

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA STROJNÍ**

**Studijní program:** B0715A270013 – Strojní inženýrství  
**Studijní specializace:** Konstruování strojů a technických zařízení

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Konstrukční návrh chladicího systému Formula Student**

**Autor:** Adam HÁJEK  
**Vedoucí práce:** Doc. Ing. Josef FORMÁNEK, Ph.D.

Akademický rok 2022/2023

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2022/2023

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Adam HÁJEK**  
Osobní číslo: **S19B0291P**  
Studijní program: **B0715A270013 Strojní inženýrství**  
Specializace: **Konstruování strojů a technických zařízení**  
Téma práce: **Konstrukční návrh chladicího systému Formula Student**  
Zadávací katedra: **Katedra konstruování strojů**

## Zásady pro vypracování

Základní požadavky:

Proveďte rešerši současného stavu v oblasti konstrukčního provedení chladicích systémů u vozů kategorie Formula Student. Proveďte výběr vhodných komponent a návrh systému v závislosti na potřebném chladicím výkonu a ohledem na minimalizaci hmotnosti celkového řešení. Celá konstrukce musí splňovat platná pravidla Formula Student

Osnova práce

1. Rešerši současného stavu v oblasti konstrukčního provedení chladicích systémů u vozů kategorie Formula Student.
2. *Specifikace požadavků.*
3. *Návrh koncepčních variant řešení, výběr vhodných komponent, hodnocení variant a výběr optimální varianty*
4. *Konstrukční návrh vybrané varianty s využitím návrhových výpočtů a dalších nástrojů.*
5. *Komplexní hodnocení návrhu s využitím výsledků predikčních výpočtů a závěr*

Konzultant: Ing. Martin Mrázek

Rozsah bakalářské práce: **30-40 stran**  
Rozsah grafických prací: **podle potřeby**  
Forma zpracování bakalářské práce: **elektronická**

#### Seznam doporučené literatury:

- [1] HOSNEDL, Stanislav a KRÁTKÝ, Jaroslav. *Příručka strojího inženýra: obecné strojí části*. Praha: Computer Press, 1999. ISBN 80-7226-055-3
- [2] HOSNEDL, Stanislav a KRÁTKÝ, Jaroslav. *Příručka strojího inženýra: obecné strojí části. Převodové mechanismy*. Praha: Computer Press, 1999. ISBN 80-7226-202-5
- [3] FormulaSAE. Series Resources. [online]. Dostupné z: <https://www.fsaeonline.com/cdsweb/gen/DocumentResources.aspx>
- [4] FormulaStudentGermany. Rules & Important Documents. [online]. Dostupné z: <https://www.formulastudent.de/fsg/rules/>
- Podkladové materiály, výkresy, prospekty, katalogy apod. poskytnuté zadavatelem úkolu.*

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Josef Formánek, Ph.D.**  
Katedra konstruování strojů

Datum zadání bakalářské práce: **30. listopadu 2022**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **26. května 2023**

L.S.

---

**Doc. Ing. Vladimír Duchek, Ph.D.**  
děkan

---

**Prof. Ing. Václava Lašová, Ph.D.**  
vedoucí katedry

## Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne: .....

.....

podpis autora



## ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Hájek	<b>Jméno</b> Adam	
<b>STUDIJNÍ PROGRAM</b>	B0715A270013 Strojní inženýrství		
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> Doc. Ing. FORMÁNEK, Ph.D.	<b>Jméno</b> Josef	
<b>PRACOVISŤE</b>	ZČU – FST – KKS		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	<b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Konstrukční návrh chladicího systému Formula Student		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KKS	<b>ROK ODEVZD.</b>	2023
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	61	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	34	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	15
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b> <b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	Bakalářská práce se zaměřuje na návrh chladicího systému pro vůz Formula Student. První část se věnuje návrhu systému, včetně analýzy současného stavu a dat získaných z minulých závodních sezón. Návrh chladicího systému je prováděn pomocí výpočtů pro dílčí komponenty. Následující část se zabývá předběžným návrhem propojení jednotlivých komponent chladicího systému. Třetí část je věnována návrhu jednotlivých komponent chladicího systému.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b> <b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b>	Chladicí systém, Formula Student, okruh chlazení

## SUMMARY OF BACHELOR SHEET

<b>AUTHOR</b>	<b>Surname</b> Hájek	<b>Name</b> Adam	
<b>STUDY PROGRAMME</b>	B0715A270013 Mechanical Engineering		
<b>SUPERVISOR</b>	<b>Surname (Inclusive of Degrees)</b> Doc. Ing. FORMÁNEK, Ph.D.	<b>Name</b> Josef	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU – FST – KKS		
<b>TYPE OF WORK</b>	<del>DIPLOMA</del>	<b>BACHELOR</b>	<b>Delete when not applicable</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Structural design of the Formula Student cooling system		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KKS	<b>SUBMITTED IN</b>	2023
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	61	<b>TEXT PART</b>	34	<b>GRAPHICAL PART</b>	15
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	The bachelor's thesis focuses on the design of a cooling system for the Formula Student car. The first part is dedicated to the system design, including analysis of the current state and data obtained from previous racing seasons. The design of the cooling system is carried out using calculations for individual components. The following part deals with the preliminary design of the interconnection of individual cooling system components. The third part is dedicated to the design of each cooling system component.
<b>KEY WORDS</b>	Cooling system, Formula Student, cooling circuit

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Josefu Formánkovi, Ph.D., dále bych chtěl také velice poděkovat konzultantům Ing. Martinovi Mrázkovi a Ing. Václavu Markovi, Ph.D za odborné rady a návrhy k práci.

Plzeň.....

podpis autora.....

## Obsah

ÚVOD .....	1
1 Chladicí systém monopostu .....	2
1.1 Chlazení vozu UWB06 .....	2
1.2 Rozdíl mezi chladicími systémy vozů se spalovacím motorem a vozů s elektrickým motorem .....	4
2 Specifikace požadavků .....	5
2.1 Pravidla pro chladicí systémy Formula Student .....	5
3 Stav techniky .....	7
3.1 Analýza řešení chlazení konkurenčních týmů .....	7
3.1.1 E-tech Racing Barcelona .....	7
3.1.2 Univerzita Lisabon .....	9
3.1.3 RIT Rochester New York .....	10
3.2 Souhrn konstrukčního řešení týmů .....	12
4 Návrh .....	13
4.1 Návrh chladicího systému .....	13
4.1.1 Koncepční návrh chladicího systému .....	13
4.1.2 Vlastní návrh chladicího systému .....	15
4.1.3 Výběr vodní pumpy .....	19
4.2 Návrh chladiče .....	25
4.2.1 Analýza volby rozměrů chladiče u konkurence .....	25
4.2.2 Vlastní návrh velikosti chladiče .....	26
4.2.3 Volba typu voštin pro chladič .....	26
4.2.4 Finální návrh chladiče .....	27
4.2.5 Návrh trubiček chladiče .....	27
4.3 Návrh minimálního průměru hadice .....	28
4.4 Návrh propojení chladících komponent formule .....	28
4.4.1 Výpočet minimálního průměru hadice .....	28
4.4.2 Volba typu hadice .....	29
4.4.3 Návrh propojení komponent .....	29
4.4.4 Návrh fixace hadic .....	30
4.5 Ověření návrhu pomocí CFD simulace .....	30
4.5.1 Simulace CFD pro levou část chladicího systému .....	30
4.5.2 Simulace CFD pro tepelný výměník měniče .....	30

5	Závěr.....	31
6	Seznam použitých zdrojů .....	32
	PŘÍLOHA č. 1 .....	i
	PŘÍLOHA č. 2.....	iv
	PŘÍLOHA č. 3.....	v
	PŘÍLOHA č. 4.....	vi

## Přehled použitých zkratk a symbolů

UWB	University of West Bohemia
ČSN	Česká technická norma
EN	Evropská norma
FST	Fakulta strojní
KKS	Katedra konstruování strojů
ZČU	Západočeská univerzita v Plzni
chlad.	chladící
FSG	Formula Student Germany
Formula SAE	Formula Society of Automotive Engineers
tlak.	Tlaková
CFD	Computational Fluid Dynamics
UWB06	univerzitní formule (2019)

## Seznam obrázků

Obrázek 1.1: chladicí systém UWB06 [4] .....	3
Obrázek 1.2: Vodní pumpa EWP80 .....	3
Obrázek 1.3: olejový systém UWB06 .....	4
Obrázek 3.1: obvod chlazení Barcelona [7] .....	7
Obrázek 3.2: znázornění teploty obrobeného chladiče při rychlosti tekutiny 0,0824 kg/s [7]... 8	8
Obrázek 3.3: chladicí blok pro elektromotor Barcelona [7].....	8
Obrázek 3.4: rozložení teploty a tvar chladicí dráhy pro elektromotor [8].....	9
Obrázek 3.5: Chladicí okruh univerzity Lisabon [8].....	10
Obrázek 3.6: chladicí systém RIT Racing [5] .....	10
Obrázek 3.7: chladicí systém RIT Racing z blízka [5] .....	11
Obrázek 4.1: chlad. systém varianta A.....	13
Obrázek 4.2: chlad. systém varianta B .....	13
Obrázek 4.3: chlad. systém varianta C .....	14
Obrázek 4.4: chlad. systém varianta D.....	14
Obrázek 4.5: schéma vlastního návrhu chlad. systému.....	16
Obrázek 4.6: 3D schéma vlastního návrhu chlad. systému.....	16
Obrázek 4.7: vodní pumpa P4514 Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.....	20
Obrázek 4.8: vodní pumpa P4504 [12] .....	21
Obrázek 4.9: vodní pumpa P5009 [13] .....	22
Obrázek 4.10: vodní pumpa Pierburg Chyba! Nenalezen zdroj odkazů. ....	23
Obrázek 4.11: vodní pumpa Bosch Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.....	24
Obrázek 4.12: předběžná skica chladiče s rozměry .....	26
Obrázek 4.13: model chladiče UWBE01 .....	27
Obrázek 4.14: trubičky chladiče.....	27
Obrázek 4.15: propojení komponent (vnitřní průměry hadic) .....	29

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Porovnávací tabulka konkurenčních týmů.....	12
Tabulka 2: porovnávací tabulka pro alternativy chlad. s. ....	15
Tabulka 3: vstupní hodnoty výpočtů.....	17
Tabulka 4: parametry vodní pumpy P4514 .....	20
Tabulka 5: parametry vodní pumpy P4504 .....	21
Tabulka 6: parametry vodní pumpy P5009 .....	22
Tabulka 7: parametry vodní pumpy Pierburg .....	23
Tabulka 8: parametry vodní pumpy Bosch .....	24
Tabulka 9: porovnávací tabulka pro alternativy vodních pump.....	25
Tabulka 10: známé hodnoty pro výpočet min. průměru hadice .....	28



# ÚVOD

Cílem této bakalářské práce je realizovat návrh chladicího systému elektrického vozu Formula Student za účelem dosažení vhodných teplotních rozmezí pro dané komponenty a dále spolehlivé těsnosti a zamezení úniku chladících kapalin do okolního prostředí. Výsledný návrh musí zcela splňovat pravidla, která jsou stanovena soutěží Formula SAE.

Formula SAE, je konstruktérská univerzitní soutěž. Hlavním cílem je navrhnout a postavit vozidlo, které splňuje pravidla soutěže. V současné době se soutěže Formula Student účastní přibližně 600 univerzit z celého světa. Soutěž se dělí na tři kategorie. Kategorie vozů se spalovacím motorem, vozů s elektrickým motorem a vozů bezpilotních. Stále více soutěžících týmů přechází ze spalovacích monopostů na elektrické monoposty, což vede k jiným požadavkům konstrukčního zpracování. V soutěži je hodnocena konstrukce a ekonomická stránka vozu. Tyto parametry jsou hodnoceny celkem jedenácti disciplínami, které se rozdělují do statické nebo dynamické kategorie. Mezi statické disciplíny patří design, kde se hodnotí konstrukční návrh, dále technická prezentace vozu, cenová kalkulace a vytvoření marketingového plánu. Dynamické disciplíny, kde dochází k testování akcelerace vozu na 75 m, funkčnosti podvozku při simulaci statického zatáčení, jízdy na trati s kužely a poslední disciplínou jízdy na trati dlouhé 22 km. Část technické přejímky, která se zaměřuje na chladicí systém, je test náklonu vozu a je zde kontrolován únik provozních kapalin. [1]

V úvodu práce bude proveden rozbor a charakteristika chladících systémů s určením specifikací požadavků s ohledem na dodržení pravidel Formula Student.

Dále bude provedena analýza chladicího systému vozu UWB06 a analýza konkurenčních řešení.

Návrh bude obsahovat vlastní konstrukční řešení a také se bude týkat hodnocení optimálního provedení chladicího systému. Hlavním cílem bude výše zmiňované udržení optimálních teplot, a to konkrétně na motorech a měniči. Následně se zvolí vhodná vodní pumpa, která bude okruh/okruhy pohánět. Pravděpodobně také dojde k redukci chladiče UWB06. Předposlední část návrhu bude volba ostatních potřebných komponent pro navržený chladicí systém.

V závěrečné části dojde k sestavení chladících okruhů v programu Siemens NX a bude vytvořena CAD dokumentace.

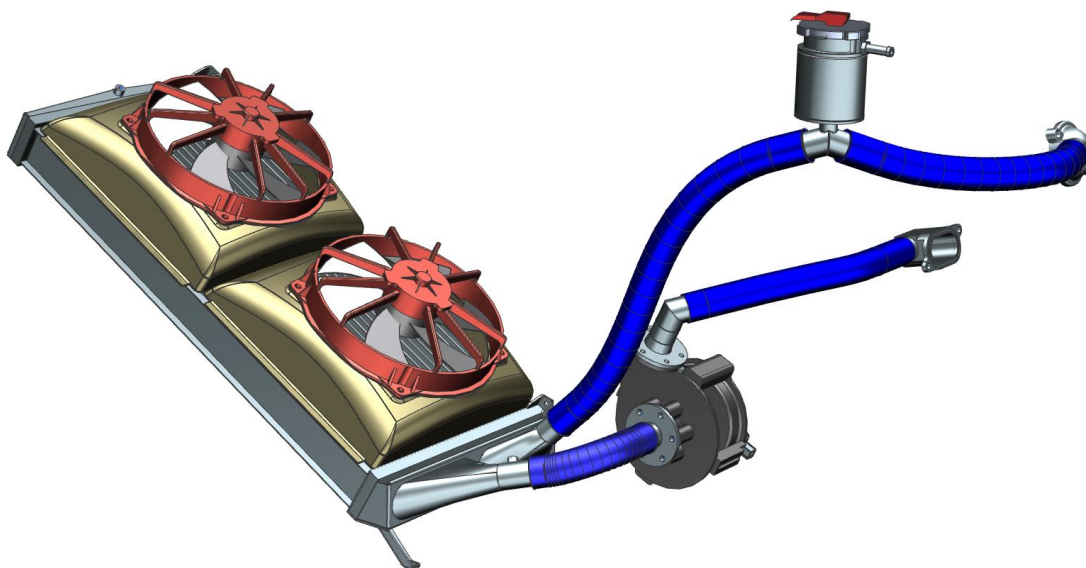
# 1 Chladicí systém monopostu

Chladicí systém elektrických vozidel je velmi důležitý. Během krátké doby vzniká v kritických částech velké množství tepla, které se musí odvádět a zajistit, že chlazené součásti budou pracovat při optimální teplotě a nedojde k jejich poškození v důsledku přehřátí. Jelikož se jedná o monoposty, tedy závodní auta, je nutné efektivně (s ohledem na účinnost a minimalizaci hmotnosti) dimenzovat chladicí okruh. U elektrických monopostů je třeba chladit elektromotory a měniče, které patří mezi větší zdroje tepla [2]. U elektrických monopostů se často vyskytují jednookruhový nebo dvouokruhový systémy chlazení [5], [8]. Dle pravidel může být chladicím médiem destilovaná voda [1]. Chlazení destilovanou vodou je mnohem účinnější než chlazení vzduchem, jelikož koeficient přestupu tepla mezi destilovanou vodou a pevnou látkou je 50x až 100x vyšší než u vzduchu. Voda dokáže velké množství tepla rozptýlit, a navíc cíleně doručit pro optimální chladicí efekt. Při udržování konstantního tlaku u vodního chlazení lze docílit i delší chladicí fáze [9]. Destilovaná voda má oproti běžným chladicím kapalinám používaných v automobilech horší mazací schopnosti, což klade zvýšené nároky na návrh těsnění hřídele vodní pumpy. [6]

## 1.1 Chlazení vozu UWB06

Předešlá generace vozu s označením UWB06 byla navržena a vyrobena v souladu s pravidly pro vozy se spalovacím motorem, a tudíž navrhovaný systém chlazení bude výrazně odlišný od vozů s elektrickým pohonem. Z důvodu konstrukce první generace vozu s elektrickým pohonem (tudíž nulovým předešlým zkušenostem a ověřených řešení týmů s chlazením elektrického trakčního systému) je níže uveden popis vodního chladicího systému poslední generace vozu se spalovacím motorem.

