



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

## CHLADIČ MOTOROVÉHO OLEJE ZÁVODNÍHO VOZIDLA

RACING VEHICLE ENGINE OIL COOLER

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Filip Lang

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Erik Bartuli, Ph.D.

BRNO 2021





# Zadání diplomové práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	<b>Bc. Filip Lang</b>
Studijní program:	Energetické a termofluidní inženýrství
Studijní obor:	Energetické inženýrství
Vedoucí práce:	<b>Ing. Erik Bartuli, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2021/22

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## Chladič motorového oleje závodního vozidla

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce je zaměřená na vývoj chladiče motorového oleje z polymerních vláken, které mají oproti konvenčním chladičům výrazně nižší hmotnost čímž přispívají k výkonnostním parametrům vozu. Těžiště práce leží ve vlastním návrhu chladiče motorového oleje závodního vozidla včetně výroby prototypu na programovatelném zařízení X-Winder který je pro řešení práce plně k dispozici. Samotné parametry výměníku budou ověřeny technickým experimentem.

### Cíle diplomové práce:

1. Návrh olejového chladiče z polymerních dutých vláken.
2. Výroba prototypu chladiče závodního vozidla na zařízení X-Winder.
3. Testování vyrobeného chladiče.

### Seznam doporučené literatury:

SKOTSKY, Alexander A. Automotive Engines. Springer Verlag, 2009, ISBN 978-3-642-00163-5.

JAN, Zdeněk a ŽDÁNSKÝ, Bronislav. Automobily (3): Motory. Brno: Avid, spol. s r.o., 2009. ISBN 978-80-87143-15-5.

L. BERGMAN, THEODORE, ADRIENNE S. LAVINE, FRANK P. INCROPERA a DAVID P. DEWITT. Fundamentals of heat and mass transfer. 7th ed. Hoboken, NJ: Wiley, c2011. ISBN 978-047-0501-979.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá návrhem olejového chladiče pro závodní automobil z polymerních dutých vláken. Olejový chladič byl vyroben na zařízení X-Winder, které není původně navrženo pro výrobu tepelných výměníků, což dříve značně komplikovalo proces výroby. Proto byly v rámci práce vytvořeny programy iniciující pohyb navíjecího zařízení na základě zadaných parametrů uživatelem. Vyrobený chladič byl porovnán s reálně využívaným olejovým chladičem pro závodní automobil na základě změřených parametrů ve zkušební komoře.

### **Klíčová slova**

Olejový chladič, tepelný výměník, polymerní dutá vlákna

## **ABSTRACT**

This disertation is about designing an oil cooler for racing car made of polymer hollow fibers. The oil cooler was made on an X-Winder device, which is not originally designed for production of heat exchangers, which was quite complicated to produce these exchangers. Therefore, programs initiating the movement of the winding device based on the parameters entered by the user were created within the work. The manufactured cooler was compared with used oil cooler from the race car in pursuance of measured parameters in the experimental chamber.

### **Key words**

Oil cooler, heat exchanger, polymeric hollow fibers

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

LANG, Filip. *Chladič motorového oleje závodního vozidla*. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139711>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Erik Bartuli

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Chladič motorového oleje závodního vozidla** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

-----  
Datum

-----  
Bc. Filip Lang

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto Ing. Erikovi Bartuli, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce. Děkuji také své rodině a přátelům, jenž mě v průběhu studia podporovali.

## OBSAH

ÚVOD.....	11
1 Tepelné výměníky (olejové chladiče).....	13
1.1 Dělení tepelných výměníků .....	14
1.2 Kapalinou chlazený olejový chladič .....	18
1.3 Vzduchem chlazený olejový chladič .....	20
2 Chladicí a olejový systém automobilu.....	21
2.1 Chladicí systém automobilu.....	21
2.1.1 Chladivo .....	22
2.1.2 Větrák .....	22
2.1.3 Vodní pumpa.....	22
2.1.4 Termostat.....	23
2.2 Olejový systém automobilu .....	23
2.2.1 Mazací okruh.....	23
2.2.2 Hlavní částí.....	24
2.2.3 Přenos tepla do motorového oleje .....	25
2.2.4 Chlazení pístů .....	27
3 Polymery.....	29
3.1 Dělení polymerů .....	29
3.2 Syntéza polymerů .....	29
3.2.1 Polymerace .....	29
3.2.2 Polyadice .....	29
3.2.3 Polykondenzace.....	30
3.3 Výroba polymerů .....	30
4 Konstrukce olejového chladiče z polymerních dutých vláken .....	31
4.1 Navíjecí zařízení X-Winder .....	31
4.2 Úprava navíjecího zařízení .....	33
4.3 Porovnávání chladič.....	35
4.4 Navržení parametrů chladiče .....	38
4.4.1 Navržení počtu vláken.....	41
4.5 Řízení navíjecího zařízení.....	42
4.5.1 Navržený pohyb navíjecího zařízení při navíjení vložky výměníku.....	42
4.5.2 Navržený pohyb navíjecího zařízení při navíjení pomocných ploch .....	50
4.5.3 Program pro navíjení vložky výměníku .....	51
4.5.4 Program pro navíjení pláště výměníku.....	58
4.5.5 Program pro navíjení pomocných ploch .....	58
4.6 Proces navíjení výměníku .....	60
4.6.1 Výroba jádra výměníku .....	60
4.6.2 Příprava procesu navíjení .....	61
4.6.3 Proces navíjení .....	62
4.6.4 Připojení přírub výměníku .....	65

4.7	Měření tepelných výkonů chladičů.....	67
4.7.1	Měření chladiče závodního automobilu.....	69
4.7.2	Měření navrženého chladiče.....	70
	ZÁVĚR.....	74
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	76
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	77
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	78
	SEZNAM TABULEK.....	80



## ÚVOD

Tepelné výměníky konstruované z polymerních dutých vláken vytváří potenciál pro možné nahrazení konvenčních tepelných výměníků. Možné využití výměníků z polymerních dutých vláken se vyskytuje v mnoha technických aplikacích, jako je chlazení elektronického zařízení, v systémech rekuperace tepla, ve výměnících určených pro chemický průmysl, v systémech zajišťující chlazení baterií atp.

Polymerní vlákna disponují některými materiálovými výhodami, při porovnání s konvenčními výměníky, které mohou být při jejich aplikacích využity. Jedním z příkladů využití výhod polymerních dutých vláken je chemický průmysl, kde se dostávají do kontaktu agresivní média a výměník. Vzhledem k odolnosti polymerů vůči korozi se jeví chemický průmysl jako jedno z perspektivních odvětví pro využití zmíněné technologie.

První část práce se zabývá samotným úvodem do problematiky související s prací. Je zde uvedena krátká část zabývající se problematikou přenosu tepla a následně jsou uvedeny konvenčně využívané tepelné výměníky a stručný přehled jejich funkce.

Další část se již věnuje samotné problematice olejových chladičů. Pro úplné pochopení olejového chlazení v automobilu je zahrnutá i část zabývající se chladičím systémem automobilu. Poté již následuje popis samotného olejového hospodářství v automobilu. Poslední části úvodu do problematiky je věnována polymerům.

Začátek hlavní části práce se zabývá samotným navíjecím zařízením, kterým disponují Laboratoře přenosu tepla a proudění VUT v Brně. Byly zhodnoceny nedostatky navíjecího zařízení a implementace řešení.

Část práce se skládala z vytvoření programu v jazyce Python generujícího textový soubor, jenž řídí navíjecí zařízení za účelem vytvoření vložky výměníku z polymerních dutých vláken. Při dřívějším návrhu tepelných výměníků býval využíván software dodávaný s navíjecím zařízením. Samotný software však není navržen pro výrobu tepelných výměníků a není schopen pracovat s měnicím se průměrem navíjené součásti, při navíjení jednotlivých vrstev vložky výměníku. V případě využití původního softwaru pro výrobu vložky výměníku je potřeba vygenerovat několik jednotlivých G-kódů a ty následně manuálně upravit a spojit. S manuální úpravou se pojilo riziko kolize zařízení a především velmi obtížné vytvoření pravidelné a opakovatelné struktury dutých vláken, to ústilo v horší schopnost porovnání jednotlivých navržených výměníků a tedy i následným vylepšením. Zmíněné negativní jevy byly podmětem pro vytvoření programu generující G-kód určený pro výrobu vložky výměníku. Program pracuje na základě zadaných parametrů uživatelem a disponuje implementacemi vylepšeníh jenž usnadňují a zpřesňují průběh navíjení. Vylepšení se týkají například automatické postupné změny některých pomocných geometrických parametrů zadaných uživatelem, které usnadňují tvorbu koncových bodů a nanášení epoxidu v průběhu navíjení nebo řeší korekci nepřesnosti navíjecího zařízení.

Následující část práce se zabývá samotnou konstrukcí tepelného výměníku. Jsou navrženy základní parametry tepelného výměníku a poté již dochází k samotné výrobě. Samotná výroba se skládala z několika částí. V první části bylo vyrobeno karbonové jádro výměníku umožňující přívod a odvod pracovního média. Na jádro výměníku poté byla navinuta samotná vložka z polymerních dutých vláken. V konečné části došlo k manuálním úpravám a k připojení přírub výměníku k vložce výměníku.

Vyrobený chladič byl v poslední části práce porovnán v rámci měření ve zkušební komoře Laboratoří přenosu tepla a proudění Vysokého učení technického v Brně s reálně využívaným olejovým chladičem, který je určen pro závodní automobil. Cílem práce bylo navrhnout chladič disponující přibližně stejným nebo větším tepelným výkonem, tedy aby zaručil dostatečný odvod tepla při podobných rozměrech jako má porovnávaný chladič.

Výsledek práce by měl určit potenciál dalšího využití navrženého chladiče a možnosti dalšího vylepšení navrhovaných chladičů.

## 1 Tepelné výměníky (olejové chladiče)

Zařízení používané k realizaci přenosu tepla se nazývá tepelný výměník. Jedná se o proces přenosu tepelné energie mezi dvěma tekutinami, které mají různou teplotu a jsou obvykle odděleny pevnou stěnou. Zařízení se vyskytuje v mnoha technických aplikacích. Konkrétní aplikace lze nalézt v oblasti vytápění prostor a chlazení prostor (radiátory, výparník a kondenzátor klimatizace aj.), výroby elektrické energie (chladičí věže elektráren, ekonomizéry, výparníky, přehřívačky, přihríváčky), rekuperace odpadního tepla, ale také například v chemických procesech [1].

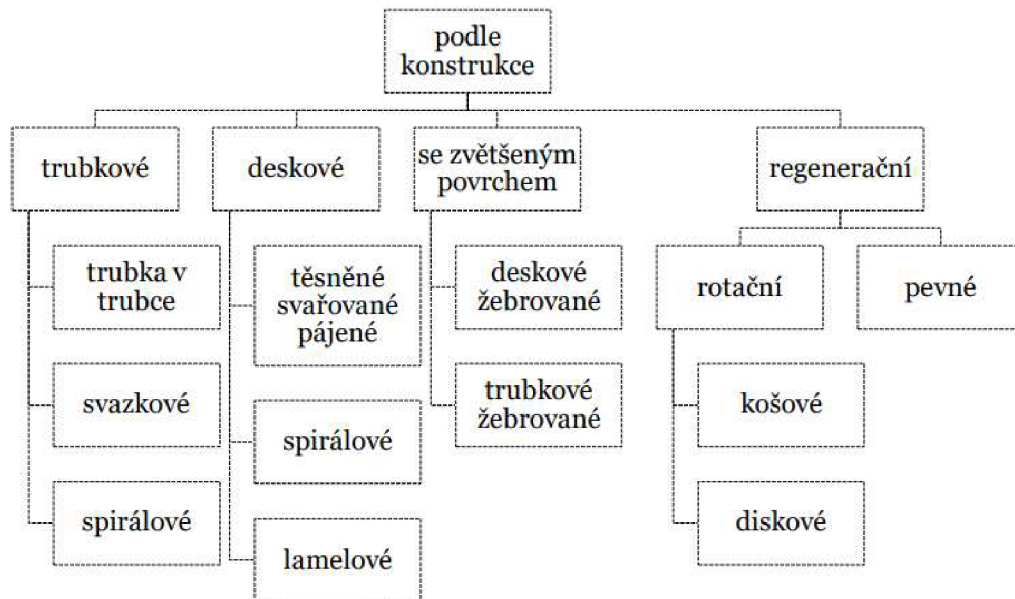
Účelem tepelného výměníku je zajistit co nejvyšší přenos tepelné energie mezi pracovními látkami. Teplé médium přenáší tepelnou energii chladnému médiu, to způsobuje ohřev chladného média a naopak pokles teploty na straně teplého média.

Proces přenosu tepelné energie může být iniciován 3 způsoby. Prvním způsobem je vedení tepla neboli kondukce. Tento mechanismus přenosu energie je dominantní u pevných látek a popisuje ho Fourierův zákon. Druhý mechanismus přenosu tepelné energie je přenos tepla prouděním neboli konvekce. Tento mechanismus přenosu energie je dominantní u kapalin a popisuje ho Newtonův ochlazovací zákon. Posledním mechanismem přenosu tepelné energie je záření neboli radiace. Tepelné záření je energie emitována hmotou v případě že její teplota není rovna absolutní nule. [1].

V reálném světě se jednotlivé typy přenosu tepelné energie vyskytují současně. Významnou roli při stanovení tepelného výkonu má součinitele prostupu tepla. Při stanovení tepelných výkonů chladičů se často zanedbává mechanismus přenosu tepelné energie radiací v důsledku nízkých teplot ve výměníku. Vliv radiace je při nižších teplotách zanedbatelný. Mechanismus radiace je potřeba zahrnout u výměníků pracujících s vysokými teplotami, jako jsou například výparníky u kotlů.

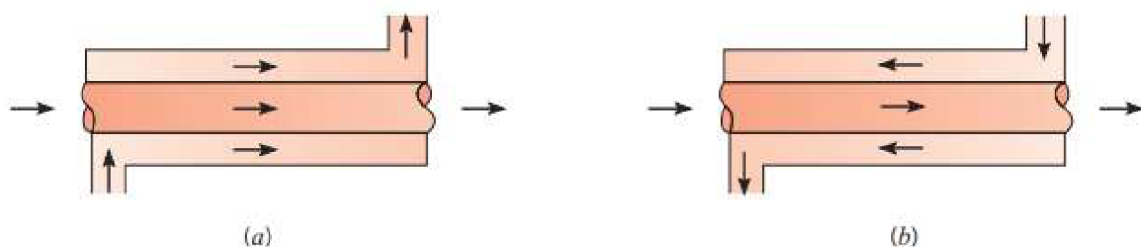
### 1.1 Dělení tepelných výměníků

Tepelné výměníky je možné klasifikovat podle mnoha faktorů. Jedním ze základních faktorů je typ konstrukce, Obr. 1.1 znázorňuje základní druhy konstrukcí. Další možnost rozdělení je podle vzájemného proudění tekutin. Proudění může být například souproudé, protiproudé, křížové nebo split. Výměníky mohou být členěny také podle procesu přenosu, tedy v závislosti zda jsou pracovní látky v přímém kontaktu (směšovací výměníky) nebo v nepřímém kontaktu. Další možná klasifikace je podle počtu pracovních médií, změny fáze, procesu přenosu tepla (konvekce nebo kombinace konvekce a radiace) nebo podle kompaktnosti [1].

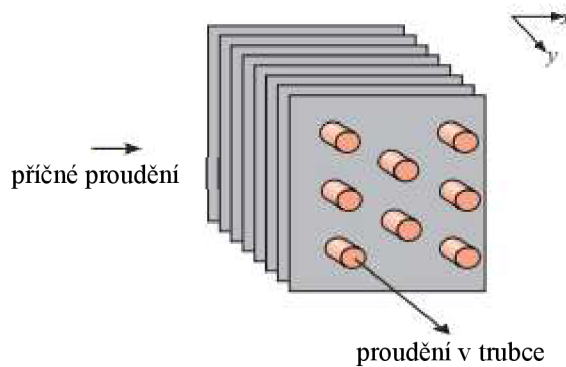


Obr. 1.1 Rozdělení tepelných výměníků podle konstrukce.

Nejjednodušší výměníky jsou takové, u kterých se pracovní média pohybují ve stejném nebo opačném směru v koncentrické trubce, takové výměníky se nazývají trubka v trubce (Obr. 1.2). Příklad příčného proudění je znázorněn na Obr. 1.3 na trubkovém žebrovaném výměníku, jde o výměník se zvětšeným povrchem [1].



Obr. 1.2 Výměník trubka v trubce. (a) Souproudý. (b) Protiproudý [1].

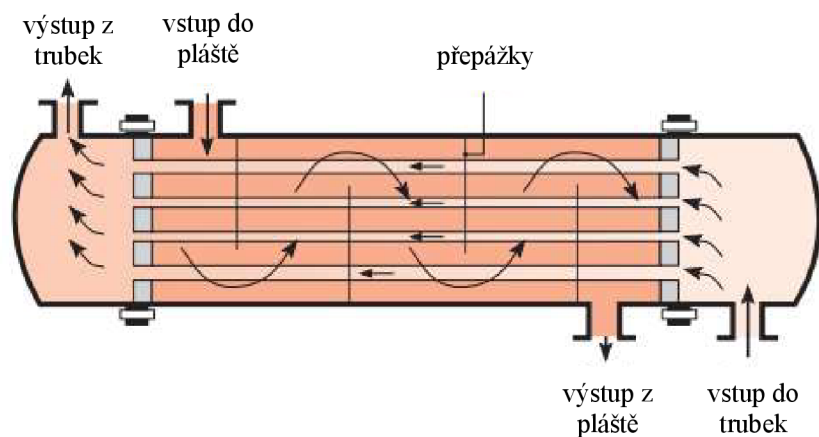


Obr. 1.3 Trubkový žebrovaný výměník [1].

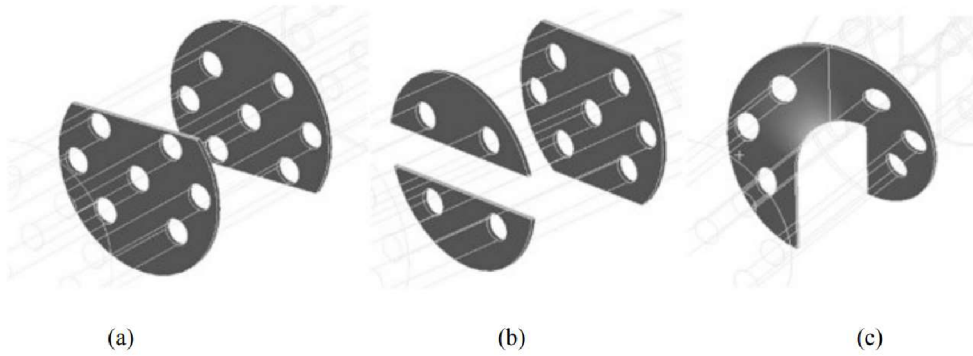
Další možnou konstrukcí využívající křížové proudění je svazkový výměník (Obr. 1.4). Princip funkce svazkového výměníku je do určité míry podobná navrhovanému výměníku v rámci diplomové práce. Jeho konstrukce se může výrazně lišit například v závislosti na použitém druhu přepážek (segmentové, koncentrické, tyčové, šroubovitě aj.), typu konstrukce přední hlavy, pláště nebo zadní hlavy a způsobu uspořádání trubek. Obecné výhody trubkových výměníků, například svazkové výměníky nebo výměníky trubka v trubce spočívají v dobré tlakové a teplotní odolnosti, nenáročném a prověřeném technologii, poměrně nízké ceně na jednotku tepelného výkonu výměníku aj. [1].

