložení lahve (stejněoměrná síla stěny) [1].

### 1.3.1 Sdílení tepla mezi sklovinou a povrchem formy

Na obr. 4 je znázorněn průběh teplot v hraniční části mezi sklovinou a stěnou formy na počátku a na konci tvarování uvnitř formy. Teploty zobrazené na schématu jsou teploty přibližně experimentálně zjištěné při výrobě lahví střední velikosti. Teploty na povrchu formy i skloviny se v průběhu času snižují a jejich rozdíl se zmenšuje. Vyrovnat se jim ale nepodaří. Ve velmi tenké vrstvě (0,01 – 0,1mm) dochází ke skokové změně teploty o 100 – 200 °C. Příčina tohoto prudkého teplotního skoku je vysvětlována vznikem špatně tepelně vodivé vrstvy, která vzniká v důsledku nerovností povrchu. Sklovina tak vlivem povrchového napětí nevniká do všech míst a vznikají vzduchové izolační plochy (polštáře). Kvalita styku těchto dvou materiálů silně závisí na lisovacím či vyfukovacím tlaku. Překročí-li teplota povrchu formy určitou hranici, která bývá u běžných materiálů přibližně 610 °C, stykové poměry mezi formou a sklovinou se změní. Sklo se postupně začne lepit na povrch formy: Tento jev se vysvětluje tím, že viskozita skloviny je při těchto teplotách natolik malá, že sklo zateče i do drobných trhlinek na povrchu formy, kde zatuhne a dojde tak k obtížné oddělitelnosti [1].



Obr. 4 – Povrchová teplota formy a skloviny na počátku a na konci tváření

## 2. Návrh variant

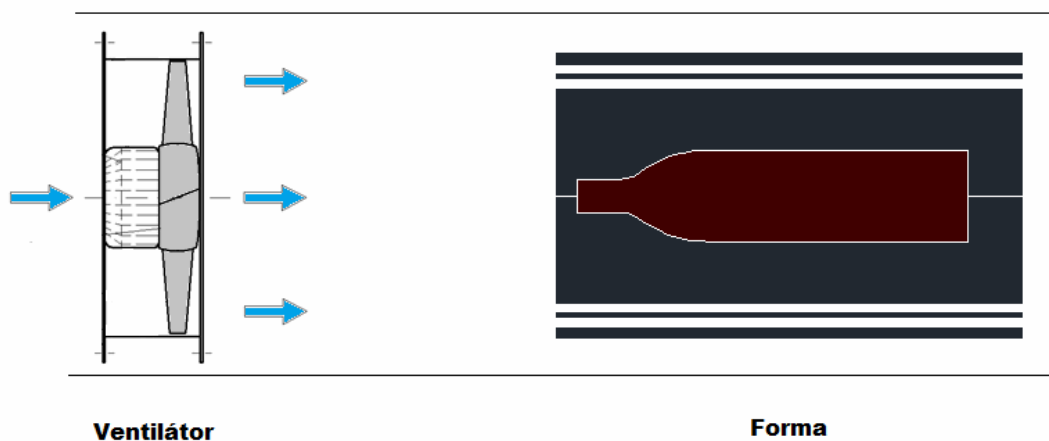
### 2.1 Požadované cíle optimalizace

Účelem úprav na stávající technologii je v první řadě zajistit větší produktivitu pracovního procesu, čímž se myslí zkrácení doby jednoho výrobního cyklu asi o 10%. Dále s přihlédnutím k vlivu na lidské zdraví snížit hluk na pracovišti a v ideálním případě znovu využít teplo odvedené z formy. Těchto cílů by mělo být dosaženo bez zvýšení energetické náročnosti výrobního procesu [4].

### 2.2 Varianty řešení

#### 2.2.1 Chlazení proudem vzduch

Tohoto provedení je aktuálně využíváno; chladicí vzduch je skrz ventilátor tlačěn potrubím směrem k formě, kterou prochází skrze vrtané kanály (Obr. 5) [4].

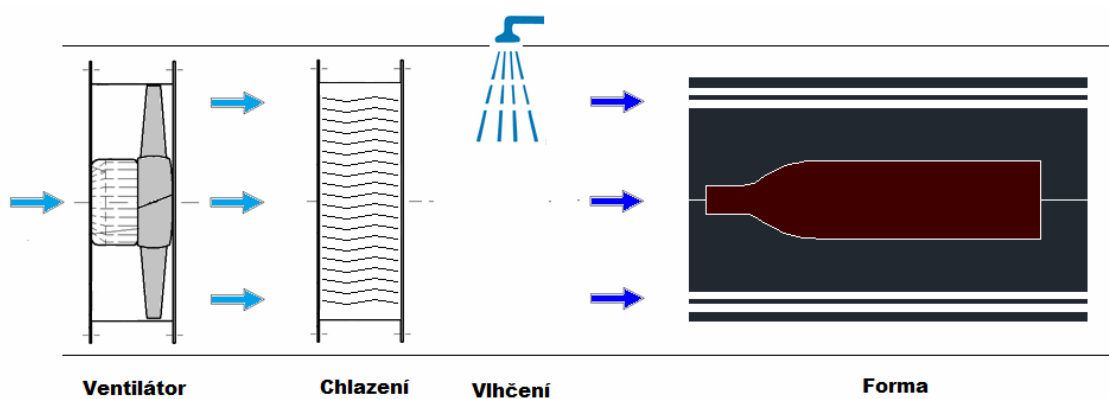


Obr. 5 – Schéma chlazení proudem vzduchu

Výhodou tohoto provedení je jeho jednoduchost, spolehlivá funkce, nízké náklady na údržbu a dobrá možnost regulace. Nevýhodou je vysoká spotřeba energie k pohonu ventilátoru, hluchnost způsobená prouděním vzduchu uvnitř kanálů formy a skrze ventilátor a dále malá chladicí účinnost (zařízení musí být dosti robustní, aby bylo dosaženo požadovaného chladicího výkonu), s čímž souvisí limity tohoto provedení a nemožnost dosažení vyšší produktivity výroby.

### 2.2.2 Chlazení proudem upraveného vzduchu

Aktuální provedení je upraveno připojením ochlazovacího a zvlhčovacího zařízení, které je umístěné mezi formou a ventilátorem (Obr. 6) [4].



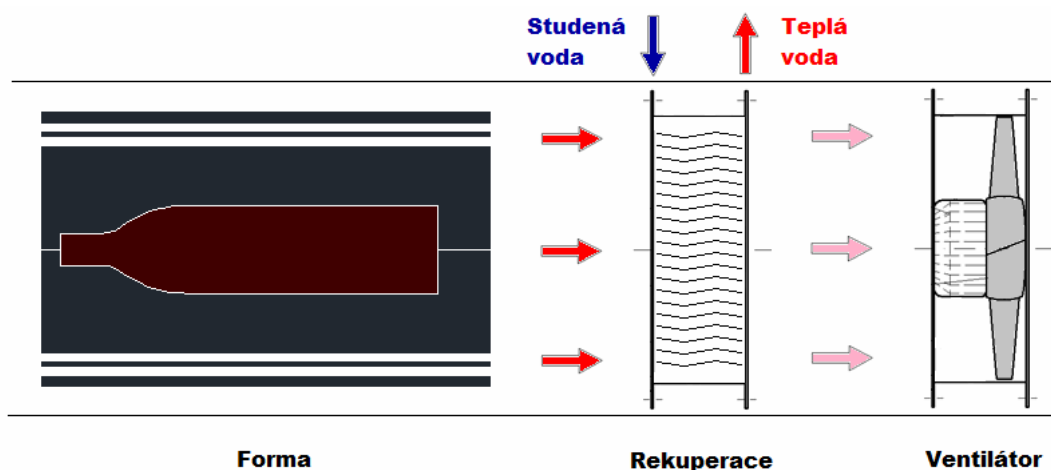
Obr. 6 – Schéma chlazení proudem upraveného vzduchu

Je to malá úprava již použitého provedení, která nám ovšem nepomáhá vyřešit hlavní obtíže. Přenos tepla je zde oproti původnímu provedení lepší, ne však natolik aby se dalo počítat s výrazným zlepšením efektivity výroby. Změna rovněž nemá vliv na snížení hlukového zatížení. K úpravě vzduchu je nutné použít chlazení, k jehož funkci musíme vynaložit další nemalé množství energie. Jako výhoda by se zde daly zmínit stabilní parametry vzduchu a s tím související lepší nastavitelnost systému.



### 2.2.3 Chlazení s obráceným proudem vzduchu

U této varianty je prohozený směr proudu vzduchu. Ten je nasáván skrze formu, prochází tepelným výměníkem a následně prostupuje ventilátorem (Obr. 7) [4].

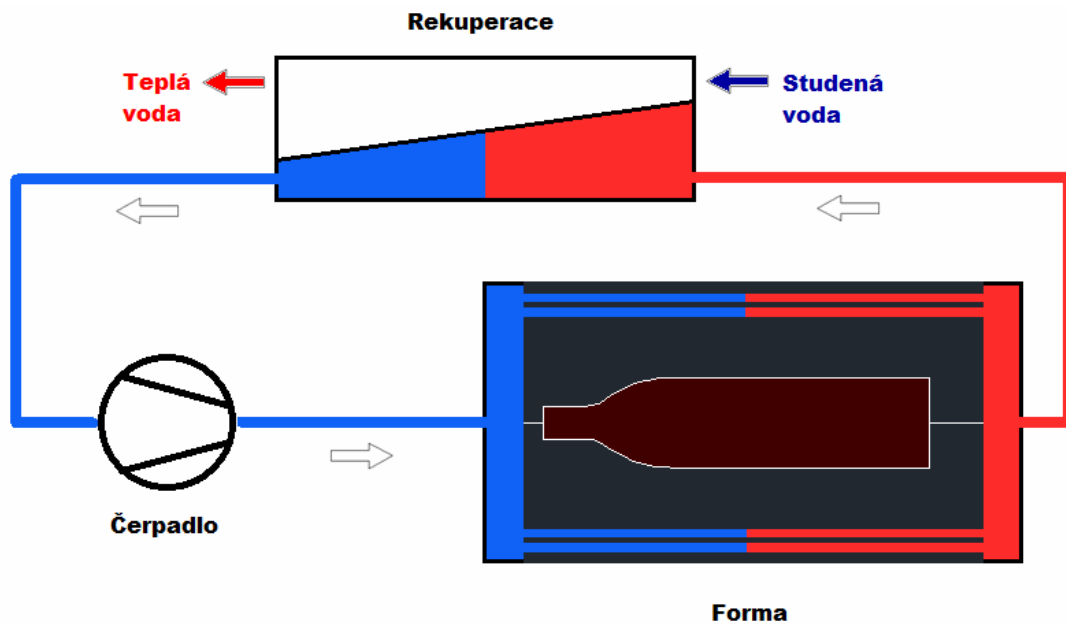


Obr. 7 – Schéma chlazení s obráceným proudem vzduchu

Tato varianta se oproti předchozím liší v tom, že je mezi ventilátor a formu dále vsazen tepelný výměník, jež nám umožňuje využít teplo odvedené z formy. K bezchybnému chodu této soustavy je nutné zařadit dočištění vzduchu od částecek oleje a prachu jdoucích od formy. Ty by mohly zanášet teplosměnné plochy výměníku a měnit tak nastavení systému. Výhodou je malá úprava stávajícího provedení, možnost rekuperace odvedeného tepla a o něco tišší chod. Problematickým může být zmíněné dočišťování vzduchu a špatné řízení jeho parametrů. Intenzita přenosu tepla se v tomto případě oproti předchozím též příliš nezlepší.

### 2.2.4 Chlazení kapalinou

Čerpadlo žene chladicí kapalinu směrem do formy, kde je ohřívána a odtud dále putuje do výměníku tepla, aby zde předala svoji energii k dalšímu použití. Poté je kapalina znovu nasáta čerpadlem a cyklus se opakuje podobně jako v chladicí soustavě u automobilu (Obr. 8) [4].

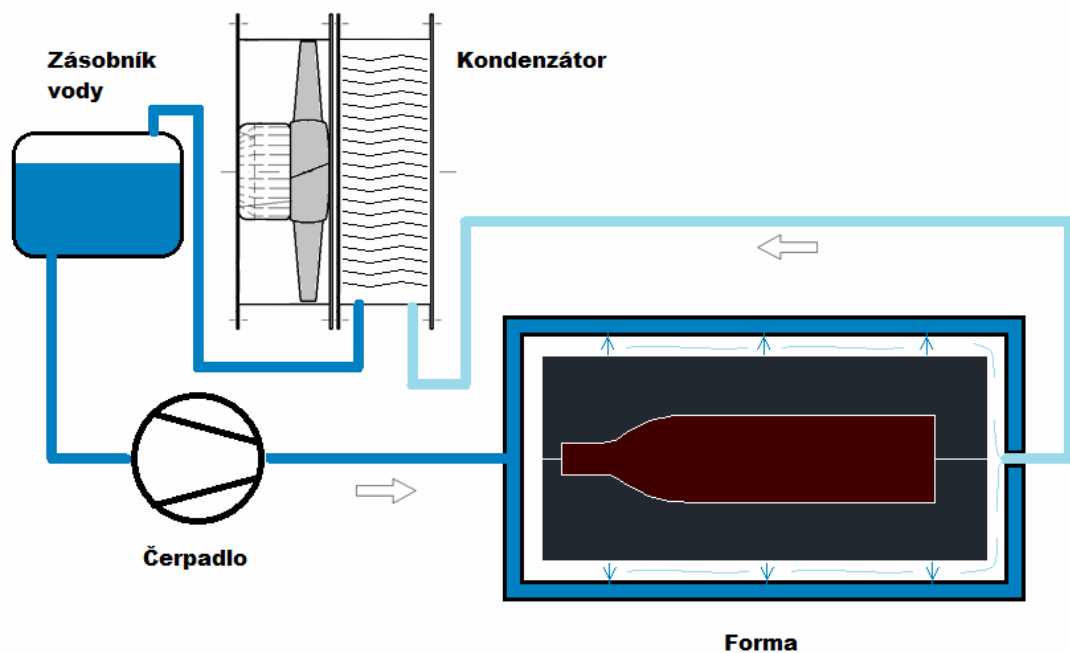


Obr. 8 – Schéma chlazení kapalinou

Chlazení vodou má oproti tomu vzduchovému hned několik výhod. Přenos tepla je mnohem intenzivnější, díky čemuž můžeme ubrat na robustnosti této soustavy (postačí menší teplosměnná plocha). Není třeba pohánět výkonný ventilátor, s čímž souvisí jednak snížení spotřeby energie a dále odstranění hluku od proudícího vzduchu. Odvedené teplo se nechá ve výměníku voda/voda účinněji využít. Je nutné zajistit dobré čištění chladicí kapaliny z důvodu zanášení teplosměnných ploch. Neboť je potřeba stále formu udržovat při vysoké teplotě (přes 300°C), mohou nastat problémy s přechodem chladicí vody do plynného skupenství, nebo naopak s udržením teploty formy na požadované hodnotě.

### 2.2.5 Chlazení s fázovým přechodem

Čerpadlo žene chladicí kapalinu směrem do speciálního obalového kontejneru, který neprodyšně obepíná formu a jeho povrch je pokrytý sadou trysek. Tyto trysky mají za úkol vstříknout přesně dané množství vody v neměnných časových intervalech tak, aby bylo teplo z formy odváděno rovnoměrně. Po styku s horkým povrchem se voda ihned odpaří a pára putuje směrem do kondenzátoru. Vzniklý kondenzát se shromažďuje ve sběrné nádrži a je dále nasáván čerpadlem k dalšímu užití (Obr. 9) [4].



Obr. 9 – Schéma chlazení s fázovým přechodem

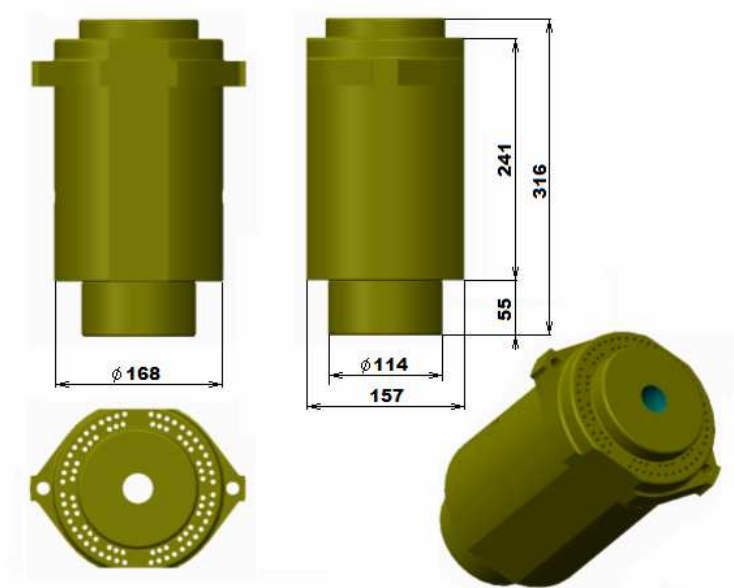
Tímto postupem se dá přesně nastavit odebrané množství energie, dosáhne velkého chladicího výkonu a rovněž se sníží hlukové zatížení (ventilátor kondenzátoru nemusí být tak výkonný a je možnost jej umístit dále od přístroje). Nevýhodou jsou velké konstrukční změny v dosavadním provedení a potřeba velmi přesného nastavení. Pro spolehlivý provoz je nutné užít demineralizované chladicí vody z důvodů zanášení kanálů.