Při návrhu chladicího systému u závodního vozu bylo cílem primárně redukovat celkovou váhu vozu a zlepšit účinnost chlazení. Byl navržen jednookruhový vodní chladicí systém, který je znázorněn na obrázku (Obrázek 1.1). Byl použit jeden chladič, a to na levé straně vozu. Chladič je osazen dvěma kusy elektrických ventilátorů. Ventilátory jsou mechanicky spojeny s chladičem pomocí mezikusu tzv. duct, který je vyroben z uhlíkového kompozitu. Vodní pumpa s označením EWP80, viz. Obrázek 1.2, měla maximální průtok 80 l/min při maximálním tlakovém spádu 350 kPa. [4]

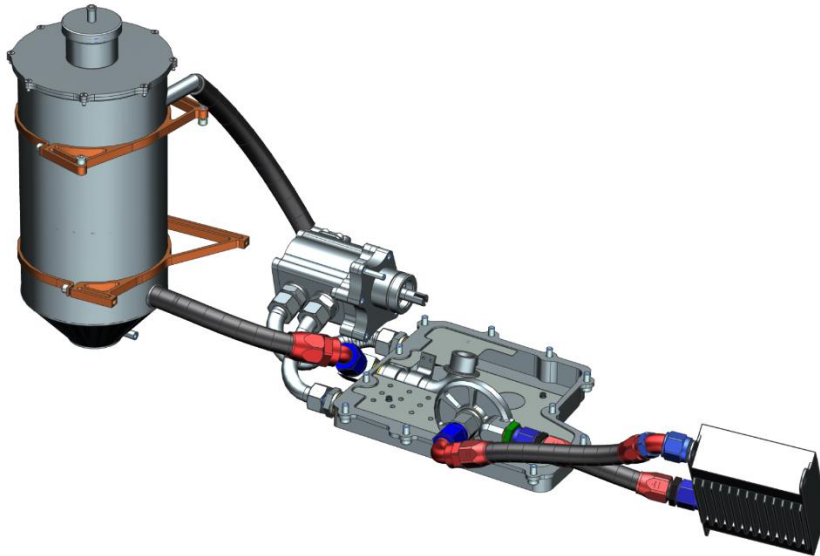


Obrázek 1.1: chladicí systém UWB06 [4]



Obrázek 1.2: Vodní pumpa EWP80

Spalovací vůz měl navíc ještě olejový systém, viz. Obrázek 1.3, který sloužil k mazání a chlazení komponent motoru. Tento systém měl vlastní tepelný výměník. [10]



Obrázek 1.3: olejový systém UWB06

## 1.2 Rozdíl mezi chladicími systémy vozů se spalovacím motorem a vozů s elektrickým motorem

Chlazení spalovacích motorů bývá výrazně odlišné od chlazení elektrických motorů. Nedochozí zde ke chlazení více motorů zvlášť, které pohánějí vůz, ale pouze se chladí jeden motor. U spalovacích motorů se navíc využívá olejového chladicího a zároveň mazacího systému pro blok motoru. U elektrických motorů je potřeba chladit výkonovou elektroniku (měniče napětí apod.), akumulátory, a samostatné motory, které jsou relativně velkým zdrojem tepla.

## 2 Specifikace požadavků

Na základě konzultací s týmem a analýzy stávajících chladících systémů byly stanoveny tyto požadavky:

1. Vůz bude poháněn čtyřmi elektromotory umístěných v kolech.
2. Měnič bude vlastní konstrukce.
3. Návrh komponent chladicího systému pro maximální odvedení tepelných ztrát měniče a elektromotorů.
4. Návrh zaměřit na minimalizaci celkové hmotnosti.
5. Návrh okruhu/okruhů chladicího systému pro optimální rozložení komponent vůči středu hmotnosti vozu.
6. Redukovat chladič z vozu UWB06.

Při návrhu chladicího systému je potřeba zohlednit vnější teplotu prostředí, ve kterém bude vůz provozován. Je potřeba zohlednit geolokaci závodních tratí a maximální teplotu, která se na nich vyskytuje. V nejhorsím případě se mohou konat závody na jihu Evropy v letním období, kde jsou vysoké teploty. Je třeba dimenzovat chladicí systém pro tyto případy. Z tohoto důvodu jsem zvolil systém vodního chlazení, který má daleko větší účinnost chlazení na provozní teploty než chlazení vzduchem.

Z historických dat týmu a průzkumu trhu při návrhu chladicího systému elektrické formule bylo rozhodnuto, že chladicí systém vozu bude obsahovat tyto komponenty: vodní chladič, vodní výměník elektromotoru, vodní pumpa, vodní výměník měniče, expanzní nádoba.

Výměník elektromotoru FISCHER TI85 a výměník měniče je již týmem navržen.

### 2.1 Pravidla pro chladicí systémy Formula Student

Pravidla jsou zaměřena hlavně na bezpečnost řidiče a osob v blízkosti vozidla. Chladicí systémy mají relativně stručná pravidla.

Zamezení kontaminace tratě chladicí kapalinou a olejem. Kapalinou chlazené motory musejí použít pouze destilovanou vodu bez přídavných aditiv. Destilovaná voda zhoršuje mazání hřídele vodní pumpy. K zadržování tekutin jiných, než je destilovaná voda z jakýchkoliv otvorů musí být použity samostatné záchytné nádoby, které mají následující pravidla.

- Nádoba musí mít min. objem 10% obsažené tekutiny nebo 900ml v závislosti, co je větší.
- Záchytné nádoby, upevnění a všechny hadice musí být vyrobeny z materiálu, který je trvale dimenzován na teploty min. 120 °C nebo teploty příslušné kapaliny podle toho, co je větší.
- Záchytné nádoby musí být pevně namontovány k podvozku a umístěny za přepážkou pod úrovní ramen řidiče.
- Záchytná nádoba musí být odvětrávána hadicí o min. vnitřním průměru 3 mm dolů po spodní úroveň podvozku a musí vystupovat mimo karoserii.

Řidič a kdokoliv stojící mimo vozidlo musí být chráněni před jakýmkoliv hydraulickým čerpadlem a potrubím s tlakem vyšším než 21 baru, toto pravidlo se nevztahuje na systém brzd.

Ochranné štíty musí být ocelové, popř. hliníkové o min. tloušťce 1 mm.

Po dynamických disciplínách je kontrolován motorový prostor a podlaha, jestli nedochází k úniku kapalin. Pokud dochází k úniku kapalin, tým je vyřazen z bodování dynamické disciplíny.  
[3]

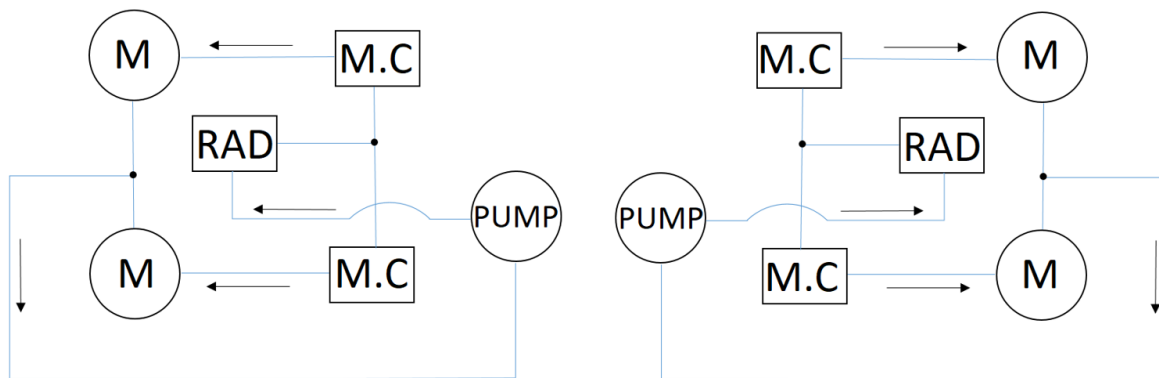
### 3 Stav techniky

#### 3.1 Analýza řešení chlazení konkurenčních týmů

Byly vybrány celkem tři konkurenční týmy. Jejich výběr byl proveden průzkumem worldrating listu Formula Student [20] a zároveň podle dostupnosti informací týkající se řešení chladičového systému u elektrické formule. Vybrané týmy jsou: E-tech Racing Barcelona, univerzita Lisabon a RIT Racing team Rochester.

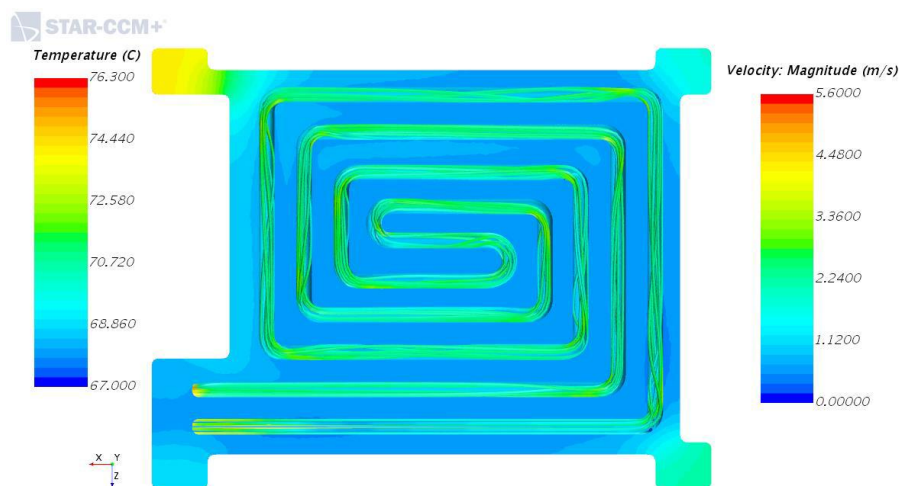
##### 3.1.1 E-tech Racing Barcelona

Chladičový systém u týmu E-tech obsahuje dva nezávislé okruhy chlazení. Každý jeden okruh slouží ke chlazení jedné dvojice elektromotorů a jejich měničů. Chladiče jsou umístěny na stranách, aby jimi mohl proudit vzduch. Vyměňují teplo mezi směnným médiem a proudícím vzduchem. Elektromotory se chladí pomocí průtoku média plastovým blokem mezi statorem a rotorem. Destilovaná voda, jako médium, je vedena vodním kanálem, který tvoří plastový blok. Zde absorbuje teplo. Každý jeden elektromotor má svůj měnič, viz. Obrázek 3.1. [7]



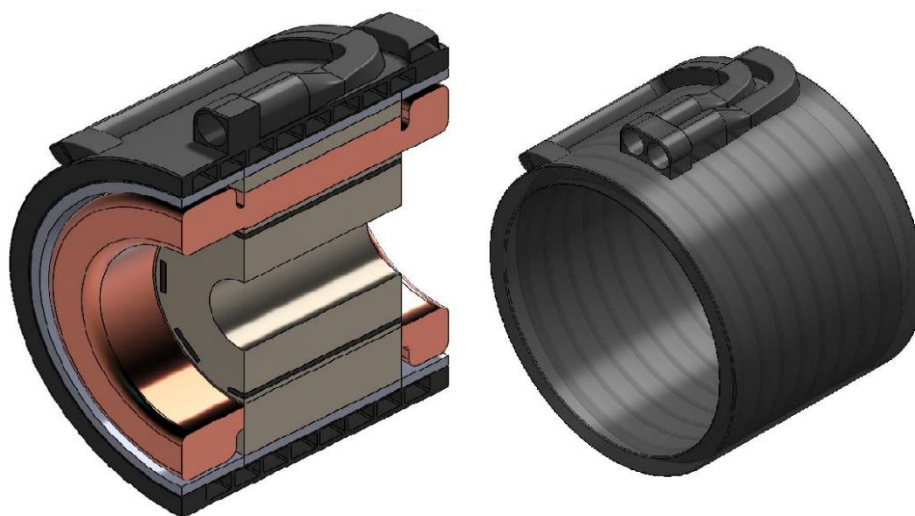
Obrázek 3.1: obvod chlazení Barcelona [7]

Chladič byl navržen z hliníku a průměr kanálu chladiče byl zvolen 6 mm. Tým Barcelony se rozhodl mezi obrobeným chladičem nebo vrtaným chladičem. Výsledkem analýz a simulací se došlo k závěru, že vrtaný chladič měl větší pokles tlaku než obrobený chladič. Tudíž, zvoleným chladičem byl obrobený chladič s konfigurací vodních kanálů zobrazených na obrázku Obrázek 3.2. [7]



Obrázek 3.2: znázornění teploty obrobeneho chladiče při rychlosti tekutiny 0,0824 kg/s [7]

Design chladičho bloku pro elektromotory, aby skrz ně mohlo proudit chladičí médium, byl navržen spirálovitě, viz. Obrázek 3.3. Blok byl vyroben v 3D tiskárně z nylonového materiálu [7].



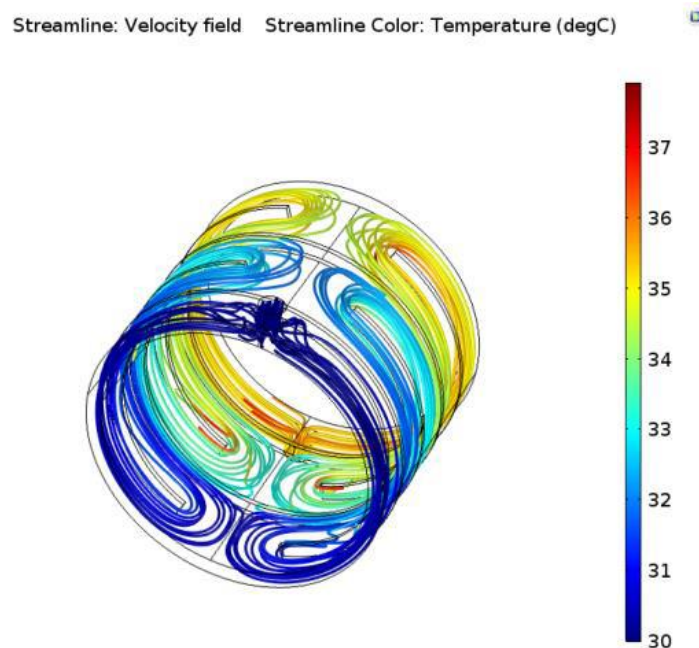
Obrázek 3.3: chladičí blok pro elektromotor Barcelona [7]



### 3.1.2 Univerzita Lisabon

Univerzitní tým z Lisabonu navrhl vůz poháněný čtyřmi elektromotory, tedy na každém kole jeden elektromotor. Chladicí systém má dva chladicí okruhy. Každý okruh má tedy svůj chladič a měnič, který se nachází na jedné straně, buď levé nebo pravé a dále přední a zadní elektromotor, který se vyskytuje na té straně. Chladicím médiem je zde voda, která proudí mezi všemi těmito součásti viz. Obrázek 3.5. Blok, který rozvádí médium v elektromotoru je vyroben z polymeru z důvodu, že použití jiného materiálu nemá žádný viditelný přínos.

Výhodou polymeru je nízká hmotnost. Tvar proudění chladicího média je znázorněný na Obrázek 3.4. Médium vstupuje do chladicího bloku elektromotoru při teplotě 30°C. Rychlost proudění je 0,1 kg/s. Vyskytuje se zde i chladič pro měnič, který se skládá z hliníkové desky se šesti vnitřními kanály tvaru U a průtok média je 0,2 kg/s. [8]



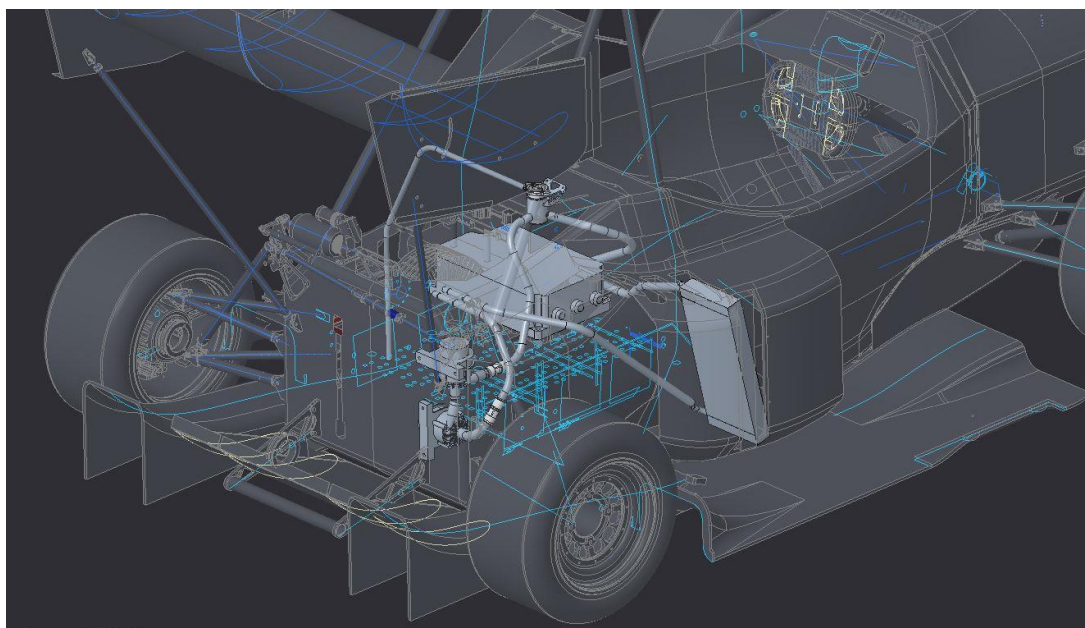
Obrázek 3.4: rozložení teploty a tvar chladicí dráhy pro elektromotor [8]