Přepážky svazkového výměníku plní tři základní funkce. Mění trajektorii proudění, potlačují vibrace a podporují trubkový svazek. Konkrétní možná konstrukce přepážek je zobrazena na Obr. 1.5. Určení vhodné konstrukce přepážky pro svazkový výměník se odvíjí vždy od konkrétní aplikace. Obr. 1.6 ukazuje matematický model tlakové ztráty v závislosti na druhu použité přepážky [2].

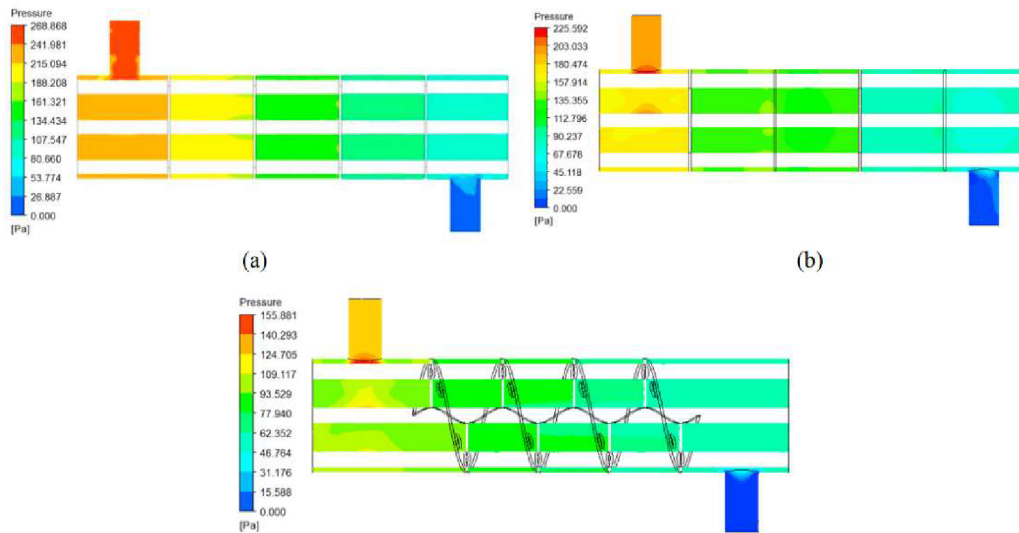
Dalším významným parametrem ovlivňující celkové tepelně-hydraulické vlastnosti výměníku je geometrie uspořádání trubek. Uspořádání se primárně dělí na trojúhelníkové a čtvercové. Při čtvercovém uspořádání jsou trubky umístěny v zákrytu za sebou, to se sebou nese výhody ve formě ochrany proti abrazi a snadnějšímu čištění. Naopak při trojúhelníkovém uspořádání neleží trubky v zákrytu, ale každá následující řada trubek svazku je vždy posunuta o trubkovou rozteč tak, aby středy trubek leželi ve středu roztečí předchozí řady trubek.



Obr. 1.4 Svazkový výměník [1].



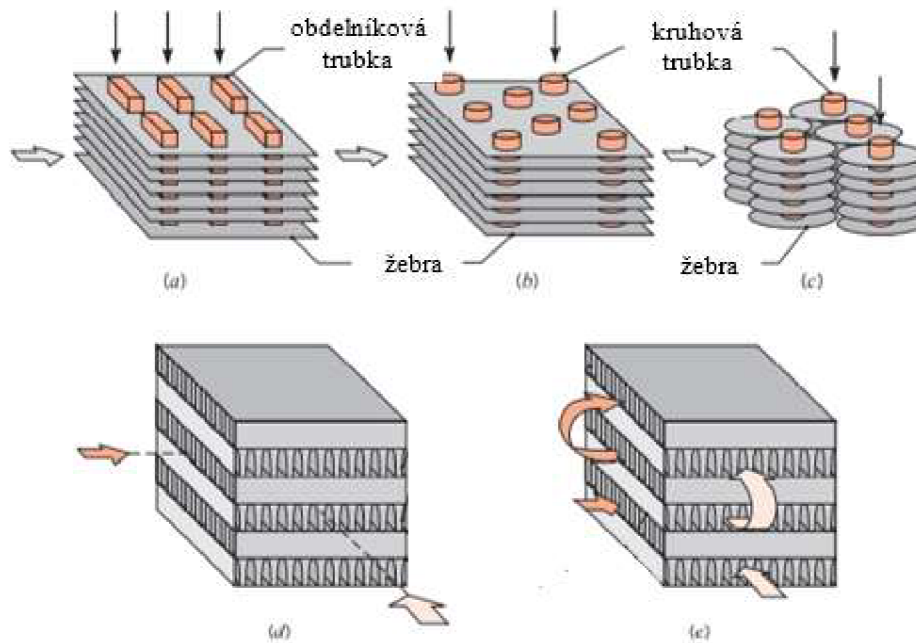
Obr. 1.5 Konstrukce přepážek svazkového výměníku.  
(a) Segmentové. (b) Dvojitě Segmentové. (c) Šroubovitě. [2]



Obr. 1.6 Tlakové ztráty svazkového výměníku v závislosti na druhu použitých přepážek.  
(a) Segmentové. (b) Dvojitě Segmentové. (c) Šroubovitě. [2]

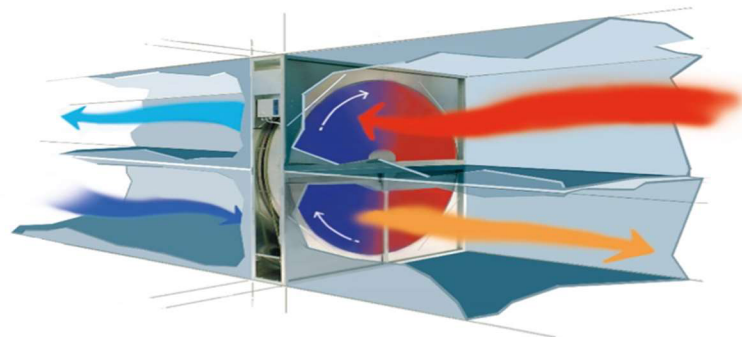
Své poměrně široké uplatnění našly v technické praxi i deskové výměníky. Jejich konstrukce se vyznačuje poměrně nízkou hmotností a malými rozměry na jednotku tepelného výkonu, z čehož vyplívá vysoký měrný tepelný výkon.

Speciální skupinou jsou kompaktní výměníky, které jsou konstruované za účelem velmi velké teplosměnné plochy na jednotku obestavěného objemu ( $S/V > 400 \text{ m}^2/\text{m}^3$  pro kapaliny a  $S/V > 700 \text{ m}^2/\text{m}^3$  pro plyny). Tyto zařízení se používají především v případě, že jedno z pracovních médií je plyn, protože plyny se obecně vyznačují řádově nižším součinitelem přestupu tepla oproti kapalinám. Konkrétní konstrukce kompaktních výměníků znázorňuje Obr. 1.7 [1].



Obr. 1.7 Různé konstrukce kompaktních výměníků [1].

Regenerační rotační výměníky (Obr. 1.8) pracují na principu akumulace energie v matrici. Matricí proudí periodicky teplý a studený proud pracovního média, kdy teplý proud předá teplo matrici, ta ho akumuluje a následně předá teplo studenému médiu.



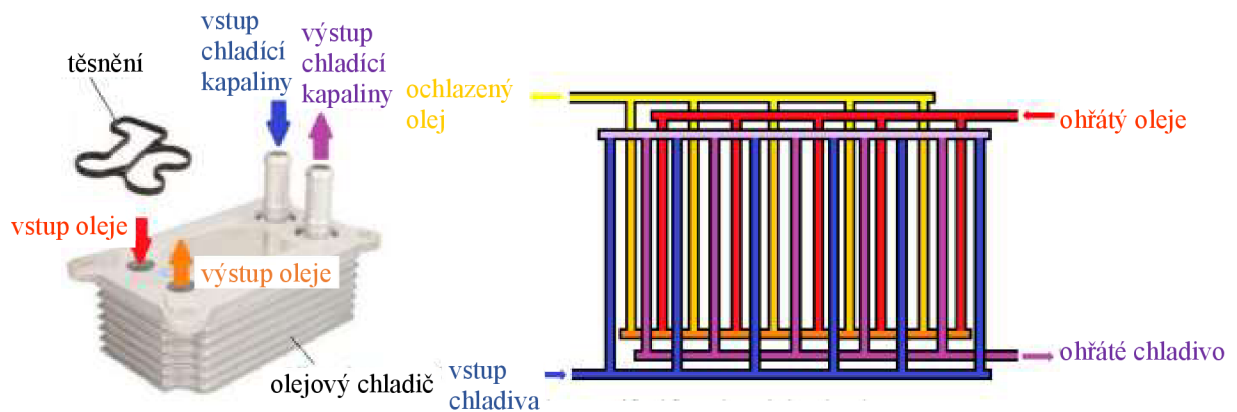
Obr. 1.8 Regenerační rotační tepelný výměník.



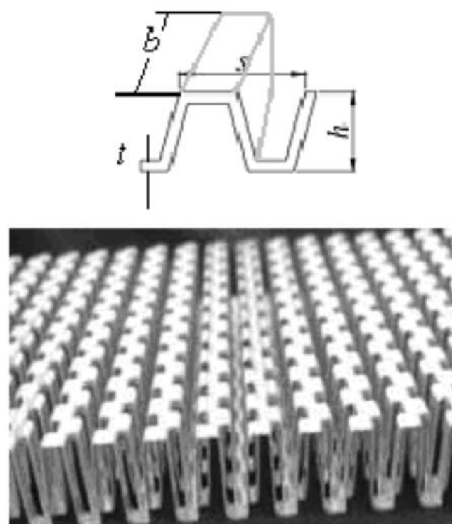
## 1.2 Kapalinou chlazený olejový chladič

Pro běžnou konstrukci olejových chladičů se v dnešní době používají především typ deskového výměníku s žebry (Obr 1.9). Ohřátý olej z motoru proudí do olejového chladiče jedním společným kanálem, který je pak rozdělen do několika paralelních průtokových cest se složitou geometrií. Podobně je vedena i chladicí kapalina jedním společným kanálem a následně rozdělena do několika paralelních kanálků. Ochlazený olej z výměníku proudí do mazacího systému motoru a teplá chladicí kapalina proudí do chladiče, kde je teplo odjímáno proudícím vzduchem [4].

Obecně jsou žebra zasazena do olejových a vodních kanálků, aby se zlepšily tepelně-hydraulické výkony. Jejich konstrukce má výrazný vliv na celkové vlastnosti tepelného výměníku. Obr. 1.10 znázorňuje konstrukci typických žeborů pro olejové výměníky [4] [5].



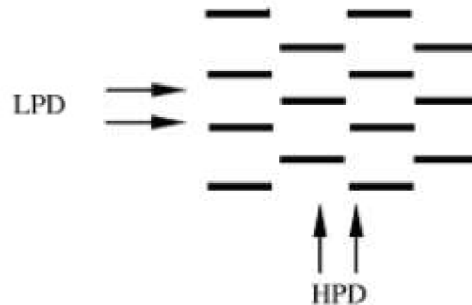
Obr 1.9 Princip funkce olejového deskového chladiče [4].



Obr. 1.10 Typická konstrukce žeborů [5].

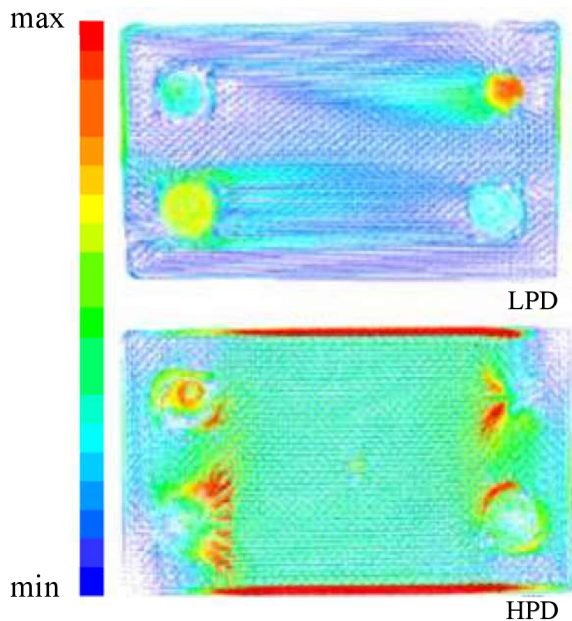


Obr. 1.11 ukazuje dva základní typy uspořádání žebér, uspořádání s nízkým hydraulickým odporem (LPD) a uspořádání s vysokým poklesem tlaku (HPD), v závislosti na směru proudění vzhledem k žebro. [5]

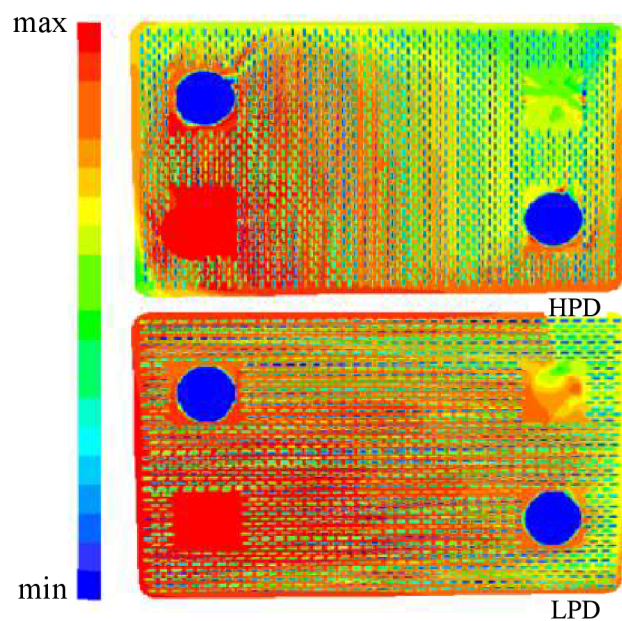


Obr. 1.11 LPD a HPD uspořádání žebér v závislosti na směru proudění média [5].

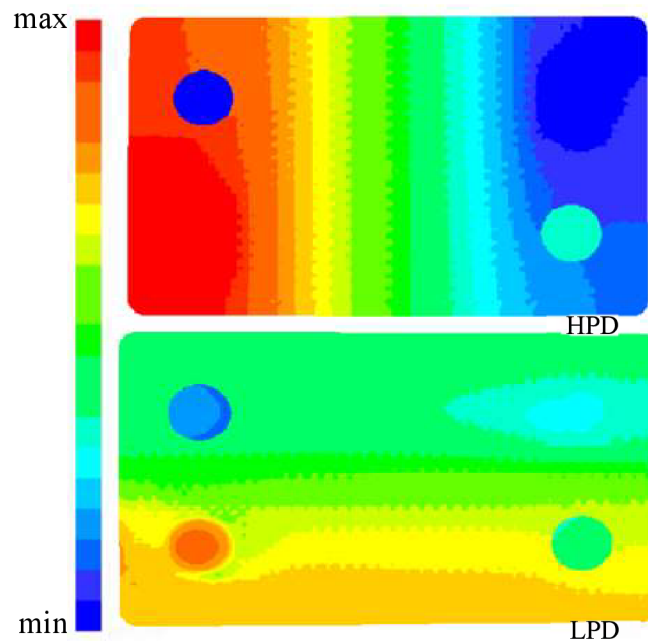
Tepelně-hydraulické výkony olejového chladiče s LPD a HPD uspořádáním jsou znázorněny na simulacích na Obr. 1.12, Obr. 1.13 a Obr. 1.14. Jsou patrné průběhy teplot, tlaku a rychlosti proudění [5].



Obr. 1.12 Průběh rychlostí (první obrázek je uspořádáním LPD a druhý HPD) [5].



Obr. 1.13 Průběh teplot (první obrázek je uspořádáním HPD a druhý LPD) [5].



Obr. 1.14 Průběh tlaku v olejovém kanálku [5].

Průběhy rychlostí ukazují, že profily proudění v olejových chladičích s LPD a HPD rozložením jsou zcela odlišné. V chladičích s HPD je proudění relativně rovnoměrné při porovnání s LPD, kde vliv žebor na proudění je výrazně menší, to se pojí i s menší účinností žebor. Výsledkem je, že měrný tepelný výkon u HPD je větší než u LPD a teplotní průběhy to potvrzují. Tlakové průběhy však ukazují, že odpor proudění u žebor s HPD je mnohem větší, většinou několiknásobně než u LPD, ale měrný tepelný výkon je větší o 50 % až 70 % [5].

Vhodnější uspořádání je především závislé na aplikaci použití, pokud příležitost vyžaduje lepší vlastnosti přenosu tepla a má nižší omezení na tlakovou ztrátu, je vhodné použít uspořádání HPD. Naopak pokud je kladen u aplikace důraz na nízkou tlakovou ztrátu, je vhodné použít uspořádání LPD [5].

### 1.3 Vzduchem chlazený olejový chladič

Tento typ olejového chladiče pracuje podobně jako chladič chladícího systému automobilu. Olej proudí uvnitř žebrované trubky a předává teplo přes kovové stěny trubky do žebor a následně do okolního vzduchu. Proud vzduchu je vyvolán pohybem vozidla nebo ventilátorem chladícího systému automobilu. [6]

## 2 Chladicí a olejový systém automobilu

V důsledku rostoucích výkonů motorů, požadavků na nízké spotřeby paliva, dosažení vysokých výkonů na malý zdvihový objem motoru, vysokých tažných schopností a s omezenou možností na rozšiřování současného systému se zvyšují požadavky na chladicí systém automobilu.

Potřeba zamezit překročení limitní hodnoty teploty oleje v olejovém systému ústí ve snahu o inovaci současných chladicích systémů motorů. Nedostatečné chlazení oleje se nejpravděpodobněji neprojeví za běžných jízdních podmínek, ale v případech maximálních výkonů motoru, jako je jízda při nejvyšších rychlostech, prudké a dlouhé zrychlování nebo tažení přívěsu [7].

### 2.1 Chladicí systém automobilu

Požadavek na chlazení vysokých teplot lze zjednodušeně rozdělit do čtyř důvodů, kterými jsou podpora vysoké objemové účinnosti, zajištění správného spalování, bezpečného mechanického provozu a spolehlivosti [9].