### 3. Energetické zhodnocení navržených variant

Výpočty energetických bilancí jsou provedeny na základě známých či změřených veličin a vychází ze zkušeností a rozumných odhadů. Nejde o přesná čísla, neboť mnoho vstupních hodnot v této problematice je silně závislá na teplotě, dalších veličinách a okolnostech, a je problém je s přesností určit. Výsledky nám však poskytují pravdivý obraz o výhodách a nevýhodách jednotlivých provedení a umožňují správný výběr vhodné varianty. Hodnoty použité při výpočtech jsou použity z literatury [2] [5] [6] [7] [8].

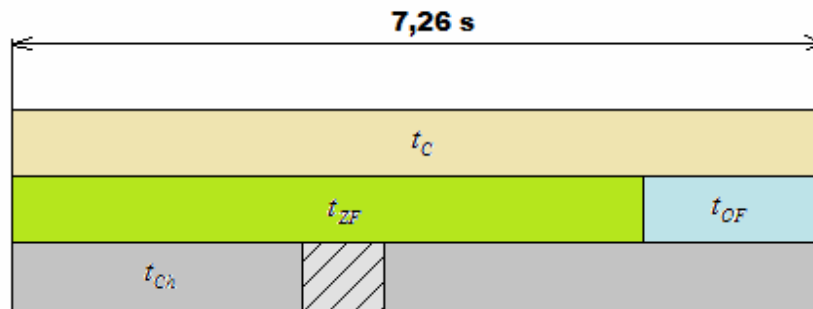
#### 3.1 Množství odvedeného tepla a průměrný tepelný výkon

Teplo, které je zapotřebí z konečné formy odvést, je pro všechny varianty stejné a jeho hodnota je uvažována pro obě poloviny formy. Níže uvedené hodnoty ploch jednotlivých částí formy a další potřebné údaje vychází z ilustrace (Obr. 10).



Obr. 10 – Konečná forma

K výpočtu tepelných bilancí bude dále nutné znát časy jednotlivých kroků výrobního cyklu. Ty jsou zobrazeny na (Obr. 11).



Obr. 11 – Časové znázornění výrobního cyklu

- $t_c$  - Doba cyklu
- $t_{zf}$  - Doba, po kterou je forma uzavřena
- $t_{of}$  - Doba, po kterou je forma otevřena
- $t_{ch}$  - Doba chlazení formy

- Celkové teplo, které je potřeba odvést:

$c_s \cong 1\,250\text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$  .....Měrná tepelná kapacita skloviny

$m_s = 0,475\text{ kg}$  ..... Hmotnost skloviny

$t_c = 7,26\text{ s}$  ..... Doba cyklu

$t_{s1} = 980\text{ }^\circ\text{C}$  ..... Teplota skloviny na počátku cyklu

$t_{s2} = 780\text{ }^\circ\text{C}$  .....Teplota skloviny na konci cyklu

$$Q_{Cody} = c_s \cdot m_s \cdot \Delta t = c_s \cdot m_s \cdot (t_{s1} - t_{s2}) = 1\,250 \cdot 0,475 \cdot (980 - 780) \Rightarrow$$

$$\underline{\underline{Q_{Cody} = 118\,750\text{ J}}}$$

Část tepla je odvedena radiací a volnou konvekcí. Pro co nejpřesnější výpočet je nutné toto teplo odečíst od celkového.

- Vstupní hodnoty potřebné pro další výpočty:

$S_{FO} = 0,191 \text{ m}^2$  .....Vnější teplosměnná plocha formy  
 $S_{FI} = 0,0887 \text{ m}^2$  .....Vnitřní teplosměnná plocha formy  
 $t_{OV} = 50^\circ\text{C}$  .....Teplota vzduchu v okolí formy  
 $t_{OK} = 70^\circ\text{C}$  ..... Teplota povrchu strojních prvků v blízkosti formy  
 $t_{FO} = 350^\circ\text{C}$  ..... Teplota povrchu vnější části formy  
 $t_{FI} = 450^\circ\text{C}$  ..... Teplota povrchu vnitřní části formy  
 $t_{Ch} = 6,53 \text{ s}$  ..... Doba chlazení formy  
 $t_{OF} = 1,61 \text{ s}$  ..... Doba, po kterou je forma otevřena  
 $c_o = 5,67 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$  ..... Souč. záření dokonale černého tělesa  
 $\varepsilon = 0,74$  ..... Emisivita zoxidované oceli  
 $d_u = 0,316 \text{ m}$  ..... Určující rozměr (výška formy)

- Teplu odvedené radiací z vnější části formy:

$$Q_{RO} = S_{FO} \cdot \varepsilon \cdot c_o \cdot \left[ \left( \frac{t_{FO} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_{OK} + 273}{100} \right)^4 \right] \cdot t_c =$$
$$0,191 \cdot 0,74 \cdot 5,67 \cdot \left[ \left( \frac{350 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{70 + 273}{100} \right)^4 \right] \cdot 7,26 \Rightarrow$$
$$\underline{\underline{Q_{RO} = 7\,966 \text{ J}}}$$

- Teplu odvedené radiací z vnitřní části formy:

$$Q_{RI} = S_{FI} \cdot \varepsilon \cdot c_o \cdot \left[ \left( \frac{t_{FI} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_{OK} + 273}{100} \right)^4 \right] \cdot t_{OF} =$$
$$0,0887 \cdot 0,74 \cdot 5,67 \cdot \left[ \left( \frac{450 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{70 + 273}{100} \right)^4 \right] \cdot 1,61 \Rightarrow$$
$$\underline{\underline{Q_{RI} = 1\,556 \text{ J}}}$$

- Teplo odvedené volnou konvekcí z vnější části formy:

$$t_u = \frac{t_{FO} + t_{OV}}{2} = \frac{350 + 50}{2} \Rightarrow$$

$$\underline{\underline{t_u = 200 \text{ } ^\circ\text{C}}}$$

$$\text{Pr} = \frac{\eta \cdot c_p}{\lambda} = \frac{25,545 \cdot 10^{-6} \cdot 1026}{0,0385} \Rightarrow$$

$$\underline{\underline{\text{Pr} = 0,681}}$$

$$\text{Gr} = \frac{g \cdot d_u^3 \cdot \gamma \cdot (t_{FO} - t_{OV})}{\nu^2} = \frac{9,81 \cdot 0,316^3 \cdot 2,11 \cdot 10^{-3} \cdot (350 - 50)}{(34,713 \cdot 10^{-6})^2} \Rightarrow$$

$$\underline{\underline{\text{Gr} = 162\,610\,901}}$$

$$\text{Nu} = 0,59 \cdot \text{Pr}^{\frac{1}{4}} \cdot \text{Gr}^{\frac{1}{4}} = 0,59 \cdot 0,681^{\frac{1}{4}} \cdot 162\,610\,901^{\frac{1}{4}} \Rightarrow$$

$$\underline{\underline{\text{Nu} = 59,1}}$$

$$\text{Nu} = \frac{\alpha \cdot d_u}{\lambda} \rightarrow \alpha = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda}{d_u} = \frac{59,1 \cdot 0,0385}{0,316} \Rightarrow$$

$$\underline{\underline{\alpha = 7,2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})}}$$

$$Q_{KO} = \alpha \cdot S_{FO} \cdot (t_{FO} - t_{OV}) \cdot t_C = 7,2 \cdot 0,191 \cdot (350 - 50) \cdot 7,26 \Rightarrow$$

$$\underline{\underline{Q_{KO} = 2\,995 \text{ J}}}$$

- Teplo odvedené volnou konvekcí z vnitřní části formy:

$$t_u = \frac{t_{FI} + t_{OV}}{2} = \frac{450 + 50}{2} =$$

$$\underline{\underline{t_u = 250 \text{ } ^\circ\text{C}}}$$

$$\text{Pr} = \frac{\eta \cdot c_p}{\lambda} = \frac{27,397 \cdot 10^{-6} \cdot 1034}{0,042} \Rightarrow$$

$$\underline{\underline{\text{Pr} = 0,6745}}$$

$$Gr = \frac{g \cdot d_u^3 \cdot \gamma \cdot (t_{FI} - t_{OV})}{\nu^2} = \frac{9,81 \cdot 0,316^3 \cdot 1,91 \cdot 10^{-3} \cdot (450 - 50)}{(71,155 \cdot 10^{-6})^2} \Rightarrow$$

$$\underline{\underline{Gr = 46\,710\,369}}$$

$$Nu = 0,421 \cdot (Pr^2 \cdot Gr)^{\frac{1}{4}} = 0,421 \cdot (0,6745^2 \cdot 46\,710\,369)^{\frac{1}{4}} \Rightarrow$$

$$\underline{\underline{Nu = 28,6}}$$

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d_u}{\lambda} \rightarrow \alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_u} = \frac{28,6 \cdot 0,042}{0,316} \Rightarrow$$

$$\underline{\underline{\alpha = 3,8 \text{ W}/(m^2 \cdot K)}}$$

$$Q_{KI} = \alpha \cdot S_{FI} \cdot (t_{FI} - t_{OV}) \cdot t_{OF} = 3,8 \cdot 0,0887 \cdot (450 - 50) \cdot 1,61 \Rightarrow$$

$$\underline{\underline{Q_{KI} = 217 \text{ J}}}$$

- Skutečné teplo odvedené pomocí navrženého chlazení:

$$Q_{odv} = Q_{Codv} - Q_{RO} - Q_{RI} - Q_{KO} - Q_{KI} =$$

$$118\,750 - 7\,966 - 1\,556 - 2995 - 217 \Rightarrow$$

$$\underline{\underline{Q_{odv} = 106\,016 \text{ J}}}$$

- Průměrný tepelný výkon:

$$P = \frac{Q_{odv}}{t_C} = \frac{106\,016}{7,26} \Rightarrow$$

$$\underline{\underline{P = 14\,603 \text{ W}}}$$



### 3.2 Chlazení proudem vzduchu (varianta a, c)

Jako chladicí médium se uvažuje vzduch odebíraný z vnějšího prostředí s parametry přibližně:

$$t_1 = 30 \text{ }^\circ\text{C} \Rightarrow p_{p1}'' = 4\,245,5 \text{ Pa}$$

$$p_{vv1} = 100\,000 \text{ Pa}$$

$$c_{psv} = 1\,004,5 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$$

$$c_{pp} = 1\,884 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$$

$$\underline{\underline{\varphi_1 = 0,5}}$$

$$d_1 = 0,622 \cdot \frac{p_{p1}'' \cdot \varphi_1}{p_{vv1} - p_{p1}'' \cdot \varphi_1} = 0,622 \cdot \frac{4\,245,5 \cdot 0,5}{100\,000 - 4\,245,5 \cdot 0,5} \Rightarrow$$

$$\underline{\underline{d_1 = 0,01349 \text{ kg}_p / \text{kg}_{sv}}}$$

$$i_1 = c_{psv} \cdot t_1 + d_1 \cdot (c_{pp} \cdot t_1 + l_o) =$$

$$1\,004,5 \cdot 30 + 0,01349 \cdot (1\,884 \cdot 30 + 2\,500\,000) \Rightarrow$$

$$\underline{\underline{i_1 = 64\,623 \text{ J/kg}_{sv}}}$$

Po průchodu chladicího vzduchu kanály formy jsou jeho parametry přibližně:

$$t_2 = 160 \text{ }^\circ\text{C} \Rightarrow p_{p2}'' = 617\,660 \text{ Pa}$$

$$p_{vv2} = 100\,000 \text{ Pa}$$

$$c_{psv} = 1\,004,5 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$$

$$c_{pp} = 1\,884 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$$

$$\underline{\underline{d_1 = d_2 = 0,01349 \text{ kg}_p / \text{kg}_{sv}}}$$

$$d_2 = 0,622 \cdot \frac{p_{p2}'' \cdot \varphi_2}{p_{vv2} - p_{p2}'' \cdot \varphi_2} \rightarrow \varphi_2 = \frac{d_2 \cdot p_{vv2}}{0,622 \cdot p_{p2}'' + d_2 \cdot p_{p2}''} =$$

$$\frac{0,01349 \cdot 100\,000}{0,622 \cdot 617\,660 + 0,01349 \cdot 617\,660} \Rightarrow$$

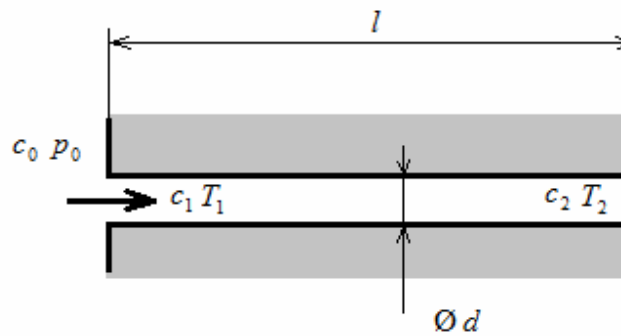
$$\underline{\underline{\varphi_2 = 0,00344}}$$

$$i_2 = c_{psv} \cdot t_2 + d_2 \cdot (c_{pp} \cdot t_2 + l_o) =$$

$$1\,004,5 \cdot 160 + 0,01349 \cdot (1\,884 \cdot 160 + 2\,500\,000) \Rightarrow$$

$$\underline{\underline{i_2 = 198\,511 \text{ J/kg}_{sv}}}$$

- Potřebné množství chladicího vzduchu na jeden cyklus pro jednu konečnou formu a hmotnostní průtok za vteřinu:



- $p_2 = 100\,000 \text{ Pa}$  ..... Tlak na výstupu  
 $d = 0,005 \text{ m}$  ..... Průměr kanálu  
 $l = 0,24 \text{ m}$  ..... Délka kanálu  
 $A = 1,9635 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$  ..... Plocha kanálu  
 $n = 84$  ..... Počet kanálů  
 $\lambda = 0,028$  ..... Součinitel třecích ztrát  
 $\xi_{vtok} = 0,5$  ..... Místní ztráta při vtoku do kanálu  
 $\chi = 1,4$  ..... Poissonova konstanta pro vzduch  
 $r = 287 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$  ..... Specifická konstanta pro vzduch

$$Q_{odv} = m \cdot \Delta i \rightarrow m = \frac{Q_{odv}}{\Delta i} = \frac{Q_{odv}}{i_2 - i_1} = \frac{106\,016}{198\,511 - 64\,623} \Rightarrow$$

$$\underline{\underline{m = 0,792 \text{ kg}}}$$

$$\dot{m} = \frac{m}{t_{ch}} = \frac{0,792}{6,53} \Rightarrow$$

$$\underline{\underline{\dot{m} = 0,121 \text{ kg/s}}}$$

- Rychlost proudění na výstupu:

$$\frac{p_2}{\rho_2} = r \cdot T_2 \rightarrow \rho_2 = \frac{p_2}{r \cdot T_2} = \frac{100\,000}{287 \cdot 433,15} \Rightarrow$$
$$\underline{\underline{\rho_2 = 0,804 \text{ kg/m}^3}}$$

$$\dot{m} = c_2 \cdot \rho_2 \cdot A \cdot n \rightarrow c_2 = \frac{\dot{m}}{\rho_2 \cdot A \cdot n} = \frac{0,121}{0,804 \cdot 1,9635 \cdot 10^{-5} \cdot 84} \Rightarrow$$
$$\underline{\underline{c_2 = 91 \text{ m/s}}}$$

$$a_2 = \sqrt{\chi \cdot r \cdot T_2} = \sqrt{1,4 \cdot 287 \cdot 433,13} \Rightarrow$$
$$\underline{\underline{a_2 = 417 \text{ m/s}}}$$

$$M_2 = \frac{c_2}{a_2} = \frac{91}{417} \Rightarrow$$

$$\underline{\underline{M_2 = 0,22 < 0,3 \Rightarrow}}$$

Nemusíme řešit jako stlačitelné proudění

- Potřebný tlak dodávaný ventilátorem:

$$p_0 = p_2 + \frac{c_2^2}{2} \cdot \rho_2 + p_z \rightarrow$$
$$p_0 = p_2 + \frac{c_2^2}{2} \cdot \rho_2 + \frac{c_2^2}{2} \cdot \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \rho_2 + \frac{c_2^2}{2} \cdot \rho_2 \cdot \xi_{vtok} \rightarrow$$
$$p_0 = p_2 + \frac{c_2^2}{2} \cdot \rho_2 \cdot \left( 1 + \lambda \cdot \frac{l}{d} + \xi_{vtok} \right) =$$
$$100\,000 + \frac{91^2}{2} \cdot 0,804 \cdot \left( 1 + 0,028 \cdot \frac{0,24}{0,005} + 0,5 \right) \Rightarrow$$
$$\underline{\underline{p_0 = 109\,468 \text{ Pa}}}$$