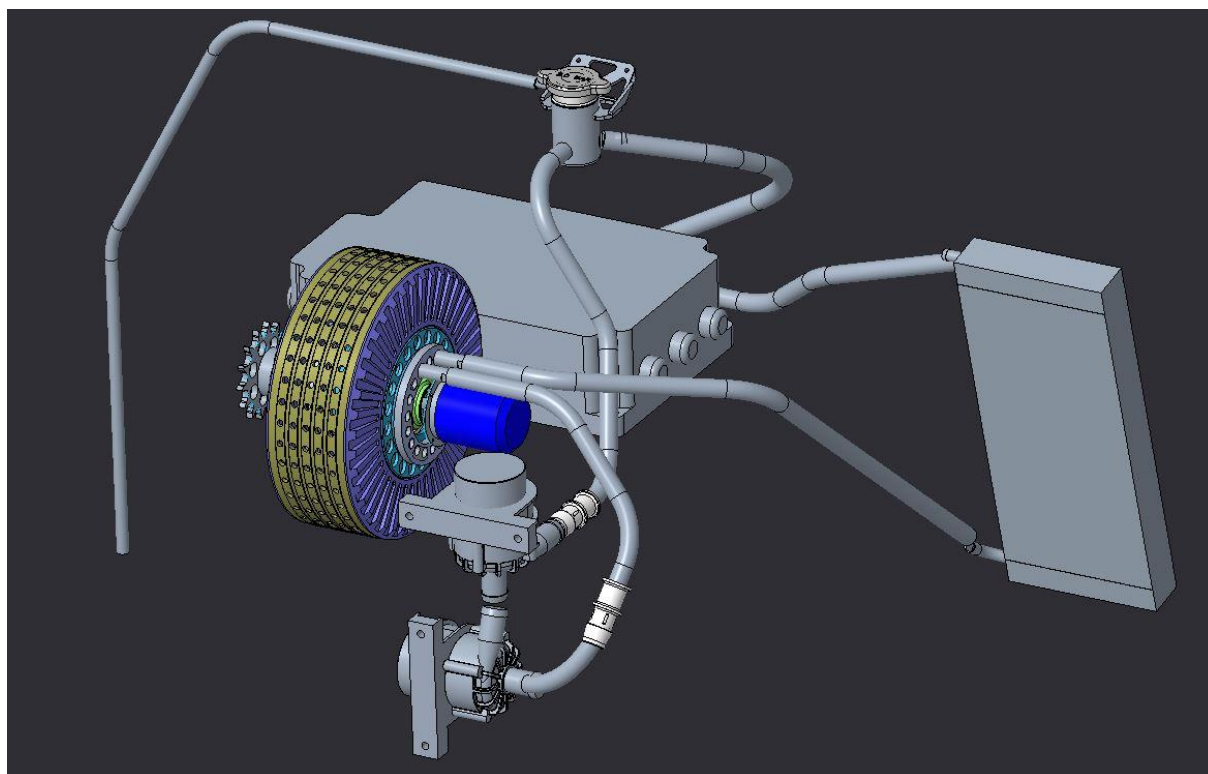
Obrázek 3.5: Chladicí okruh univerzity Lisabon [8]

### 3.1.3 RIT Rochester New York

Tým RIT Rochester svůj elektrický monopost navrhnul poháněný pouze jedním elektromotorem uloženým v zadní části vozu viz. Obrázek 3.6. Chladicím médiem byla voda. Chladič pro celý chladicí systém byl navržen pouze na pravé straně od monokoku. I přes to že měli jeden okruh chlazení, v chladicím systému se vyskytovali 2 vodní pumpy, kvůli vysokému poklesu tlaku během proudění. Vodní pumpy mají nastaveny na proudění média 8 l/min. [5]



Obrázek 3.6: chladicí systém RIT Racing [5]



Obrázek 3.7: chladicí systém RIT Racing z blízka [5]

### 3.2 Souhrn konstrukčního řešení týmů

Porovnáním návrhového řešení konkurenčních týmů jsem shrnul do tabulky (Tabulka 1), která ukazuje výhody a nevýhody konstrukčního řešení jednotlivých týmů.

**Tabulka 1: Porovnávací tabulka konkurenčních týmů**

TÝM	+	-
<b>E-TECH RACING BARCELONA</b>	dvouokruhový chladicí systém, dva chladiče, chladicí blok v elektromotorech, vodní chlazení, plastový chladicí blok elektromotor	Měnič pro každý elektromotor (chlazení čtyř elektromotorů)
<b>UNIVERZITA LISABON</b>	dvouokruhový chladicí systém, pro každý okruh jeden měnič, vodní chlazení, chladicí blok elektromotorech z polymeru, dva chladiče, rozložení těžiště	Tvar proudění chladicího média elektromotorem (chlazení čtyř elektromotorů)
<b>RIT ROCHESTER NEW YORK</b>	Chladicí médium voda, chlazení jednoho elektromotoru, nenáročnost	jeden chladič, rozložení těžiště

Na základě provedené rešerše lze konstatovat, že vybrané týmy, které používají pohon čtyř elektromotorů volí chlazení pomocí dvou okruhů chlazení. Okruh levé strany a okruh pravé strany vozu. Jako tým UWB jsme se rozhodli chladit systém jedním chladičem na každé straně, viz. Obrázek 3.5. Dále jsme rozhodli zvolit dvouokruhové chlazení, kvůli lepší účinnosti chlazení systému a lepšímu rozložení hmotnosti vůči těžišti. Chladicí bloky v elektromotorech budou vyrobeny z termoplastu. Tvar proudění chladicího média blokem elektromotoru bych zvolil podobající se tvaru týmu E-tech Racing, viz. Obrázek 3.3, jelikož je jednodušší a více účinný.

## 4 Návrh

Na základě specifikace požadavků viz. str. 5 bylo provedeno několik koncepčních návrhů chladících okruhů.

### 4.1 Návrh chladícího systému

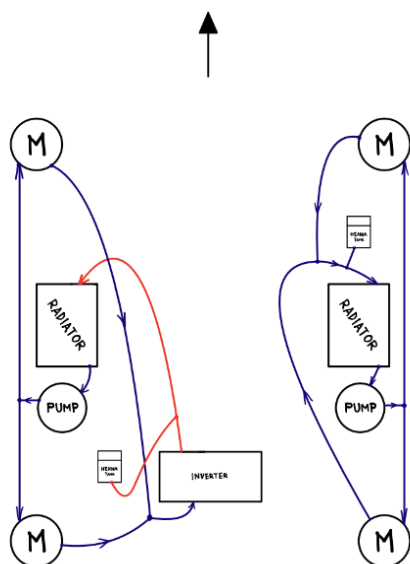
Návrh je zaměřen na rozložení komponent chladícího systému a volbu vodní pumpy na základě výpočtu minimálního průtoku.

#### 4.1.1 Koncepční návrh chladícího systému

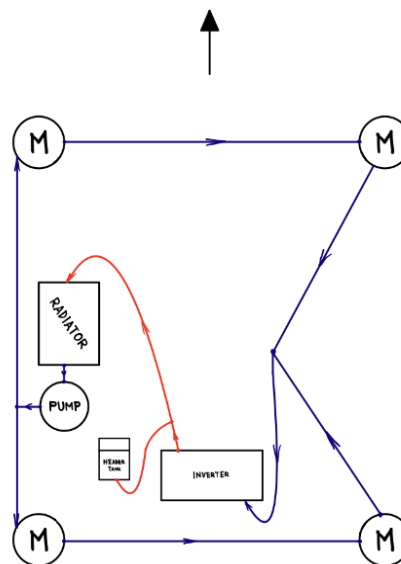
Schématicky byly navrženy celkem 4 možné varianty, kterými by měly být chlazeny elektromotory a měnič.

Nejprve by se měly chladit elektromotory a následně měnič. Je to z důvodu toho, že elektromotory, které budou použity by měli mít provozní teplotu 10 – 40 °C a jejich maximální teplotní gradient by neměl přesahovat 5 K. Teploty, které dosahuje měnič se pohybují přibližně okolo 90 °C. Teplotní rozdíl mezi elektromotory a měničem je vysoký, proto je tedy důležité chladit nejdříve komponentu s nižší provozní teplotou (elektromotory), aby nedošlo ke špatné provozní teplotě.

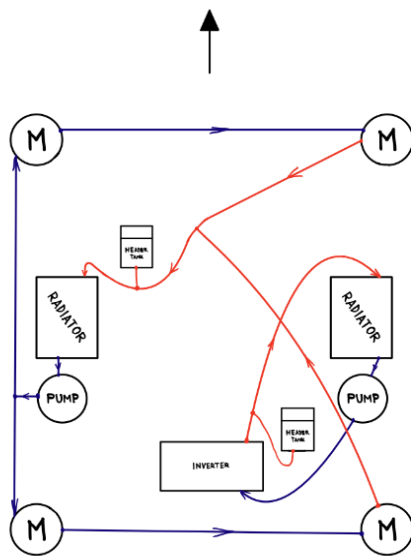
Na níže uvedených obrázcích jsou zobrazeny jednotlivé varianty, které indikativně zohledňují i rozmístění jednotlivých komponent na voze. Uvedená šipka označuje přední část vozu.



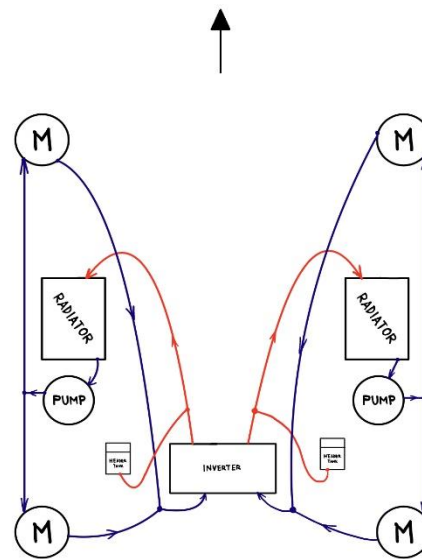
Obrázek 4.1: chlad. systém varianta A



Obrázek 4.2: chlad. systém varianta B



Obrázek 4.3: chlad. systém varianta C



Obrázek 4.4: chlad. systém varianta D

Obrázek 4.1 je zobrazena varianta A, která je charakterizována dvěma uzavřenými okruhy chlazení. V každém okruhu se nachází jedna vodní pumpa a jeden vodní chladič. Levý okruh musí chladit dva elektromotory a následně měnič. Pravý okruh chladí pouze dva elektromotory.

Obrázek 4.2 je zobrazena varianta B, která je charakterizována jedním uzavřeným okruhem chlazení. Oproti alternativě A se zde nachází pouze jeden chladič a jedna pumpa. Tento jeden okruh by měl chladit všechny čtyři elektromotory a také měnič.

Obrázek 4.3 je zobrazena varianta C, která je charakterizována dvěma uzavřenými okruhy chlazení. V každém okruhu se nachází jedna vodní pumpa a jeden vodní chladič. Tato alternativa je rozdělena na okruh chlazení elektromotorů a okruh chlazení měniče.

Obrázek 4.4 je zobrazena varianta D, která je charakterizována dvěma uzavřenými okruhy chlazení. Okruhy jsou identické. V každém okruhu se nachází jedna vodní pumpa, jeden vodní chladič a vodní výměník na měnič. Zde je oproti ostatním alternativám vodní výměník na měnič rozdělen na dvě části.

Tabulka 2 porovnává jednotlivé parametry chladících systémů. Každý parametr je násoben vahou daného parametru. Výsledný nejvyšší součet dílčích hodnocení je nejbližší k požadovanému ideálnímu řešení a tím i neoptimálnější alternativou.

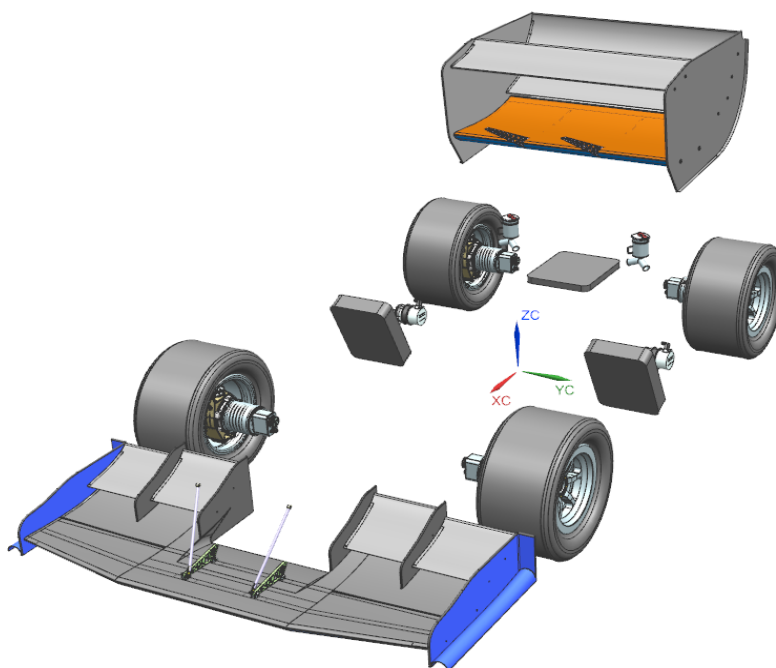
**Tabulka 2: porovnávací tabulka pro alternativy chlad. s.**

PARAMETR	ALTERNATIVY				VÁHA	IDEÁLNÍ STAV
	A	B	C	D		
NENÁROČNOST NÁVRHU	3	3	2	1	2	4
CENTRALIZACE	3	1	3	4	3	4
CENA	2	4	2	2	1	4
ROZMĚRY CHLADIČE	3	1	3	3	2	4
ROVNOMĚRNOST TEPLOT NA MOTORECH	3	1	1	3	3	4
POČET VODNÍCH VÝMĚNÍKŮ NA MĚNIČ	3	3	3	1	1	4
SOUČET	35	21	27	32	-	-

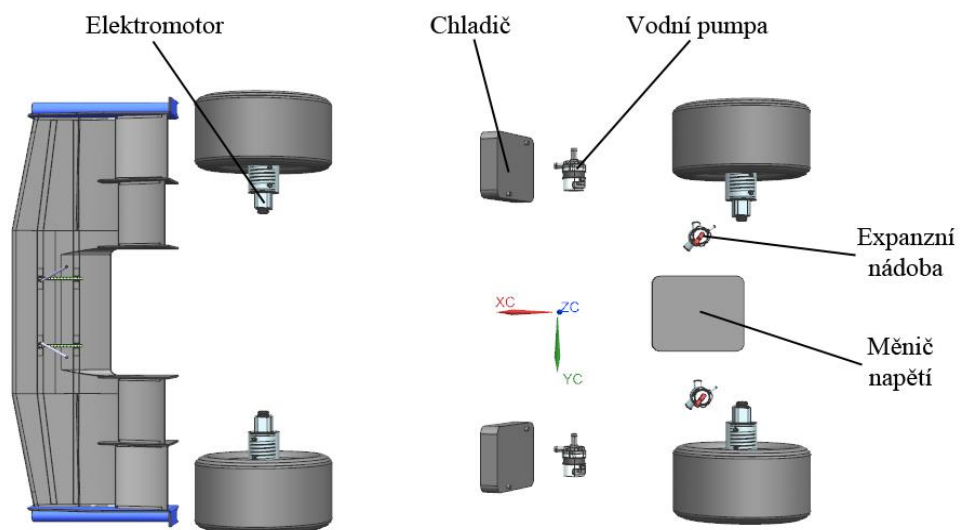
Volba nejvhodnější varianty byla provedena pomocí porovnávací tabulky (Tabulka 2). Na základě této tabulky lze konstatovat, že nejvhodnější variantou je varianta A, která má vhodnou centralizaci těžiště a vhodný návrh pro rovnoměrnost teplot na elektromotorech. U této varianty je měnič chlazen levým okruhem chladícího systému.

#### 4.1.2 Vlastní návrh chladícího systému

Vybraná alternativa A, viz. Obrázek 4.4 byla schematicky navržena v programu Siemens NX jako názorné rozložení komponent v monopostu. Na Obrázek 4.6 je zobrazen pohled v prostoru (3D) a na Obrázek 4.5 je půdorysný pohled, ve kterém jsou zobrazeny a označeny jednotlivé části chladícího systému.



Obrázek 4.6: 3D schéma vlastního návrhu chlad. systému



Obrázek 4.5: schéma vlastního návrhu chlad. systému



#### 4.1.2.1 Výpočet průtoku

Pro výpočet průtoku celým systémem bylo odvozeno z výpočtu průtoku jedním elektromotorem. Ten byl vyjádřen pomocí upravené kalorimetrické rovnice pro výpočet tepla.

$$\dot{Q} = \dot{m} * c * \Delta T$$

kde  $\dot{Q}$  ... tepelná ztráta [W],  $\dot{m}$  ... hmotnostní průtok  $\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right]$ ,  $c$  ... měrná tepelná kapacita  $\left[\frac{\text{J}}{\text{kg} * \text{K}}\right]$ ,  $\Delta T$  ... gradient teploty [°C].

Pro výpočet tepelných ztrát na motoru bylo potřeba znát celkový efektivní výkon a účinnost motoru. Je nutné uchládit motory při závodu na 22 km. Pro zjednodušení z důvodu neznámé vektorizace pohonů bylo rozhodnuto uvažovat nejvíce kritickou variantu, kde celkový efektivní výkon bude přenesen pouze na kola zadní nápravy v poměru 50:50. Velikost celkového efektivního výkonu bylo odečteno ze souhrnu dat z dřívějších závodů, konkrétně jednoho kola závodu „FSG\_2018\_Radek\_Lap2“ a dále byly převzaty ještě přibližné průměrné hodnoty účinnosti elektromotoru a pro další výpočty také hodnotu účinnosti měniče (převzato z [15]). Gradient teploty motoru je převzán z datasheetu motoru, viz. PŘÍLOHA č. 2. Tyto hodnoty byly zapsány do tabulky (Tabulka 3) s dalšími vstupními hodnotami pro výpočty.