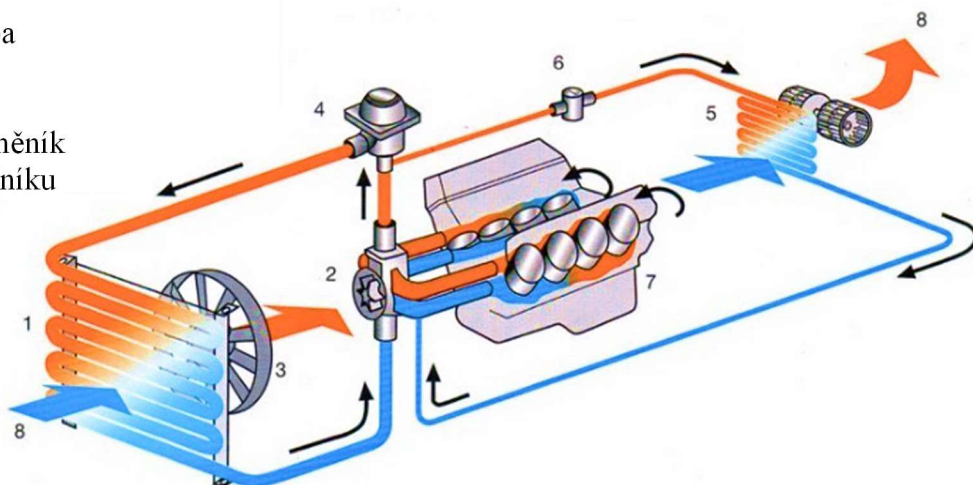
Správně fungující chladicí systém v automobilu je nezbytný pro zamezení přehřívání komponent a s tím spojených negativních jevů. Patříčně pracující chladicí systém poskytuje konkrétní výhody ve snížené spotřebě paliva, zachování pevnosti součástí, zabraňuje opotřebením způsobeným třením mezi válcem a pístem (mazací vlastnosti se při příliš vysokých teplotách zhoršují), zabraňuje vysokoteplotní korozi a snižuje emise výfukových plynů. U zážehových motorů zabraňuje také samovolnému vznícení směsi paliva a vzduchu [7] [9].

V dřívějších letech nebylo neobvyklé chlazení motoru vzduchem, v dnešní době mají prakticky všechny auta kapalinové chladicí systémy. Vzduchem chlazené motory měli výhody především ve své jednoduchosti. Nepotřebují trubky, hadice, vodní pumpu, chladič, termostat nebo chladicí kapalinu, s tím se váže i nižší hmotnost. Daný systém chlazení je takřka bezúdržbový. S přechodem od chlazení vzduchem k chlazení kapalinou se váže především zvyšování výkonu motoru a tedy zvyšování měrné tepelné energie předané z motoru do chladicího média. Teplo odebrané pomocí kapaliny bude nakonec předáno opět vzduchu stejně jako u vzduchem chlazených motorů, rozdíl spočívá v nepřímém předání tepla z motoru do vzduchu u kapalinových chladicích systémech [7].

Jak již bylo uvedeno, teplo je v současnosti z motoru odváděno pomocí chladicí kapaliny. S použitím chladicí kapaliny se pojí výrazný růst součinitele prostupu tepla a to především díky řádově vyšší hodnotě součinitele přestupu tepla na straně chladicího média, kapaliny, při porovnání se vzduchem. Za daných podmínek výrazně roste měrný tepelný výkon odebíraného tepla z motoru. Další výrazná výhoda spočívá v jednodušším udržení stabilní teploty motoru pomocí termostatu [8].

Obr. 2.1 popisuje možné uspořádání chladicího systému v automobilu. Okolní vzduch proudí chladičem umístěným v přední části vozu a odebírá teplo z chladicí kapaliny. Aby bylo zajištěno dostatečné proudění vzduchu chladičem při nízkých rychlostech vozidla je k chladiči namontován ventilátor. Ventilátor obvykle napájen elektricky a je namontován mezi motorem a chladičem. Termostat je v chladicím okruhu umístěn za účelem udržení optimální teploty chladicí kapaliny. Termostat reguluje teplotu tím, že upravuje množství vody, které proudí chladičem [7].

1. Chladič
2. Vodní pumpa
3. Větrák
4. Termostat
5. Tepelný výměník
6. Ventil výměníku
7. Motor
8. Vzduch



Obr. 2.1 Chladič motorového oleje závodního vozidla [7].

### 2.1.1 Chladič

Chladičím okruhem proudí obvykle směs vody a glykolu v poměru 1:1. Chladič by mělo poskytovat také ochranu proti korozi kovových dílů a mít dobré nemrznoucí vlastnosti pro zimní provoz. Směs vody a etylenglykolu v poměru 1:1 má bod varu 108 °C a bod tuhnutí -38 °C při atmosférickém tlaku. Při porovnání bodů tuhnutí a varu společně s nebezpečím koroze pro některé kovy je patrná značná výhoda použití směsi glykolu a vody v automobilech oproti samotné vodě [7] [9].

### 2.1.2 Větrák

Dostatečný objemový průtok vzduchu chladičem je jedním z požadavků pro docílení správně fungujícího a efektivního chladičského systému. K zajištění dostatečného proudění vzduchu za všech podmínek se obvykle přidává ventilátor. Ventilátory mohou být poháněny motorem, elektricky nebo hydraulicky.

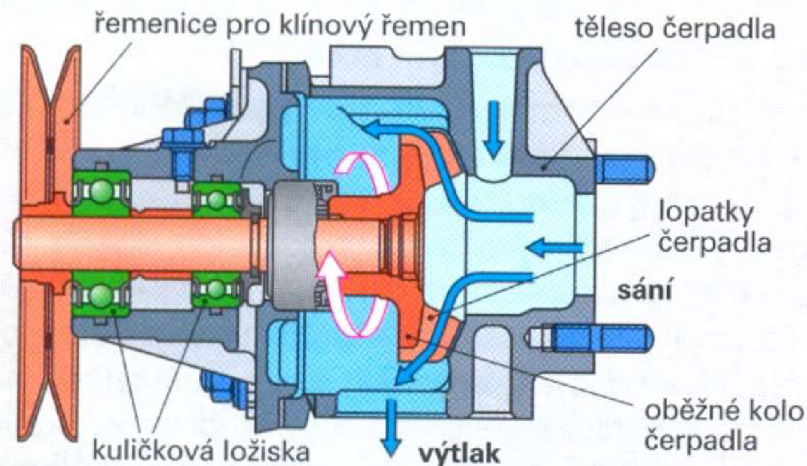
U běžných vozidel je ventilátor při běžné rychlosti obvykle vypnutý, naopak při pomalé jízdě nebo stání vozidla, kdy průtok vzduchu chladičem je malý vlivem nízké rychlosti vozidla, není zajištěn dostatečný odvod tepla a ventilátor je proto zapnutý. [9]

### 2.1.3 Vodní pumpa

Vodní pumpa neboli čerpadlo (Obr. 2.2), zajišťuje nucenou cirkulaci chladicí kapaliny v motoru. Mechanická energie přivedená na rotující hřídeli je transformována do kinetické energie chladicí kapaliny.

Odstředivé čerpadlo je jedno z nejběžnějších a dá se použít téměř univerzálně, má dvě hlavní komponenty a to oběžné kolo připojené k hřídeli a skříň.





Obr. 2.2 Čerpadlo chladičho okruhu [7].

#### 2.1.4 Termostat

Termostat je v chladičím okruhu umístěn za účelem udržení optimální teploty chladičí kapaliny. Cílem je neodvádět z motoru více tepla než je potřeba a udržovat teplotu co nejkonstantnější. Když je teplota chladičí kapaliny pod požadovanou teplotou, termostat se uzavře a chladičí kapalina proudí zpět do vodního čerpadla. Při zvyšování teploty se termostat začne otevírat a část kapaliny bude proudit do chladiče a po dosažení požadované teploty se termostat otevře úplně.

## 2.2 Olejový systém automobilu

Hlavním účelem olejového systému automobilu je mazání pohyblivých částí v motoru a zamezení opotřebování zejména ložisek a hřídelí. Motorový olej ale zároveň plní chladičí funkci některých komponent, které není možno chladit vodou. Také čistí povrchy, chrání součásti před korozí a transportuje částice nečistot do olejového filtru. Příliš vysoké teploty oleje mají škodlivý vliv na celkový výkon a životnost motoru. Vysoká teplota oleje je taky přímou indikací vysoké teploty motoru a s tím i neefektivního chladičího systému motoru [7] [10].

### 2.2.1 Mazací okruh

Olejové čerpadlo nasává olej z olejové vany trubicí a čerpá olej přes filtr, aby se olej vyčistil. Obvykle je za čerpadlem přetlakový ventil za účelem řízení tlaku oleje v motoru. Ventil může odvádět olej přímo zpět do olejové vany. Olej se pohybuje v kanálcích, které jsou obvykle odlity v bloku motoru a hlavě, které přivádějí olej k hlavním ložiskům a ložiskům vačkové hřídele. Vrtáním v klikové hřídeli je olej přiváděn do ojnicích ložisek. Další kanálky dopravují olej do ostatních pohyblivých částí motoru [7].

Turbodmychadla jsou také zásobovaná olejem, obvykle prostřednictvím přidavného potrubí nebo hadic za účelem mazání ložisek hřídele a odvodu tepla [7].

## 2.2.2 Hlavní části

### Olejový chladič

Základní dělení konstrukce olejových chladičů podle chladicího média je vzduchem chlazený a kapalinou chlazený olejový výměník, v závislosti na použití vozidla, které chladí. Vzduchem chlazený olejový výměník je většinou umístěn v přední části vozidla z důvodu potřeby dostatečného proudění vzduchu skrz výměník. Vodou chlazené výměníky nepotřebují proudící vzduch, a proto na jeho umístění nejsou kladeny zvláštní nároky [7].

Olejové chladiče jsou obvykle navrženy z hliníku a jsou charakteristické vysokým součinitelem prostupu tepla a nízkou hmotností [7].

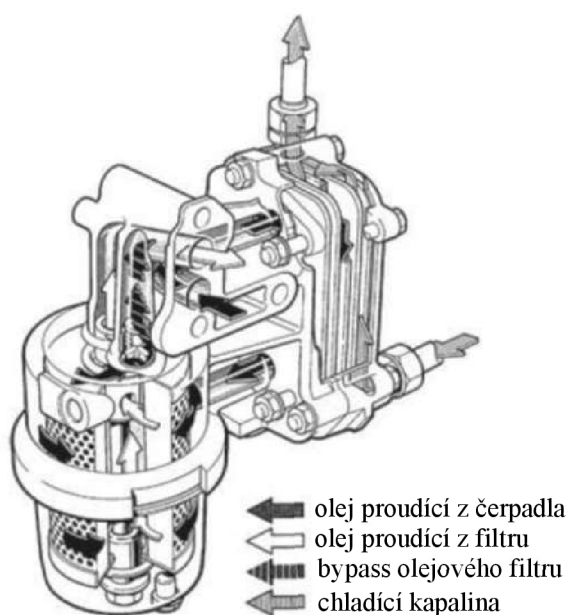
### Motorový olej

Hlavní funkce motorového oleje je mazání a chlazení komponent motoru. Vlastnosti oleje jsou výrazně ovlivněny jeho teplotou, při vysokých teplotách klesá viskozita a nastávají problémy s dostatečným mazáním. Kvalitní olej má dobré mazací vlastnosti při nízkých i vysokých teplotách a má nízkou viskozitu s minimálními ztrátami třením. U moderních olejů tvoří 75 až 85% objemu oleje základní mazivo. Zbytek oleje tvoří aditiva zlepšující jeho vlastnosti. Antikorozní přísady, přísady proti opotřebení, přísady zlepšující viskózní index a antioxidanty jsou běžnými aditivami používanými v motorových olejích [7].

Motorový olej vyžaduje periodickou výměnu, aby byl zachován správný chod motoru. Příliš vysoká ale i nízká teplota přispívá ke snížení životnosti samotného oleje, přičemž teplota v optimálním rozsahu poskytuje nejdelší životnost.

### Olejový filtr

Olejový filtr (Obr. 2.3) je umístěn v olejovém okruhu tak, aby zachytával částice, které by se mohli poškodit motor, obvykle v blízkosti olejové vany pod blokem motoru [7].



Obr. 2.3 Olejový filtr a olejový chladič [7].

### 2.2.3 Přenos tepla do motorového oleje

Hlavními zdroji přenosu tepla do motorového oleje ve spalovacím motoru jsou písty a tření mezi pohyblivými součástmi. Písty jsou jediné olejem chlazené komponenty v motoru, které odebírají teplo přímo ze spalovacího procesu. Když je palivo ve spalovací komoře zapáleno, část energie se přemění na mechanickou energii, část energie ve formě tepla je odváděna ve výfukových plynech a zbylá energie ve formě tepla je předána konvekcí a radiací do částí sousedící se spalovací komorou. Hlavní komponenty tvořící spalovací komoru a odebírající teplo z ní jsou, hlava válců, blok válců a písty. Hlava válců a blok válců jsou chlazeny systémem vodního chlazení, zatímco písty jsou chlazeny motorovým olejem. Obr. 2.4 a Obr. 2.5 znázorňují rozdílné tvary pístu u spalovacího a zážehového motoru [7].



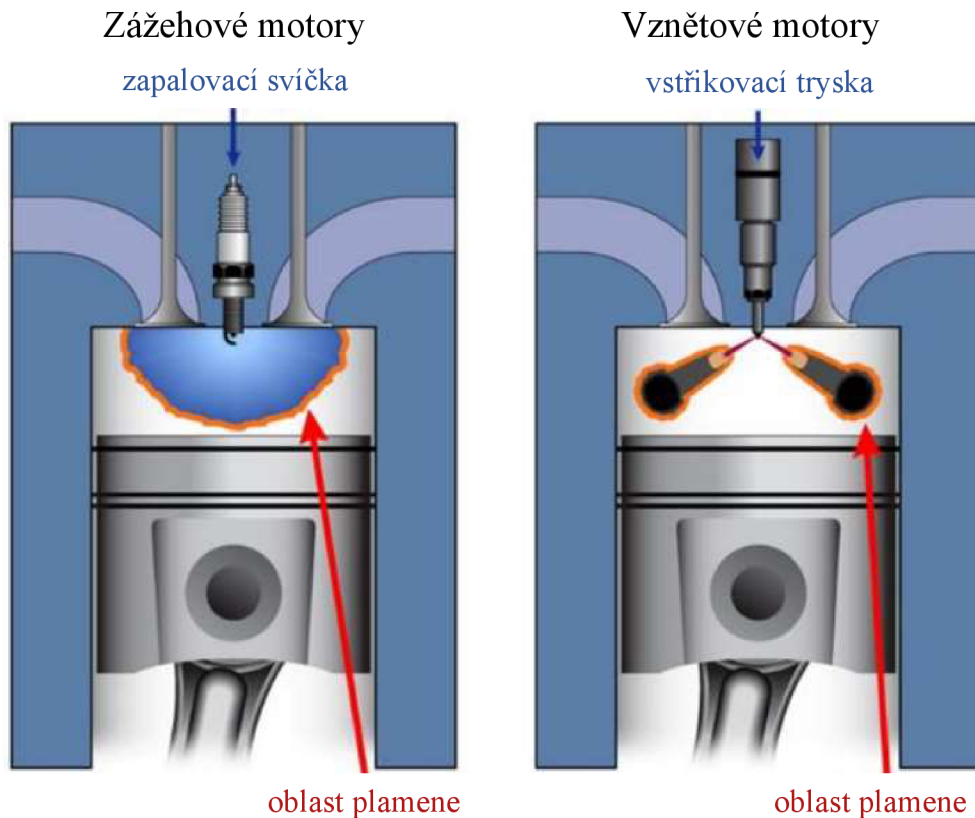
Obr. 2.4 Píst zážehového motoru [7].



Obr. 2.5 Píst vznětového motoru [7].

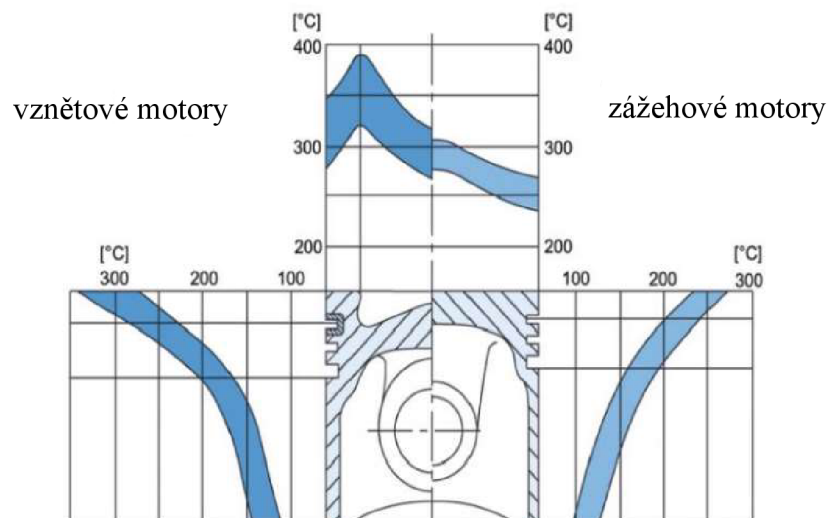
Spalování v benzínovém motoru je iniciováno zapalovací svíčkou, která vznítí směs paliva a vzduchu. Plamen se bude rozšiřovat rovnoměrně ve všech směrech od svíčky, teplotní pole v pístu bude v důsledku toho rovnoměrné [7].

Vzhledem k tomu, že vznětové motory jsou kompresně zapalované, iniciované vysokou teplotou ve spalovací komoře, čelo plamen se začne šířit v oblasti vstříkovací trysky. Několik čel plamenů bude iniciováno podél vstříkovacích proudů paliva směrem k povrchům obklopujících spalovací komoru. Teplotní pole v pístu bude nerovnoměrné. Rozdíl v zapalování vznětového a zážehového motoru je patrný na Obr. 2.6 [7].



Obr. 2.6 Zapalování ve vznětovém a zážehovém motoru [7].

Teplotní zatížení u pístů zážehových motorů je maximální ve středu pístu. Teplota klesá rovnoměrně směrem k okraji pístu. Písty vznětových motorů čelí nejvyšším teplotám na okraji spalovací komory. Teplota klesá rovnoměrně směrem ke středu i okraji pístu. Vzhled teplotního profilu (Obr. 2.7) je zejména závislý na orientaci, počtu a úhlu vstřikovacích otvorů, ale také na vstřikovacím tlaku, času a geometrii spalovací komory [7].



Obr. 2.7 Teplotní profil pístů [7].