- Stanovení příkonu ventilátoru:

$T_0 = T_1 = 303,15 \text{ K}$  ..... Teplota vzduchu na vstupu

$p_b = 100\,000 \text{ Pa}$  ..... Barometrický tlak

$x = 1,5$  ..... Ventilační konstanta

$\eta = 0,6$  ..... Účinnost elektromotoru

$$p_0 \cdot \dot{V}_0 = \dot{m} \cdot r \cdot T_0 \rightarrow \dot{V}_0 = \frac{\dot{m} \cdot r \cdot T_0}{p_0} = \frac{0,121 \cdot 287 \cdot 303,15}{109\,468} \Rightarrow$$

$$\underline{\underline{\dot{V}_0 = 0,0962 \text{ m}^3 / \text{s}}}$$

$$P = \frac{(p_0 - p_b) \cdot \dot{V}_0}{\eta} \cdot x = \frac{(109\,468 - 100\,000) \cdot 0,0962}{0,6} \cdot 1,5 \Rightarrow$$

$$\underline{\underline{P = 2277 \text{ W}}}$$

### 3.3 Chlazení proudem upraveného vzduch (varianta b)

Vzduch před úpravou je uvažován se stejnými parametry jako v předchozím případě.

$$t_1 = 30 \text{ }^\circ\text{C} \Rightarrow p_{p1} = 4\,245,5 \text{ Pa}$$

$$p_{vv1} = 100\,000 \text{ Pa}$$

$$\varphi_1 = 0,5$$

$$d_1 = 0,01349 \text{ kg}_p / \text{kg}_{sv}$$

$$\underline{\underline{i_1 = 64\,623 \text{ J} / \text{kg}_{sv}}}$$

Jako první krok při úpravě vzduchu uvažuje chlazení na teplotu přibližně 25 °C.

$$t_2 = 25 \text{ °C} \Rightarrow p_{p2}'' = 3\,169 \text{ Pa}$$

$$p_{vv2} = 100\,000 \text{ Pa}$$

$$d_2 = d_1 = 0,01349 \text{ kg}_p / \text{kg}_{sv}$$

$$d_2 = 0,622 \cdot \frac{p_{p2}'' \cdot \varphi_2}{p_{vv2} - p_{p2}'' \cdot \varphi_2} \rightarrow \varphi_2 = \frac{d_2 \cdot p_{vv2}}{0,622 \cdot p_{p2}'' + d_2 \cdot p_{p2}''} =$$

$$\frac{0,01349 \cdot 100\,000}{0,622 \cdot 3\,169 + 0,01349 \cdot 3\,169} \Rightarrow$$

$$\underline{\underline{\varphi_2 = 0,67}}$$

$$i_2 = c_{psv} \cdot t_2 + d_2 \cdot (c_{pp} \cdot t_2 + l_o) =$$

$$1\,004,5 \cdot 25 + 0,01349 \cdot (1\,884 \cdot 25 + 2\,500\,000) \Rightarrow$$

$$\underline{\underline{i_2 = 59\,473 \text{ J} / \text{kg}_{sv}}}$$

Adiabatické chlazení na teplotu 21 °C (další chlazení zvlhčením vzduchu již není možné z důvodu relativní vlhkosti téměř 100%).

$$t_3 = 21 \text{ °C} \Rightarrow p_{p3}'' = 2\,505 \text{ Pa}$$

$$p_{vv3} = 100\,000 \text{ Pa}$$

$$\underline{\underline{i_3 = i_2 = 59\,473 \text{ J} / \text{kg}_{sv}}}$$

$$i_3 = c_{psv} \cdot t_3 + d_3 \cdot (c_{pp} \cdot t_3 + l_o) \rightarrow d_3 = \frac{i_3 - c_{psv} \cdot t_3}{c_{pp} \cdot t_3 + l_o} =$$

$$\frac{59\,473 - 1\,004,5 \cdot 21}{1\,884 \cdot 21 + 2\,500\,000} \Rightarrow$$

$$\underline{\underline{d_3 = 0,01511 \text{ kg}_p / \text{kg}_{sv}}}$$

$$d_3 = 0,622 \cdot \frac{p_{P3}'' \cdot \varphi_3}{p_{v3}'' - p_{P3}'' \cdot \varphi_3} \rightarrow \varphi_3 = \frac{d_3 \cdot p_{v3}''}{0,622 \cdot p_{P3}'' + d_3 \cdot p_{P3}''} =$$

$$\frac{0,01511 \cdot 100000}{0,622 \cdot 2505 + 0,01511 \cdot 2505} \Rightarrow$$

$$\underline{\underline{\varphi_3 = 0,9468}}$$

Parametry vzduchu po průchodu kanály formy:

$$t_4 = 155^\circ C \Rightarrow p_{P4}'' = 542\,990 \text{ Pa}$$

$$p_{v4}'' = 100\,000 \text{ Pa}$$

$$d_4 = d_3 = 0,01511 \text{ kg}_P / \text{kg}_{SV}$$

$$d_4 = 0,622 \cdot \frac{p_{P4}'' \cdot \varphi_4}{p_{v4}'' - p_{P4}'' \cdot \varphi_4} \rightarrow \varphi_4 = \frac{d_4 \cdot p_{v4}''}{0,622 \cdot p_{P4}'' + d_4 \cdot p_{P4}''} =$$

$$\frac{0,0151 \cdot 100\,000}{0,622 \cdot 542\,990 + 0,0151 \cdot 542\,990} \Rightarrow$$

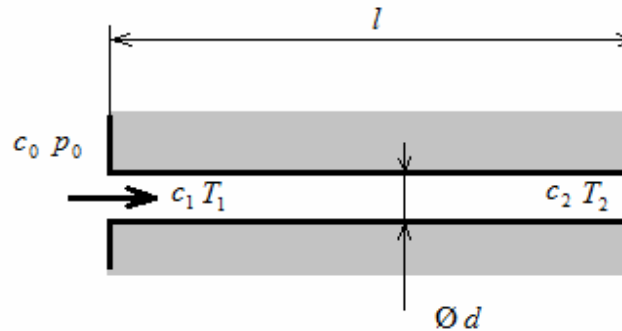
$$\underline{\underline{\varphi_4 = 4,365 \cdot 10^{-3} \text{ kg}_P / \text{kg}_{SV}}}$$

$$i_4 = c_{p_{sv}} \cdot t_4 + d_4 \cdot (c_{pp} \cdot t_4 + l_o) =$$

$$1\,004,5 \cdot 155 + 0,0151 \cdot (1\,884 \cdot 155 + 2\,500\,000) \Rightarrow$$

$$\underline{\underline{i_4 = 197857 \text{ J} / \text{kg}_{SV}}}$$

- Potřebné množství chladícího vzduchu na jeden cyklus pro jednu konečnou formu a hmotnostní průtok za vteřinu:



- $p_2 = 100\,000\text{ Pa}$  ..... Tlak na výstupu  
 $T_2 = 428,15\text{ K}$  ..... Teplota na výstupu z kanálu  
 $d = 0,005\text{ m}$  ..... Průměr kanálu  
 $l = 0,24\text{ m}$  ..... Délka kanálu  
 $A = 1,9635 \cdot 10^{-5}\text{ m}^2$  ..... Plocha kanálu  
 $n = 84$  ..... Počet kanálů  
 $\lambda = 0,028$  ..... Plocha kanálu  
 $\xi_{\text{vtok}} = 0,5$  ..... Místní ztráta při vtoku do kanálu  
 $\chi = 1,4$  ..... Poissonova konstanta pro vzduch  
 $r = 287\text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$  ..... Specifická konstanta pro vzduch

$$Q_{odv} = m \cdot \Delta i \rightarrow m = \frac{Q_{odv}}{\Delta i} = \frac{Q_{odv}}{i_2 - i_1} = \frac{106\,016}{197\,857 - 59\,473} \Rightarrow$$

$$\underline{\underline{m = 0,766\text{ kg}}}$$

$$\dot{m} = \frac{m}{t_{ch}} = \frac{0,766}{6,53} \Rightarrow$$

$$\underline{\underline{\dot{m} = 0,117\text{ kg/s}}}$$

- Rychlost proudění na výstupu:

$$\frac{p_2}{\rho_2} = r \cdot T_2 \rightarrow \rho_2 = \frac{p_2}{r \cdot T_2} = \frac{100\,000}{287 \cdot 428,15} \Rightarrow$$

$$\underline{\underline{\rho_2 = 0,814\text{ kg/m}^3}}$$

$$\dot{m} = c_2 \cdot \rho_2 \cdot A \cdot n \rightarrow c_2 = \frac{\dot{m}}{\rho_2 \cdot A \cdot n} = \frac{0,117}{0,814 \cdot 1,9635 \cdot 10^{-5} \cdot 84} \Rightarrow$$

$$\underline{\underline{c_2 = 87 \text{ m/s}}}$$

- Potřebný tlak dodávaný ventilátorem:

$$p_0 = p_2 + \frac{c_2^2}{2} \cdot \rho_2 + p_z \rightarrow$$

$$p_0 = p_2 + \frac{c_2^2}{2} \cdot \rho_2 + \frac{c_2^2}{2} \cdot \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \rho_2 + \frac{c_2^2}{2} \cdot \rho_2 \cdot \xi_{vtok} \rightarrow$$

$$p_0 = p_2 + \frac{c_2^2}{2} \cdot \rho_2 \cdot \left( 1 + \lambda \cdot \frac{l}{d} + \xi_{vtok} \right) =$$

$$100\,000 + \frac{87^2}{2} \cdot 0,814 \cdot \left( 1 + 0,028 \cdot \frac{0,24}{0,005} + 0,5 \right) \Rightarrow$$

$$\underline{\underline{p_0 = 108\,761 \text{ Pa}}}$$

- Stanovení příkonu ventilátoru:

$T_0 = T_3 = 294 \text{ K}$  ..... Teplota vzduchu na vstupu  
 $p_b = 100\,000 \text{ Pa}$  ..... Barometrický tlak  
 $x = 1,5$  ..... Ventilační konstanta  
 $\eta = 0,6$  ..... Účinnost elektromotoru

$$p_0 \cdot \dot{V}_0 = \dot{m} \cdot r \cdot T_0 \rightarrow \dot{V}_0 = \frac{\dot{m} \cdot r \cdot T_0}{p_0} = \frac{0,117 \cdot 287 \cdot 294,15}{108\,761} \Rightarrow$$

$$\underline{\underline{\dot{V}_0 = 0,0908 \text{ m}^3/\text{s}}}$$

$$P = \frac{(p_0 - p_b) \cdot \dot{V}}{\eta} \cdot x = \frac{(108\,761 - 100\,000) \cdot 0,0908}{0,6} \cdot 1,5 \Rightarrow$$

$$\underline{\underline{P = 1\,989 \text{ W}}}$$



### 3.4 Chlazení kapalinou (varianta d)

- Potřebného hmotnostního průtoku vody:

$$c_v = 4180 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

$$t_1 = 70 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\underline{t_2 = 90 \text{ }^\circ\text{C}}$$

$$Q_{Codv} = m \cdot c_v \cdot \Delta t \rightarrow m = \frac{Q_{Codv}}{c_v \cdot \Delta t} = \frac{Q_{Codv}}{c_v \cdot (t_2 - t_1)} = \frac{118750}{4180 \cdot (90 - 70)} \Rightarrow$$

$$\underline{\underline{m = 1,42 \text{ kg}}}$$

$$\dot{m} = \frac{m}{t} = \frac{1,42}{7,26} \Rightarrow \underline{\underline{\dot{m} = 0,196 \text{ kg/s}}}$$

### 3.5 Chlazení s fázovým přechodem (varianta e)

- Potřebného množství vstříkované vody na jeden cyklus:

$$c_v = 4180 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \dots\dots\dots \text{Měrná tepelná kapacita vody}$$

$$l_v = 2257600 \text{ J/kg} \dots\dots\dots \text{Výparné teplo vody}$$

$$t_1 = 60 \text{ }^\circ\text{C} \dots\dots\dots \text{Teplota vstříkované vody}$$

$$\underline{t_2 = 100 \text{ }^\circ\text{C}} \dots\dots\dots \text{Výparná teplota vody}$$

$$Q_{odv} = m_v \cdot c_v \cdot \Delta t + m_v \cdot l_v \rightarrow m_v = \frac{Q_{odv}}{c_v \cdot \Delta t + l_v} = \frac{Q_{odv}}{c_v \cdot (t_2 - t_1) + l_v} =$$

$$\frac{118750}{4180 \cdot (100 - 60) + 2257600} \Rightarrow$$

$$\underline{\underline{m_v = 0,049 \text{ kg}}}$$

- Objemový průtok vodní páry odcházející do kondenzátoru:

Voda potřebná k chlazení je vstřikována na stěnu formy pouze omezenou dobu a po dotyku s horkým povrchem se okamžitě odpaří. Z toho plyne, že pára odchází do kondenzátoru v určitých časových cyklech závislých na frekvenci a době vstřikování.

$t_{vs} = 2,5 \text{ s}$  ..... Doba vstřikování vody

$\rho_{vp} = 0,598 \text{ kg} / \text{m}^3$  .....Hustota syté vodní páry při 100 °C

$$m_v = \rho_{vp} \cdot V_{vp} \rightarrow V_{vp} = \frac{m_v}{\rho_{vp}} = \frac{0,049}{0,598} \Rightarrow$$

$$\underline{\underline{V_{vp} = 0,082 \text{ m}^3}}$$

$$V_{vp} = \dot{V}_{vp} \cdot t_{vs} \rightarrow \dot{V}_{vp} = \frac{V_{vp}}{t_{vs}} = \frac{0,082}{2,5} \Rightarrow$$

$$\underline{\underline{\dot{V}_{vp} = 0,0328 \text{ m}^3 / \text{s}}}$$

### 3.6 Výběr varianty

Při posuzování výše uvedených možností provedení se musíme rozhodovat na základě hlavních požadavků optimalizace soustavy. Ty jsou zaměřeny hlavně na zvýšení produktivity výroby. Z tohoto důvodu se dá usuzovat, že varianty „a, b, c“ nebudou k dalšímu zdokonalování příliš vhodné, neboť u nich narážíme na limity spojené s přenosem tepla. Rovněž hluková zátěž zde zůstává na původní hodnotě. Varianta „d“ se může zdát jako vhodná z hlediska jednoduchosti a velké účinnosti přenosu tepla, problém by však mohl nastat s přechodem chladiva do plynné fáze. Povrchová teplota formy může mít vysoko přes 100°C a tak by při styku chladiva s formou docházelo k varu, při čemž by se kapalina mohla odpařit ještě před průchodem celé délky kanálu. To by mělo za

následek nerovnoměrný odvod tepla z dutiny formy, velké vnitřní namáhání, a znemožňovalo by to vhodné nastavení procesu tuhnutí výrobku.

Pro naše použití jsme se rozhodli pro variantu „e“, pomocí níž jsme schopni přesně regulovat množství odvedeného tepla a zároveň dosáhneme snížení hlučnosti.

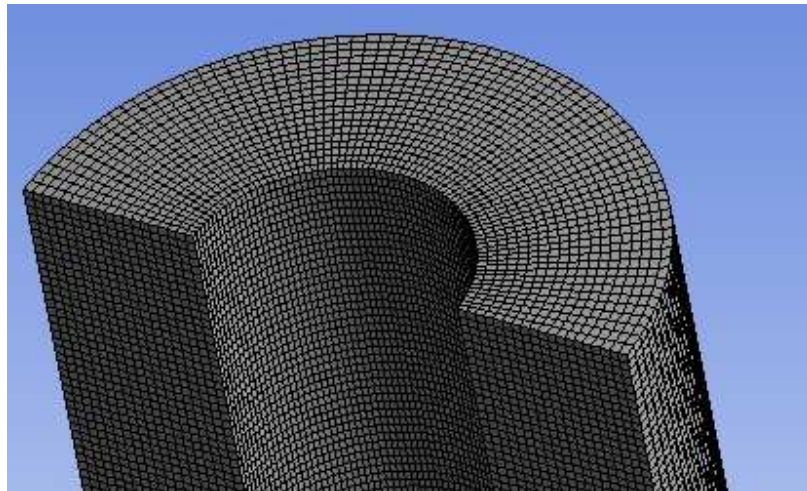
Rovněž energetické zhodnocení napovídá využití poslední varianty, neboť k chlazení postačí velmi malé množství vody vstříkované pod nízkým tlakem. Tomu odpovídá nízká spotřeba el. energie. K té je třeba připočíst spotřebu ventilátoru kondenzátoru, který ovšem nemusí být zdaleka tak výkonný jako v případech „a, b, c“.

## 4. Numerická simulace

Výpočet byl proveden v programu ANSYS Workbench – Transient Thermal Analysis System. Úkolem této simulace je seznámit nás s rozložením teplot v průběhu simulovaného výrobního procesu formy. Získáme tak náhled na námi zvolenou variantu „e“ a eliminujeme možnost výskytu případných problémů.

### 4.1 Tvorba sítě

Pro vytvoření sítě je v našem případě užito šestistěnných elementů v počtu 175 275 s 740 496 uzly (Obr. 12).