Tabulka 3: vstupní hodnoty výpočtů

měrná tep. kapacita vody při 45 °C	$c$	<b>4176</b>	<b>J/kg*K</b>
gradient teploty motoru	$\Delta T$	<b>5</b>	<b>°C</b>
celkový efektivní výkon	$P_{ef}$	<b>22977</b>	<b>W</b>
účinnost motoru	$\eta_m$	<b>0,94</b>	-
účinnost měniče	$\eta_M$	<b>0,98</b>	-

##### 4.1.2.1.1 Předběžný výpočet průtoku na vytrvalostní závod

Tepelná ztráta na motoru

$$\dot{Q} = P_{ef} * (1 - \eta)$$

kde  $P_{ef}$  ... efektivní výkon [W],  $\eta$  ... účinnost [-].

Pro správnou orientaci bylo zvoleno, že parametry pro motor se značí s horním indexem „m“ a hodnoty pro Měnič se značí s horním indexem „M“.

*Efektivní výkon na jeden motor*

$$P_{ef}^m = \frac{P_{ef}}{2} = \frac{22977}{2} = 11488,5 \text{ W}$$

*Výpočet tepelných ztrát na motoru:*

$$Q^m = P_{ef}^m * (1 - \eta^m) = 11488,5 * (1 - 0,94) = 689,3 \text{ W}$$

*Výpočet hmotnostního průtoku motoru:*

$$\dot{m}^m = \frac{Q^m}{c * \Delta T} = \frac{689,3}{4176 * 5} = 0,033 \text{ kg/s} = 1,98 \text{ l/min}$$

Jelikož jsou v chladicích okruzích vždy dva elektromotory, tak tento průtok bude násoben dvěma.

*Výpočet předběžného minimálního průtoku chladicím okruhem*

$$\dot{m} = 2 * \dot{m}^m = 2 * 1,98 = 3,96 \text{ l/min}$$

#### **4.1.2.1.2 Předběžný výpočet průtoku na sprint**

Nejkritičtější varianta ale může také nastat při soutěžním sprintu, kde z baterie bude odebírán celkový možný výkon, tedy 80 kW dle pravidel FSG.

Lze tedy předpokládat, že příkon na měniči bude 80 kW a z toho byl dopočítán výkon na každý motor a určen průtok.

*Výkon měniče*

$$P^M = P^M * \eta^M = 80000 * 0,98 = 78400 \text{ W}$$

Výkon měniče se rovná výkonu na všech motorech.

*Výkon jednoho motoru*

$$P^m = \frac{P^M}{4} = \frac{78400}{4} = 19600 \text{ W}$$

*Výpočet tepelných ztrát na jednom motoru:*

$$Q^m = P^m * (1 - \eta^m) = 19600 * (1 - 0,94) = 1176 \text{ W}$$

*Výpočet minimálního hmotnostního průtoku jednoho motoru:*

$$\dot{m}^m = \frac{Q^m}{c * \Delta T} = \frac{1176}{4176 * 5} = 0,056 \text{ kg/s} = 3,38 \text{ l/min}$$

Jelikož jsou v chladících okruzích vždy dva elektromotory, tak tento průtok bude násoben dvěma.

*Výpočet předběžného minimálního průtoku chladicím okruhem*

$$\dot{m} = 2 * \dot{m}^m = 2 * 3,38 = 6,76 \text{ l/min}$$

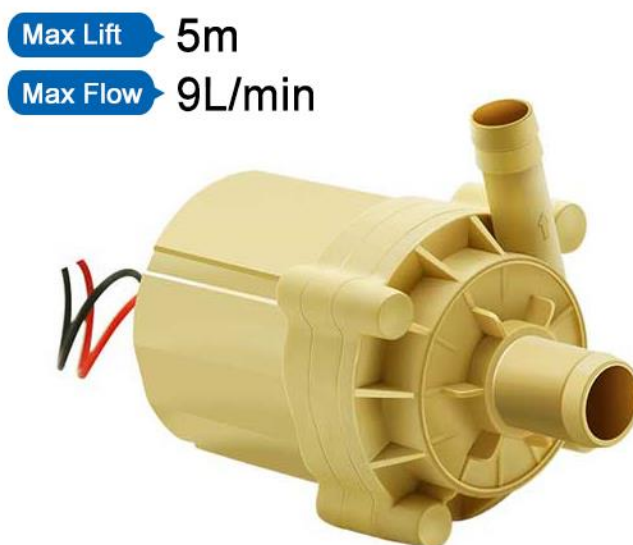
Zde je vidět, že pro sprint je potřeba vyššího průtoku než pro dlouhý závod. Z tohoto důvodu je dále počítáno s hodnotou 6,76 l/min.

Pro následující rešerši vodních pump je třeba brát ohled na to, že se v okruhu budou vyskytovat ještě tlakové ztráty, které je vhodné přibližně odhadnout pomocí výpočtů pro tlakové ztráty potrubí. Z důvodu zjednodušení systému bude zvolena stejná vodní pumpu pro oba okruhy. Okruhy se od sebe liší pouze tlakovými ztrátami na měniči.

### **4.1.3 Výběr vodní pumpy**

Bylo vybráno celkem pět vodních pump. Vybráno bylo na základě rozsahu průtoku mezi 8–20 l/min. Ne všude je uvedeno průtočné množství a další potřebné informace. Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto vybrat vodní pumpy i na základě hmotnosti, jelikož hmotnosti pump nebudou tolik odlišné pro daný průtok. Dále bylo třeba vybírat vodní pumpy pro napětí 12V, z důvodu napájení z baterie.

#### 4.1.3.1 Water Purifier Pump P4514



Obrázek 4.7: vodní pumpa P4514 [11]

Tabulka 4: parametry vodní pumpy P4514

P4514		
hmotnost	0,18	kg
maximální výtlačná výška	5	m
maximální průtok	9	l/min
použití	vnitřní/vnější	
médium	-	

#### 4.1.3.2 Water Cooling Pump P4504



Obrázek 4.8: vodní pumpa P4504 [12]

Tabulka 5: parametry vodní pumpy P4504

P4504		
hmotnost	-	kg
maximální výtlačná výška	9	m
maximální průtok	12	l/min
použití	vnitřní/vnější	
cena	-	

### 4.1.3.3 Automobile Cooling Pump P5009

Max Lift 3m  
Max Flow 25L/min



Obrázek 4.9: vodní pumpa P5009 [13]

Tabulka 6: parametry vodní pumpy P5009

P5009		
hmotnost	0,55	kg
maximální výtlačná výška	3	m
maximální průtok	25	l/min
použití	vnější	
cena	-	

#### 4.1.3.4 Příkladné vodní čerpadlo Pierburg 7.04071.71.0



Obrázek 4.10: vodní pumpa Pierburg [14]

Tabulka 7: parametry vodní pumpy Pierburg

<b>Pierburg</b>		
hmotnost	0,26	kg
maximální výtlačná výška	-	m
maximální průtok	-	l/min
použití	vnější	
cena	5276 Kč	

#### 4.1.3.5 Přídavné vodní čerpadlo Bosch PAD 12 V (0 392 023 004)



Obrázek 4.11: vodní pumpa Bosch [16]

Tabulka 8: parametry vodní pumpy Bosch

Bosch		
hmotnost	0,25	kg
maximální výtlačná výška	-	m
maximální průtok	16,6	l/min
použití	vnější	
cena	2133 Kč	



**Tabulka 9: porovnávací tabulka pro alternativy vodních pump**

PARAMETR	OZNAČENÍ PUMPY					VÁHA	IDEÁLNÍ STAV
	P4514	P4504	P5009	Pierburg	Bosch		
<b>HMOTNOST</b>	4	3 <sup>1-</sup>	1	3	3	3	4
<b>MAX. PRŮTOK</b>	1	4	2	2 <sup>1-</sup>	2	3	4
<b>POUŽITÍ</b>	3	3	3	4	4	2	4
<b>MATERIÁL</b>	4	4	4	4	4	2	4
<b>CENA</b>	1 <sup>1-</sup>	1 <sup>1-</sup>	1 <sup>1-</sup>	3	4	2	4
<b>DOSTUPNOST</b>	2	2	2	4	4	2	4
<b>SOUČET</b>	35	41	27	45	47	-	56

<sup>1-</sup> - odhadnuté hodnoty na základě podobnosti vodních pump.

Vyhodnocením optimálního řešení chladicího systému došlo k závěru porovnávací tabulkou. Z tabulky (Tabulka 9) vychází jako nejlepší alternativa vodní pumpa Bosch. Rozhodující parametr byl hlavně dostupnost. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl zvolit vodní pumpu Bosch.

## 4.2 Návrh chladiče

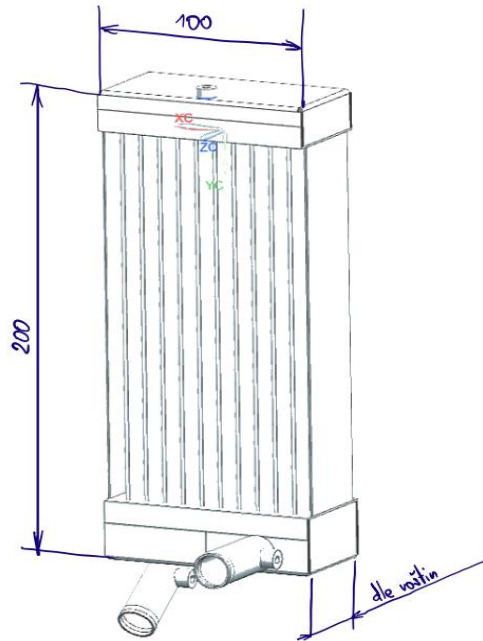
Na základě průzkumu trhu došlo k tomu, že bylo potřeba navrhnout vlastní chladič z důvodu toho, že dodavatelé neposkytují žádné podrobnější data, které by byla potřeba vědět. Byl zvolen tedy postup návrhu chladiče následovný. Nejdříve z průzkumu ostatních univerzitních týmů byla zjištěna přibližná velikost chladiče, následně zvolen typ voštin.

### 4.2.1 Analýza volby rozměrů chladiče u konkurence

Z průzkumu konkurenčních týmů byla zjištěna přibližná velikost chladičů, množství chladičů v závislosti na počtu chladících okruhů a umístění chladičů na monopostu.

#### 4.2.2 Vlastní návrh velikosti chladiče

Rozměr chladiče byl zvolen přibližně 200 mm x 100 mm. Chladiče budou dva a budou se nacházet na obou stranách formule vedle kokpitu. Třetí rozměr chladiče neboli šířka se bude odvíjet od velikosti voštin. Oproti chladiči UWB07 došlo pouze k redukci velikosti chladiče v závislosti na změně potřebného množství tepla a dále došlo k rozložení chladičů na obě strany monopostu. U modelu UWB07 byl pouze jeden chladič větších rozměrů.

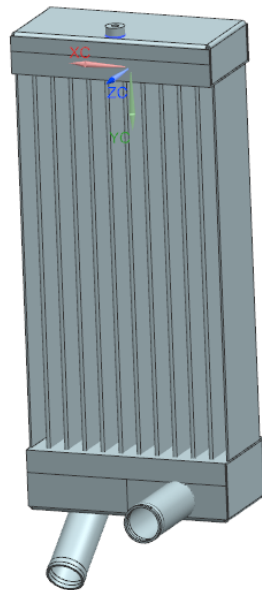


Obrázek 4.12: předběžná skica chladiče s rozměry

#### 4.2.3 Volba typu voštin pro chladič

Voštiny byly vybrány stejné jako na voze UWB07. Tyto voštiny jsou ověřené a funkční. Pouze došlo k redukci.

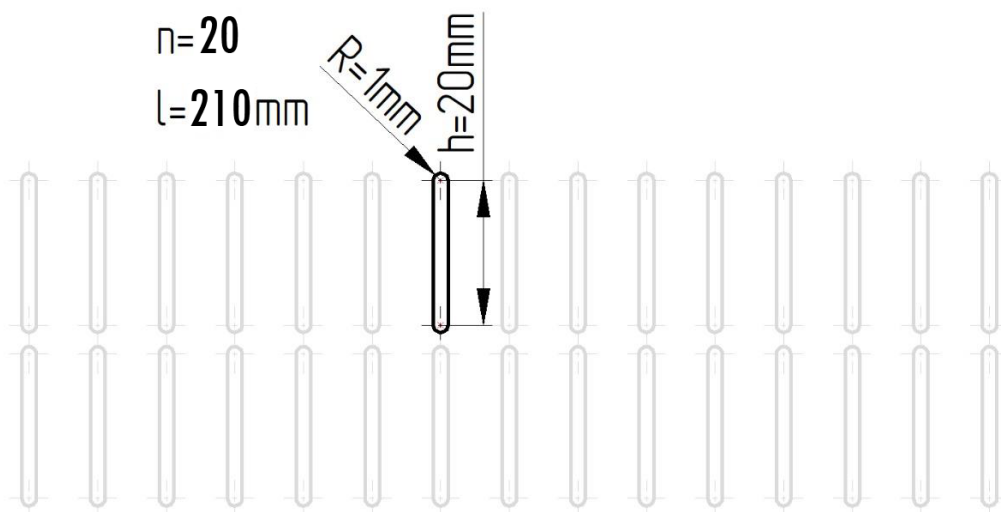
#### 4.2.4 Finální návrh chladiče



Obrázek 4.13: model chladiče UWBE01

Navržený chladič má 2 řady po trubičkách. V Příloha č. 4 se nachází výkres navrženého chladiče.

#### 4.2.5 Návrh trubiček chladiče



Obrázek 4.14: trubičky chladiče

l ... výška chladiče, n ... počet trubiček, h...výška trubičky, R...poloměr zaoblení hrany trubičky

### 4.3 Návrh minimálního průměru hadice

Pro chladicí systém je třeba provést výpočet pro minimální průměr hadice. Ta se odvíjí od tlakových ztrát, délky hadice, velikosti průtoku atd.

Tlak, který pumpa dodá chladicímu okruhu je odvozen z dokumentace [17] a dílčí tlakové ztráty jsou vypočteny z CFD měniče, viz. PŘÍLOHA č. 1. Je uvažováno, že tlaková ztráta na měniči je přibližně stejná jako na chladiči a motorech

**Tabulka 10: známé hodnoty pro výpočet min. průměru hadice**

$p_z^M$	tlak. ztráta výměníku motoru	<b>2700</b>	<b>Pa</b>
$p_z^{Mě}$	tlak. ztráta výměníku měniče	<b>2708</b>	<b>Pa</b>
$p_z^{CH}$	tlak. ztráta chladiče	<b>2708</b>	<b>Pa</b>
$p_z^F$	tlak. ztráta fittingů	<b>0</b>	<b>Pa</b>
$p_p$	tlak. pumpy	<b>16000</b>	<b>Pa</b>
$l$	délka hadice	<b>2,5</b>	<b>m</b>
$\eta$	dynamická viskozita vody	<b>0,001002</b>	<b>Pa/s</b>
$Q$	objemový průtok	<b>0,000113</b>	<b>m<sup>3</sup>/s</b>

### 4.4 Návrh propojení chladících komponent formule

#### 4.4.1 Výpočet minimálního průměru hadice

Tlaková ztráta hadice se vypočítá:

$$p_z^H = p_p - p_z^F - p_z^{CH} - p_z^M - p_z^{Mě} = 16000 - 0 - 2700 - 2708 - 2708 = 7884 \text{ Pa}$$

Z definice Poiseuilleova zákona pro laminární proudění kapaliny.

$$Q = \frac{\pi * d_{\min}^4 * p_z^H}{128 * l * \eta}$$

Z rovnice si vyjádřím  $d_{\min}$ ...minimální průměr hadice.

$$d_{\min} = \sqrt[4]{\frac{128 * l * \eta * Q}{\pi * p_z^H}} = \sqrt[4]{\frac{128 * 2,5 * 0,001002 * 0,000113}{\pi * 7884}} = 6,18 \text{ mm}$$

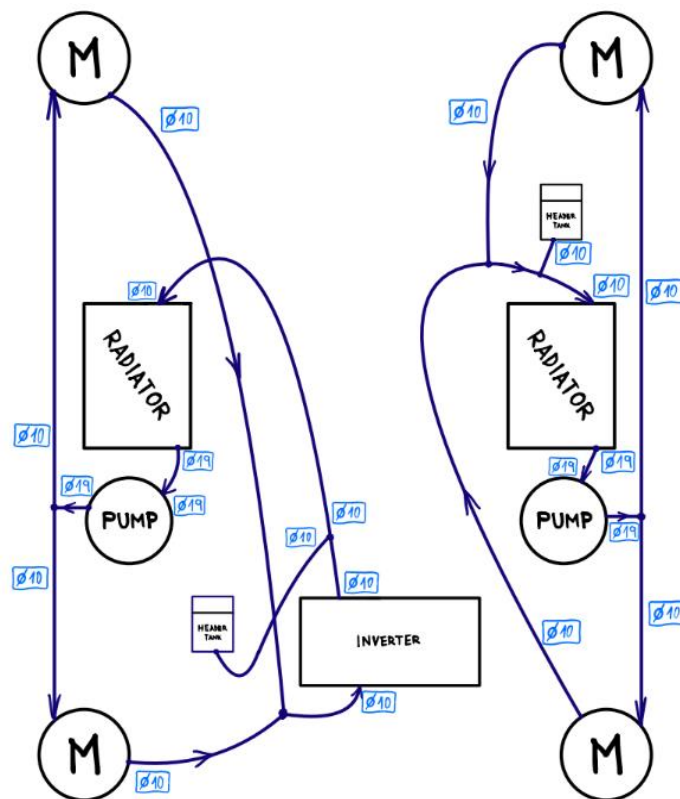
Minimální průměr hadice je 6,18 mm. Dle prozkoumání konkurenčních týmů a vzhledem k bezpečnosti byl zvolen jako ideální vnitřní průměr hadice 10 mm.