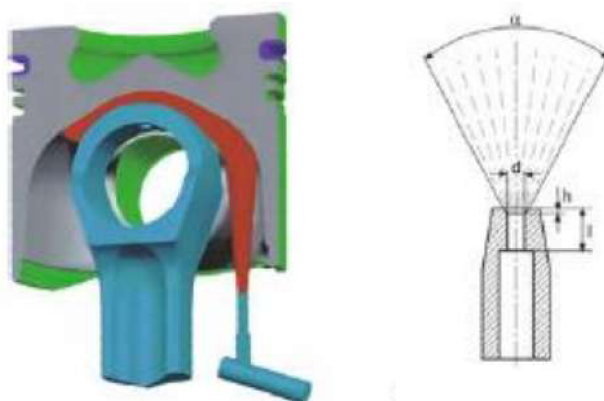


## 2.2.4 Chlazení pístů

Tepelné zatížení v pístu může být zvýšeno jen do určité míry, při nadměrném zatížení dojde k negativním vlivům, které mohou ovlivnit funkci pístu a v extrémních případech vést i k destrukci komponent. Chlazení pístů je proto standardní výbavou dnešních motorů [7].

### Chlazení ostřikem

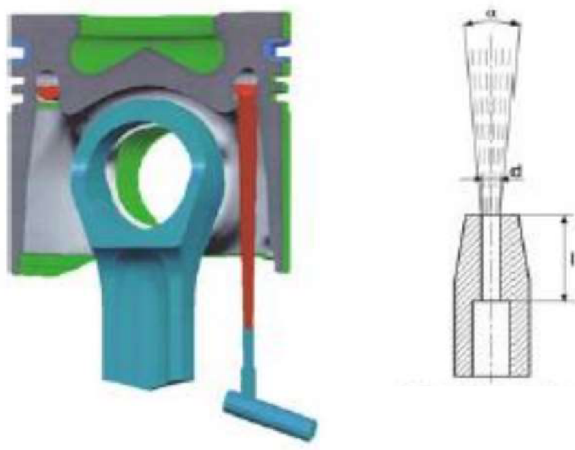
Obr. 2.8 ukazuje nejjednodušší způsob chlazení pístu motorovým olejem, chlazení ostřikem, pod píst je namontovat rozprašovací trysku, která je připojena k olejovému systému a rozstříkuje olej v širokém úhlu do spodní části pístu. Daný typ chlazení se používá převážně pro benzínové motory a dieselové motory s nižším výkonem [7].



Obr. 2.8 Chlazení ostřikem [7].

### Chlazení pístu chladícím kanálem

V případě potřeby většího chlazení, obvykle pro písty vysoce výkonných vznětových motorů, se používají písty s chladícím kanálem (Obr. 2.9). Chladící kanál má prstencový tvar a olejová tryska vstříkne koncentrovaný proud oleje do vstupu kanálku, čímž se vytváří uvnitř kanálku proudění, které odebírá teplo z pístu do oleje [7].

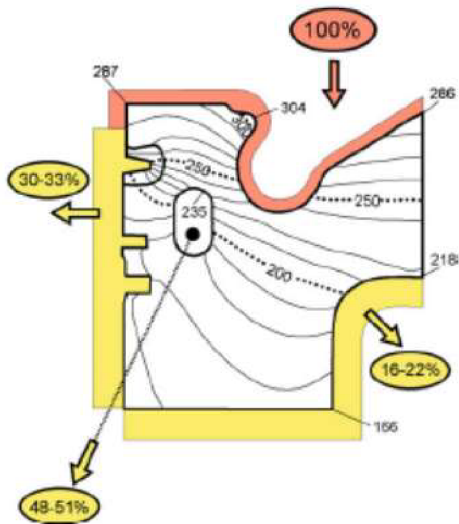


Obr. 2.9 Chlazení pístů chladícím kanálem [7].

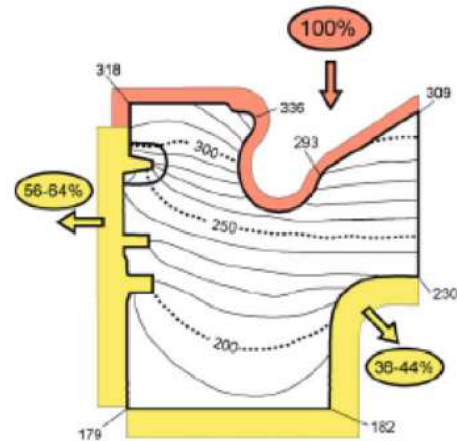
### Tepelný tok v pístu

Obr. 2.10 znázorňuje píst chlazený chladícím kanálkem. Do stěny válce se přenáší podstatně menší množství tepelné energie, přibližně 30-33 %. Olej v kanálku odebírá 48-51 % a zbytek se přenáší do okolního vzduchu a oleje v klikové skříni [7].

Obr. 2.11 znázorňuje píst chlazený ostřikem, kde je 56-64 % tepla odvedeno přes píst do stěny válce. Toto teplo bude nakonec absorbováno kapalinou v chladícím systému motoru. 36-44 % tepla je přeneseno do oleje a vzduchu v klikové skříni [7].



Obr. 2.10 Tepelný tok a teploty v pístu chlazeným chladícím kanálkem [7].



Obr. 2.11 Tepelný tok a teploty v pístu chlazeným ostřikem [7].

### 3 Polymery

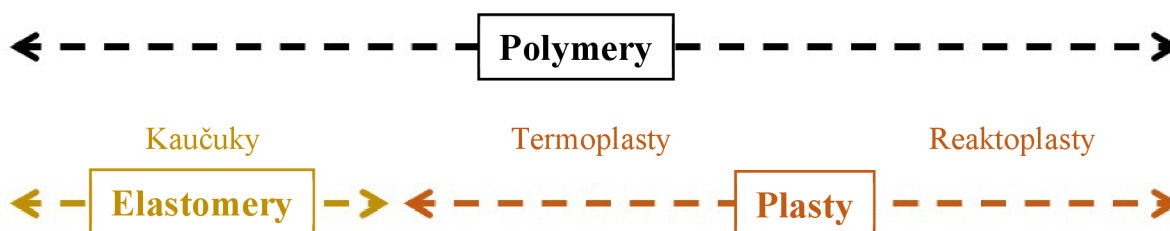
Věda o polymerech se zrodila z potřeby vyrábět a pochopit nové druhy plastů, pryže, lepidel, vláken a povlaků. To vypovídá již od začátku o praktičnosti výzkumu. Polymery dnes tvoří základ oděvů, automobilových dílů a podobně. V současnosti lze také sledovat posun od teorie k novým aplikacím, jako jsou aplikace například v elektrotechnice a požární odolnosti [11].

Chemicky jsou polymery molekuly s dlouhým řetězcem o velmi vysoké molekulární hmotnosti. Ve svých molekulách obsahují většinou atomy uhlíku, vodíku a kyslíku, dusíku a jiných prvků [11] [12].

#### 3.1 Dělení polymerů

Polymery je možné rozdělit na přírodní a syntetické. Přírodními polymery můžeme myslet například bavlnu, škrob, proteiny a vlnu. První významné syntetické polymery byly bakelit a nylon, které ukázali obrovské možnosti nových materiálů. Vědci si však uvědomovali, že nerozumí mnoha vztahům mezi chemickými strukturami a fyzikálními vlastnostmi. Díky vědomosti potenciálu využití se iniciovaly značné výzkumy, které dnes tvoří základ fyzikálních polymerních věd [11].

Další možné dělení polymerů v závislosti na chování při běžné a zvýšené teplotě představuje Obr. 3.1. Elastomer se vyznačuje vysokou elasticitou za běžných podmínek, lze ho tedy deformovat s malým odporem, přičemž deformace je převážně vratná. Charakteristickým příkladem elastomerů jsou kaučuky. Naopak plasty jsou při běžných teplotách netvárné. S rostoucí teplotou se stávají tvarovatelnými. Plasty, které vykazují schopnost opakované změny z plastického stavu do tuhého se nazývají termoplasty. V případě, že jde o změnu nevratnou, protože je výsledkem chemické reakce, mluvíme o reaktoplastech [12].



Obr. 3.1 Dělení polymerů z hlediska jejich chování za běžné a zvýšené teploty.

#### 3.2 Syntéza polymerů

Vznik syntetických polymerů je iniciován třemi chemickými reakcemi, konkrétně polymerací, polyadící nebo polykondenzací.

##### 3.2.1 Polymerace

Polymerace je řetězová chemická reakce velkého počtu molekul monomeru. Monomery lze rozdělit podle počtu funkčních vazeb, to následně ovlivňuje strukturu výsledného polymeru. Při polymeraci vznikají dlouhé makromolekuly polymeru. [12]

##### 3.2.2 Polyadice

Sloučeniny, jejichž molekuly obsahují násobné vazby, nebo jsou tvořeny kruhy s malým počtem členů, mohou být mimo vzájemného spojování schopny adičních reakcí se sloučeninami, jejichž molekuly obsahují vhodné funkční skupiny. Mají-li tyto sloučeniny ve

svých molekulách alespoň dvě funkční skupiny, může mnohonásobnou adicí vzniknout polymer [12].

### 3.2.3 Polykondenzace

Polykondenzace je sled stejných opakujících se reakcí funkčních skupin výchozích látek, při této reakci vzniká ze dvou nízkomolekulárních látek polymer a jiná nízkomolekulární látka, většinou voda [12].

U polymerace má produkt stejné chemické složení jako výchozí monomer, naproti tomu u polykondenzace má jiné chemické složení než nízkomolekulární látky, ze kterých vznikl [12].

Polykondenzace se využívá například pro výrobu bakelitu, polyesteru nebo PET lahví [12].

### 3.3 Výroba polymerů

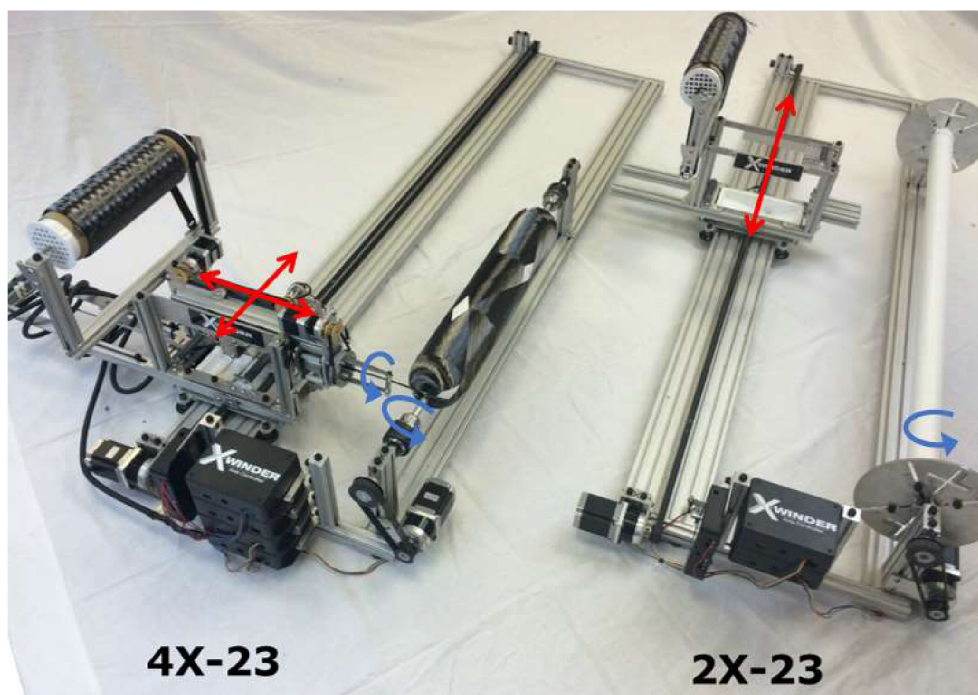
Při výrobě polymerů je uvolňováno teplo, jedná se tedy o exotermickou reakci, které je potřeba reakční směsí odvádět. Chemicky nejjednodušší je polymerace samotného monomeru. V případě, že je polymer v monomeru rozpustný začne s rostoucí polymerací roztok tuhnout až po úplné ztuhnutí. Polymer následně zaujímá tvar reakční nádoby. V opačném případě, kdy se polymer nerozpustí ve výchozím monomeru, vylučuje se v jemných částicích. Daný proces je označován jako polymerace v monomerní fázi. Pokud je k monomeru přidáno vhodné rozpouštědlo vznikne roztok polymeru, takzvaná roztoková polymerace. Další způsoby polymerace jsou emulzní polymerace a suspenzní polymerace. Způsob polymerace ovlivňuje výsledné vlastnosti, a proto se vždy volí s ohledem na konečné použití [12].

## 4 Konstrukce olejového chladiče z polymerních dutých vláken

### 4.1 Navíjecí zařízení X-Winder

Pro konstrukci navrhovaného chladiče bylo využito zařízení X-Winder, které slouží k navíjení filamentu. Stroje na navíjení filamentu byly zkonstruovány již během dobývání vesmíru v 60. letech minulého století, avšak jejich rozměry by se dali přirovnat k velikosti nákladního automobilu a jejich cena byla velmi vysoká. Jejich rozsáhlejší použití tedy bylo zmíněnými faktory významně omezeno, v současnosti je jejich využití přístupné i širší veřejnosti.

Společnost X-Winder LLC nabízí dva typy navíjecích zařízení, dvouosé zařízení 2X-23 a čtyřosé zařízení 4X-23 (Obr. 4.1), která je možné vylepšit pomocí další sady kterou společnost nabízí. Vylepšení stroje spočívá především v možnosti navíjení větších průměru a možnosti rychlejšího navíjení díky novým motorům.

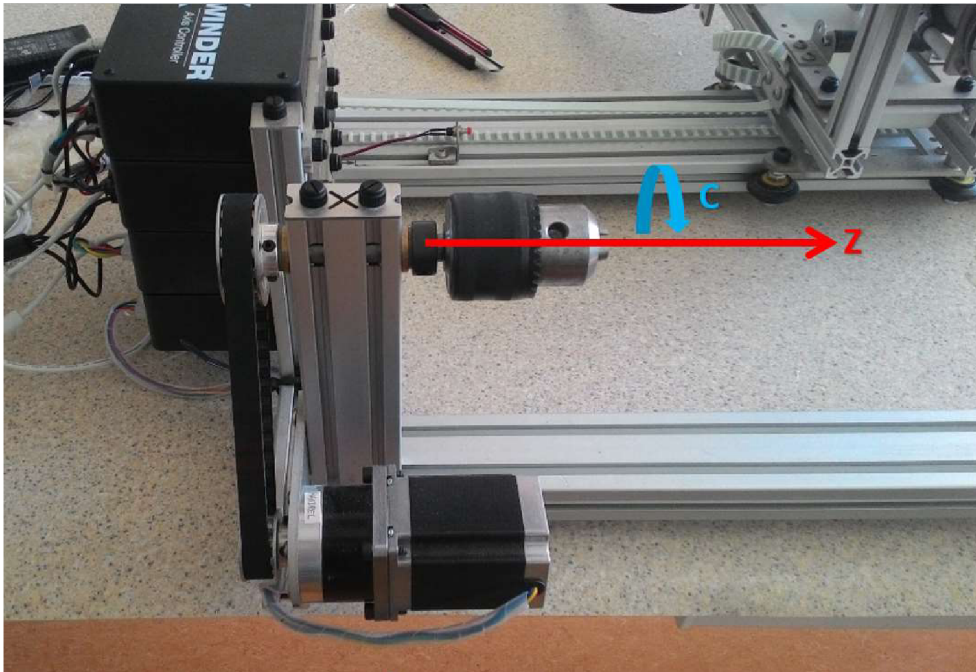


Obr. 4.1 Navíjecí zařízení 4X-23 a 2X-23 se zobrazenými osami pohybu [3].

Laboratoře přenosu tepla a proudění Vysokého učení technického v Brně disponuje zařízením 4X-23, které bylo použito pro výrobu navrhnutého chladiče z polymerních dutých vláken. Hlavní části tohoto zařízení jsou umístěny ve třech funkčních blocích, blok pro držení navíjeného přípravku, blok pro navíjení materiálu a blok pro pohyb jednotky s navíjecím materiálem.

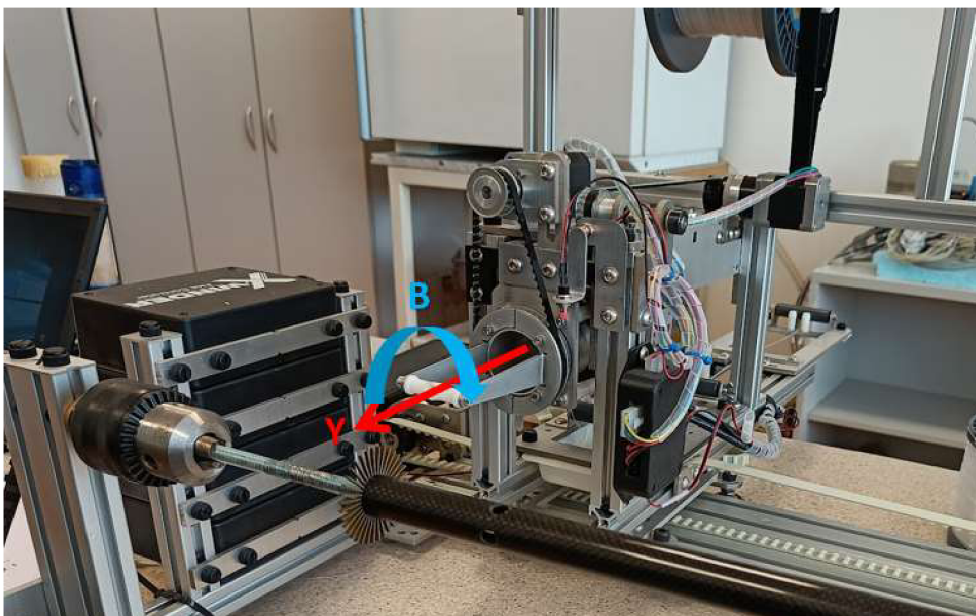
Blok pro držení navíjeného zařízení se skládá z elektromotoru, vřetene, řemenového pohonu, rámu, sklíčidla aj. Blok zajišťuje rotační pohyb kolem osy Z, tedy pohyb v ose rotace C, viz Obr. 4.2.