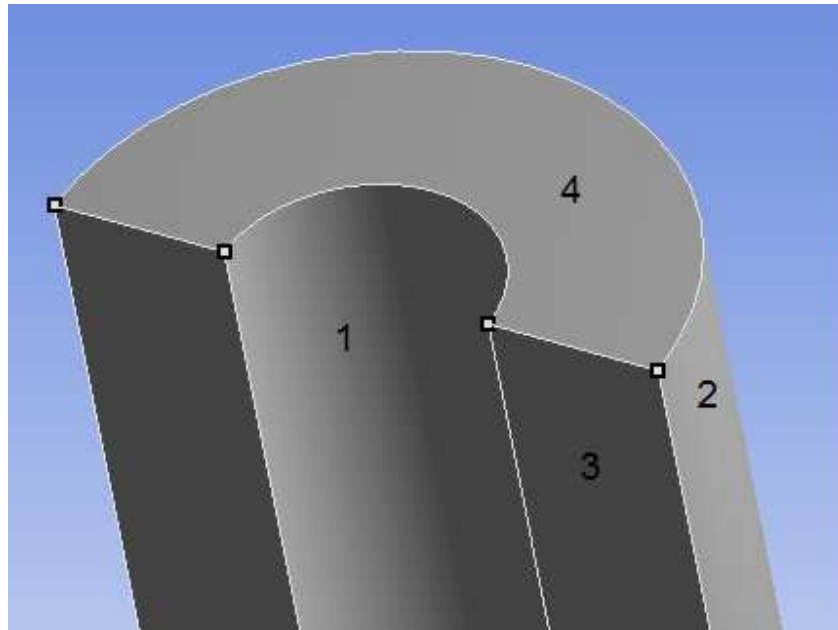


Obr. 12 – Síť modelu formy

### 4.2 Nastavení ploch modelu formy

Teplo do modelu vstupuje vnitřní válcovou plochou (1) a je odváděno vnější válcovou plochou (2). V reálném případě je voda vstřikována na několik bodových míst. V tomto modelu je děj chlazení zjednodušen tak, že se teplo odvádí z celé vnější válcové plochy,

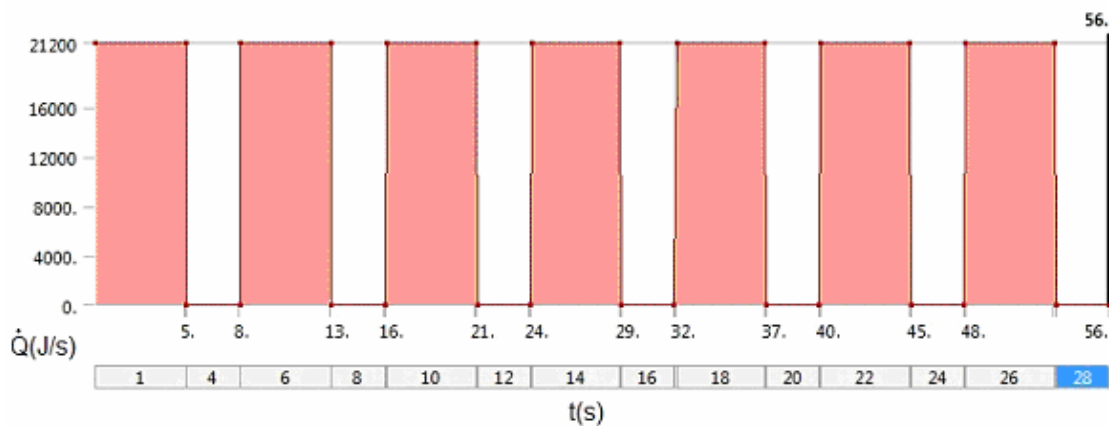
neboť by reálné nastavení bylo zbytečně složité. Stěny (4) jsou nastaveny jako dokonale izolované, neboť na ně chladící voda nesměřuje a odvod ostatními vlivy je v tomto místě spíše zanedbatelný. Stěna (3) představuje rovinu symetrie a rovněž dělicí rovinu formy (Obr. 13).



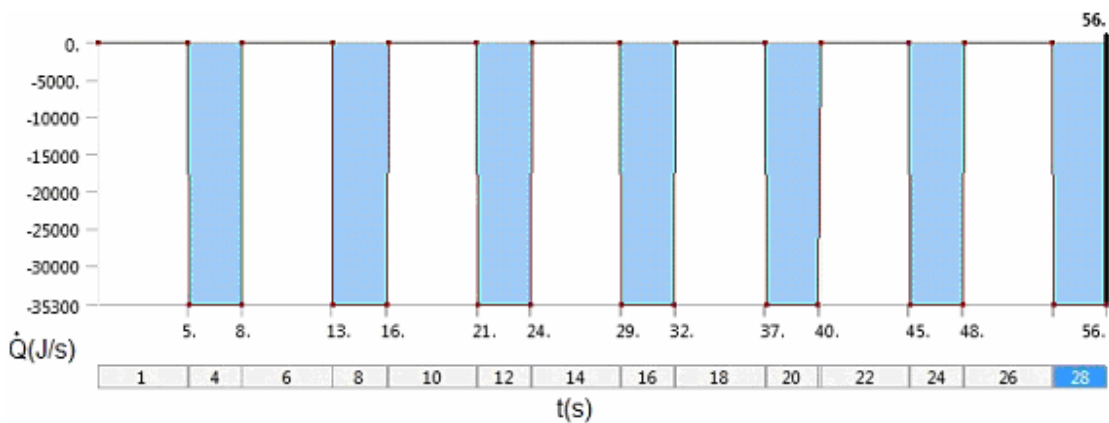
Obr. 13 – Značení ploch modelu formy

### 4.3 Nastavení systému

Simulace probíhá v čase 0–58 s (7 cyklů) a během této doby je střídavě spouštěno a vypínáno ohřívání a chlazení formy (Obr. 14, 15). Délka cyklu je nastavena na 8 s, přičemž v čase 0–5 s je spuštěno ohřívání a v čase 5–8 s chlazení. Počáteční teplota je nastavena na 380 °C.

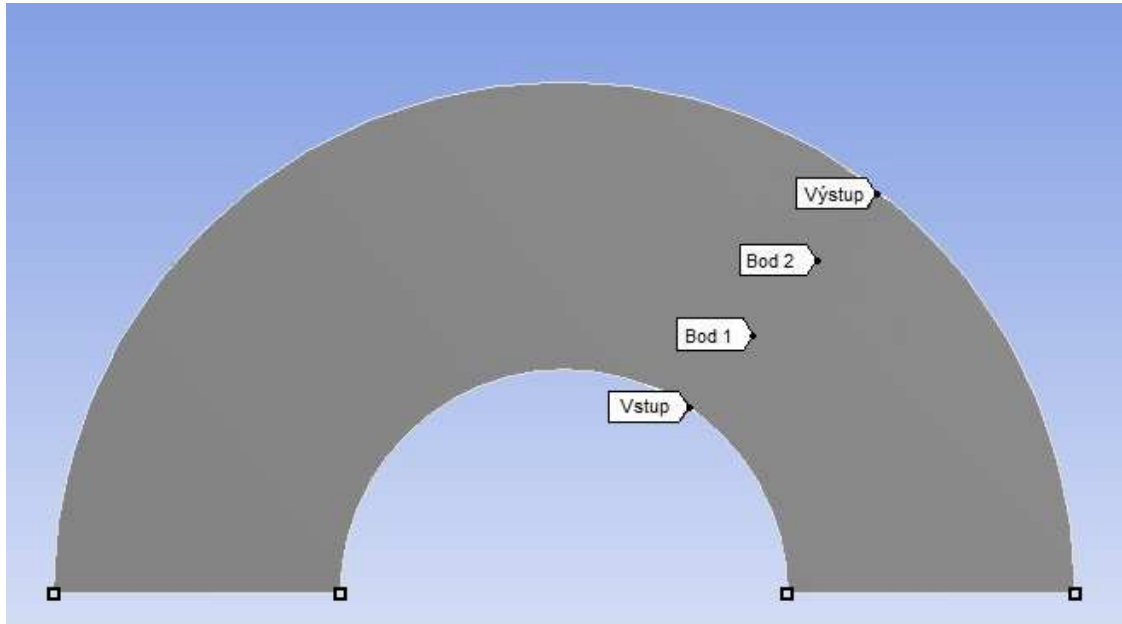


Obr. 14 – Průběh přiváděného tepelného toku vstupujícího do formy



Obr. 15 – Průběh odváděného tepelného toku vystupujícího z formy

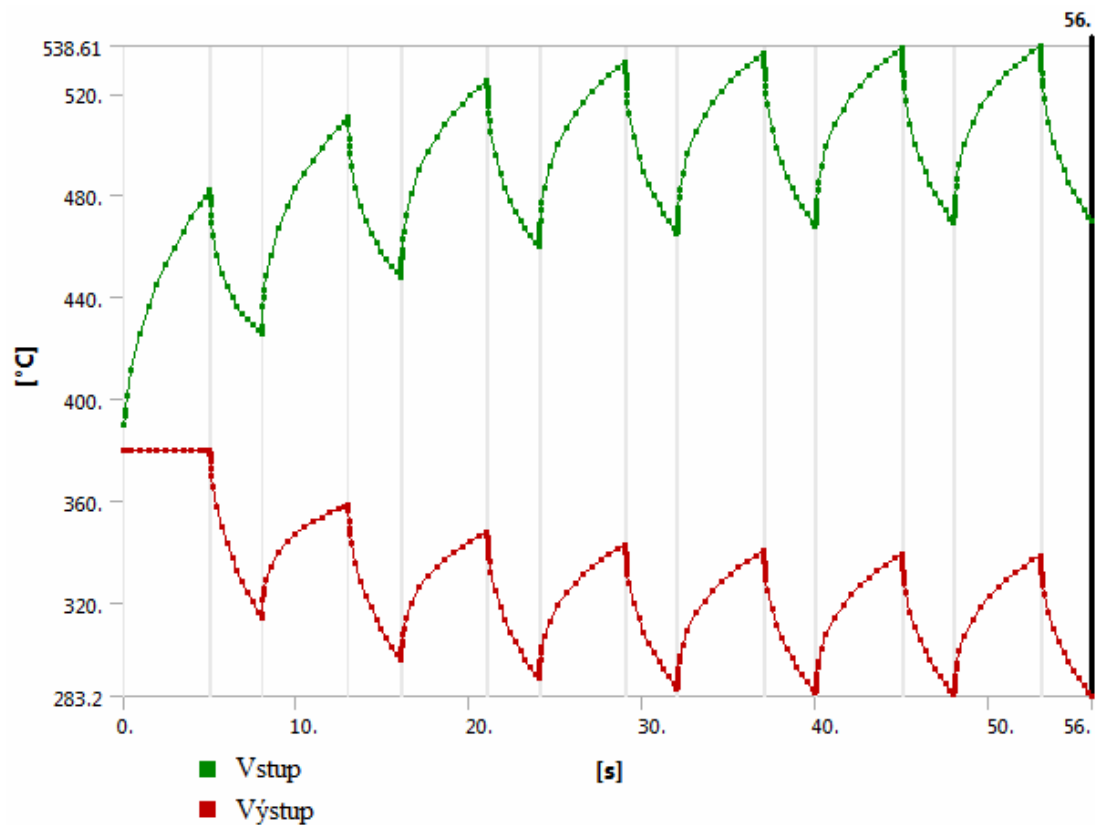
Přitom je sledována teplota ve vyznačených místech uvnitř těla formy „Vstup, Bod 1, Bod 2, Výstup“. Body 1 a 2 se nacházejí v 1/3 a 2/3 tloušťky stěny formy (Obr. 16).



Obr. 16 – Měřicí místa

#### 4.4 Vypočítané hodnoty

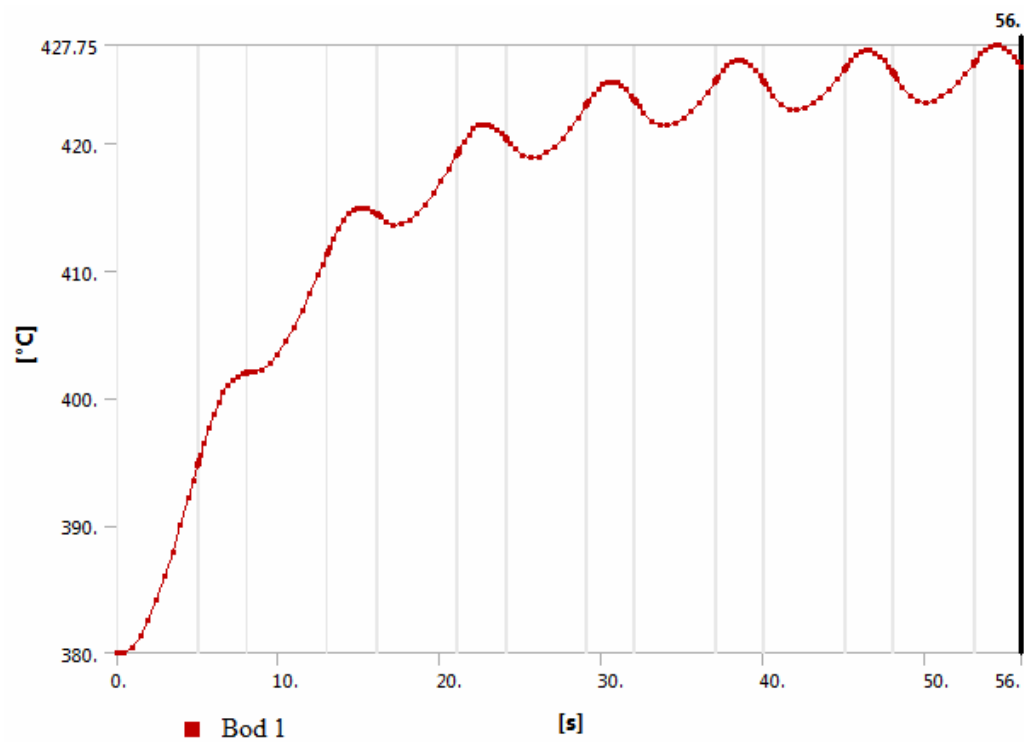
Průběh teplot závislý na čase je zobrazen níže (Obr. 17, 18, 19). Počet cyklů byl zvolen tak, aby teplota dosáhla určitého ustálení (tvořila periodicky se opakující křivku). Na obr. 16 je vidět průběh teplot na vstupní a výstupní válcové ploše a nechá se zde vyzorovat, že rozdíl teplot mezi těmito plochami je v daný okamžik přibližně 200 °C. Teplota na vstupní ploše přitom kolísá o  $\pm 35^{\circ}\text{C}$  od střední hodnoty a teplota na výstupní ploše o  $\pm 30^{\circ}\text{C}$ .



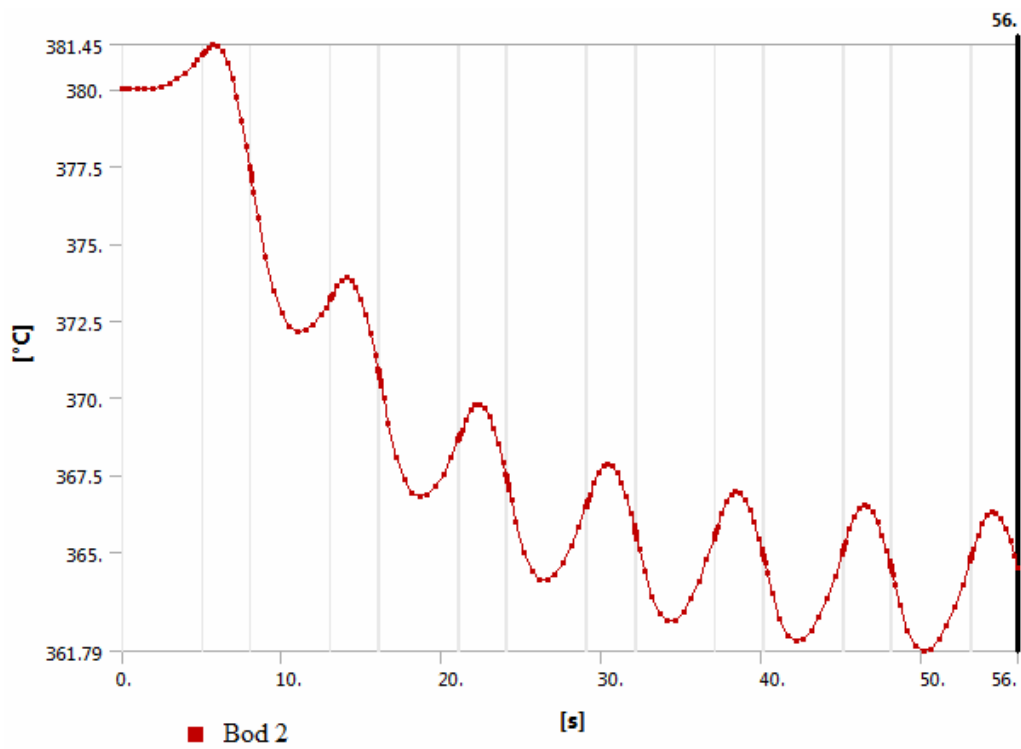
Obr. 17 – Graf vypočítaných teplot na vstupu a výstupu

Jak se dá usuzovat, teploty uvnitř stěny formy kolísají o poznání méně (v obou měřících bodech přibližně  $\pm 2,5^{\circ}\text{C}$  okolo střední hodnoty). Z toho vyplývá, že tepelný tok procházející stěnou je v čase přibližně konstantní, což je příznivé pro tepelné namáhání formy (Obr. 18, 19).