#### 4.4.2 Volba typu hadice

Z hlediska funkčnosti a minimalizace hmotnosti, které se podílí na funkci byla vybrána PVC hadice s vnitřním průměrem 10 mm a vnějším průměrem 14 mm, viz. [18]. Pouze v části mezi chladičem a pumpou a pak dále od pumpy k plastové spojce T bude hadice s vnitřním průměrem 19 mm a vnějším průměrem 25 mm, viz. [19].

#### 4.4.3 Návrh propojení komponent

Z návrhu rozložení komponent viz. Obrázek 4.1 bylo zakresleno do obrázku (Obrázek 4.15) konkrétní průměry hadic u jednotlivých vstupů/výstupů. Všechny konce hadic budou upevněny k vstupům, či výstupům komponent přes pružinové spony [21], kromě uchycení k části u motorů. Zde dojde k závitovému uchycení o velikosti M10 na motorech a pomocí redukce na hadici 10 mm, viz. Spojky byly navrženy, viz. PŘÍLOHA č. 4. Výkres sestavy pro navržené chladicí okruhy, viz. PŘÍLOHA č. 4.



Obrázek 4.15: propojení komponent (vnitřní průměry hadic)

#### **4.4.4 Návrh fixace hadic**

Hadice budou uchyceny stahovacími pásky [22] na kabelových příchytkách [23], které budou nalepeny na monokoku.

### **4.5 Ověření návrhu pomocí CFD simulace**

#### **4.5.1 Simulace CFD pro levou část chladicího systému**

Pro kontrolu návrhu chladicího systému byl proveden systémový výpočet CFD, který vyznačuje konkrétní hodnoty tlaku a rychlosti proudění pro určitá místa chladicího systému, viz. PŘÍLOHA č. 1. Jako vstupní hodnota byl zadán graf z datasheetu vodní pumpy Bosch, viz. PŘÍLOHA č. 3.

#### **4.5.2 Simulace CFD pro tepelný výměník měniče**

Pro návrhu tepelného výměníku byl proveden systémový výpočet CFD, který vyznačuje konkrétní hodnoty tlaku a rychlosti proudění pro určitá místa tepelného výměníku, viz. PŘÍLOHA č. 1.

## 5 Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout chladicí systém, který bude použit u elektrické studentské formule. Hlavní požadavky byly kladeny na dosažení vhodných teplotních rozmezí pro dané komponenty s minimalizací hmotnosti tohoto řešení.

Teoretická část práce se zabývá rozbořem, charakteristikou chladicích systémů s určením specifikací požadavků, mezi které patří také dodržení pravidel Formula Student.

Před vlastním návrhem chladicího systému byla provedena analýza řešení chladicího systému vozu UWB06 a analýza konkurenčního řešení. Získané údaje byly hlavní klíčem pro určení okrajových podmínek potřebných pro samotný návrh chladicího systému.

Návrh byl proveden z definovaných okrajových podmínek, pomocí kterých bylo následně porovnávacími tabulkami vyhodnoceno optimální provedení chladicího systému.

Pro dvouokruhový chladicí systém byl následně vypočítán minimální průtok, který je třeba k udržení optimálních teplot na motorech a měniči. Dle výpočtů se určila vodní pumpa, která bude tento okruh pohánět. Stejná vodní pumpa byla použita i u druhého okruhu.

Další úprava proběhla na chladiči, který byl zredukován a zvolen pro každý okruh vlastní.

Pro takto navržený systém byl vypočítán minimální průměr hadice, který byl třeba použít pro vedení chladicího média mezi komponentami.

Podle výpočtů byly zvoleny konkrétní velikosti hadic a navrhly se spojky.

V závěrečné části došlo k sestavení chladicích okruhů v programu Siemens NX a byla vytvořena CAD dokumentace s CFD analýzou výměníku měniče a analýzou levého chladicího okruhu.

Cílem pro následující roky je další redukování hmotnosti s ohledem na dodržení teploty a tlaku provozní kapaliny v optimálním provozním rozmezí i při těch nejvyšších možných stavech, jako může být například zmiňovaný sprint. K docílení tohoto stavu může dojít změnou materiálů komponent, či změřením a následným zhodnocením finální konstrukce vozu z pohledu menšího předimenzování při závodu.

## 6 Seznam použitých zdrojů

Bibliografické odkazy a citace vychází z normy ČSN ISO 690 (01 0197). Podrobný návod, jak citovat literaturu a prameny, s příklady je uveden na stránkách knihovny ZČU <https://sites.google.com/site/novaiso690/>.

- [1] Formula Student Germany.  
<https://www.formulastudent.de/>.
- [2] Fontes, Pedro. Cooling of the electric propulsor of a Formula Student vehicle. (2016).  
<https://www.semanticscholar.org/paper/Cooling-of-the-electric-propulsor-of-a-Formula-Fontes/b8a1b3c823da59f7cc6a419e5fd4f731e0cf4721#extracted>
- [3] Rules Formula Student (2022).  
[https://www.formulastudent.de/fileadmin/user\\_upload/all/2022/rules/FS-Rules\\_2022\\_v1.0.pdf](https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2022/rules/FS-Rules_2022_v1.0.pdf)
- [4] Racing Team Pilsen. Prezentace Power Train UWB06, (2018)
- [5] Jander, F. Designing a Formula SAE electric cooling system. Designing a Formula SAE Electric Cooling System.  
<https://www.filipjander.com/2020/09/designing-formula-sae-cooling-system.html>
- [6] Šebela, Kamil. Chladicí systém Formule Student. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. (2019).  
<https://theses.cz/id/hs2j7a/>.
- [7] Castrillo Jiménez, Luis Alberto. Design of a Cooling System of an Electric Formula Student Car. (5 Oct. 2018).
- [8] Pedro. Miguel de Aguiar Fontes. Cooling of the electric propulsor of a Formula Student vehicle. (2016).  
<https://www.semanticscholar.org/paper/Cooling-of-the-electric-propulsor-of-a-Formula-Fontes/b8a1b3c823da59f7cc6a419e5fd4f731e0cf4721#extracted>
- [9] Plasticportal.eu. Vodní a vzduchové chlazení. (06. 07. 2021).  
<https://www.plasticportal.cz/cs/s-chladnou-hlavou-vodni-a-vzduchove-chlazenim-%E2%80%93-%C2%A0-v-cem-je-rozdil/c/7424/>
- [10] Bednář, M. Jak fungují motory: Klíčové Součásti a Jejich Funkce. Autoforum.cz. (2015, May 3).  
<https://www.autoforum.cz/technika/jak-funguji-motory-klicove-soucasti-a-jejich-funkce/>



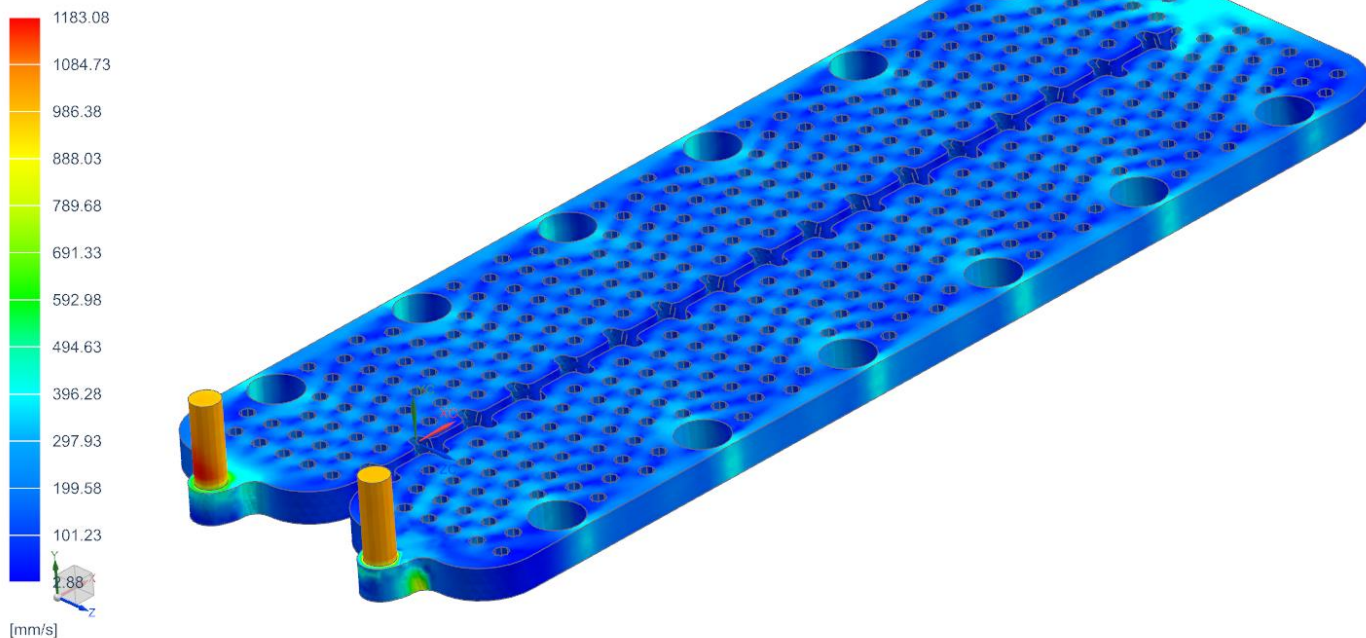
- [11] Dongguan Shenpeng Electronics Co. 12V/24V DC Water Purifier Pump P4514.  
<https://www.spminipump.com/product/170.html>
- [12] Dongguan Shenpeng Electronics Co. 12V/24V BLDC Water Cooling Pump P4504  
<https://www.spminipump.com/product/160.html?fbclid=IwAR30AkZ7K7qbDBKQkJ388F2zM0G-B6vMEt8GoMWir1-1SxFGoIR9h-Z3x2w>
- [13] Dongguan Shenpeng Electronics Co. 12V Automobile Cooling Pump P5017  
[https://www.spminipump.com/product/187.html?fbclid=IwAR16E8FwqDPkrI\\_p9Im-IC4SdK0jjFyRSKjhMJUIUMrfoxZx9-bMMVevYBI](https://www.spminipump.com/product/187.html?fbclid=IwAR16E8FwqDPkrI_p9Im-IC4SdK0jjFyRSKjhMJUIUMrfoxZx9-bMMVevYBI)
- [14] KMOTORSHOP. (n.d.). Přídavné Vodní čerpadlo - 7.04071.71.0 Pierburg.  
www.kmotorshop.com.  
[https://www.kmotorshop.com/cs/article-detail/view/106874/pridavne-vodni-cerpadlo-7-04071-71-0-pierburg-5q0965561b-65-06500-0000-117653?fbclid=IwAR1y7x-PVBPAhR\\_gopAq2TL\\_31P97U1VJAaZZmhdAAAdk5hbP7eerjXit9b4#description](https://www.kmotorshop.com/cs/article-detail/view/106874/pridavne-vodni-cerpadlo-7-04071-71-0-pierburg-5q0965561b-65-06500-0000-117653?fbclid=IwAR1y7x-PVBPAhR_gopAq2TL_31P97U1VJAaZZmhdAAAdk5hbP7eerjXit9b4#description)
- [15] SONNTAG, David. Formula Student - konstrukce trakční baterie. Plzeň, Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Luboš Streit, Ph.D. (2022)  
<https://theses.cz/id/j3xdpt/>
- [16] Shop5.cz, Tuning Car Design. Elektrická Vodní Pumpa / čerpadlo Bosch 12V 16,6L/m.  
<https://www.tuningcardesign.cz/elektricka-vodni-pumpa-bosch-12v-16-6l-m/>
- [17] Bosch GmbH, R. Water-circulating pump PAD | 12V. (27. 3. 2011)  
<https://www.finjector.com/documents/4d8f7afec9beb/BOSCH-0392023004.pdf>
- [18] HORNBACH. Hadice na Vodu akvarijní PVC měkká 10 x 2 mm metrůž.  
<https://www.hornbach.cz/p/hadice-na-vodu-akvarijni-pvc-mekka-10-x-2-mm-metraz/5806469/>
- [19] HORNBACH. Hadice na vodu jezírková PVC měkká 3/4" metrůž.  
<https://www.hornbach.cz/p/hadice-na-vodu-jezirkova-pvc-mekka-3-4-metraz/10172893/>
- [20] Formula Student Electric - World Ranking List.  
<https://fs-world.org/E/>
- [21] Race – shop. Pozinkovaná Pružinová Spona  
<https://race-shop.cz/hadicove-spony/51572-pozinkovana-pruzinova-spona-ruzne-velikosti.html>

- [22] Obalove-materialy.cz. Stahovací Pásky černé 2,5\*100 mm, balení 100 KS. Obalové materiály.  
[https://www.obalove-materialy.cz/stahovaci-pasky-cerne-25-100-mm-baleni-100-ks?msclkid=7e687d6fe96011bff69619396bf1d2be&utm\\_source=bing&utm\\_medium=cpc&utm\\_campaign=%5BGURU%5D+PLA+-+Y&utm\\_term=4587368676787275&utm\\_content=Ad+group+%231#1150s](https://www.obalove-materialy.cz/stahovaci-pasky-cerne-25-100-mm-baleni-100-ks?msclkid=7e687d6fe96011bff69619396bf1d2be&utm_source=bing&utm_medium=cpc&utm_campaign=%5BGURU%5D+PLA+-+Y&utm_term=4587368676787275&utm_content=Ad+group+%231#1150s)
- [23] Globosphere.cz ©. Emas. 19x19 Kabelová Přichytka Přírodní 19x19mm samolepicí, pro pásky šíře 3,6mm.  
[https://www.emas.cz/kap-19x19-kabelova-prichytka-prirodni-19x19mm-samolepici-pro-pasky-sire-3-6mm-vpu19x19?utm\\_source=zbozi.cz&utm\\_medium=product&utm\\_campaign=zbozi.cz&utm\\_content=&utm\\_id=3805719](https://www.emas.cz/kap-19x19-kabelova-prichytka-prirodni-19x19mm-samolepici-pro-pasky-sire-3-6mm-vpu19x19?utm_source=zbozi.cz&utm_medium=product&utm_campaign=zbozi.cz&utm_content=&utm_id=3805719)