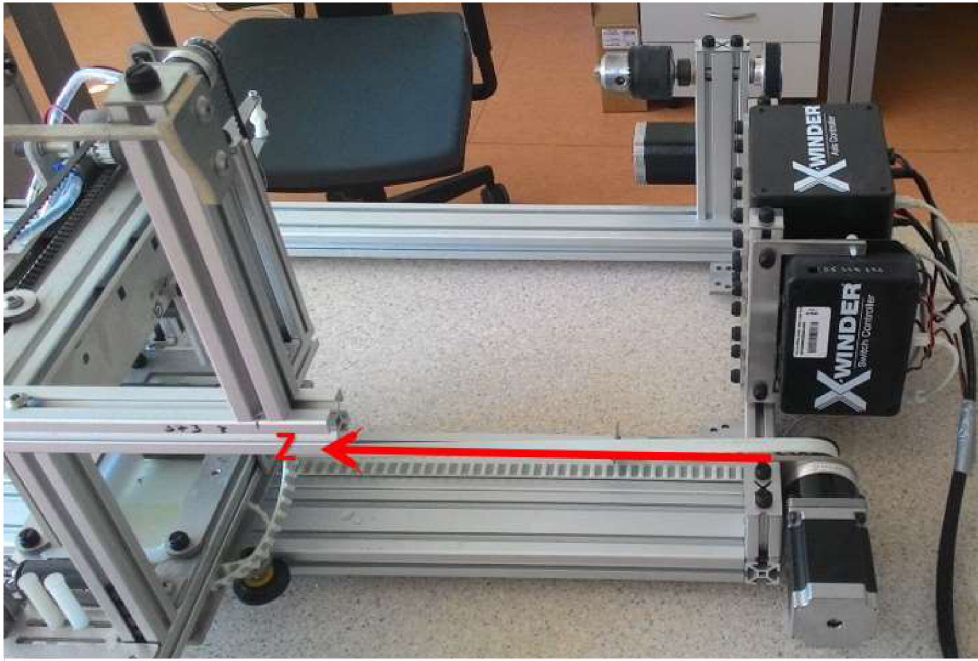
Obr. 4.2 Rotační pohyb v ose rotace C.

Blok pro navíjený materiál obsahuje cívku s navíjeným materiálem, v případě konstrukce tepelného výměníku se jedná o dutá vlákna z polyamidu pro konstrukci funkční části a skleněná vlákna pro navíjení vnějšího povrchu zařízení. Součástí je dále vanička s lepidlem, vodící válce, nůž pro odstranění přebytečného lepidla z vláken, podávací hlava a dva elektromotory. Elektromotory umožňují pohyb podávací hlavy v ose Y a zároveň rotační pohyb kolem osy Z, tedy pohyb v ose otáčení B, viz Obr 4.3 Obr 4.3.



Obr 4.3 Pohyb ve směru osy Y a rotační pohyb v ose rotace B.

Blok pro pohyb jednotky s navíjeným materiálem a podávací hlavy se skládá z řemenového pohonu, lineárního vedení a elektromotoru, který umožňuje pohyb ve směru osy Z, viz Obr. 4.4.

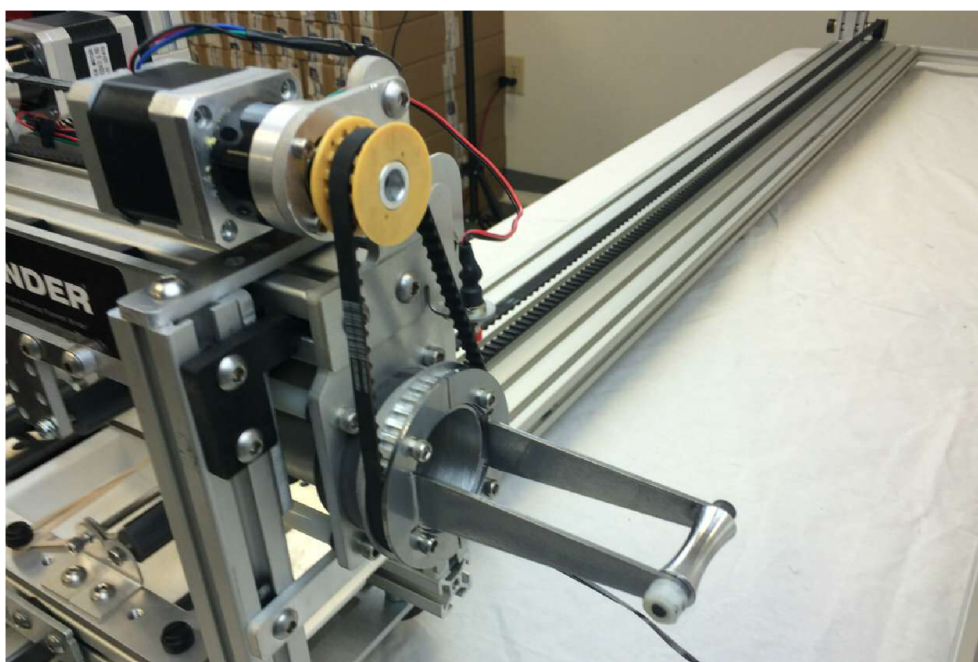


Obr. 4.4 Pohyb ve směru osy Z.

Zařízení dále zahrnuje elektronické vybavení ve formě řídicího systémů.

#### 4.2 Úprava navíjecího zařízení

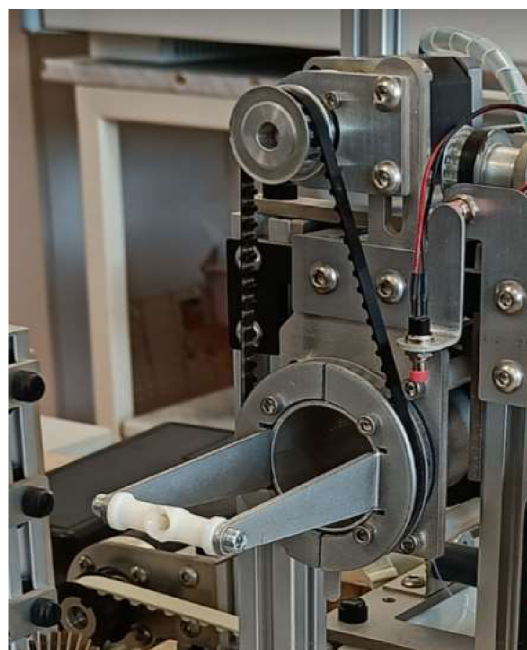
X-Winder není navržen pro výrobu tepelných výměníků z polymerních dutých vláken, proto byly některé konstrukční prvky upraveny. Na Obr. 4.5 Obr. 4.5 je zobrazena konstrukce původní podávací hlavy, která byla nahrazena novými podávacími hlavami. Nový design navíjecí hlavy, Obr. 4.6 Obr. 4.7, je používán pro navíjení skleněného vlákna tvořící obal výměníku. Vylepšená konstrukce zabraňuje sklouznutí skleněného vlákna během navíjení. Druhý nový design, Obr. 4.7, je používána pro navíjení dutých vláken a zdokonalení konstrukce vede k možnosti přesnějšího nastavení vláken v průběhu navíjení.



*Obr. 4.5 Původní konstrukce navijecí hlavy [3].*



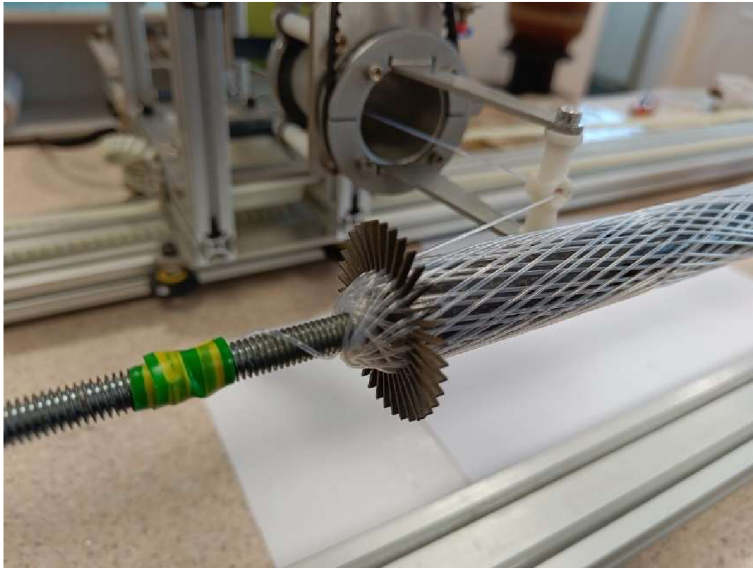
*Obr. 4.6 Navijecí hlava určená pro navijení skleněného vlákna.*



*Obr. 4.7 Navijecí hlava určená pro navijení polymerních dutých vláken.*



Při navíjení dutých vláken docházelo na konci navíjeného výměníku ke sklouzávání vláken vlivem otáčejícího se vřetene a následně tedy k nerovnoměrnému rozložení vláken. Proto byl již dříve vyroben přípravek, Obr. 4.8, umožňující nastavení přesné pozice vláken a jejich konečný počet v každé z pozic přípravku. Při procesu navíjení zapadne vlákno do předem určené mezery a následně při otáčení vřetene nedojde k jeho sklouznutí na jinou pozici. Obr. 4.9 znázorňuje použití přípravku v průběhu navíjení.



Obr. 4.9 Použití přípravku proti sklouzávání dutých vláken v průběhu navíjení.



Obr. 4.8 Přípravek proti sklouzávání dutých vláken.

### 4.3 Porovnávání chladič

Navržený chladič v diplomové práci bude porovnán s olejovým chladičem určeným pro závodní automobily, konkrétně pro vůz Škoda S2000. Obr. 4.10 zobrazuje konstrukci chladiče. Hlavní komponenty olejového chladiče je tělo chladiče, příruby, těsnění, podložky, přepážka a šrouby, viz Obr. 4.11.



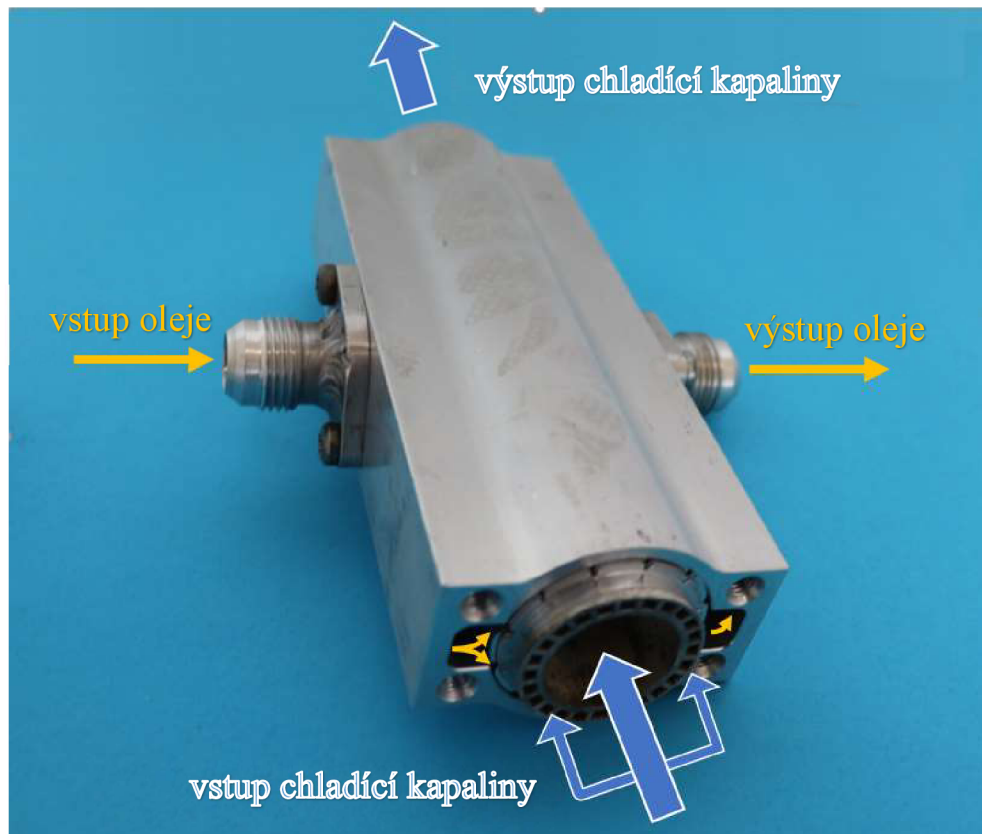
Obr. 4.10 Olejový chladič určený pro závodní automobil.



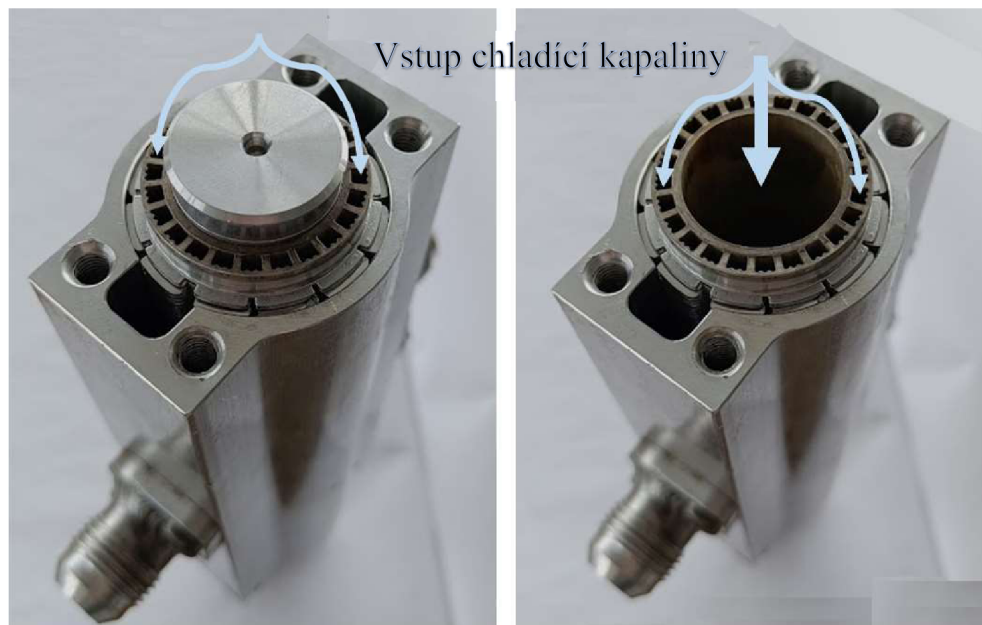
*Obr. 4.11 Hlavní komponenty olejového chladiče pro závodní automobil.*

Princip fungování chladiče je zobrazen na Obr. 4.12. Ohřátý olej z motoru proudí do chladiče, kde je rozveden kanálkem do mezikruhového prostoru. Mezikruhový prostor je opatřen žebry za účelem zvýšení měrného tepelného výkonu výměníku. Chladicí kapalina proudí obvykle v kanálcích v mezikruhovém prostoru. Vysoký průtok chladicí kapaliny ovšem způsobuje vzhledem k poměrně nízkému průtokovému průřezu mezikruhových kanálků velké tlakové ztráty. Olejový chladič disponuje odnímatelnou přepážkou, která v případě požadavku na snížení tlakové ztráty může být odebrána. V daném případě se značně zvětší průtočný průřez a to vede ke snížení rychlosti proudění chladicí kapaliny a následně i ke snížení tlakových ztrát. Vzhledem k poměrně velkému průřezu přepážky v poměru s mezikruhovými kanálky dojde nejen k výraznému poklesu tlakové ztráty ale zároveň i k poklesu měrného tepelného výkonu. Vzhledem k jednoduchosti konstrukce přepážky se nabízí možnost kombinace obou zmíněných uspořádání spočívající ve formě vytvoření otvoru v přepážce.

Obr. 4.13 zobrazuje rozdíl v případě proudění chladicí kapaliny při využití přepážky a bez využití přepážky.



Obr. 4.12 Princip funkce olejového chladiče závodního automobilu.



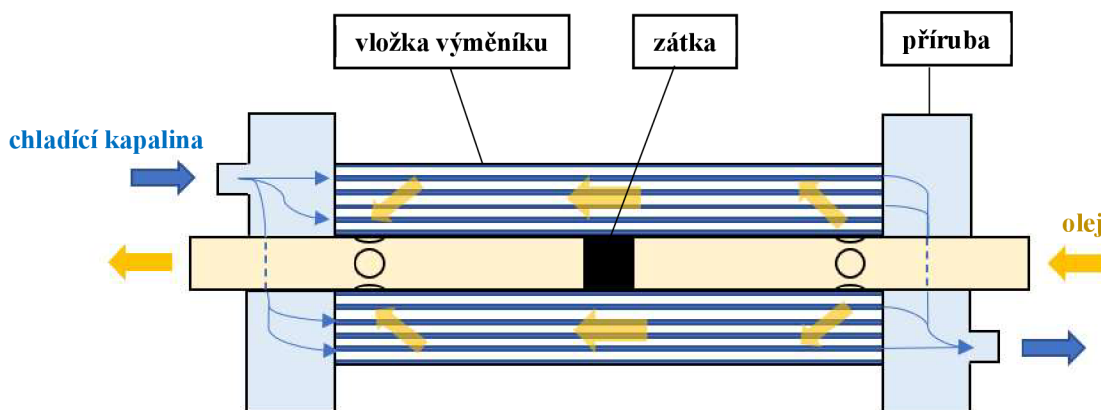
Obr. 4.13 Princip funkce přepážky v olejovém chladiči.



#### 4.4 Navržení parametrů chladiče

Primárním cílem navrženého chladiče je dosáhnout dostatečných tepelných výkonů v porovnání s reálně využívaným olejovým chladičem pro závodní automobily a tím zajistit dostatečné chlazení oleje ve výměníku. Délka funkční části navrženého chladiče byla zvolena identicky jako u porovnávaného chladiče, avšak pro navržený chladič byly využity vstupní a výstupní příruby, které výrazně zvětší celkovou délku výměníku. Příruby byly vyrobeny ze sklotextitu. Sklotextit je levný, dobře lepitelný, ale zároveň těžký materiál. I přes zmíněnou poslední negativní vlastnost je materiál vhodný a to především pro laboratorní použití.

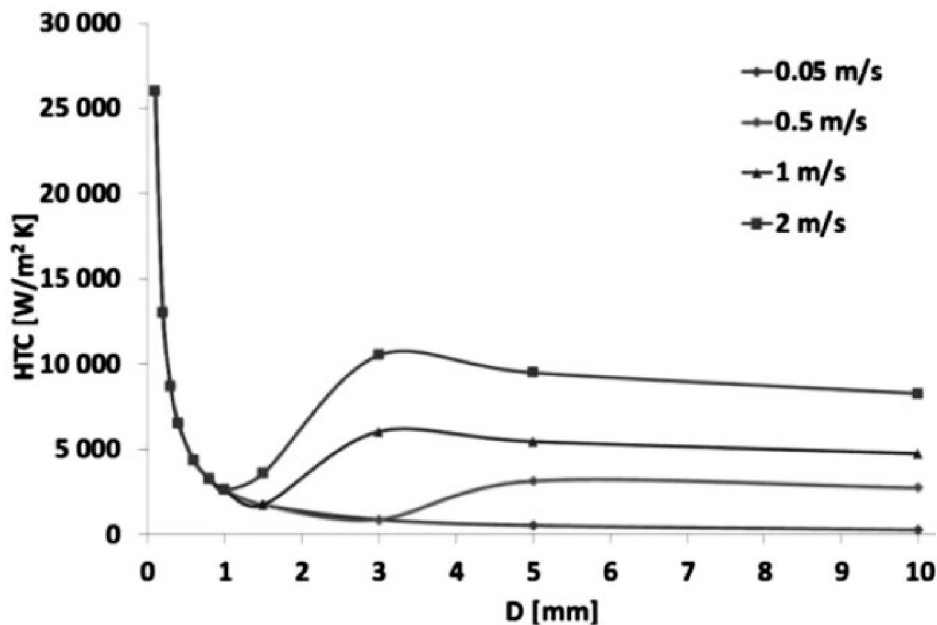
Navržený olejový chladič je konstrukčně podobný svazkovému výměníku a výměníku typu trubka v trubce. Obr. 4.14 zobrazuje schéma principu funkce navrženého výměníku. Vlivem vysoké viskozity oleje je navrženo proudění oleje vně polymerních dutých vláken. V případě proudění oleje v dutých vláknech by vlivem vysoké viskozity a malého vnitřního průměru vláken mohlo docházet k velkým tlakovým ztrátám. V dutých vláknech se proto předpokládá proudění chladicí kapaliny. Olej vstupuje do chladiče vnitřní trubkou z karbonu, ve které je celkem 8 otvorů. Čtyři otvory zajišťují vstup oleje do aktivní části výměníku, kde dochází ke kontaktu samotného oleje a polymerních dutých vláken, respektive chladicí kapaliny. A čtyři otvory pro samotný odvod ochlazeného oleje z aktivní části výměníku.