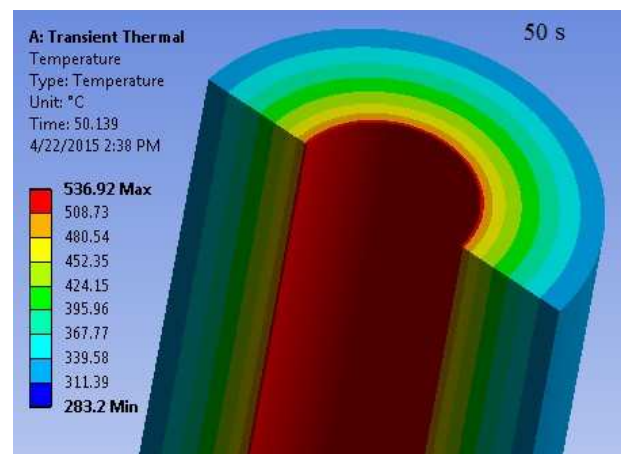
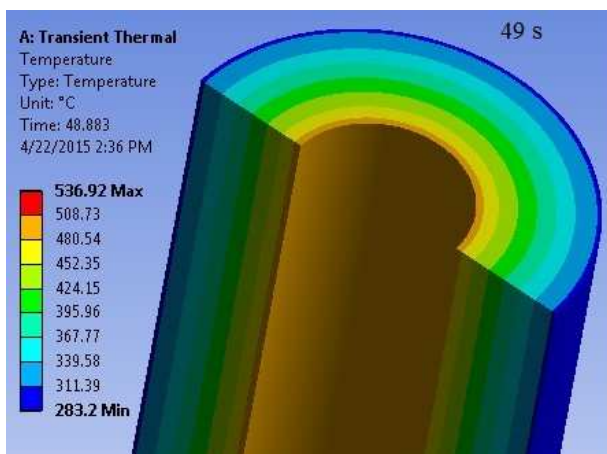
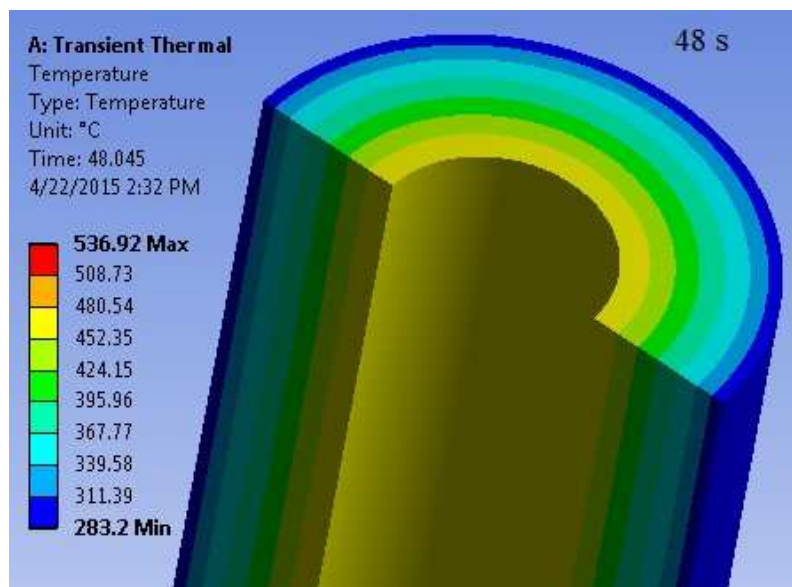
Obr. 18 – Graf vypočítané teploty v Bodě 1

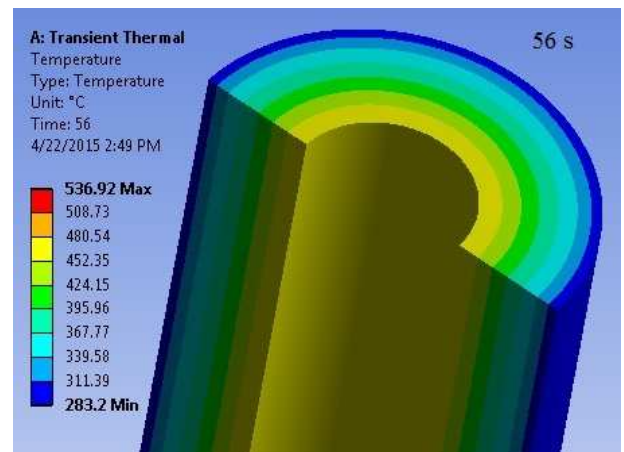
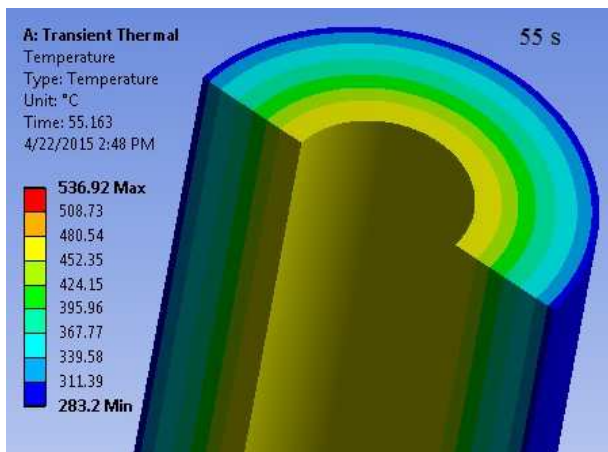
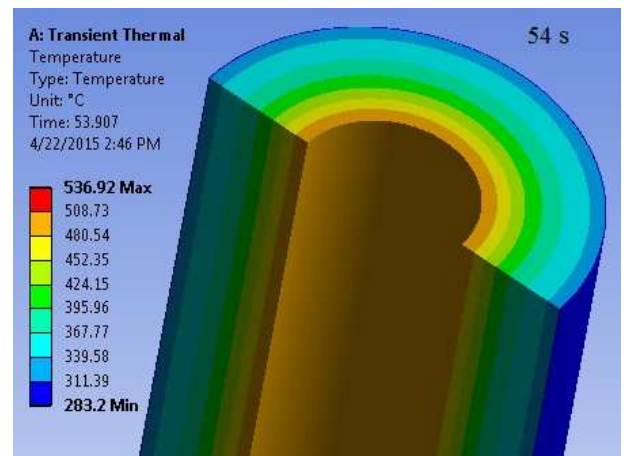
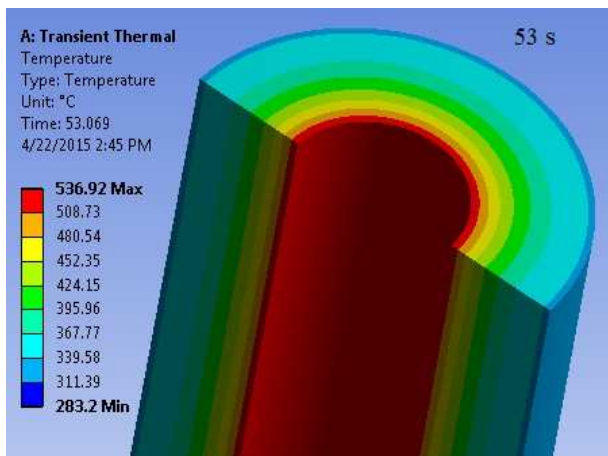
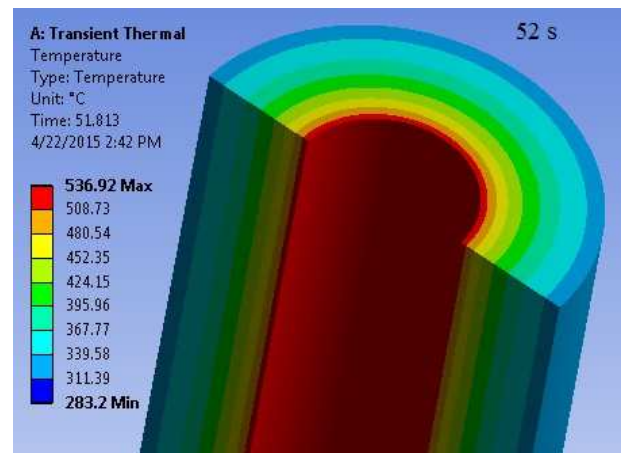
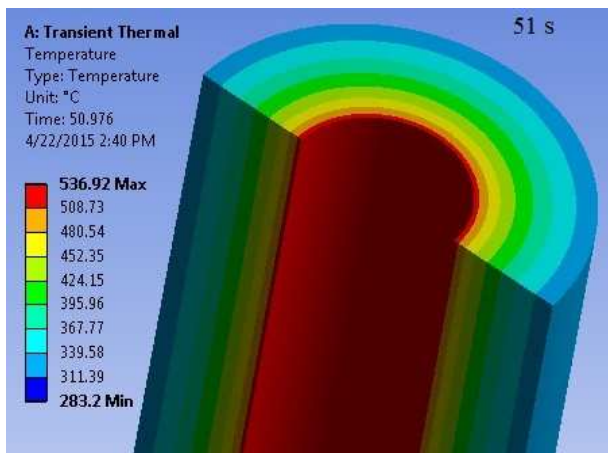


Obr. 19 – Graf vypočítané teploty v Bodě 2

## 4.5 Grafické znázornění výsledků

Pro lepší představu o průběhu teplot v závislosti na čase je na devíti snímcích představen postupný vývoj během jednoho rozvinutého cyklu v intervalu 48 – 56 s . Rozestup mezi jednotlivými snímky je jedna sekunda. Z obrázků je stejně jako z předešlých grafů patrné, že tepelný spád uvnitř stěny formy se v průběhu času výrazně nemění (Obr. 20 - 28).





Obr. (20 – 28) – Grafické znázornění časové změny teploty

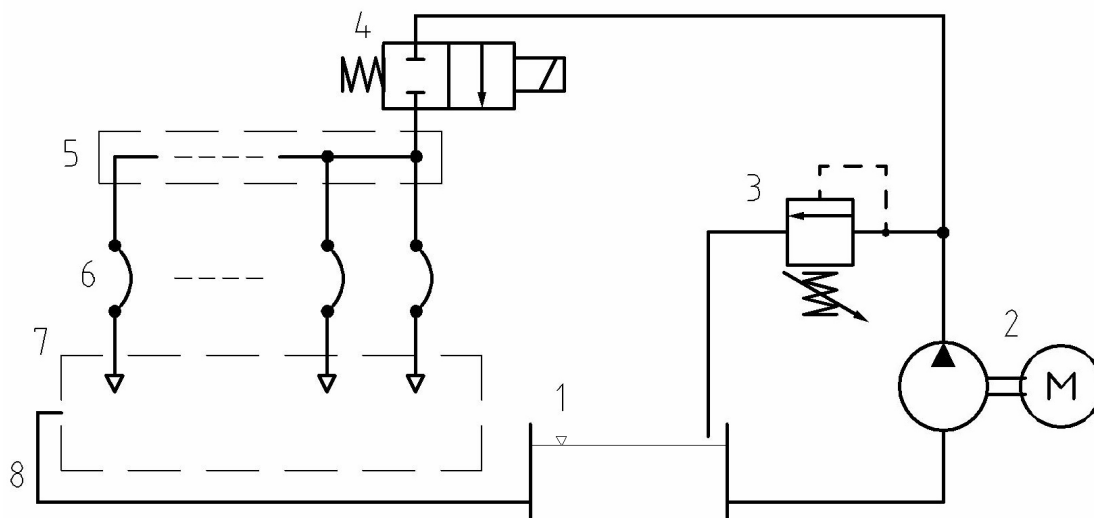
## **5. Konstrukce zařízení**

### **5.1 Hydraulický okruh**

Jak již bylo uvedeno, experimentální zařízení je uzpůsobeno k použití vodního chlazení se suchým kontejnerem a sadou trysek. Ty jsou namířeny na vnější plášť formy a vstříkují vodu střídavě v přednastavených intervalech. K ohřívání formy je použit plynový hořák, který rovněž pracuje ve střídavém režimu. Jelikož by bylo problematické tento hořák neustále zapalovat a zhasínat v krátkých časových intervalech, je této regulace dosaženo pomocí přímočarého posuvného mechanismu, který ho pravidelně oddaluje a přibližuje k formě.

Voda, jež se po vstříku odpaří, má být v reálném případě odvedena do kondenzátoru a dále do sběrné nádrže. Odtud má být opětovně nasáta čerpadlem a použita. V experimentálním zařízení se od tohoto provedení upustilo, neboť je kondenzátor potřebného výkonu dosti nákladný. Navíc se nepředpokládají výskyt technických obtíží v této části okruhu, které by bylo třeba pomocí výzkumu optimalizovat.

Aby bylo možné vodu vstříkovat v námi požadovaných intervalech, musíme ji přivádět pomocí elektronicky řízeného hydraulického okruhu (Obr. 29) [7].



Obr. 29 – Chladicí okruh (schéma)

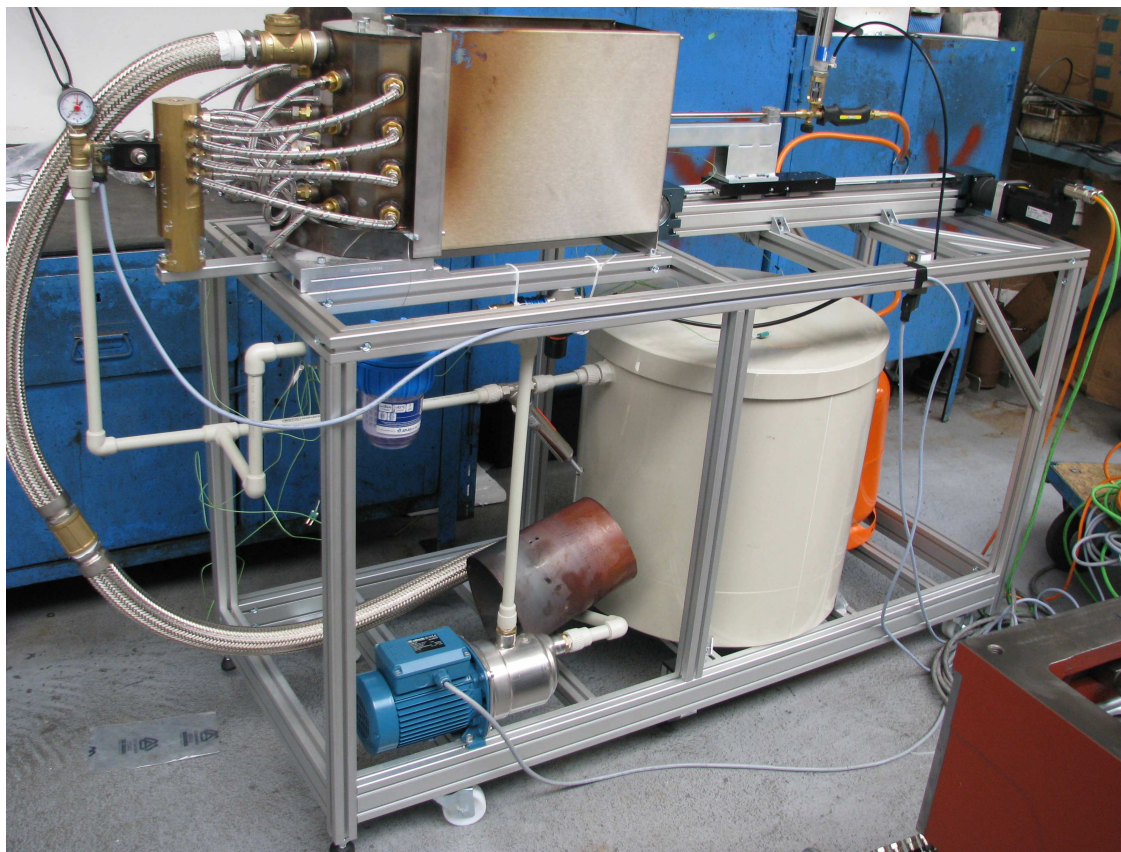
- 1) Sběrná nádrž
- 2) Přiváděcí čerpadlo poháněné elektromotorem
- 3) Přepouštěcí ventil
- 4) Elektromagnetický rozvaděč
- 5) Rozvodka vody
- 6) Přiváděcí hadice
- 7) Chladicí komora
- 8) Zpětné potrubí

Popis funkce:

Voda, jež je shromážděna ve sběrné nádrži (1), je nasávána čerpadlem (2). Pokud je rozvaděč (4) uzavřený, voda proudí přes přepouštěcí ventil (3) zpět do nádrže. Jakmile se rozvaděč otevře, přepouštěcí ventil zpětnou cestu uzavře a voda proudí přes rozvodku vody (5) ke všem vstříkovacím tryskám. Ty vstříknou dané množství vody na povrch formy a ta se odpaří. Pára je poté přivedena zpět do sběrné nádrže.