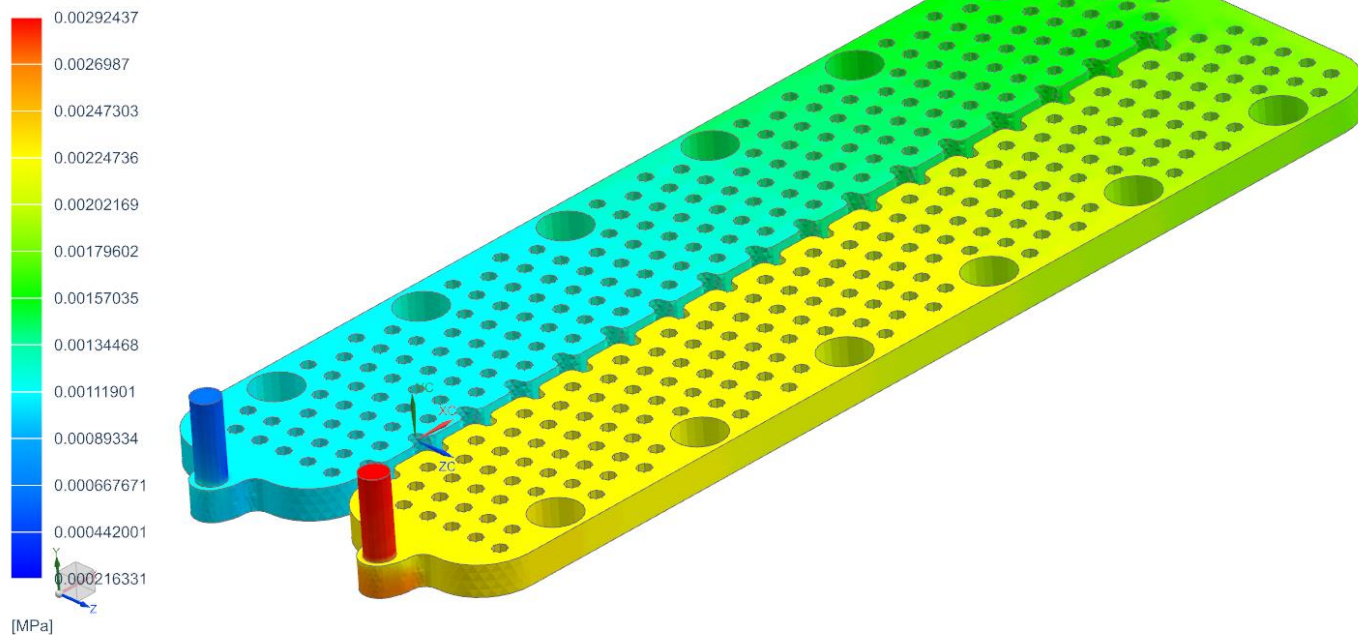
## **PŘÍLOHA č. 1**

### **CFD**

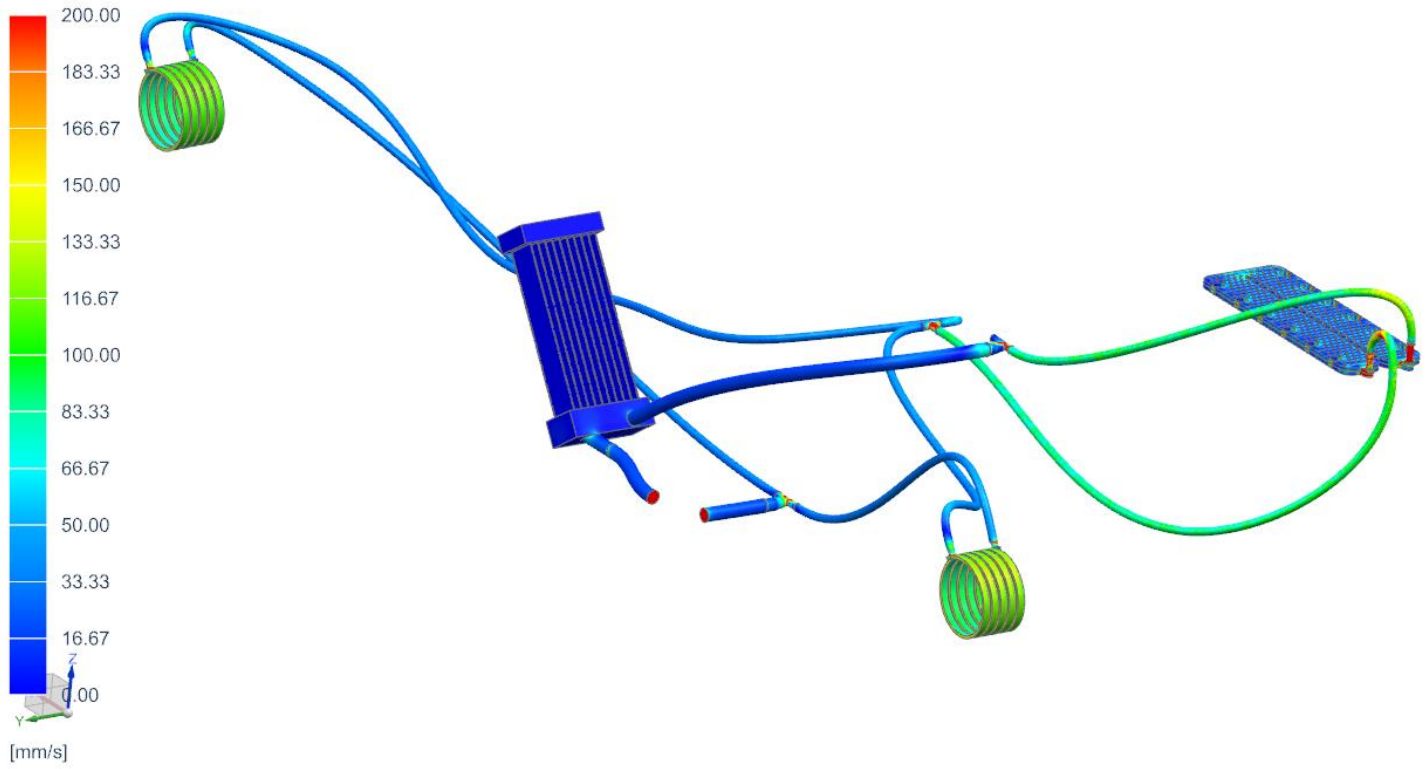
vypocet\_prutok\_sim1 : vypocet\_prutok\_Result  
Load Case 1, Static Step 1  
Velocity - Element-Nodal, Unaveraged, Magnitude  
Min : 2.88, Max : 1183.08, Units = mm/s



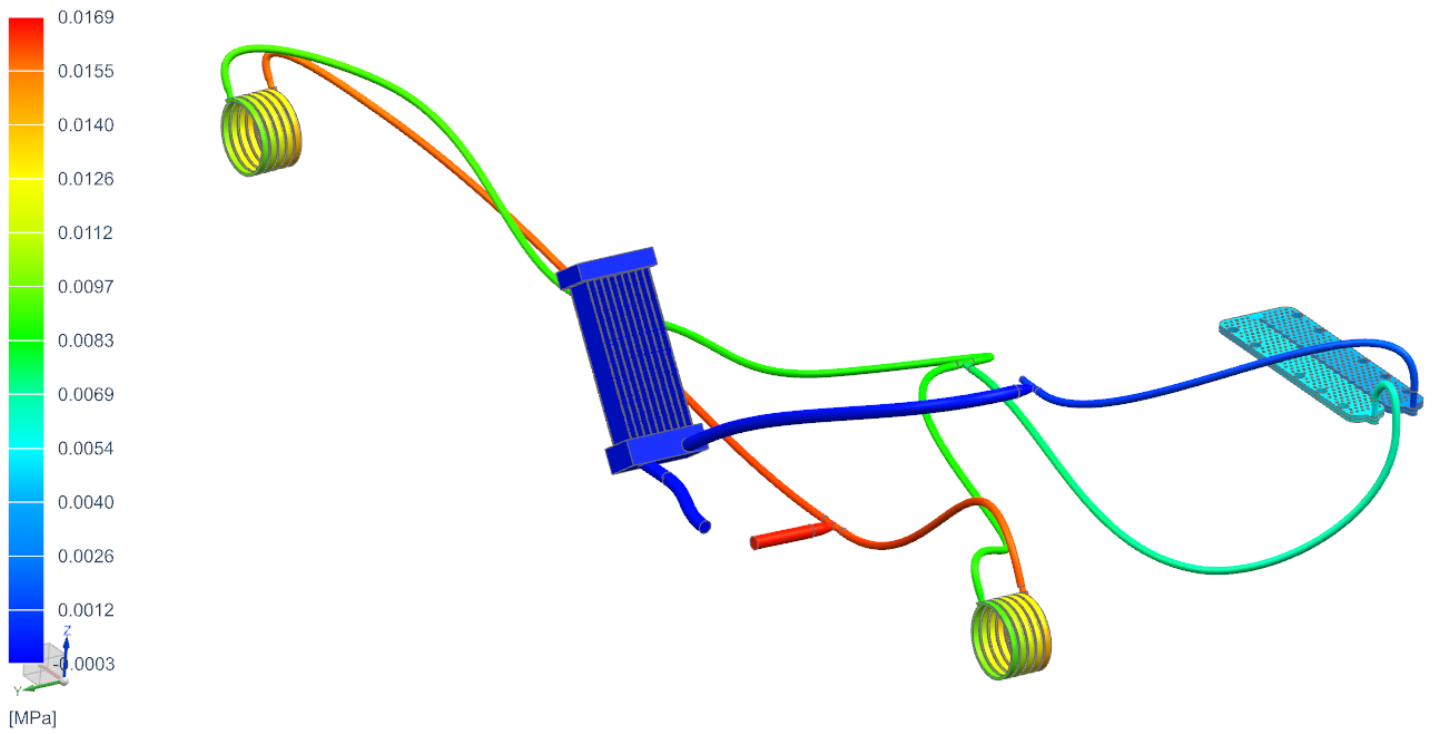
vypocet\_prutok\_sim1 : vypocet\_prutok\_Result  
Load Case 1, Static Step 1  
Total Pressure - Element-Nodal, Unaveraged, Scalar  
Min : 0.000216331, Max : 0.00292437, Units = MPa



chlazeni\_cfd\_vvypocet\_L\_sim1 : Solution 1 Result  
Load Case 1, Static Step 1  
Velocity - Element-Nodal, Unaveraged, Magnitude  
Min : 0.00, Max : 1670.82, Units = mm/s



chlazeni\_cfd\_vvypocet\_L\_sim1 : Solution 1 Result  
Load Case 1, Static Step 1  
Total Pressure - Element-Nodal, Unaveraged, Scalar  
Min : -0.0003, Max : 0.0169, Units = MPa



## **PŘÍLOHA č. 2**

### **Datasheet elektromotoru FISCHER**

	Symbol	Unit	Value	
<b>Rated Data Water cooled (<math>\varphi = 0^\circ</math>)</b>				
Nominal Torque	T <sub>NomWC</sub>	Nm	11,1	
Nominal Current	I <sub>NomWC</sub>	A <sub>rms</sub>	22,6	
Nominal Speed	n <sub>NomWC</sub>	rpm	13250	
Nominal Power	P <sub>NomWC</sub>	W	15404	
Winding Losses <sup>1</sup> / Total Losses <sup>1,2</sup>	P <sub>DWC</sub>	W	254	617
Holding Torque	T <sub>HWC</sub>	Nm	7,9	
Holding Current	I <sub>HWC</sub>	A <sub>rms</sub>	16	

<b>Rated Data S6 duty (<math>\varphi = -10^\circ</math>)</b>				
Torque	T <sub>S6</sub>	Nm	24,6	
Current	I <sub>S6</sub>	A <sub>rms</sub>	51	
Speed	n <sub>S6</sub>	rpm	12100	
Power	P <sub>S6</sub>	W	31199	
Winding Losses <sup>1</sup> / Total Losses <sup>1,2</sup>	P <sub>DS6</sub>	W	1282	1619
Holding Torque	T <sub>HS6</sub>	Nm	17,4	
Holding Current	I <sub>HS6</sub>	A <sub>rms</sub>	35,9	

<b>Peak Data (<math>\varphi = -10^\circ</math>)</b>				
Peak Torque	T <sub>Peak</sub>	Nm	29,1	
Peak Current	I <sub>Peak</sub>	A <sub>rms</sub>	61	
Speed at Peak Torque	n <sub>Peak</sub>	rpm	11600	
Peak Power	P <sub>Peak</sub>	W	35366	
Winding Losses <sup>1</sup> / Total Losses <sup>1,2</sup>	P <sub>DPeak</sub>	W	1843	2167

<b>Data</b>				
Torque Constant	k <sub>t</sub>	Nm/A <sub>rms</sub>	0,492	
BEMF Constant (Phase - Phase)	k <sub>e</sub>	V <sub>rms</sub> /(rad/s)	0,296	
Motor Constant	k <sub>m</sub>	V <sub>rms</sub> /rpm	0,031	
Idle Speed	n <sub>idle</sub>	Nm/vW	0,447	
max. Speed (Fieldweaking)	n <sub>max</sub>	rpm	13650	
max. Frequency (Idle/Fieldweaking)	f <sub>max</sub>	rpm	20000	
DC Bus Voltage	U <sub>DC</sub>	Hz	910	1333
∅ Resistance per Phase (Winding only)	R <sub>Ph20</sub>	V <sub>DC</sub>	600	
∅ Inductance per Phase (Winding only)	L <sub>Ph</sub>	Ω	0,126	
electr. Time Constant $\tau=L/R$	T <sub>el</sub>	mH	0,393	
Number of Polepairs	n	ms	3,11	
Winding Connection			4	
			Star	





	Symbol	Unit	Value
<b>Data Watercooling</b>			
Inlet Temperature of Coolant	$T_{in}$	°C	10 ... 40
Max. Temperature rise of Coolant	$T_{max}$	K	5
Min. required Coolant flow	$Q_{min}$	l/min	---
Volume of cooling channel	$V_{cool}$	l	---
thermal Time Constant	$\tau_{th}$	min	---

	Symbol	Unit	Value
<b>Data Mechanics</b>			
Rotor Inertia (assembly set)	J	kgm <sup>2</sup>	$0,33 \cdot 10^{-3}$
Weight of Motor w/o Housing	m	kg	2,8
Outer Stator Diameter w/o Housing	dA	mm	85
Inner Stator Diameter	dAg	mm	51,6
Length of Stator	l	mm	70

#### Annotations - Losses

<sup>1</sup> Winding Losses are referred to a Coil Temperature of 100°C.

<sup>2</sup> The total Losses are made up of: Winding Losses; Stator Iron Losses; Rotor Losses;

*Calculation of total Losses:*

Winding Losses + Stator Iron Losses (at speed X) + Rotor Losses (at speed X)

#### Annotations - general

Ensure that your servo drive can handle the Nominal- and Peakcurrent of the Motor.

An adjustment of the Speed and DC Bus Voltage can be done after consultation.

The nominal data in this datasheet are based on an ambient/coolant temperature of 20°C

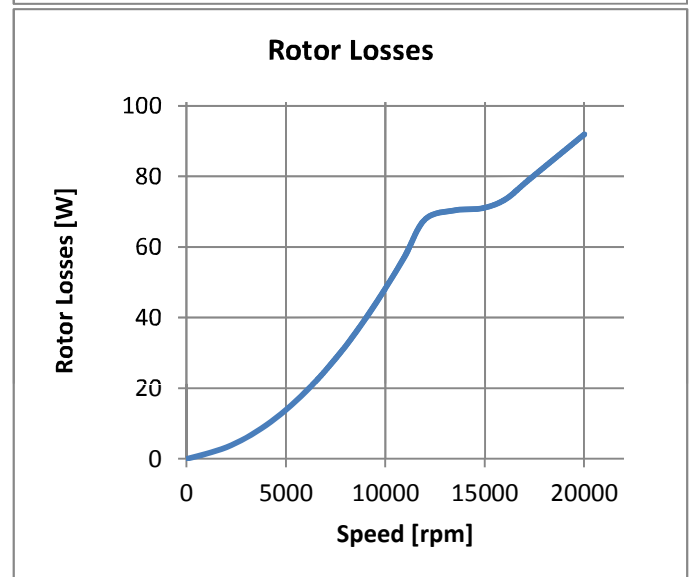
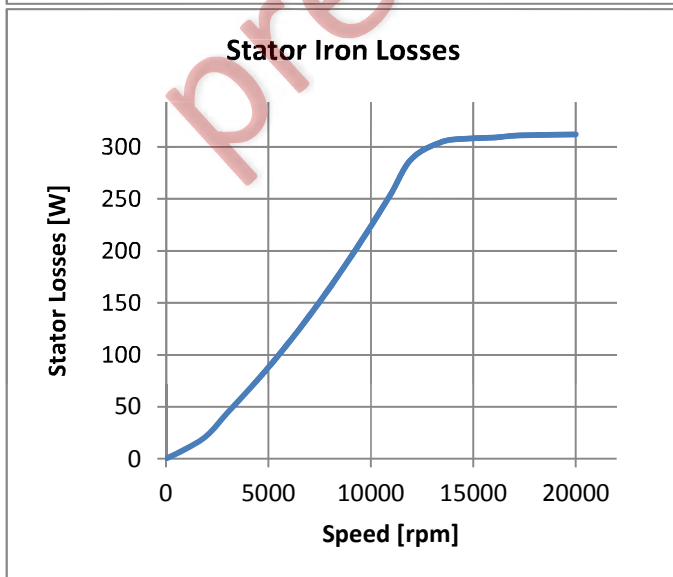
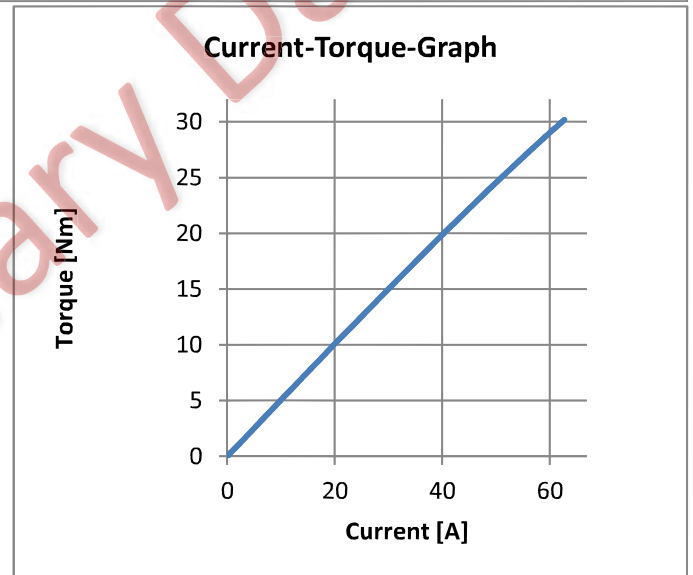
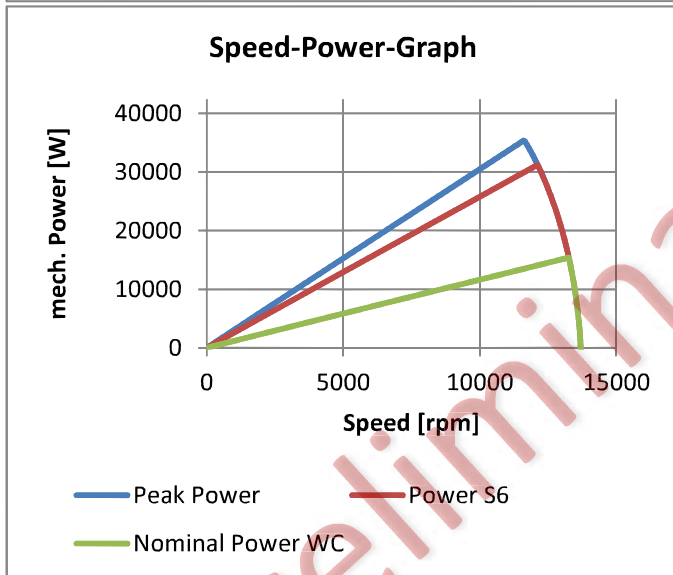
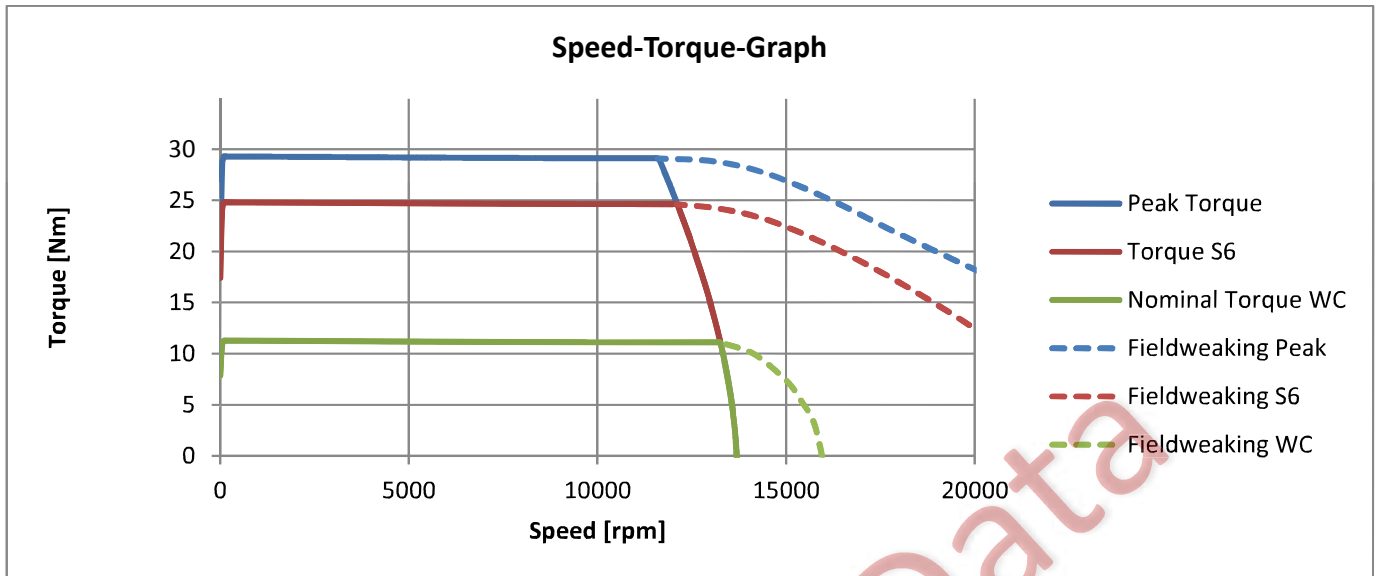
The stated nominal Torques are without consideration of friction losses through Bearings or Sealings.