Obr. 4.14 Schéma navrženého olejového chladiče.

Navržený výměník je navržen s kombinovaným prouděním. Chlazená látka vstupuje do aktivní části chladiče křížovým prouděním a následně proudy pracovních látek směřují proti sobě, vzniká tedy protiproudé proudění. Protiproudé výměníky obecně dosahují vyšších tepelných výkonů, a proto jsou využívány u většiny aplikací.

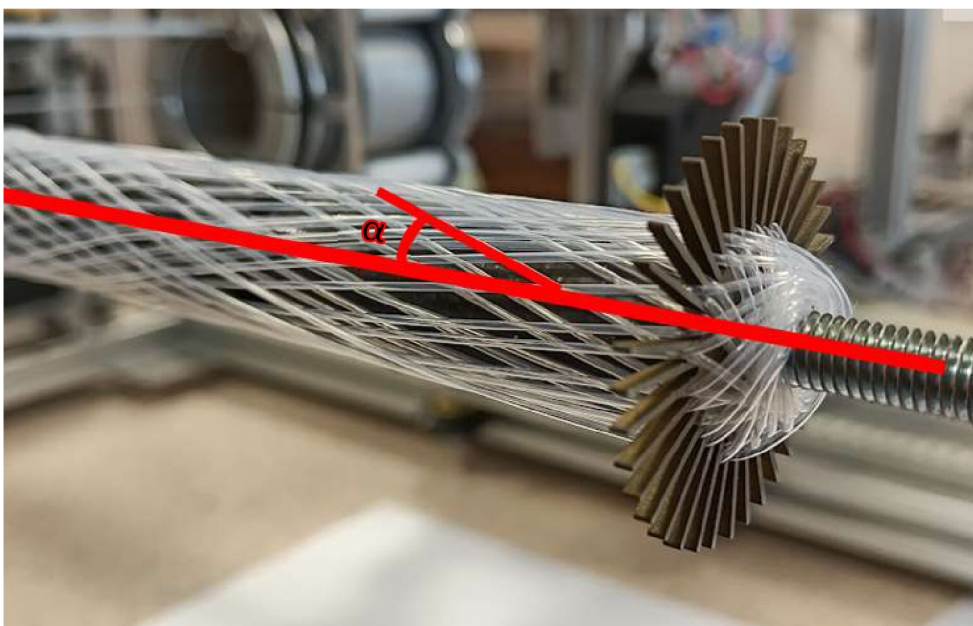
Pro konstrukci navrženého výměníku byly použity dutá vlákna z Polyamidu 11. Vnitřní průměr vláken je 0,8 mm a vnější je 1 mm. Celkový tepelný odpor u vláken je stanoven jako součet tepelného odporu prostupu tepla z pracovního média vně vláken do stěny vlákna, tepelného odporu vláken a tepelného odporu prostupu tepla ze stěn vláken do pracovního média. Vzhledem k malému průměru vláken se považují vlákna jako kapilární trubice. Kapilární trubice se uvnitř trubiček vyznačují velkým součinitelem přestupu tepla. Tepelný odpor stěny je závislý na tepelné vodivosti materiálu a poměru vnějšího a vnitřního průměru vlákna. Polyamid 11 má poměrně nízkou tepelnou vodivost, avšak tloušťka stěny je pouze 0,1 mm. V případě snižování tloušťky stěny za účelem redukce tepelného odporu stěny může docházet k negativní jevům, které jsou spojené především se spolehlivostí. Obr. 4.15 zobrazuje závislost součinitele přestupu tepla uvnitř vláken na průměru vlákna [13].



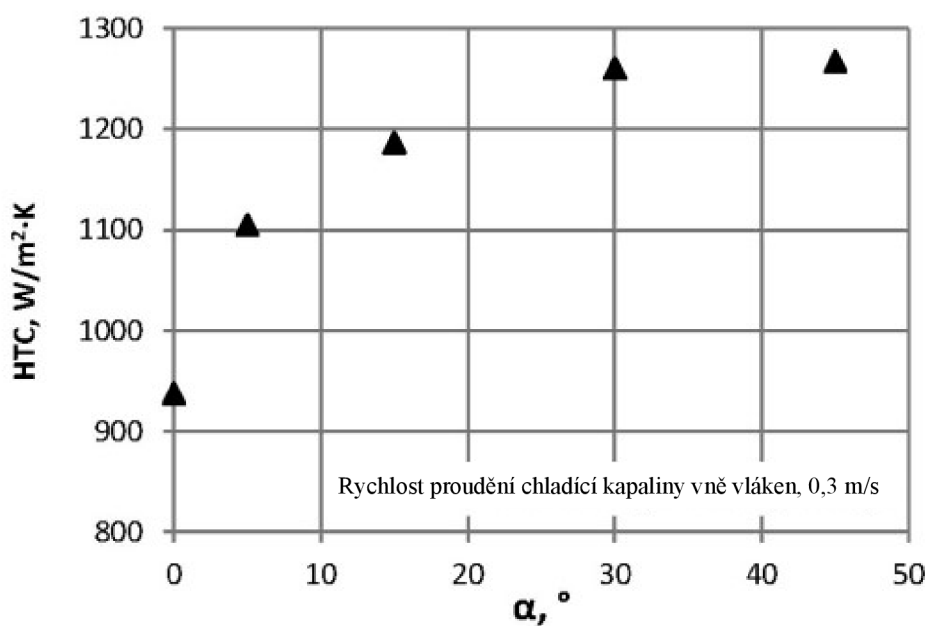
Obr. 4.15 zobrazuje závislost součinitele přestupu tepla uvnitř vláken na průměru vlákna [13]

Navržená dutá vlákna budou mít v aktivní části sklon vláken vzhledem k ose výměníku (Obr. 4.16) za účelem zvětšení měrného tepelného výkonu. Sklon vláken se bude ve vrstvách výměníku měnit, vlákna v první vrstvě budou dosahovat sklonu  $5^\circ$  a vlákna v poslední vrstvě výměníku budou dosahovat sklonu  $30^\circ$ , difference sklonu vláken je způsobena navrženým principem navíjení za účelem vytvoření pravidelné struktury vláken ve všech vrstvách výměníku.

Dříve publikovaná studie prezentuje, že sklon vláken o pouhých  $5^\circ$  způsobí značný nárůst součinitele prostupu tepla samotných vláken, viz Obr. 4.17. Součinitel prostupu tepla se výrazně zvětšuje především po počáteční iniciaci sklonu samotných vláken a při vyšších hodnotách sklonu je jeho hodnota téměř konstantní. Z grafu je zřejmé, že v případě sklonu vláken nad  $30^\circ$  nedochází k nárůstu součinitele přestupu tepla [13].



Obr. 4.16 Sklon vláken vzhledem k ose výměníku.



Obr. 4.17 Součinitel prostupu tepla vláken na základě sklonu vláken pro pracovní medium voda-voda [13].

Počet vláken v aktivní části výměníku nebyl exaktně stanoven při návrhu. Práce má za cíl vytvořit rozměrově podobný chladič, respektive rozměrově podobnou aktivní část obou chladičů, tedy bez uvažování přírub jednotlivých výměníků. Konečný počet vláken byl tedy stanoven na základě snahy nepřesáhnout rozměr porovnávaného chladiče. Do výměníku se vešlo 610 vláken

#### 4.4.1 Navržení počtu vláken

V případě návrhu výměníku bez ohledu na výsledné rozměry by byla využita metoda LMTD. K výpočtu požadovaného počtu vláken je potřeba znát požadované vstupní a výstupní teploty pracovních médií, součinitel prostupu tepla a požadovaný tepelný výkon výměníku. Rovnice 4.1 zobrazuje základní rovnici pro výpočet tepelného výkonu pro metodu LMTD. [1]

$$P = U \cdot S \cdot \Delta T_{ln} \quad (4.1)$$

Rovnice 4.1 platí pouze pro případ souproutého nebo protiproutého proudění. Pro přesnější návrh by bylo potřeba stanovit korekční faktor. Ze znalosti vstupních a výstupních teplot by byl vypočten střední teplotní logaritmický spád  $\Delta T_{ln}$  (Rovnice 4.2).

$$\Delta T_{ln} = K \cdot \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (4.2)$$

Poslední potřebná veličina pro získání požadované délky vlákna výměníku, respektive celkového počtu vláken, je součinitel prostupu tepla (Rovnice 4.3).

$$U = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_{IN} \cdot d} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{PA}} \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right) + \frac{1}{\alpha_{OUT} \cdot D}} \quad (4.3)$$

Jmenovatel součinitele prostupu tepla je tvořen třemi částmi. První část zahrnuje konvekci na vnitřní straně dutého vlákna, druhá část reprezentuje vedení v polymerním dutém vláknu a poslední složka představuje vedení na vnější straně polymerního dutého vlákna.

Za účelem výpočtů součinitelů přestupů tepla na vnitřní straně dutého vlákna je potřeba stanovit vlastnosti pracovního média pro předpokládanou střední teplotu pracovního média. Je potřeba stanovit hodnotu hustoty, rychlosti proudění, kinetické viskozity, tepelnou vodivost pracovních médií a Prandtlova čísla.

V následující části je potřeba výpočet dalších bezrozměrných veličin jako je Reynoldsovo číslo a Nusseltovo číslo. Po určení zbylých parametrů pro správnou volbu rovnice pro výpočet součinitele přestupu tepla získáme již samotnou hodnotu součinitele přestupu tepla.

Pro druhou část výpočtu součinitele prostupu tepla, zabývající se vedením, je potřeba určit tepelnou vodivost materiálu.

Návrh podle LMTD byl poměrně zjednodušen, ale i přesto je výpočet poměrně složitý. Chybovost výpočtu zvyšují některé další faktory. Například hodnota rychlosti proudění na vnější straně vláken nejde přesně stanovit. Výpočet také nezahrnuje chybovost vláken, kde může docházet při výrobě k zacpání některých vláken. Výpočet také nezahrnuje korekci počtu vláken horní vrstvy, které bývají vlivem navíjení pláště znehodnoceny.

#### 4.5 Řízení navíjecího zařízení

Navíjecí zařízení X-Winder 4X-C je řízeno příkazy napsanými v programovacím jazyku G-kód. Základní příkazy v jazyku jsou poměrně jednoduché, avšak při využití komplexnějších příkazů může být pochopení významu příkazů značně složité. G-kód má více variant a jeho specifické příkazy se můžou u ovládaných zařízení lišit. Jazyk našel své široké uplatnění v ovládání obráběcích zařízení jako jsou frézky nebo soustruhy. Vytvořený G-kód se skládá z jednotlivých příkazů vytvořených vždy na jednom řádku, ty jsou zpracovávány pomocí řídicí jednotky, která následně vytváří pohyb pomocí motorů v jednotlivých částech zařízení na základě jednotlivých příkazů.

Společnost X-Winder LLC ke každému zařízení dodává i software X-Winder Desinger určený k jednoduchému ovládání. Aplikace umožňuje uživateli nastavení přesných parametrů geometrie pro navíjení filamentu. Po zadání požadovaných hodnot do aplikace je vygenerován G-kód, který po spuštění programu řídí proces.

X-Winder Desinger ovšem není schopen pracovat s měnicím se průměrem navíjené vložky chladiče, respektive jádra výměníku z polymerních dutých vláken, při postupném navíjení jednotlivých vrstev vláken a zároveň jeho použití nebylo navrženo pro práci s přípravkem, který nám umožňuje rovnoměrné rozložení vláken. V případě využití softwaru pro generování G-kódu je potřeba vygenerovat několik jednotlivých kódů a ty následně manuálně upravit a spojit. Manuální úprava se sebou nese riziko kolize zařízení a především velmi obtížné možnosti vytvoření pravidelné a opakovatelné struktury dutých vláken pro konstrukci více výměníků. S nepravidelností struktury se pojí špatná schopnost porovnání jednotlivých chladičů s různou strukturou a následně tedy i možnosti vylepšení a porovnání jednotlivých výměníků.

V rámci diplomové práce byly vytvořeny celkově tři programy napsané v jazy G-kód pro celkové navinutí tepelného výměníku. První G-kód byl vygenerován pomocí programu vytvořeném v programovacím jazyku Python. Program byl vytvořen v rámci diplomové práce a jeho účelem je vytvoření funkční části výměníku na základě zadaných parametrů. Druhý G-kód byl vygenerován pomocí softwaru X-Winder Desinger a slouží pro navíjení pláště výměníku. Třetí G-kód byl vygenerován pomocí programu vytvořeném v Pythonu v rámci práce a jeho účelem je vytvoření pomocných ploch, které budou využity při následném zasazení funkční části výměníku do vstupní a výstupní hlavy.

##### 4.5.1 Navržený pohyb navíjecího zařízení při navíjení vložky výměníku

Vygenerovaný G-kód obsahuje na začátku svého programu příkazy, které zajistí správné fungování programu, ovšem na procesu navíjení nemají žádný vliv.

```
[G-CODE GENERATED BY PYTHON on 2022-04-25 11:08:14.113859]
[Description = navíjení vložky vymeniku]
[FileName = jadro.csv]
[Units are in MILLIMETERS]
[FilePath = C:\Users\filip\Desktop\PYTHON \jadro.csv]
[GENERAL PART DESCRIPTION: Diameter = 44.0 mm]
[GENERAL PART DESCRIPTION: TotLen = 193116.0 mm]
[GENERAL PART DESCRIPTION: FilaDiameter = 1 mm]
[---]
[INITIALIZE WINDING SESSION]
C C1 [DECIMAL COMMA FORMAT = YES]
G21 [Units are Millimeters]
G90 [Absolute Positioning]
X V417,000 T4 Z47,752
```



```
[ENABLE STEPPERS AND MOVE TO STARTING POSITION]
M17 [Enable Steppers]
G1 I10 J10 K10 N10 O10 T10 [Linear and Angular Acceleration Settings of Axes]
G28 E50,800 R4 F25,400 C0,00 [Move Axes to Limit Switches]
G4 P1000 [Pause 1s at Carriage Limit Switch]
G1 J1,250 K1,250 O1,250 T10 [Set Axes Accels]
G4 Z P1000 [Pause 1s]
G1 F15,40 Z110,00 Y28,00 E15,40 B90,00 R10 S0
[BEGIN 4-AXIS WINDING WITH FLAT ENDS]
D0 ST=Winding Schedule
M0 [Wait for Button Press to Begin Winding Schedule]
M601 [MARK THE MANDREL REFERFENCE ANGLE]
```

Následuje část programu, která již generuje samotný pohyb navíjecího zařízení. Jeden příkazový blok G-kódu, zajišťující samotné navíjení vložky výměníku, obsahuje čtrnáct příkazů, které se v programu opakují v závislosti na navrhnutém počtu dutých vláken výměníku. Jeden blok zajistí navinutí dvou vláken výměníku.

```
G1 F40,00 Z141,00 S0 [MOVE LEFT END]
G1 F30,00 Z420,00 S6,45 C360,00 A360,00 [MOVE LEFT END]
G1 F15,00 Z440,00 S0 [MOVE LEFT END]
G1 E15,00 Y14,00 S0 [MOVE LEFT END]
G1 S5,00 C188,00 A548,00 [ROTATION]
G1 E20,00 Y28,00 S0 [MOVE BACK FROM LEFT END]
G1 F20,00 Z420,00 S0 [MOVE BACK FROM LEFT END]
G1 F40,00 Z389,00 S0 [MOVE LEFT END]
G1 F30,00 Z110,00 S6,45 C360,00 A908,00 [MOVE RIGHT END]
G1 F15,00 Z90,00 S0 [MOVE RIGHT END]
G1 E15,00 Y14,00 S0 [MOVE RIGHT END]
G1 S5,00 C180,00 A1088,00 [ROTATION]
G1 E20,00 Y28,00 S0 [MOVE BACK FROM RIGHT END]
G1 F20,00 Z110,00 S0 [MOVE BACK FROM RIGHT END]
```

Samotný příkaz G1, vyskytující se v kódu, zajišťuje pohyb zařízení. Parametry F, E určují rychlost lineárních pohybů ve směru osy Z a Y a jejich hodnoty jsou určeny v mm/s. Členy Z a Y určují pozici navíjecího zařízení v jednotlivých osách po vykonání příkazu a jejich hodnoty jsou určeny v mm. Parametr S určuje rychlost rotace vřetene s navíjeným výměníkem a je určen v otáčkách za minutu. Parametr C určuje úhel rotace vřetene ve stupních. Celkový úhel otočení vřetene v průběhu navíjení zobrazuje parametr A, ten na samotnou funkci navíjecího zařízení nemá vliv.

První příkaz zajistí lineární pohyb ve směru osy Z s nulovou rychlostí rotace vřetene (Obr. 4.18), tedy pohybem v ose rotace C. Příkaz má za účel zapadnutí dutého vlákna do požadované pozice přípravku a tím vytvoření pravidelné a predikované struktury. V dřívějších programech nebyl zmíněný krok součástí G-kódu, to znamená, že stroj vykonával lineární pohyb ve směru osy Z s nenulovou rychlostí rotace vřetene. Rotace vřetene způsobovala špatnou predikci umístění dutých vláken v přípravku, z důvodů obtížného odhadu času zapadnutí vlákna do přípravku a tedy vykonaném rotačním pohybu do doby zapadnutí vlákna do přípravku.