## 5.2 Konstrukční uspořádání

Rám je smontován ze stavebnicových hliníkových nosných profilů a je vybaven pojezdovými koly. V jeho spodní části se nalézá sběrná nádrž, láhev na propan-butan a přívaděcí čerpadlo. To je potrubím spojeno s rozvodkou vody, která se nalézá na horní části rámu v blízkosti chladicí komory a formy. Rozvodka s komorou jsou vzájemně propojeny gumovými hadicemi s pancéřovým pletením. Z horní části chladicí komory pak vystupuje silná gumová hadice rovněž s pancéřovým pletením, která slouží k odvodu páry zpět do sběrné nádrže. Na protější straně je umístěn plynový hořák s pojezdovým mechanismem, který slouží ke střídavému zahřívání formy. Aby hořák neběžel zbytečně neustále naplno, je vybaven elektronicky řízeným servoventilem (Obr. 30) [7].



Obr. 30 – Experimentální stroj k simulaci chlazení sklářské formy

## 5.3 Použité strojové prvky

### 5.3.1 Vstřikovací trysky

Pro odvod tepla z tělesa formy je nutné použít speciální vstřikovací trysky. Pro jejich návrh je potřeba provést jednoduchý výpočet:

$$V_o = 0,05 \text{ l} \dots\dots\dots \text{Potřebné množství vody na jeden cyklus}$$
$$t = 8 \text{ s} \dots\dots\dots \text{Doba jednoho cyklu}$$

- Počet cyklů za hodinu:

$$c = \frac{3600}{t} = \frac{3600}{8} \Rightarrow$$
$$c = \underline{\underline{450}}$$

- Množství vody potřebné k hodinovému provozu:

$$V_c = c \cdot V_o = 450 \cdot 0,05 \Rightarrow$$
$$V_c = \underline{\underline{22,5 \text{ l}}}$$

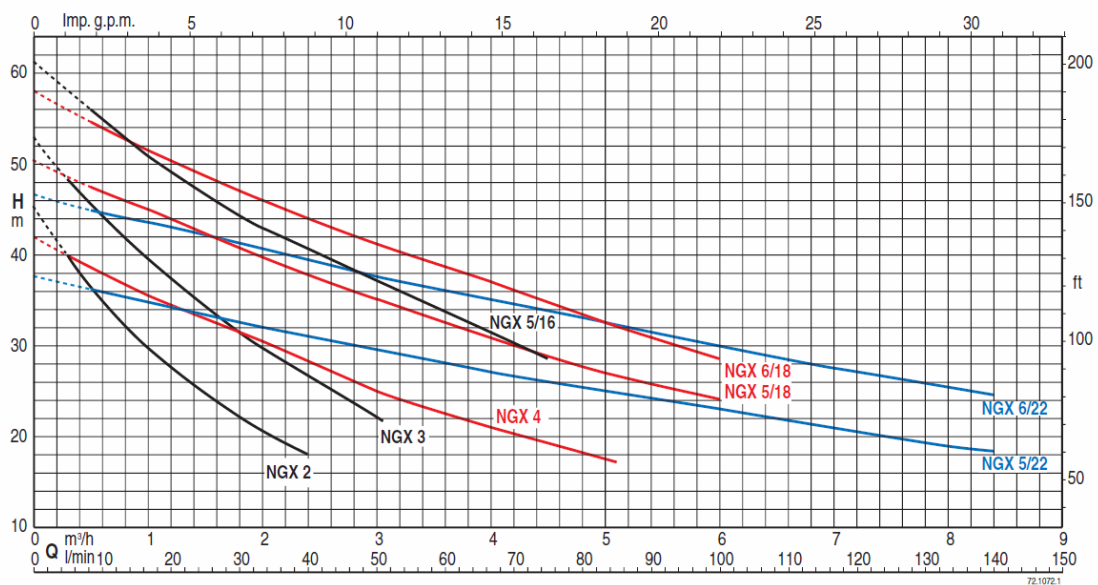
Tomuto požadavku odpovídají trysky TX.60 (Obr. 31), které při chladicím čase 4 sekundy z jednoho cyklu, tlaku 5 barů a počtu 16 ks dodávají množství vody 23,2 l/hod. Přesný chladicí výkon se dá dále snadno regulovat časovým nastavením rozvaděče.



Obr. 31 – Tryska TX.60 se zobrazením rozstříku

### 5.3.2 Čerpadlo

Dle požadovaných parametrů použitých trysek bylo zvoleno samonasávací čerpadlo Jet NGX 3 značky Calpeda příkon 0,9 kW (Obr. 32, 33).



Obr. 32 – Výkonová křivka čerpadel řady NGX



Obr. 33 – Čerpadlo NGX



### 5.3.3 Plynový hořák

Dle výpočtů je tepelný výkon vstupující do formy stanoven přibližně na 15 kW, což ovšem není nutné z hlediska měření přesně dodržet. Důležité je, aby se podařilo formu zahřát na teplotu přesahující 100 °C a pomocí vodního chlazení ji udržet na konstantní hodnotě tak, jak by tomu bylo v reálném případě. K tomu je potřeba užít hořák s dostatečným výkonem s přihlédnutím k velkým tepelným ztrátám při předávání a s možností plynulé regulace. Nejprve bylo zvažováno několik variant, jako trubicové zářiče, nebo různé plynové hořáky s širokou či jinou výpustí. Hlavně z důvodu vysokých nákladů byl nakonec vybrán dvojitý plynový hořák na propan-butan s maximálním výkonem 110 kW a teplotou plamene 1500 – 1800 °C (Obr. 34).



Obr. 34 – Dvojitý plynový hořák

### 5.3.4 Pojezdový mechanismus

Pro manipulaci s plynovým hořákem je použita lineární jednotka LJHR60G-450 s délkou zdvihu  $l = 450 \text{ mm}$  (Obr. 35) s doporučenou převodovkou SG070-07 (T3,H3) s převodovým poměrem  $i = 7$  (Obr. 36) a servomotor TGN3-0350-30-320/T1S4 s točivým momentem  $M_k = 3 \text{ Nm}$  a jmenovitými otáčkami  $n = 3000 \text{ ot/min}$  (Obr. 37).



Obr. 35 – Lineární jednotka



Obr. 36 – Převodovka



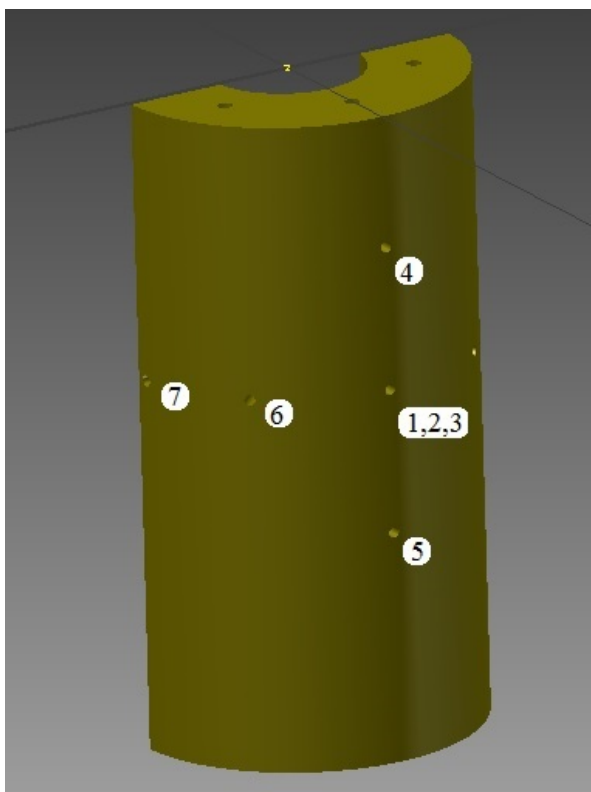
Obr. 37 – Servomotor

## 6. Experiment s vodním chlazením

Experiment musí být proveden tak, aby co nejdříveji simuloval reálný výrobní proces. Jak již bylo zmíněno, k tomuto účelu je zkušební zařízení vybaveno takovými mechanismy, které umožňují střídavý ohřev a chlazení formy. V celém průběhu experimentu se přitom zaznamenávají teploty uvnitř modelu formy, které se následně vyhodnocují.

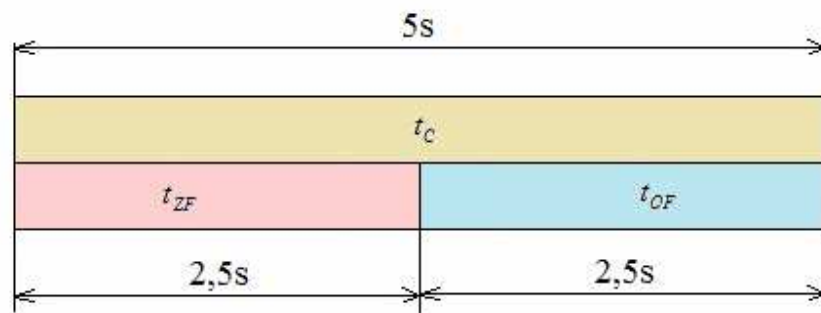
### 6.1 Příprav

Pro záznam průběhů teplot je model formy vybaven sadou termočlánků rozmístěných dle přiloženého schématu (Obr. 38). K měření je užito stroje DEWE - 5000 se sadou termočlánků typu K - chromel+alumel.



Obr. 38 – Místa opatřená termočlánky

Místo označené číslicemi 1,2,3 je vrtané téměř skrz celou tloušťku stěny do hloubky 40 mm. V tomto místě jsou umístěny 3 termočlánky v různých hloubkách tak, že číslo 1 je nejhlouběji, číslo dvě uprostřed a číslo tři u povrchu. Další termočlánky jsou umístěny v pozicích zbývajících číslic v hloubce 25 mm (přibližně polovina tloušťky stěny). Časování jednotlivých fází experimentu probíhá dle schématu (Obr. 39).



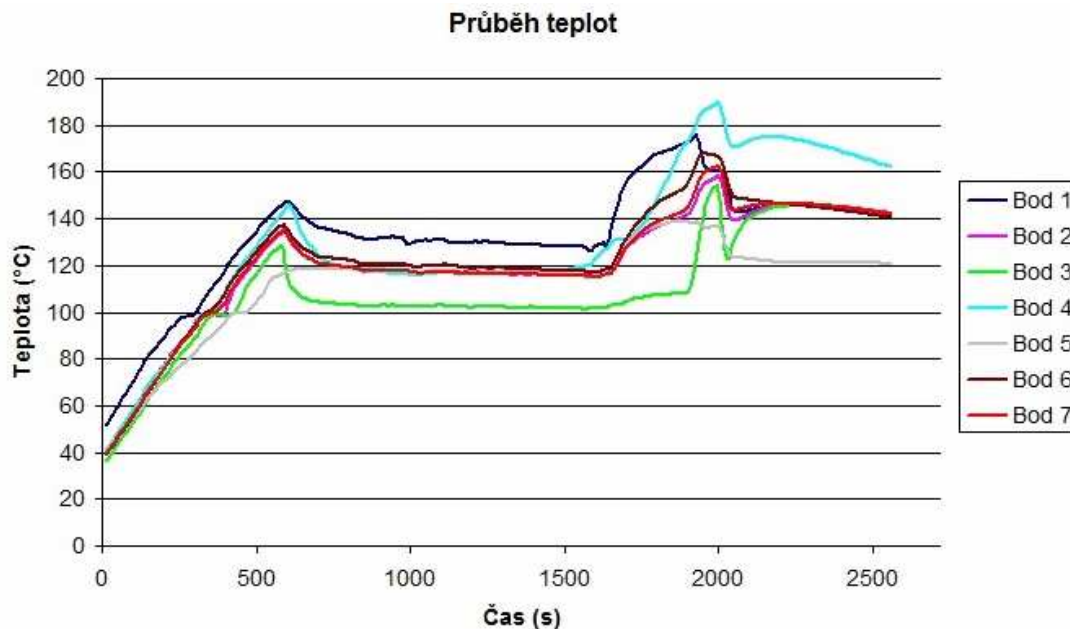
Obr. 39 – Časování cyklů ohřívání a chlazení

- $t_c$  - Doba cyklu
- $t_{ZF}$  - Doba zahřívání formy
- $t_{OF}$  - Doba ochlazování formy

## 6.2 Měření

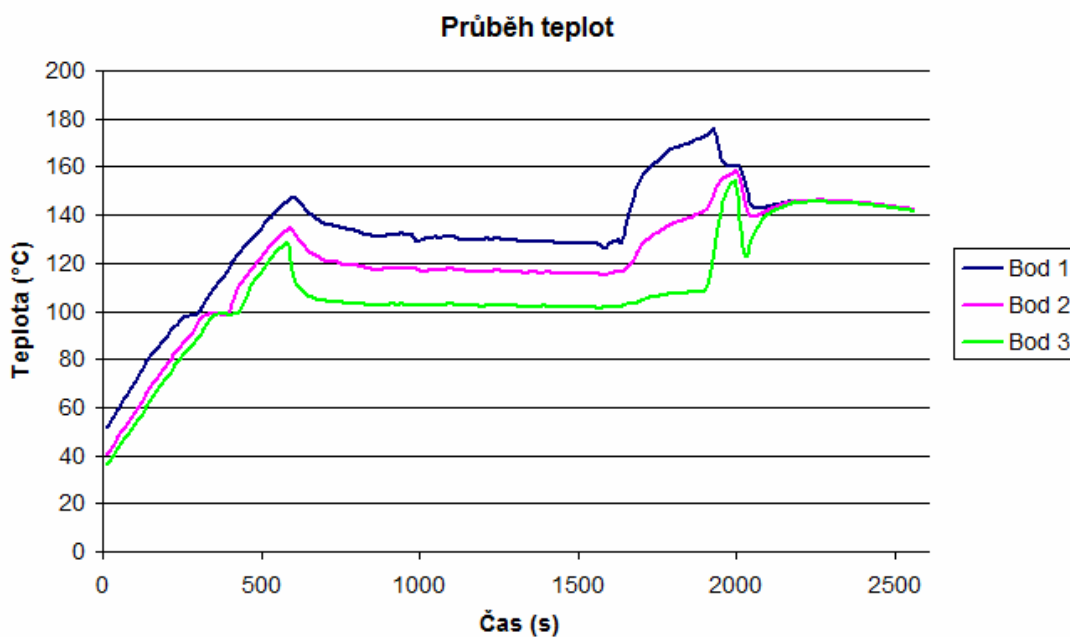
Výsledky jsou zobrazeny na grafu z měření (Obr. 40). Značení jednotlivých teplot odpovídá značení v (Obr. 38). Záměrně jsou zde znázorněny všechny teplotní křivky v jednom grafu z důvodu vzájemného porovnání. Jak je vidět, teploty se od sebe v různých místech výrazně neliší. Měření začíná strmým, téměř lineárním nástupem teploty v délce přibližně 10 minut k hodnotě 150 °C. V okamžiku, kdy je spuštěno chlazení, teplota poklesne a ustálí se na přibližně konstantní hodnotě. V blízkosti chlazeného povrchu formy se teplota drží blízko nad 100 °C, zatímco na opačné straně teplota kolísá okolo 130 °C. Na této konstantní hodnotě pak probíhá měření přibližně 15 minut. Poté následuje vypnutí chlazení a několikaminutový ohřev k teplotě 190 °C.

Ten je opět zastaven spuštěním chladicího okruhu a krátce po něm se celý systém vypíná a nechá se volně dochladiť.



Obr. 40 – Graf naměřených hodnot

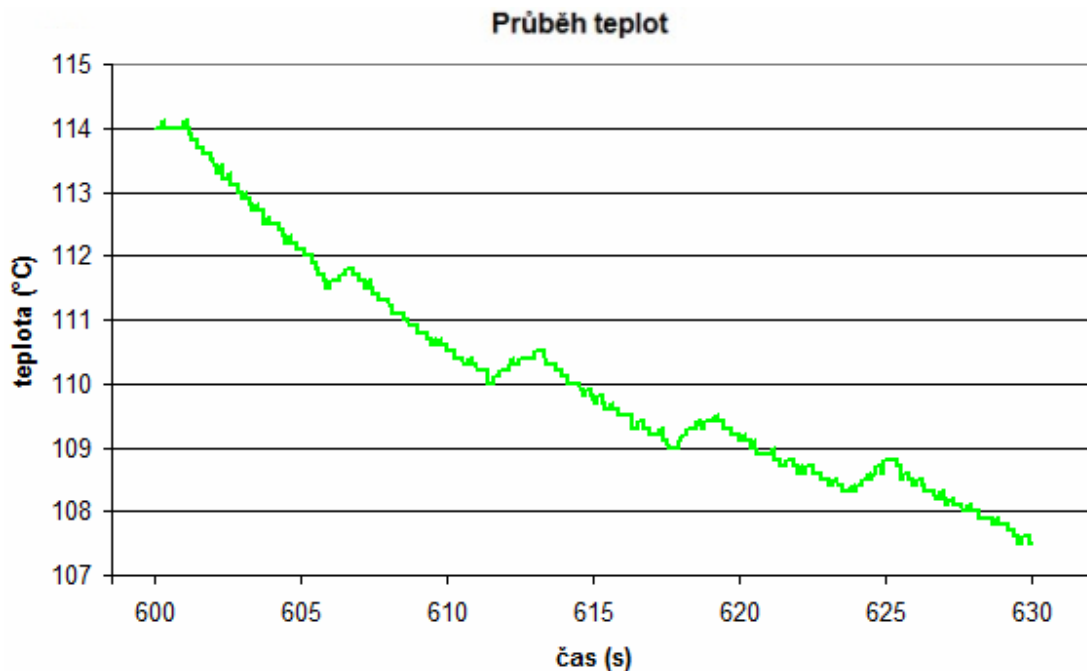
Pro lepší představu o rozdílu teplot v různých hloubkách stěny je přiložen graf měření pouze se třemi křivkami (Obr. 41).