#### Annotations - thermal monitoring system

Because the exact duty type depends also on the thermal connection of the motor, the embedded thermal monitoring system has to be analysed and attended. However, attention has to be payed that the temperature sensors do not show the exact temperature of the winding and this could be up to 20 K higher due to thermal capacities. Despite an electrical insulation towards the winding, you are only allowed to connect the sensors to your controller by using a galvanic separation in between.







## **PŘÍLOHA č. 3**

### **Datasheet BOSCH vodní pumpa**

Water-circulation pumps with D.C. motors

# PAD | 12 V

Water-circulating pump driven by brushless motor

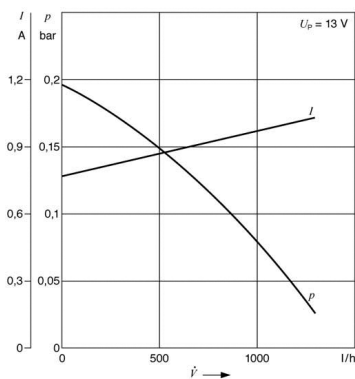


## Technical data

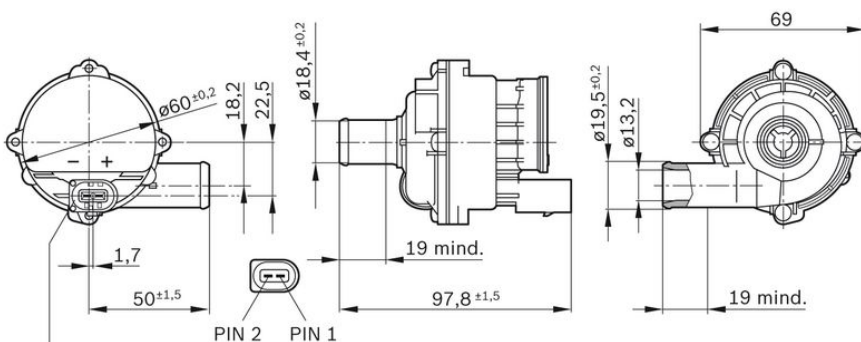
Part number	<b>0 392 023 004</b>
Nominal voltage	$U_N$ 12 V
Delivery quantity	$\dot{V}$ 900 dm <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>
Delivery pressure	$p$ 0,1 bar
Direction of rotation	R
Type of duty	S 1
Degree of protection	IP 69 K
Weight	approx. 0,3 kg

Circuit diagram for connection please contact us

## Characteristic curve



## Dimensional drawing



Passend zu AMP- Stecker-  
gehäuse 1-967412-2  
Kodierung A

Robert Bosch GmbH  
Automotive Aftermarket  
Postfach 410960  
76225 Karlsruhe  
Germany

[www.bosch-elektromotoren.de](http://www.bosch-elektromotoren.de)



**BOSCH**  
Invented for life

## **PŘÍLOHA č. 4**

### **Výkresová dokumentace**

4

3

2

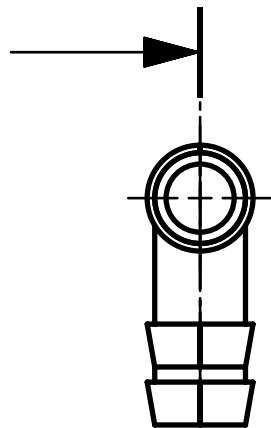
1

D

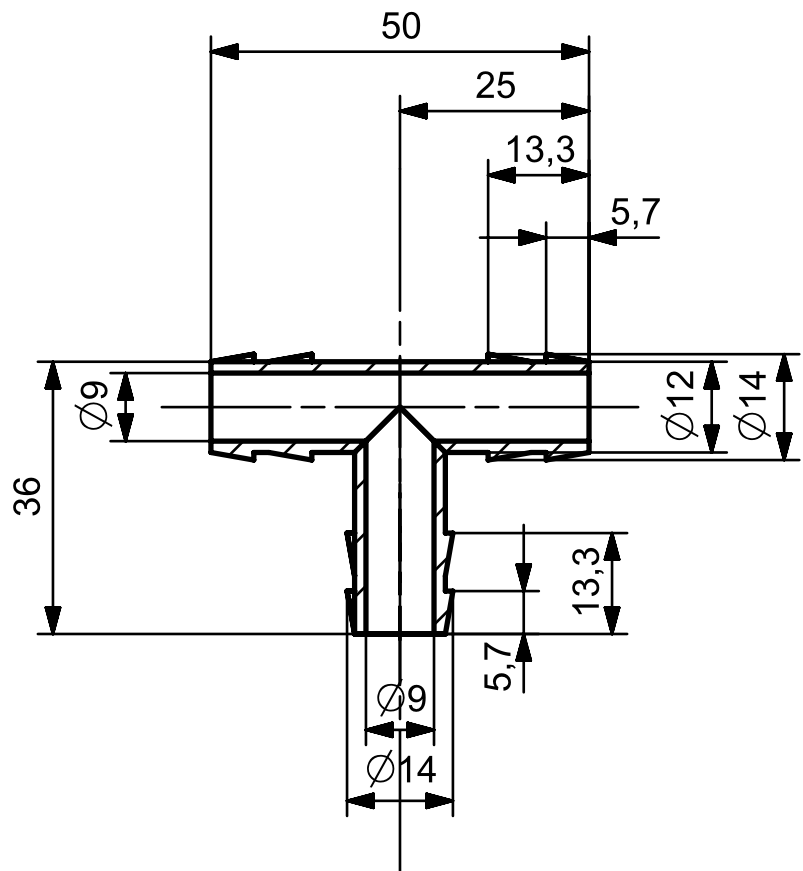
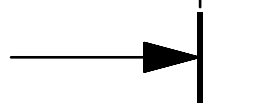
D

A-A

A



A



C

C

B

B



PE

Pocet ks. / Quant.	Nazev - rozmer / Title - size	Polotovar / Blank	Material	T.O. / C.W.	C.hmot. / Weight	H.hmot. / weight	Cislo vykresu sestavy / Assembly drawing no.	Poz. / Pos.

CAD 1	Datum / Date	Jmeno / Name
Kreslil / Drawn by	27. 4. 2023	Hajek Adam
Prezkoušel / Checked by		
Schválil / Approved by		
Index změny / change description	Schválil. / Approved	Datum / Date
Podpis změny / change description	Podpis / Signature	

UNIVERSITY  
OF WEST BOHEMIA

Vsechna prava vyhrazena / All rights reserved

Poznámka / Note:

 Tolerance / Tolerovani ISO 128 ISO 8015 ISO 2768mk	Soubor-model / ASM-file A_fitting_Y_10_10	Projekt / Project: Formula Student - Cooling	Meritko / Scale 1 : 1
	Soubor-vykres / DRW-file A_fitting_Y_10_10	C.sestavy / Assembly No. UWBE01-01.01	
Nazev / Title Spojka PE, typ T, 10 mm-10 mm		Rev. Cislo vykresu / Drawing No. 1	Format A4
		List / sheet no. Pocet listu / sheets 1	

4

3

2

1

A

A

4

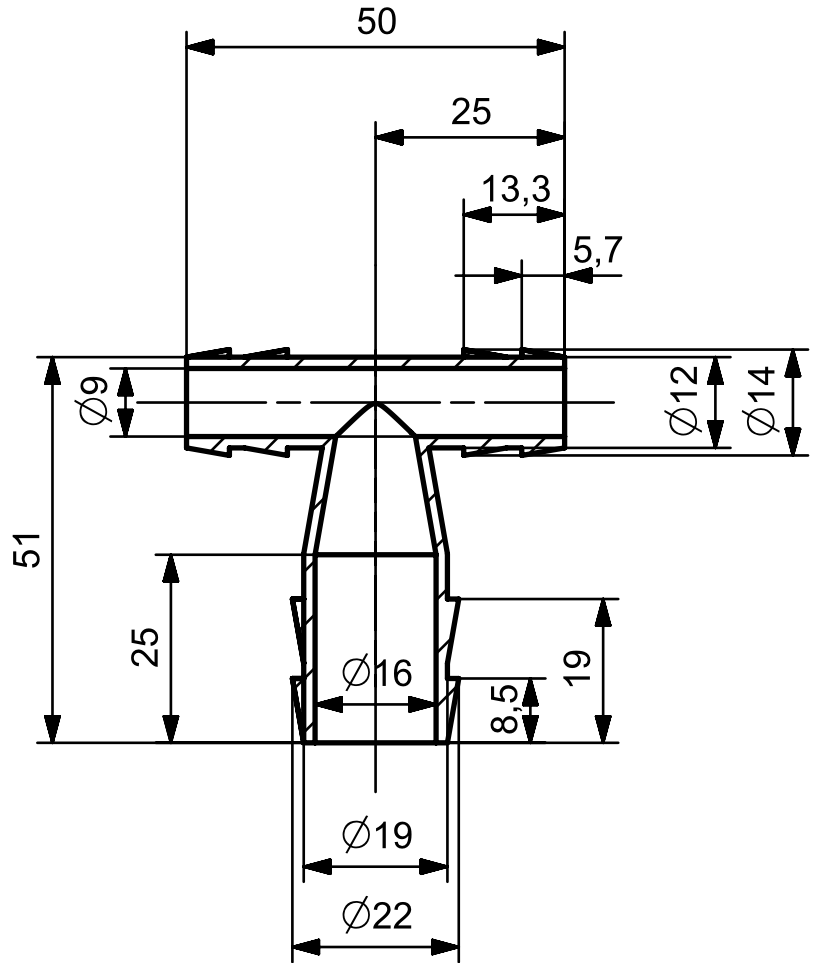
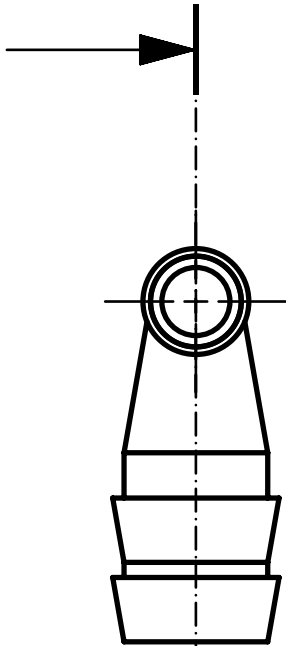
3

2

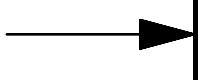
1

A-A

A



A



PE

Pocet ks.	Nazev - rozmer	Polotovar	Material	T.O.	C.hmot.	H.hmot.	Cislo vykresu sestavy	Poz.
Quant.	Title - size	Blank	Material	C.W.	Weight	Weight	Assembly drawing no.	Pos.

CAD 1	Datum / Date	Jmeno / Name
Kreslil / Drawn by	27. 4. 2023	Hajek Adam
Prezkoušel / Checked by		
Schválil / Approved by		
Index změny / change description	Schválil. / Approved	Datum / Date
Podpis změny / change description	Podpis / Signature	

UNIVERSITY  
OF WEST BOHEMIA

Vsechna prava vyhrazena / All rights reserved

Poznámka / Note:

Nazev / Title	Rev.	Cislo vykresu / Drawing No.	Format
Spojka PE hadice typ T, 19 mm-10 mm		UWBE01-01-02	A4
		List / sheet no. Pocet listu / sheets	

4

3

2

1

4

3

2

1

D

D

C

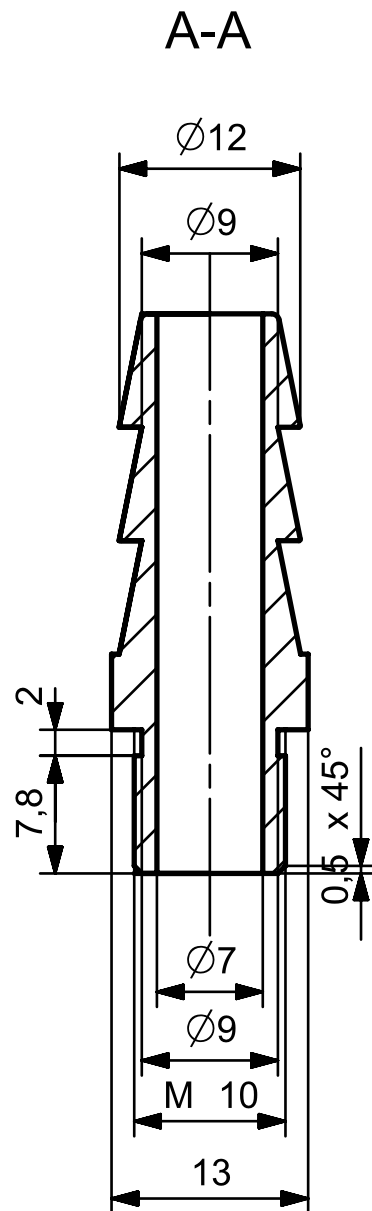
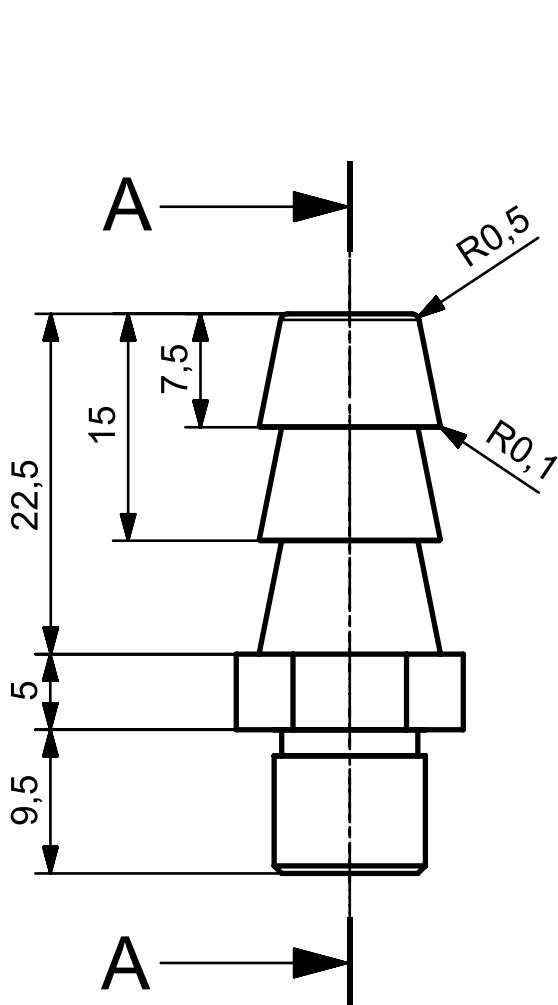
C

B

B

A

A



EN AW 7075 t6

Pocet ks.	Nazev - rozmer	Polotovary	Material	T.O.	C.hmot.	H.hmot.	Cislo vykresu sestavy	Poz.
Quant.	Title - size	Blank	Material	C.W.	Weight	Weight	Assembly drawing no.	Pos.