G1 F40,00 Z141,00 S0 [MOVE LEFT END]

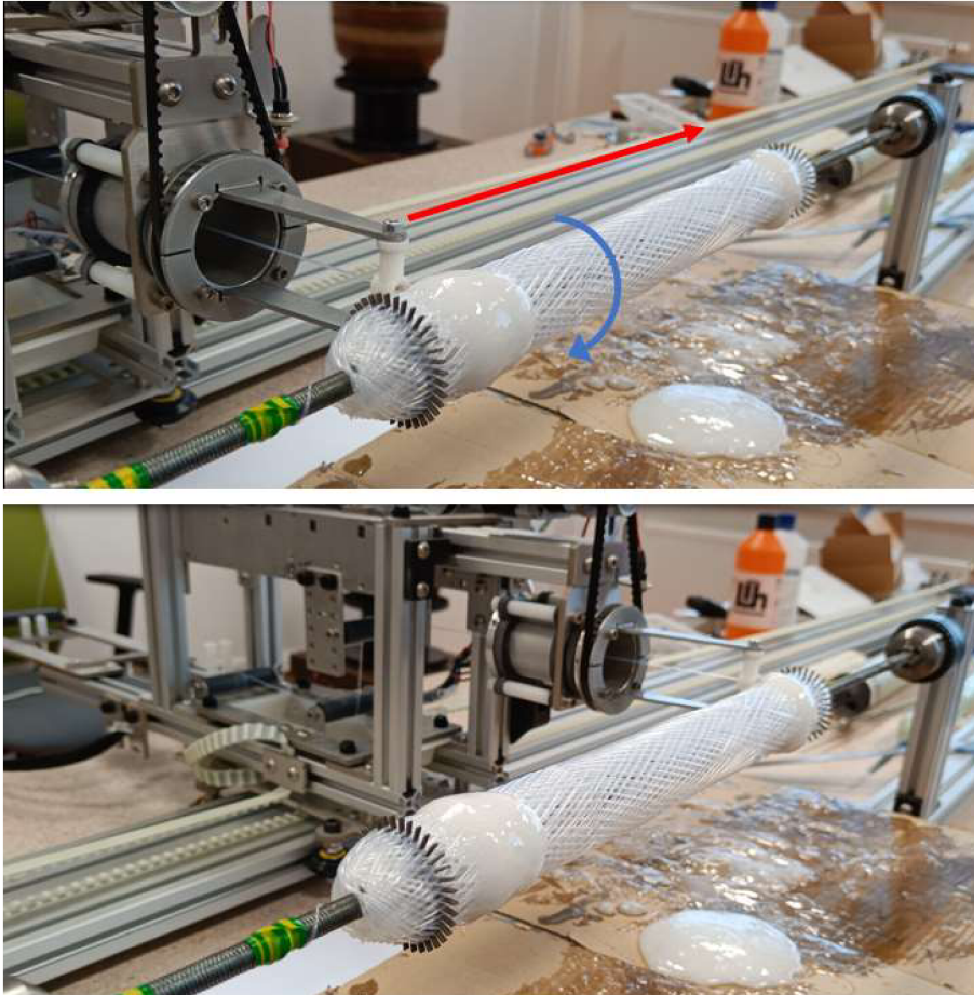


*Obr. 4.18 První pohyb navijecího zařízení v průběhu navíjení vložky výměníku.*

Konkrétní pohyb při navrženém výměníku byl tedy z pozice Z100 do pozice Z141 při rychlosti pohybu 40 mm/s.

Druhý příkaz vytvoří již samotnou strukturu aktivní částí navíjené vložky. Pohyb hlavy zařízení se skládá z lineárního pohybu ve směru osy Z až do pozice druhého přípravku a rotačního pohybu v ose C, viz Obr. 4.19. Kombinace pohybů vytvoří šroubovici, respektive požadovaný sklon navíjeného vlákna vzhledem k ose výměníku.

G1 F30,00 Z420,00 S6,45 C360,00 A360,00 [MOVE LEFT END]



Obr. 4.19 Druhý pohyb navíjecího zařízení v průběhu navíjení vložky výměníku.

U navrženého výměníku došlo tedy k pohybu z pozice Z141 do pozice Z420 při rychlosti 30 mm/s a k otočení o  $360^\circ$  při rychlosti rotace 6,45 otáček/min. Rychlosti vzájemných pohybů bylo potřeba stanovit tak, aby pohyb byl rovnoměrný a tedy čas k jeho realizaci byl stejný. V tomto případě je potřeba 9,3 s k vykonání zmíněného kroku.

V rámci návrhu pohybu byla snaha o zefektivnění celkového výrobního času. Jevila se tedy jako rozumná možnost zvýšení jednotlivých rychlostí při pohybu. Zařízení 4X-23 disponuje maximální rychlostí rotace vřetene 90 otáček/min a rychlostí lineárního pohybu ve směru osy Z a Y 200 mm/s.

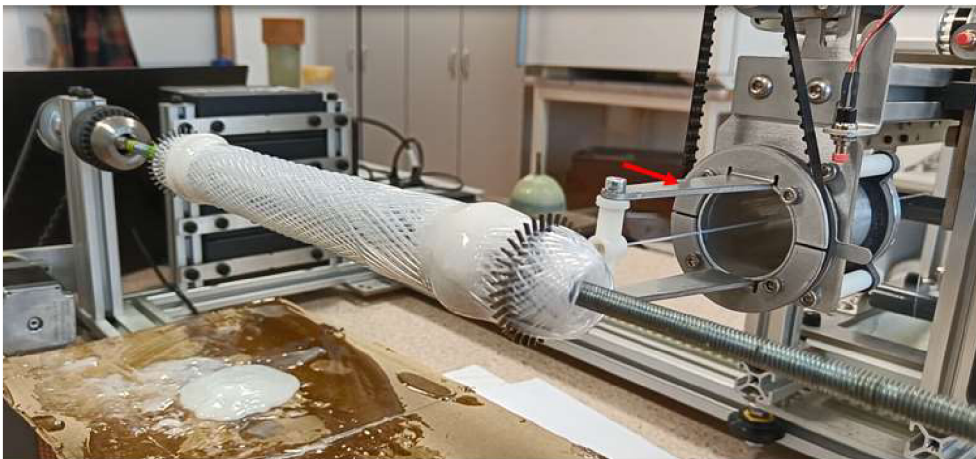
Při použití vyšších rychlostí pohybu ovšem nastal problém se samotným zařízením. Přesnost navíjení se výrazně zhoršila a to především v ose C, kde docházelo k výraznému přetáčení vřetene. Tento problém lze do jisté míry redukovat přidáním korekční hodnoty pro otáčení vřetene. Při použití vysokých rychlostí pohybu se také začal objevovat problém



s náhodnými pohyby neodpovídající příkazům v řídicím kódu. Ve snaze o vyřešení zmíněného problému byla provedena revize řídicí jednotky, bylo zkontrolováno nastavení správných parametrů pro elektronické vybavení navijecího stroje, také byly vyměněny datové kabely a bylo připojeno nové ovládací zařízení pro ovládání X-Winderu. Žádný ze zmíněných kroků však nevedl k vyřešení problému, a proto se konečné rychlosti pohybů snížily na výrazně nižší hodnoty než jsou limitní rychlosti stroje.

Třetí příkazový řádek je svou funkcí podobný příkazu z prvního řádku. Lineární pohyb ve směru osy Z zajišťuje zapadnutí dutého vlákna do přípravku, viz Obr. 4.20.

G1 F15,00 Z440,00 S0 [MOVE LEFT END]

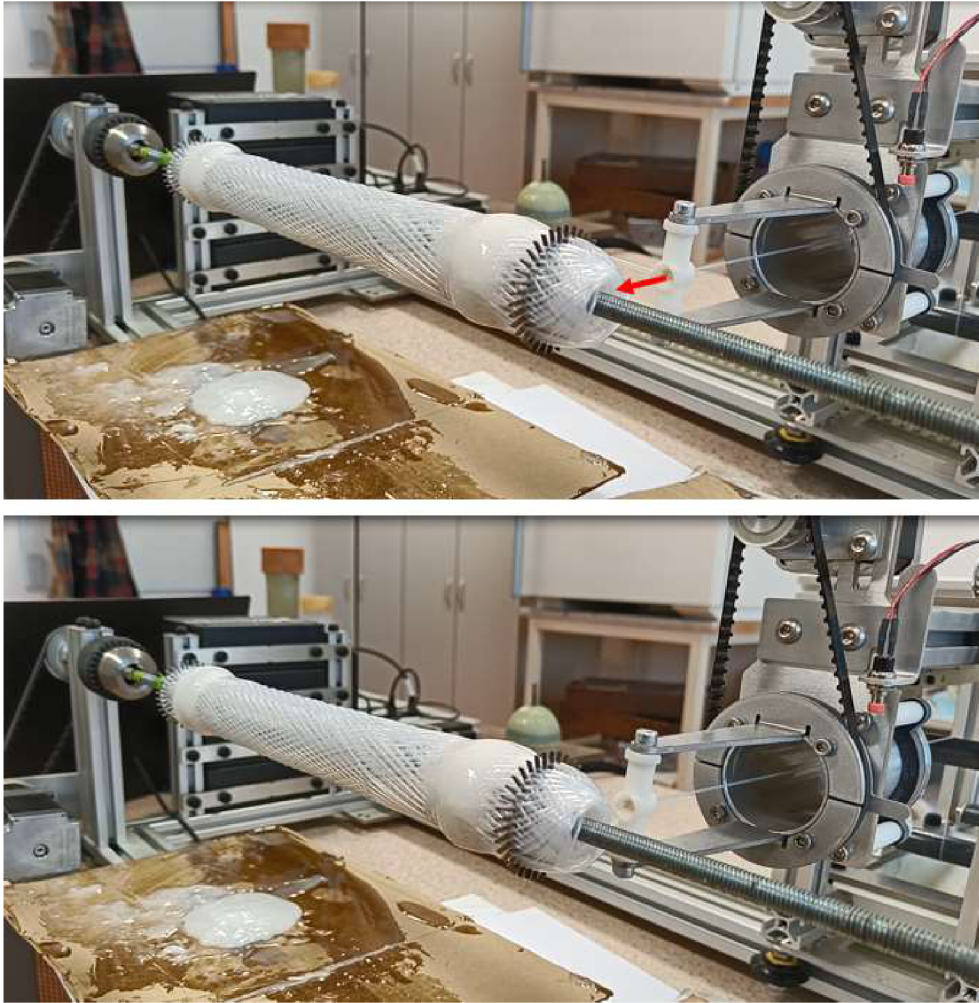


Obr. 4.20 Třetí pohyb navijecího zařízení v průběhu navijení vložky výměníku.

U navržené vložky výměníku tedy dochází k pohybu z pozice Z420 do pozice Z440 při rychlosti 15 mm/s.

Ve čtvrtém řádku je iniciován pohyb ve směru osy Y směrem k ose výměníku za účelem vytvoření koncového bodu výměníku, viz Obr. 4.21.

G1 E15,00 Y14,00 S0 [MOVE LEFT END]



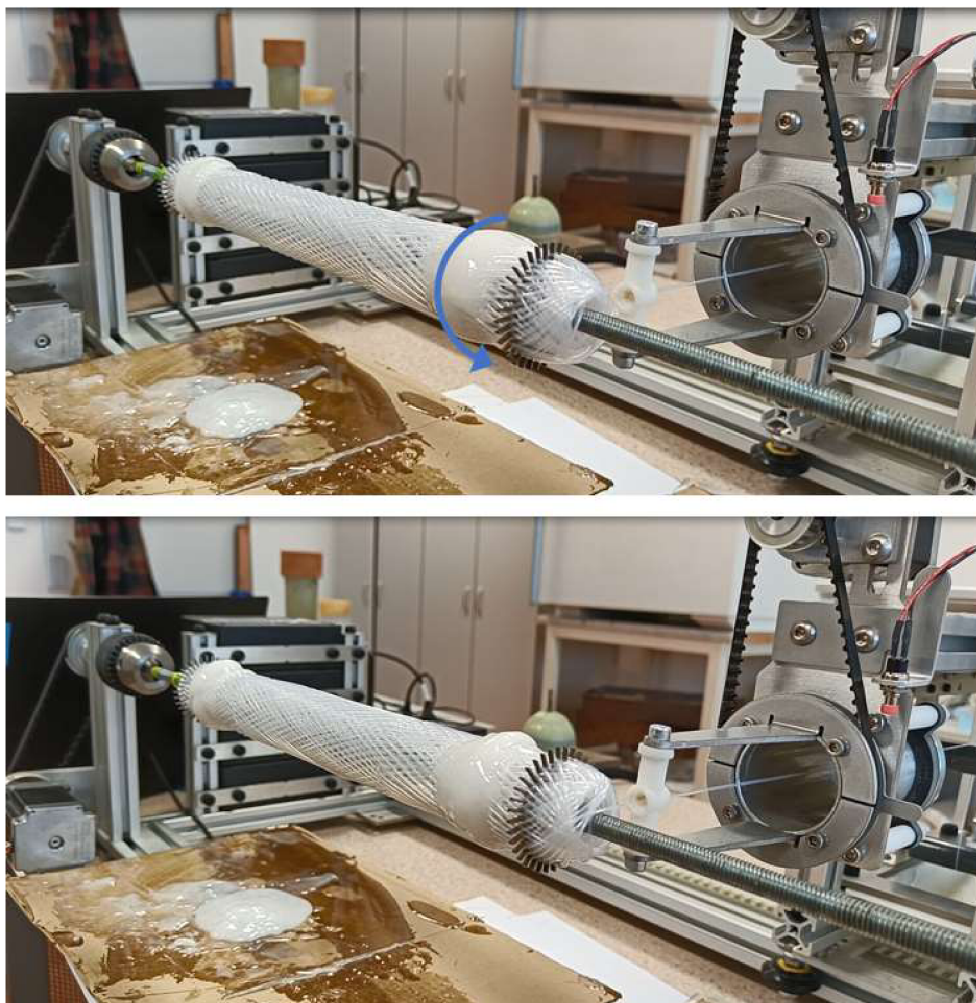
*Obr. 4.21 Čtvrtý pohyb navijecího zařízení v průběhu navijení vložky výměníku.*

V programu pro navijení vložky výměníku tedy dochází k pohybu z pozice Y28 do pozice Y14 při rychlosti pohybu 14 mm/s.



Po dosažení koncového bodu výměníku dochází k rotaci závitové tyče s výměníkem o hodnotu  $180^\circ$  a hodnotu úhlu jedné zubové mezery (Obr. 4.22). V případě navrženého výměníku byl použit přípravek disponující 36 zubovými mezerami. Dochází tedy k rotaci o  $190^\circ$  ve směru osy rotace C. Z příkazu je ale zřejmé, že příkaz určuje otočení vřetene pouze o  $188^\circ$ . Daná problematika souvisí s nepřesností stroje a potřebou vytvoření korekce. Problematika bude hlouběji probána v další části práce.

G1 S5,00 C188,00 A548,00 [ROTATION]

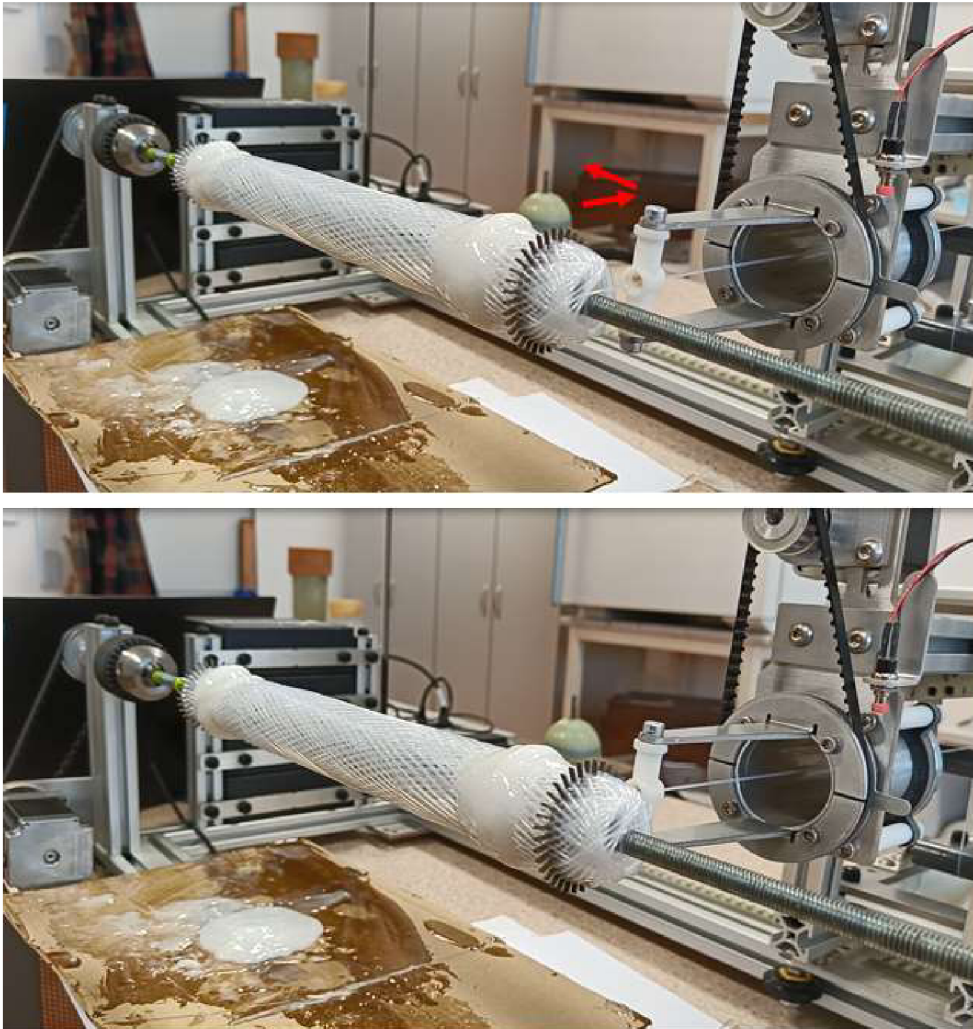


*Obr. 4.22 Pátý pohyb navijecího zařízení v průběhu navíjení vložky výměníku.*



Následující dva příkazy zajišťují vratný pohyb z koncového bodu směrem zpět k přípravku. Po dokončení pohybů je hlava umístěna zpět v pozici u přípravku a zařízení je připraveno pro navíjení dalšího vlákna výměníku, viz Obr. 4.23.

G1 E20,00 Y28,00 S0 [MOVE BACK FROM LEFT END]  
G1 F20,00 Z420,00 S0 [MOVE BACK FROM LEFT END]



Obr. 4.23 Šestý a sedmý pohyb navíjecího zařízení v průběhu navíjení vložky výměníku.

Zbývající příkazy jsou velmi podobné doposud popsané části pohybu navíjecí hlavy a slouží k navíjení dalšího vlákna, tentokrát při opačném pohybu ve směru osy Z.

G1 F40,00 Z389,00 S0 [MOVE LEFT END]  
G1 F30,00 Z110,00 S6,45 C360,00 A908,00 [MOVE RIGHT END]  
G1 F15,00 Z90,00 S0 [MOVE RIGHT END]  
G1 E15,00 Y14,00 S0 [MOVE RIGHT END]  
G1 S5,00 C180,00 A1088,00 [ROTATION]  
G1 E20,00 Y28,00 S0 [MOVE BACK FROM RIGHT END]  
G1 F20,00 Z110,00 S0 [MOVE BACK FROM RIGHT END]

Celkový čas navinutí vložky výměníku z polymerních dutých vláken byl 200 minut při navinutí 610 vláken.