Obr. 41 – Graf naměřených hodnot (porovnání hloubek)

### 6.3 Zhodnocení měření

Měření bylo provedeno za celkově nižších teplot, než by tomu bylo v reálném případě. Je z něj však patrné, že je možné zařízení provozovat s námi požadovanými konstantními parametry teplot. Z numerické simulace je vidět, že formou prochází slabé teplotní vlny s frekvencí závislou na frekvenci ohřevu a chlazení. Ty se nám v tomto experimentu podařilo naměřit s pomocí velké vzorkovací frekvence 100 Hz a jsou dobře patrné například v časovém úseku 600 až 630 sekund (Obr. 42). Nejsou však tak silné, jako jsme zprvu předpokládali. To si vysvětlujeme velkou akumulací schopností formy s přilehlými částmi a také tím, že i po odsunu hořáku z něj část tepla do formy neustále vstupuje. Kromě těchto periodických změn zde probíhají i změny nahodilého rázu. Ty mohou být způsobeny malou nepravidelností při vstřikovávání vody, či ohřevu.



Obr. 42 – Tepelné vlny procházející formou (sonda 3)

## 7. Závěr

Jak je z výsledků měření patrné, provoz takto koncipovaného chlazení by měl být v praxi reálný. K tomu je potřeba provést určité menší optimalizace na experimentálním zařízení, které umožní stálý provoz s konstantními parametry a posunou nás blíže k výslednému řešení.

Mezi tyto úpravy bych nejprve zařadil změnu pozice odtahového potrubí pro páru. To je nyní umístěno v horní části chladicí komory. Pro odvod samotné páry je toto řešení vyhovující, problém však nastává ve chvíli, kdy se část vstříknuté vody od povrchu formy odrazí a shromažďuje se na dně chladicí komory. Tato voda se zde pomalu odpařuje a způsobuje nerovnoměrný odvod tepla ze stěny formy. Tento problém se dá snadno odstranit přemístěním odtahového potrubí do spodní části komory tak, aby tudý odcházela pára společně s neodpařenou vodou.

Dále nám měření ukázalo, že by bylo vhodné u reálného řešení použít řízení se zpětnou vazbou a to i přes to, že se nám při experimentu dařilo udržet se na konstantních hodnotách teplot. Ty jsou v reálném případě výrazně vyšší a zvyšuje se i pravděpodobnost jejich rozkolísání. Z technického hlediska by toto neměl být velký problém, neboť nám k takovému řízení postačí pouze několik správně rozmístěných termočlánků a vyhodnocovací zařízení. Správná časová regulace elektronicky řízeného rozvaděče je poté už jen otázkou dobře seřízeného systému.

Dalším důležitým poznatkem je vyvarovat se použití jakýchkoli plastových, gumových či silikonových hmot v blízkosti horkých povrchů. Teplo při delším provozu projde i do takových míst, kde bychom jej zprvu nemuseli v takové míře očekávat. Zvláště dobré je se jim vyhnout u hadic přivádějících chladicí kapalinu a z hlediska životnosti i u potrubí odvádějící páru. Rovněž těsnění je dobré zaměnit například za měděná. Gumovým hadicím je také dobré se vyhnout z toho důvodu, že se při natlakování roztáhnou, a po odpojení přívodu svým smrštěním neustále dodávají část chladicí vody. Zde by opět pomohla záměna za měděné trubičky.

Za povšimnutí stojí porovnání výkonu původního ventilátoru (příkon 2,3 kW) a použitého čerpadla (příkon 0,9 kW). Nutno dodat, že provoz čerpadla je velmi tichý a

splňuje tak požadavek na snížení hlukové zátěže na pracovišti. Teplo z kondenzátoru by se v případě potřeby dalo využít například k vytápění v administrativních budovách.



## Literatura

- [1] BROUČEK, Pavel. *Výzkum podmínek ovlivňujících zvyšování výkonu automatických strojů na obalové sklo*. Liberec, 1967. Disertační práce.
- [2] SMRČEK, Antonín. *Strojní tvarování skla*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1981, 326 s.
- [3] EXNAR, Petr. *Příprava a vlastnosti alkalickoboritých pro rentgenovou fluorescenční spektrometrii*. Hradec Králové: Státní výzkumný ústav sklářský, 1983.
- [4] THEMANN, Rolf a Václav DVOŘÁK. *Vývoj progresivního systému chlazení forem sklářského tvarovacího stroje*. Praha: Technologická agentura České republiky, 2013.
- [5] Emisivita oceli. *NEWPORT ELECTRONICS* [online]. 2005 [cit. 2015-05-21].  
Dostupné z: <http://newport.cz/techinfo/emiskovy.html>
- [6] PETŘÍKOVÁ, Markéta a Pavel KRYŠTŮFEK. *Tabulky a diagramy pro termodynamiku*. Vyd. 4. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2011, 51 s. ISBN 978-80-7372-785-7.
- [7] Údaje poskytnuté p. Drahoňovským z firmy Sklostroj Turnov CZ
- [8] KRYŠTŮFEK, Pavel a Markéta PETŘÍKOVÁ. *Mechanika tekutin Tabulky*. Liberec: Technická universita v Liberci, 2007.

## Seznam příloh

Graf naměřených hodnot

Obrázek původního provedení 3D

Obrázek řezu chladicí komory

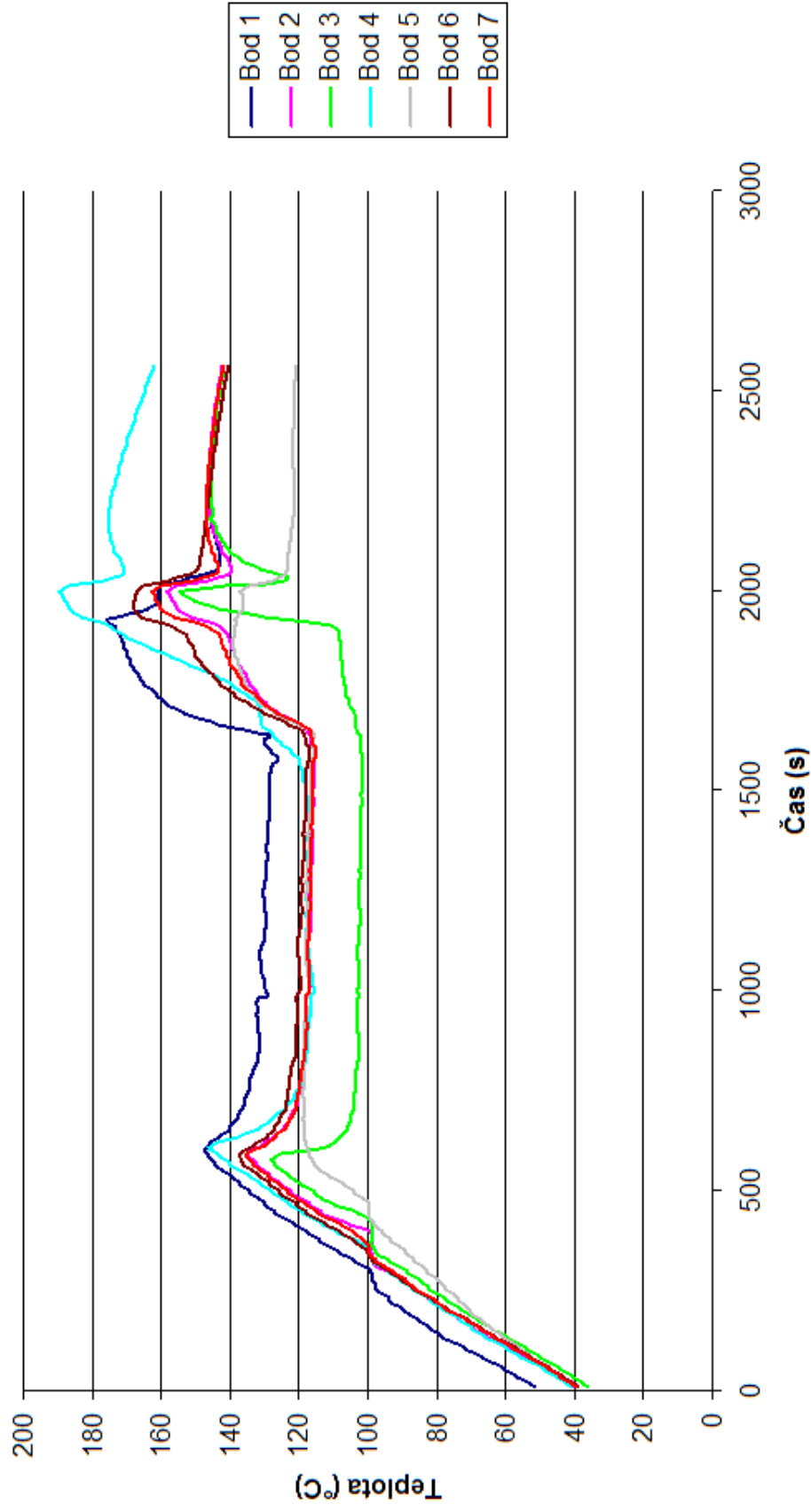
Fotografie – chladicí komora

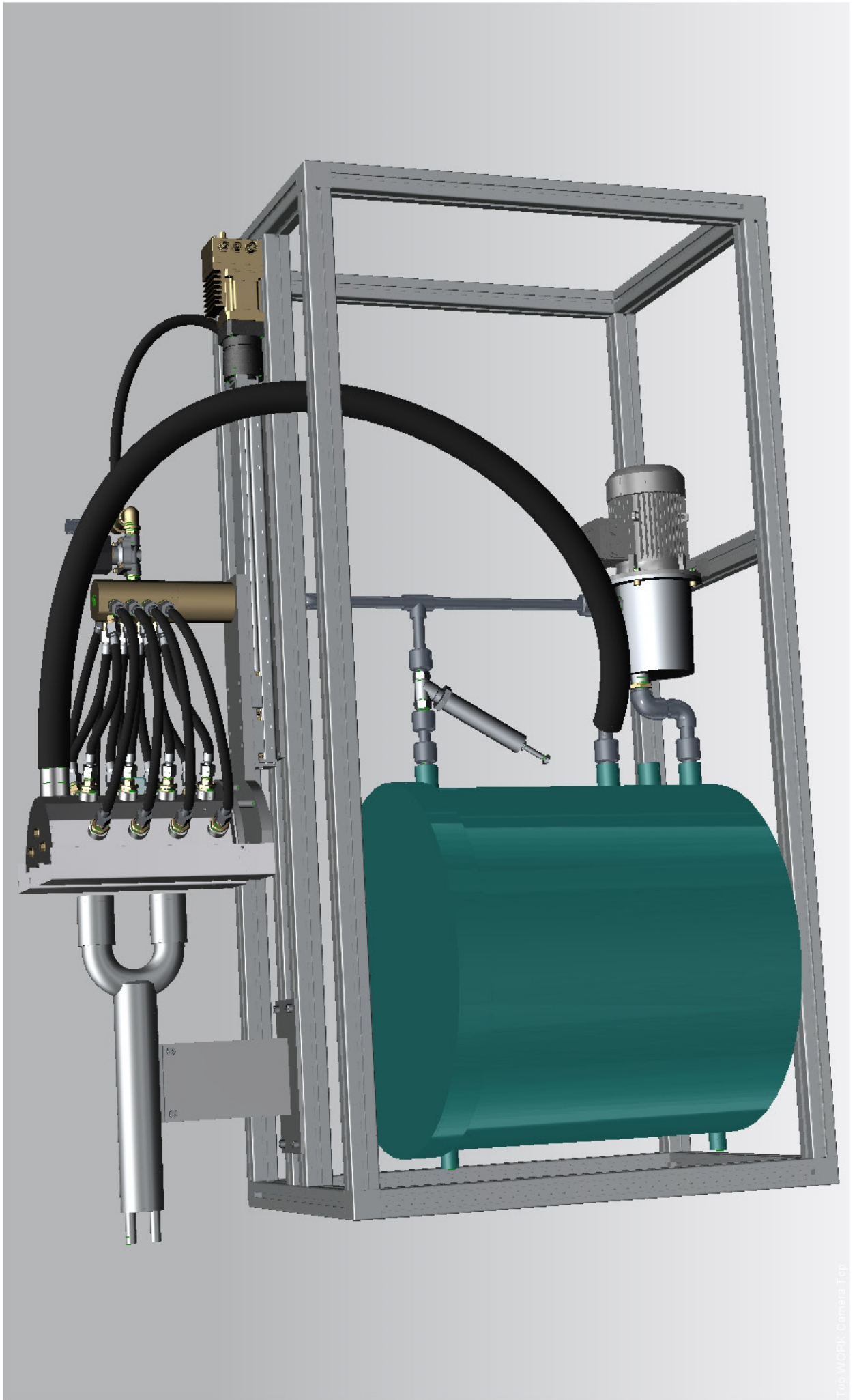
Fotografie – hořák včetně pojezdového mechanismu