CAD 1	Datum / Date	Jmeno / Name
Kreslil / Drawn by	29. 4. 2023	Hajek Adam
Prezkoušel / Checked by		
Schválil / Approved by		
Index zmen / change description	Schválil. / Approved	Datum / Date
Podpis zmeny / change description	Podpis / Signature	

UNIVERSITY  
OF WEST BOHEMIA

Vsechna prava vyhrazena / All rights reserved

Poznámka / Note:

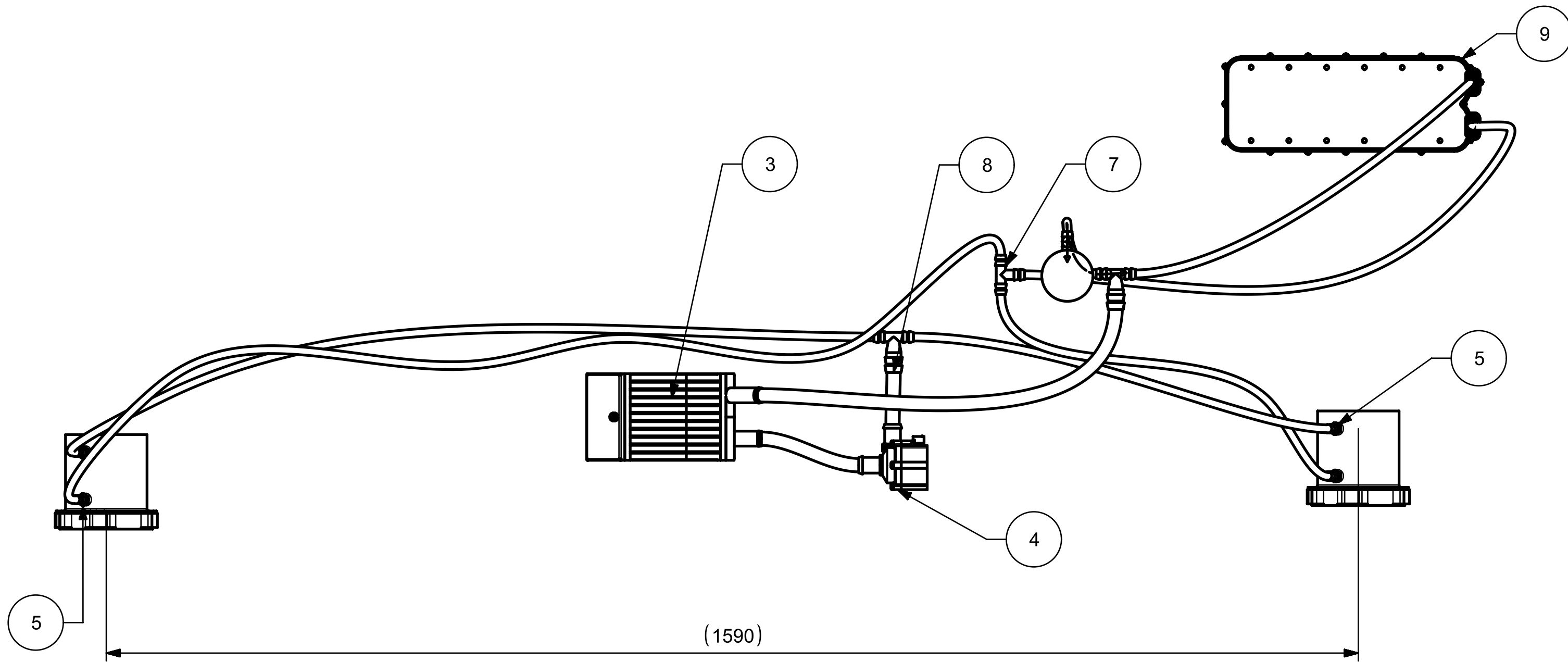
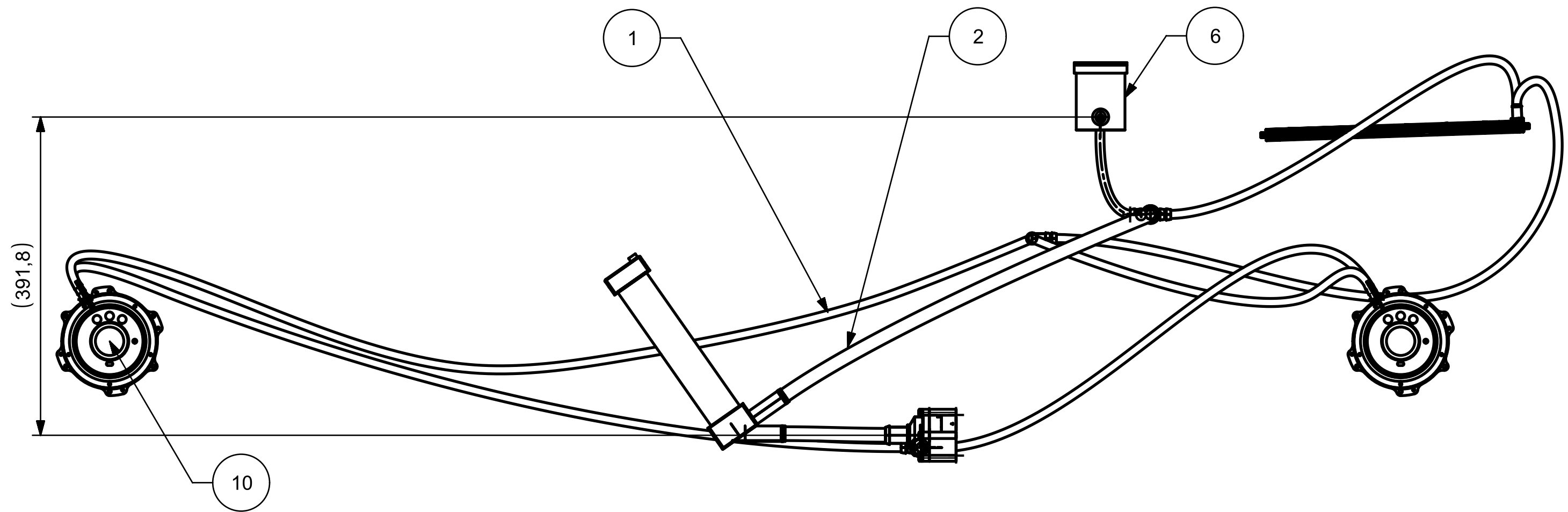
Nazev / Title	Rev.	Cislo vykresu / Drawing No.	Format
Fitting M10-10		UWBE01-01-03	A4
		List / sheet no. Pocet listu / sheets	

4

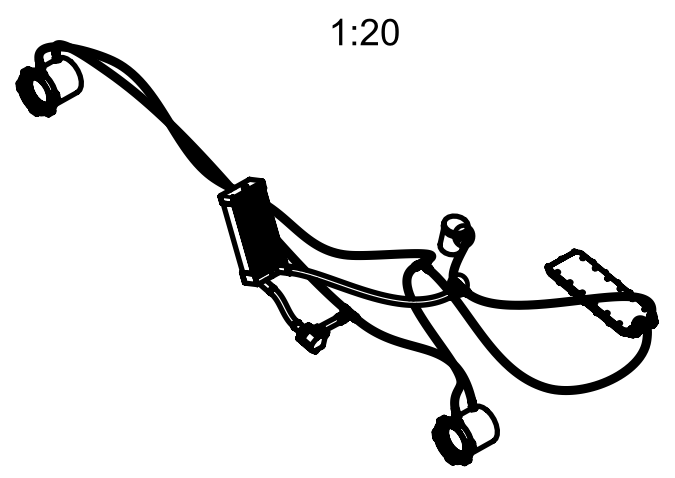
3

2

1

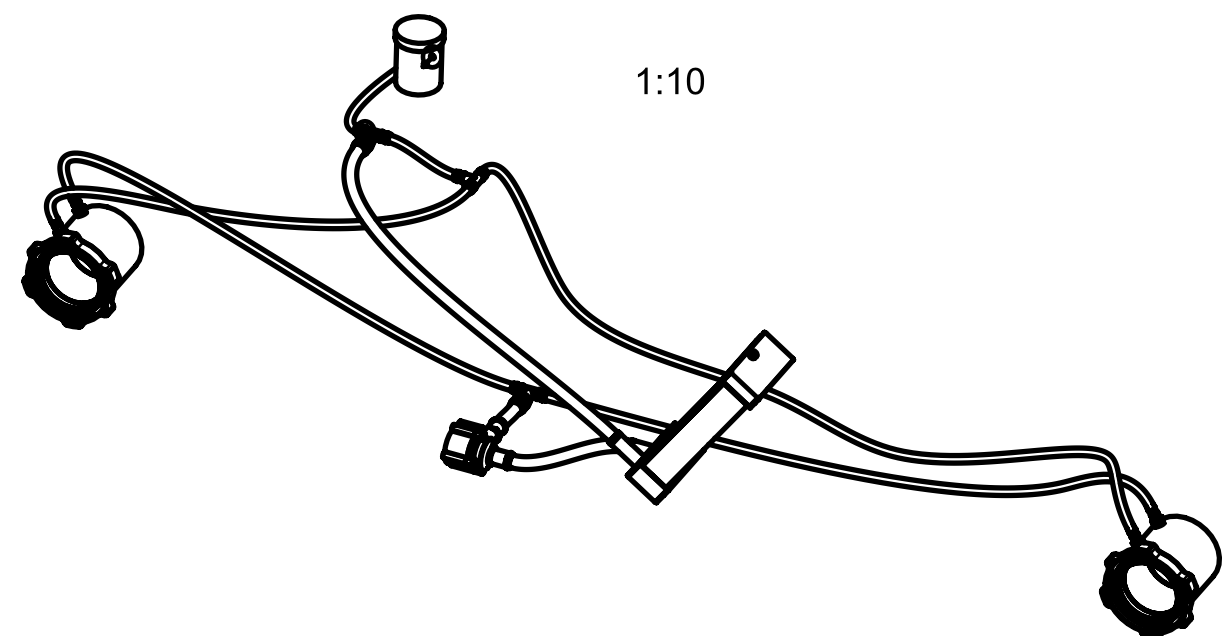
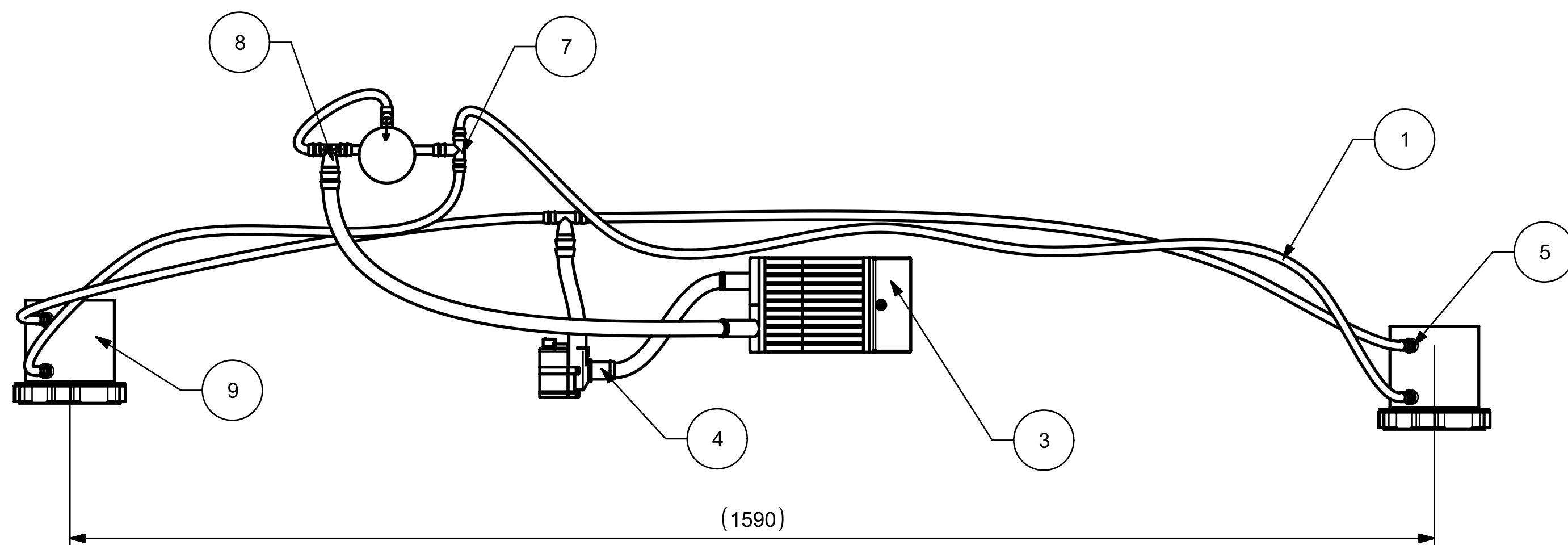
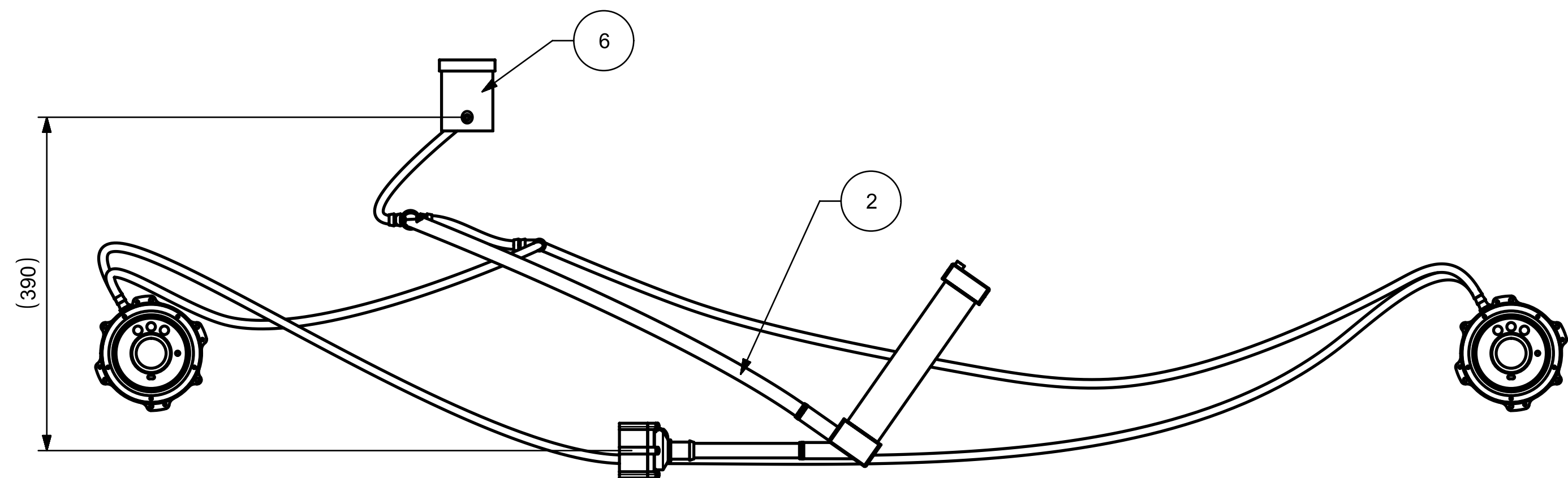


PC NO	PART NAME		QTY
10	AUX_MOTOR_TEHLICE		2
9	AUX_MENIC		1
8	A_FITTING_Y_19_10	[UWBE01-01-02]	2
7	A_FITTING_Y_10_10	[UWBE01-01-01]	1
6	EXPANSION_VESSEL		1
5	FITTING_MOTOR_M10_10	[UWBE01-01-03]	4
4	A_SESTAVA_PUMPA1		1
3	A_CHLADIC-SESTAVA		1
2	[Hadice 19]		[3]
1	[Hadice 10]		[7]





Poz. / Nazev Pos. / Title		Datum / Date		Jmeno / Name		Polotovarov		Material		Hmotnost / Počet ks. Weight / Quant.	
Kreslil / Drawn by		23. 4. 2023		Ha_jek Adam		Blank		Material		Weight / Quant.	
Projekoval / Checked by						UNIVERSITY OF WEST BOHEMIA		Material		Weight / Quant.	
Schválil / Approved by						Všechna práva vyhrazena / All rights reserved		Material		Weight / Quant.	
Index změny / change description		Schválil. / APP		Datum / Date		Podpis / Signature		Poznámka / Note:			
Tolerance / Tolerovani		Soubor-model / ASM-File		Projekt / Project		Formula Student - Cooling		Měřítka / Scale			
ISO 128 ISO 9015 ISO 2768mK		chlazeni_cfd		Soubor-vykres / DRW-File		C,hmot,sestavy / Assembly No.		1:5			
Název / Title		chlazeni_cfd		Rev.		Císlo výkresu / Drawing No.		UWBE01-00-01		Format A2	
						List / sheet no. 1		Počet listů / sheets 1			





9	AUX_MOTOR_TEHLICE		2
8	A_FITTING_Y_19_10	[UWBE01-01-02]	2
7	A_FITTING_Y_10_10	[UWBE01-01-01]	1
6	EXPANSION_VESSEL		1
5	FITTING_MOTOR_M10_10	[UWBE01-01-03]	4
4	A_SESTAVA_PUMPA1		1
3	A_CHLADIC-SESTAVA		1
2	[Hadice 19]		3
1	[Hadice 10]		6
PC NO	PART NAME		QTY

Poz. / Pos.	Nazev / Title	Polotovarov / Blank	Material / Material	Hmotnost / Weight	Pocet ks. / Quant.
Exp. / Kresil / Prokresl / Schvál /	Datum / Date / 29. 4. 2023	Jmeno / Name / Hajek Adam	 		
Index zmeny / Popis zmeny / change description		Schval. / APP / Datum / Date	Podpis / Signature	Poznanka / Notes	
Tolerance / Tolerovani / ISO 128		Soubor-model / ASM-File / chlazení_cfd_2		Projekt / Project / Formula Student - Cooling	
Soubor-vykres / DRW-File / chlazení_cfd_2		C-část / sest / assembly No.		Měřítko / Scale / 1:5	
Nazev / Title / Sestava chladicí okruh P		Rev.	Cislo vykresu / Drawing No. / UWBE01-00-02	Format / A2	
List / sheet no. 1		Pocet listu / sheets 1			