Výkres – rozvodka vody

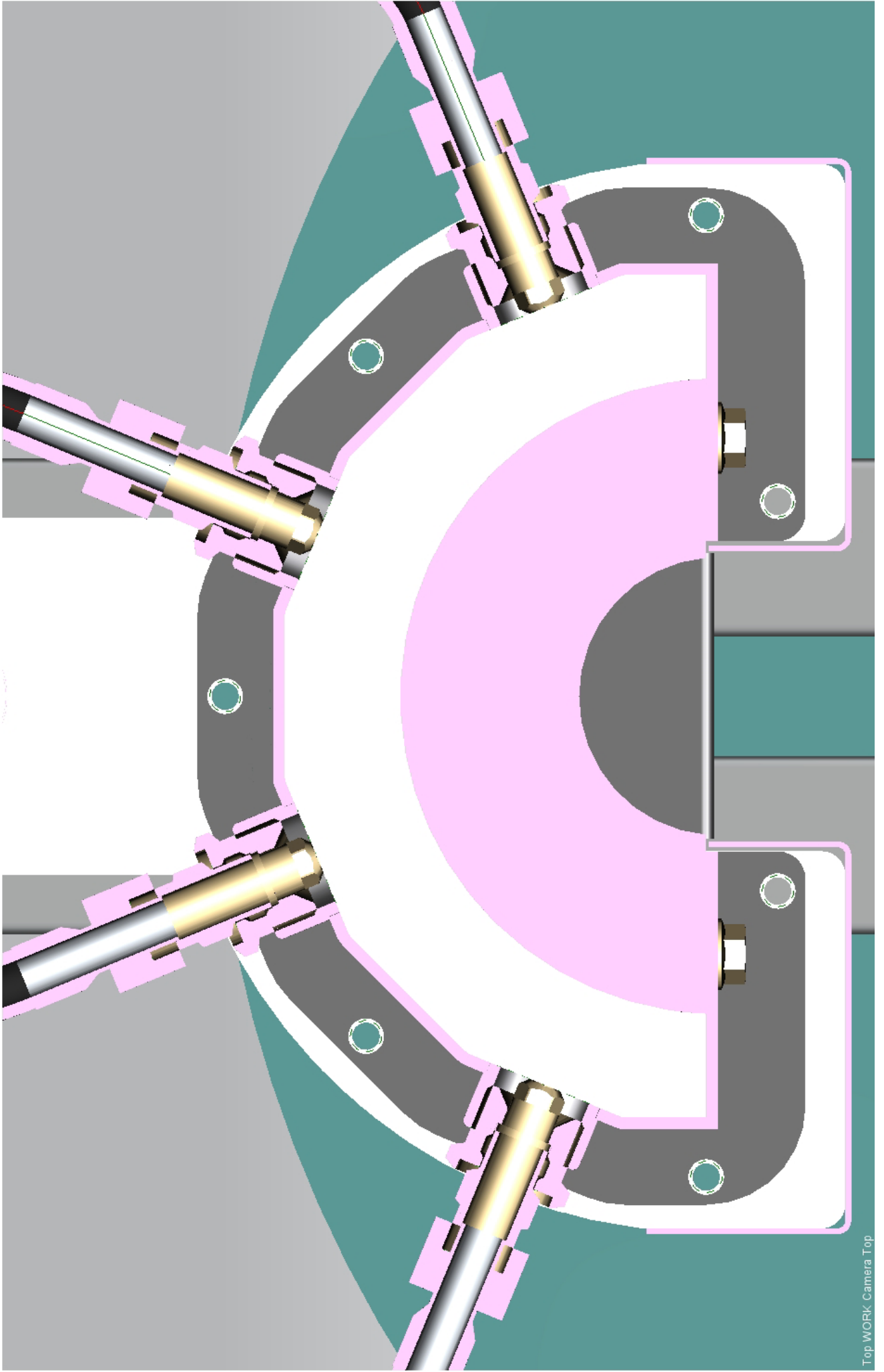
Výkres – svařenec chladicí komora

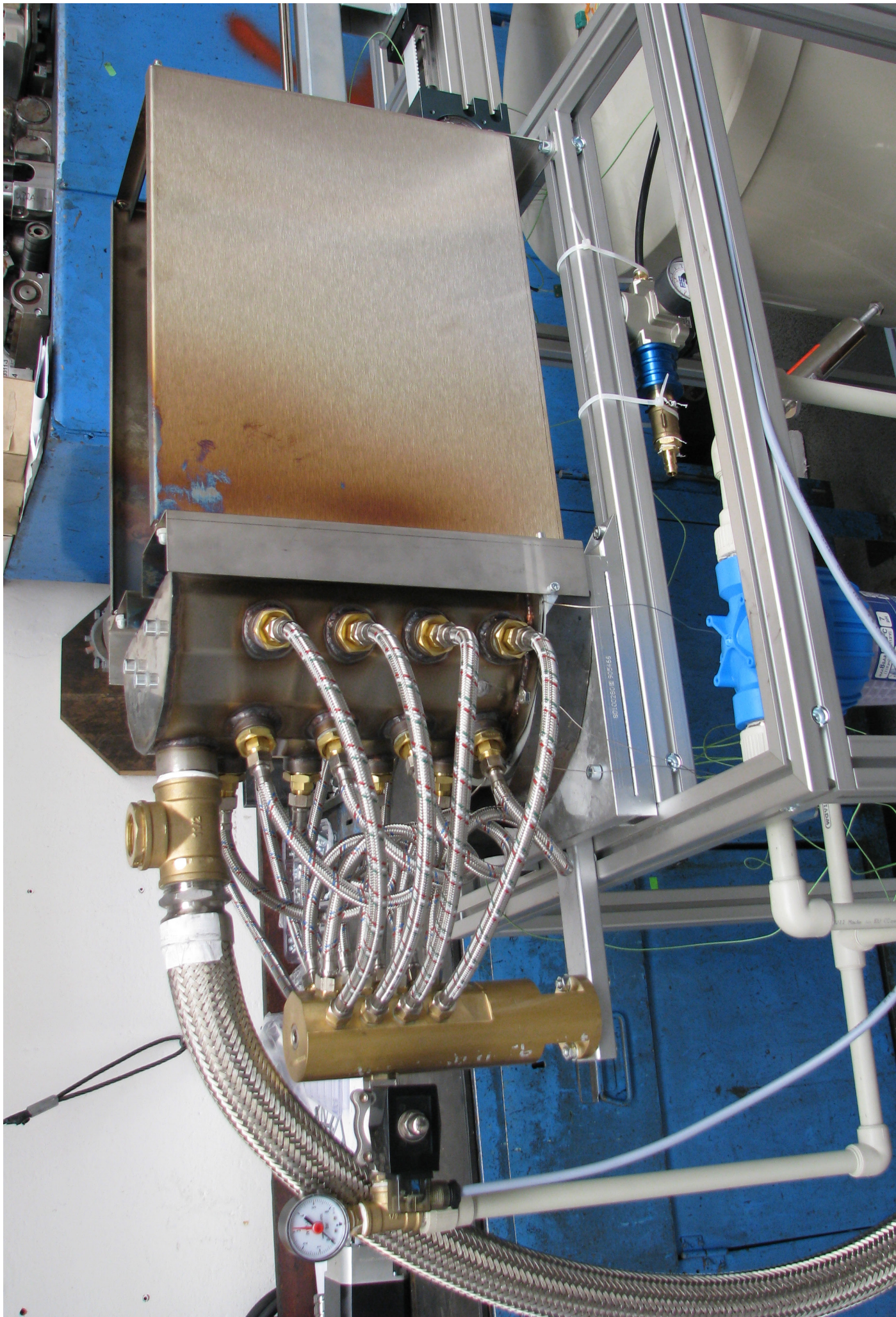
## Průběh teplot

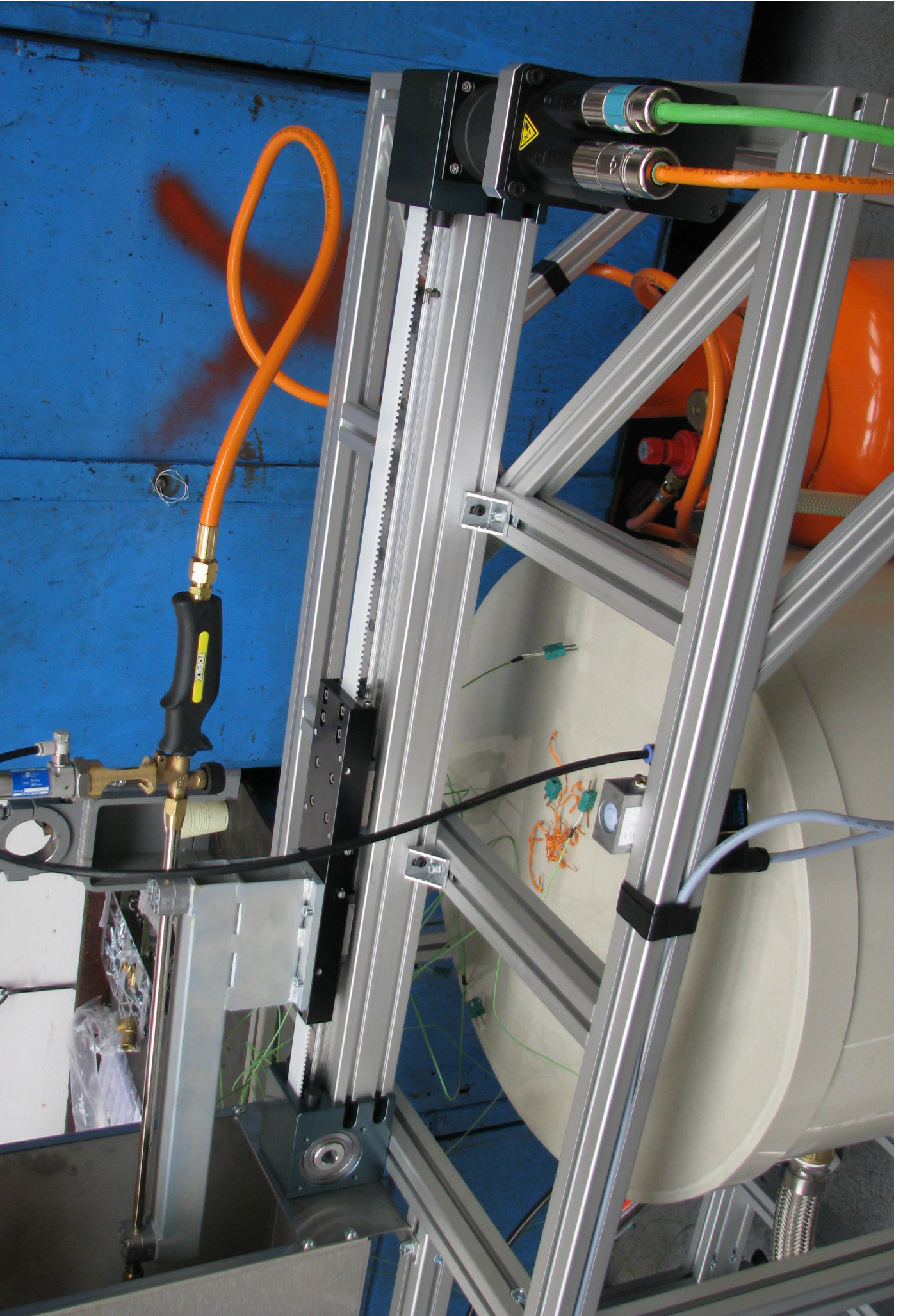


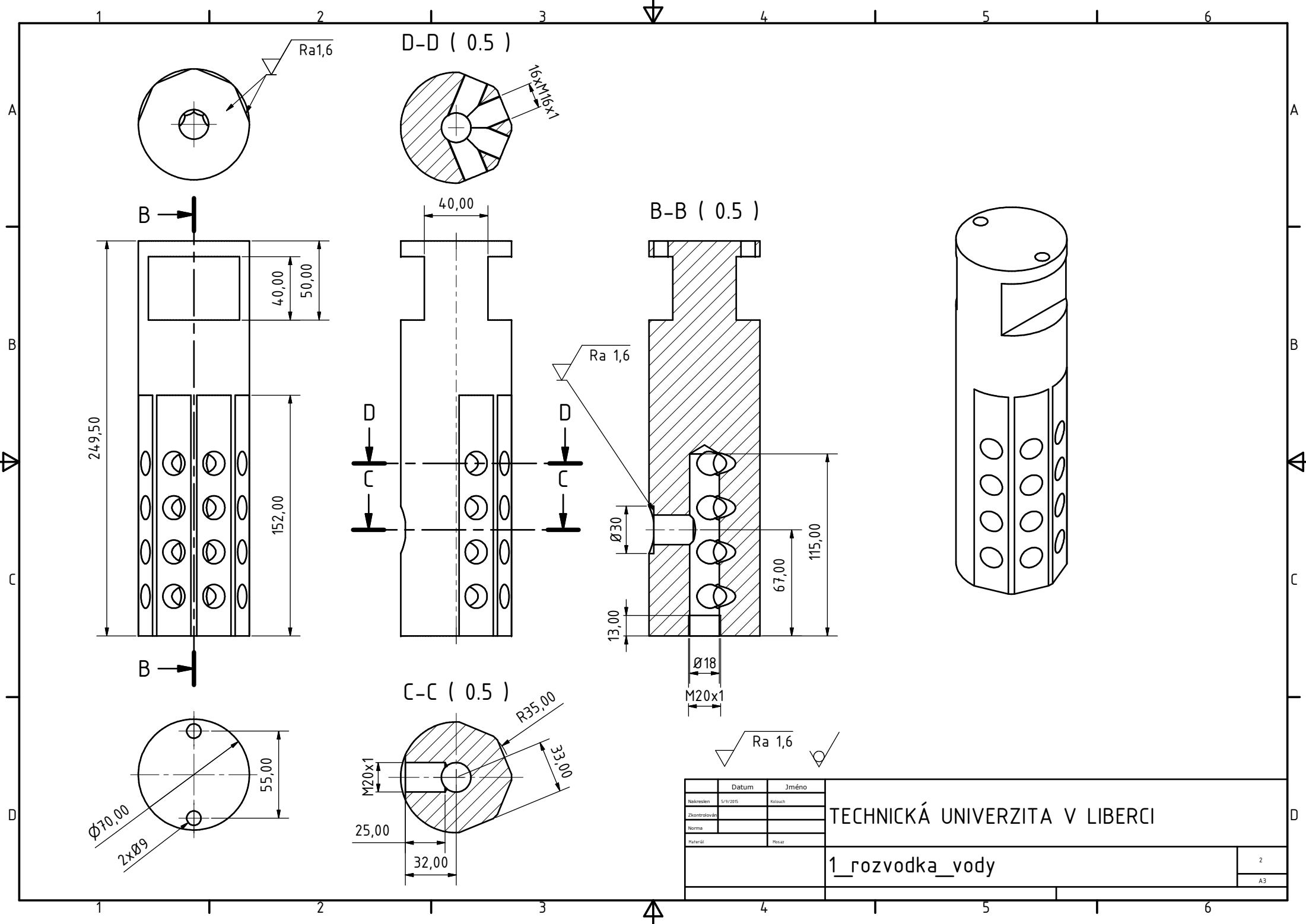


Top WORK, Camera Top



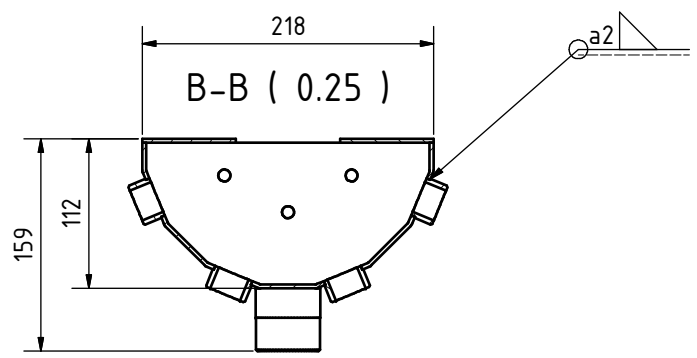
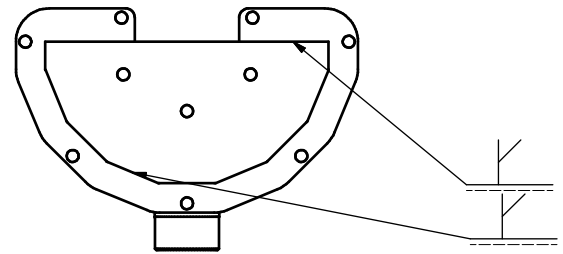
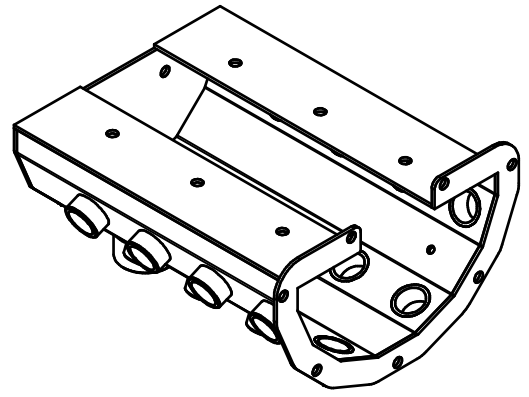
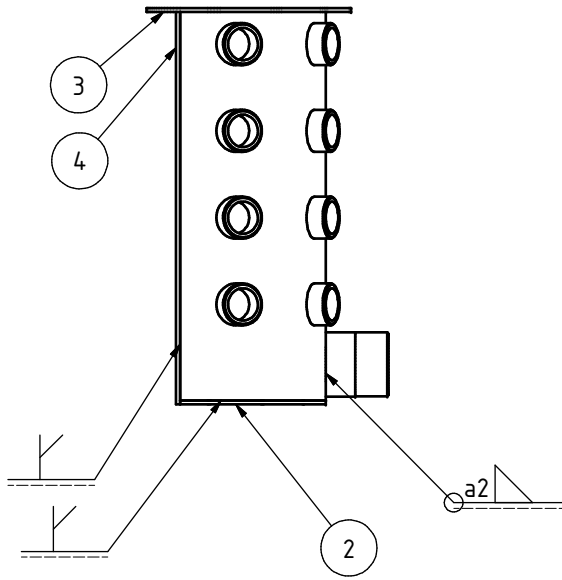
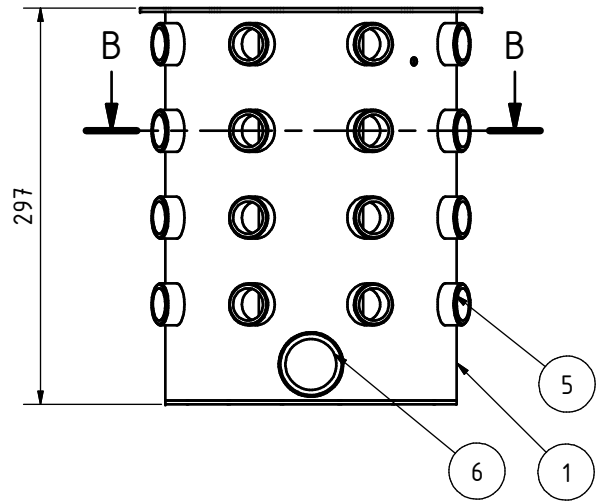






	Datum	Jméno	TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Nakreslen	5/9/2015	Kolouch	
Zkontrolován			
Norma			
Material		Miscar	
1_rozvodka_vody			2
			A3





Svary zavařit tak, aby byly vodotěsné

KUSOVNÍK			
POZICE	KS	ČÍSLO SOUČÁSTI	POPIS
1	1	06300_80101707_PLAST_KOMORY	
2	1	06300_80101710_VIKO_KOMORY	
3	1	06300_80101708_PRIRUBA_KOMORY	
4	2	06300_80101709_LEM_KOMORY	
5	16	06300_80101717_HRDLO-NAVAREK_G3-4-UPRAVA	
6	1	06300_80101712_HRDLO-NAVAREK_G1_1-2-VNE-UPRAVA	

Datum	Jméno
Nakreslen	Křídoušek
Zkontrolován	
Norma	
Material	Din 14301

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

2\_komora\_chladici\_model