#### 4.5.2 Navržený pohyb navijecího zařízení při navíjení pomocných ploch

Vygenerovaný G-kód obsahuje na začátku svého programu příkazy, stejné jako při navíjení vložky výměníku, které zajistí správné fungování programu, ovšem na proces navíjení nemají žádný vliv.

```
[G-CODE GENERATED BY PYTHON on 2022-04-27 12:55:44.779392]
[FileName = priruba.csv]
[Units are in MILLIMETERS]
[FilePath = C:\Users\filip\Desktop\PYTHON\priruba.csv]
[---]
[INITIALIZE WINDING SESSION]
C C1 [DECIMAL COMMA FORMAT = YES]
G21 [Units are Millimeters]
G90 [Absolute Positioning]
X V417,000 T4 Z47,752
[ENABLE STEPPERS AND MOVE TO STARTING POSITION]
M17 [Enable Steppers]
G1 I10 J10 K10 N10 O10 T10 [Linear and Angular Acceleration Settings of Axes]
G28 E50,800 R4 F25,400 C0,00 [Move Axes to Limit Switches]
G4 P1000 [Pause 1s at Carriage Limit Switch]
G1 J1,250 K1,250 O1,250 T10 [Set Axes Accels]
G4 Z P1000 [Pause 1s]
G1 F15,40 Z156,00 Y40,00 E15,40 B0,00 R10 S0
[BEGIN 4-AXIS WINDING WITH FLAT ENDS]
D0 ST=Winding Schedule
M0 [Wait for Button Press to Begin Winding Schedule]
M601 [MARK THE MANDREL REFERFENCE ANGLE]
```

V případě navíjení pomocných ploch výměníku dochází k opakovanému použití příkazů popsaných ve dvou řádcích. Je iniciován pomalý lineární pohyb ve směru osy Z při vysoké rychlosti otáčení vřetene, tedy pohybu ve směru osy rotace C.

```
G1 F1,00 Z113,00 S20 B-10 R10 C5160,00 [MOVE LEFT END]
G1 F1,00 Z156,00 S20 B10 R10 C5160,00 [MOVE RIGHT END]
```

U navrženého chladiče docházelo tedy k pohybu mezi body Z113 A Z156, při otáčení vřetene rychlostí 20 otáček/s. V případě navíjení pomocných ploch dochází i k natažení podávací hlavy. Při pohybu do levé části výměníku dochází k natočení podávací hlavy o 10°, při zpětném pohybu dojde k otočení o 20° do pozice B-10. Rychlost otáčení podávací hlavy byla stanovena na 10 otáček/min.

### 4.5.3 Program pro navíjení vložky výměníku

Samotný program generující výsledný G-kód se skládá z několika částí. V první části programu jsou importovány moduly potřebné pro fungování programu. CSV modul umožní vytvoření samotného textového souboru s navrženým G-kódem. Moduly `datetime` a `os` byly importovány za účelem lepšího popisu samotného G-kódu a zaznamenávají čas vytvoření a umístění vytvořeného textového souboru. Poslední module `math` byl v programu použit z důvodu nutnosti definice matematické konstanty  $\pi$ , která byla využita v rámci výpočtů.

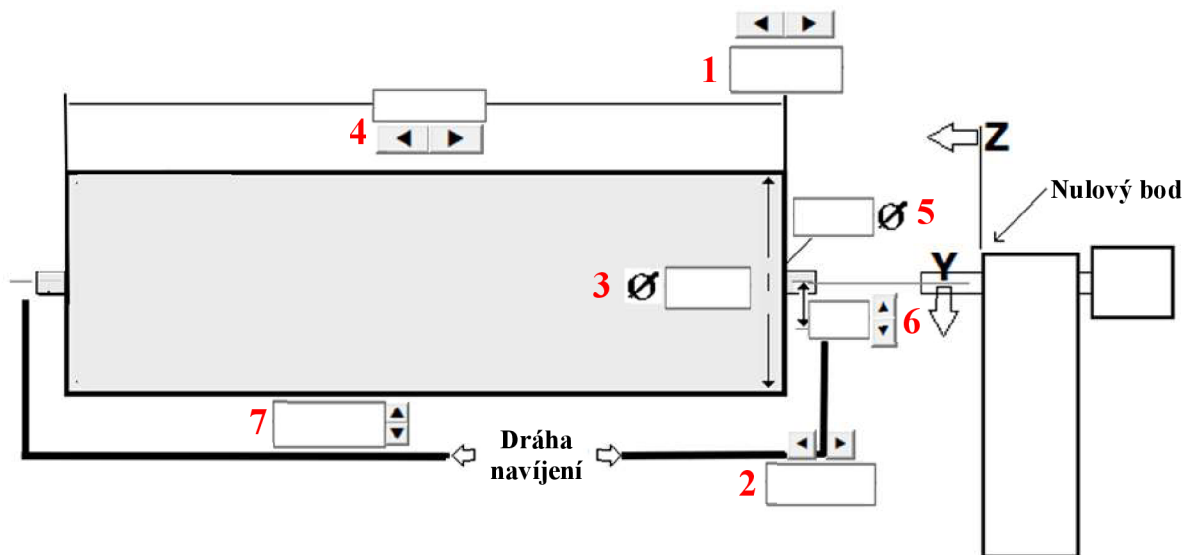
```
import csv
from datetime import datetime
import os #FilePath
import math #pi

control = 0
```

Program pro navíjení vložky výměníků generuje G-kód na základě zadaných parametrů uživatelem.

Další část programu vyžaduje zadání parametrů, respektive informací, které neovlivňují samotný průběh navíjení, ale slouží k vytvoření popisu generovaného textového souboru. Postupně je vyžadováno zadání jména souboru, popisu navíjené vložky a vnějšího průměru navíjeného filamentu. Tyto informace budou po vygenerování G-kódu zobrazeny na prvních řádcích a umožní lepší orientaci.

Následně vyzve program uživatele k zadání sedmi geometrických parametrů, které následně určují dráhu výsledného pohybu při navíjení vložky výměníku, Obr. 4.24.



Obr. 4.24 Geometrické parametry pro tvorbu vložky výměníku.

První souřadnice určuje polohu přípravku a zároveň i počáteční místo navíjení funkční části v ose Z. Druhý parametr určuje vzdálenost do které bude navíjecí hlava zajíždět v ose Z, při navíjení koncových částí výměníků. Třetí souřadnice určuje konečný průměr navíjeného výměníku. Hodnota parametru čtyři představuje vzdálenost mezi přípravky, kde dojde k navíjení požadované struktury dutých vláken. Pátý parametr určuje průměr závitové tyče, na kterou jsou upevněny přípravky. Šestá souřadnice stanovuje vzdálenost, do které bude zajíždět navíjecí hlava v koncových bodech výměníku ve směru osy Y. Sedmá souřadnice vytyčuje rozestup v ose Y, ve které se bude pohybovat navíjecí hlava od zadaného výsledného průměru výměníku.

V následujícím kroku vyzve program uživatele k zadání úhlové korekční hodnoty. V průběhu navíjení docházelo k mírnému přetáčení vřetene o větší úhlovou hodnotu než stanovuje program. To vedlo k občasnému vynechání pozice v přípravku, respektive zapadnutí vlákna do jiné pozice, než bylo navrženo programem. Za účelem eliminace tohoto jevu byl vytvořen zmíněný korekční faktor. Hodnota faktoru se liší v závislosti na rychlosti otáčení vřetene a celkovém úhlu otočení vřetene při jednom navíjecím cyklu. Doporučená hodnota, získaná na základě empirických zkušeností, je stanovena na  $2^\circ$ . V případě přetrvávajícího jevu je doporučeno upravit korekční faktor v každém kroku o hodnotu  $0,5^\circ$ .

Následně program vyzve uživatele k zadání hodnoty celkového počtu poloh v přípravku, do kterých je umístováno vlákno. Poté jsou zadány dva parametry určující otočení vřetene v průběhu navíjení. Parametr a určuje úhel otočení vřetene v koncovém bodu výměníku, c stanovuje otočení vřetene v průběhu navíjení funkční části výměníku a určuje tedy strukturu dutých vláken v aktivní části výměníku.

Následuje zadání celkového požadovaného počtu dutých vláken a stanovení zda bude využito více různých párů přípravku. Varianta využití více párů přípravku se uplatňuje v případě požadavku na navíjení velkého počtu vláken. V případě navíjení navrhovaného olejového chladiče byl využit pouze jeden pár přípravků, i přesto program disponuje možností využití varianty použití několika párů přípravků pro budoucí využití.

Zbývá část programu je využita v případě využití více párů přípravků. Obsah programu je podobný jako doposud popsané části vyžadující zadání informací uživatelem.

Při zadávání všech hodnot uživatelem dochází ke kontrole zadaných hodnot a v případě zadání nelogických hodnot, jako zadání textu do geometrických parametrů, dochází k přerušení programu a k opětovnému vyzvání uživatele k zadání všech hodnot.

```
while control == 0:
    try:
        name = input("Zadejte název souboru: ")
        popis = input("Vložte krátký popis: ")
        filDiameter = float(input("Vložte hodnotu vnějšího průměru navíjeného vlákna [mm]: "))
        pos_1 = float(input("Zadejte hodnotu na pozici 1 [mm]: "))
        pos_2 = float(input("Zadejte hodnotu na pozici 2 [mm]: "))
        pos_3 = float(input("Zadejte hodnotu na pozici 3 [mm]: "))
        pos_4 = float(input("Zadejte hodnotu na pozici 4 [mm]: "))
        pos_5 = float(input("Zadejte hodnotu na pozici 5 [mm]: "))
        pos_6 = float(input("Zadejte hodnotu na pozici 6 [mm]: "))
        pos_7 = float(input("Zadejte hodnotu na pozici 7 [mm]: "))
        correction1 = float(input("Zadejte hodnotu korekce (doporučeno → 2°): "))
        numbersAngle = int(input("Zadejte počet mezer přípravku: "))
        a = float(input("Zadejte uhel otočení vřetene v koncovém bodě výměníku [°]: "))
        c = float(input("Zadejte uhel otočení vřetene v průběhu navíjení funkční části výměníku [°]:"))
```

```
fibers_1 = int(input("Celkový počet vláken: "))
star2 = input("Bude použit 2. přípravek? (Odpověď Ano/Ne): ")

if star2.lower().strip() == "ano":
    pos2_1 = float(input("Zadejte hodnotu na pozici 1 pro 2. přípravek [mm]: "))
    pos2_2 = float(input("Zadejte hodnotu na pozici 2 pro 2. přípravek [mm]: "))
    pos2_3 = float(input("Zadejte hodnotu na pozici 3 pro 2. přípravek [mm]: "))
    pos2_4 = float(input("Zadejte hodnotu na pozici 4 pro 2. přípravek [mm]: "))
    pos2_5 = float(input("Zadejte hodnotu na pozici 5 pro 2. přípravek [mm]: "))
    pos2_6 = float(input("Zadejte hodnotu na pozici 6 pro 2. přípravek [mm]: "))
    pos2_7 = float(input("Zadejte hodnotu na pozici 7 pro 2. přípravek [mm]: "))
    correction2 = float(input("Zadejte hodnotu korekce (doporučeno → 2°): "))
    numbersAngle2 = int(input("Zadejte počet mezer přípravku: "))
    fibers_2 = int(input("Celkový počet vláken pro 2. přípravek: "))

control = 1
except:
    print("Zadány neplatné vstupní hodnoty!")
```

Další část programu se již zaměřuje na samotné vytvoření funkce vytvářející textový soubor G-kódu. První část definuje globální parametry, které budou využity pro vytvoření pohybu navíjecí hlavy. Definice globálních parametrů umožní změnu parametrů v průběhu navíjení. Poté je již k dříve zadanému názvu souboru přiřazena požadovaná koncovka, kterou využívá navíjecí zařízení. V daném formátu jména a koncovky bude vytvořen i konečný soubor s G-kódem. V dalším kroku je vygenerována cesta určující konečné umístění navrženého G-kódu.

Program Python při práci s číselnými hodnotami používá jako desetinou značku tečku, avšak pro využití G-kódu je potřeba definovat desetinou značku jako čárku. Z tohoto důvodu byla vytvořena funkce transferValue, která transformuje všechny číselné hodnoty využívané v konečném textovém souboru.

```
def G_Code():
    global pos_2
    global pos_7
    global pos2_2
    global pos2_7

    sum1 = 0
    nameFile = name + ".X4G"
    nameFilePath = os.path.abspath(nameFile)

    def transferValue(valueOld):
        valueNew = str("{:.2f}".format(valueOld)).replace(".", ",")
        return valueNew
```



Další část programu je zaměřena na vytvoření již samotného obsahu výsledného textového souboru, který bude zpracovávat řídicí jednotka navíjecího stroje. V prvních řádcích budou v hranatých závorkách vloženy poznámky definující základní charakteristiky výměníku. Poznámky zahrnují čas vytvoření souboru, popis vložený uživatelem, název souboru, umístění souboru a geometrické parametry výměníku.

```
with open(nameFile, 'w', newline='') as file:
    writer = csv.writer(file, delimiter='$')
    writer.writerow(["[G-CODE GENERATED BY PYTHON on {}".format(datetime.now().strftime("%Y-%m-%d
%i:%M:%S %p"))])
    writer.writerow(["[FileName = {}".format(nameFile)])
    writer.writerow(["[Description = {}".format(popis)])
    writer.writerow(["[FilePath = {}".format(nameFilePath)])
    writer.writerow(["[Units are in Millimeters]"])
    writer.writerow(["[GENERAL PART DESCRIPTION: Total diameter = {} mm".format(pos_3)])
    writer.writerow(["[GENERAL PART DESCRIPTION: Total fiber length = {} m".format((fibers_1 *
pos_4 + pos_3 * fibers_1)/1000)])
    writer.writerow(["[GENERAL PART DESCRIPTION: Fiber diameter = {} mm".format(filDiameter)])
    writer.writerow(["---"])
```

Následně jsou definovány příkazy k inicializování navíjecího procesu.

```
writer.writerow(["[INITIALIZE WINDING SESSION]"])
writer.writerow(["C C1 [DECIMAL COMMA FORMAT = YES]"])
writer.writerow(["G21 [Units are Millimeters]"])
writer.writerow(["G90 [Absolute Positioning]"])
writer.writerow(["X V417,000 T4 Z47,752"])
```

Pokračující část programu se věnuje zápisu příkazů umožňujících funkci motorů. Příkazy dirigují pohyb navíjecí hlavy do limitních bodů, opatřenými senzory. Po přesunu do limitních bodů následuje pohyb do pozice určené k počátku navíjení. Zde dojde k automatickému zastavení programu za účelem upevnění prvního vlákna výměníku.

```
writer.writerow(["[ENABLE STEPPERS AND MOVE TO STARTING POSITION]"])
writer.writerow(["M17 [Enable Steppers]"])
writer.writerow(["G1 I10 J10 K10 N10 O10 T10 [Linear and Angular Acceleration Settings of
Axes]"])
writer.writerow(["G28 E50,800 R4 F25,400 C0,00 [Move Axes to Limit Switches]"])
writer.writerow(["G4 P1000 [Pause 1s at Carriage Limit Switch]"])
writer.writerow(["G1 J1,250 K1,250 O1,250 T10 [Set Axes Accels]"])
writer.writerow(["G4 Z P1000 [Pause 1s]"])
writer.writerow(["G1 F15,40 Z{} Y{} E15,40 B90 R10 S0".format(transferValue(pos_1),
transferValue(pos_3/2+pos_7))])
```



```
writer.writerow(["[BEGIN 4-AXIS WINDING WITH FLAT ENDS]"])
writer.writerow(["D0 ST=Winding Schedule"])
writer.writerow(["M0 [Wait for Button Press to Begin Winding Schedule]"])
writer.writerow(["M601 [MARK THE MANDREL REFERFENCE ANGLE]"]])
```

V následující části je definován počet cyklů, které je potřeba vykonat pro navinutí požadovaného počtu vláken. Za účelem vytvoření rovnoměrného pohybu je vypočítána rychlost rotace  $s$  v průběhu navíjení aktivní části vložky výměníku z parametrů lineárního pohybu ve směru osy  $Z$ . Poté je vypočítána část rotace v koncovém bodě zajišťující rovnoměrné rozložení vláken v každé části přípravku.

V průběhu navíjení dochází ke změně geometrického parametru 2, který byl zadán uživatelem. Při navíjení docházelo v koncovém bodu k narážení navíjecí hlavy do koncových částí již navinutého vlákna. Proto byla implementovaná část programu, která posunuje navíjecí hlavu vždy po navinutí 72 vláken o 2 mm směrem od přípravku.

Ve snaze o zjednodušení nanášení epoxidové směsi na vlákna výměníku byla zavedena část programu, která mění zadaný parametr 7. Po navinutí 80 % procent vláken vložky dojde ke zvětšení mezery mezi navíjecí hlavou a předpokládaným průměrem výměníku o 1 cm.

V další části programu se generují již samotné příkazy na základě dříve zadaných hodnot.

```
numLayers1 = int(fibers_1 // 2 + 1)
for i in range(1, numLayers1):
    s = (c/360)*(60/(pos_4*0.9/30)) # F=30
    starAngle = 360/numbersAngle - correction1

    if i % numbersAngle == 0:
        pos_2 -= 2

    if i == (round(numLayers1*0.8)):
        pos_7 = pos_7 + 10

    writer.writerow(["---"])
    writer.writerow(["[STAR1]"])
    writer.writerow(["[Layer {}]".format(i)])
    writer.writerow(["G1 F40,00 Z{} S0 [MOVE LEFT
END]".format(transferValue((pos_1+pos_4*0.1)))]])
    writer.writerow(["G1 F30,00 Z{} S{} C{} A{} [MOVE LEFT
END]".format(transferValue(pos_1+pos_4), transferValue(s), transferValue(c), transferValue(sum1 + c)))]])
    writer.writerow(["G1 F15,00 Z{} S0 [MOVE LEFT END]".format(transferValue((pos_1 - pos_2) *
1 + pos_1 + pos_4)))]])
    writer.writerow(["G1 E15,00 Y{} S0 [MOVE LEFT END]".format(transferValue(pos_6)))]])
    writer.writerow(["G1 S5,00 C{} A{} [ROTATION]".format(transferValue(a + starAngle),
transferValue(sum1 + c + a + starAngle)))]])
    writer.writerow(["G1 E20,00 Y{} S0 [MOVE BACK FROM LEFT END]".format(transferValue(pos_3/2
+ pos_7)))]])
    writer.writerow(["G1 F20,00 Z{} S0 [MOVE BACK FROM LEFT END]".format(transferValue(pos_1 +
pos_4)))]])
```

```
        writer.writerow(["G1 F40,00 Z{} S0 [MOVE LEFT  
END]".format(transferValue((pos_1+pos_4*0.9)))]])  
        writer.writerow(["G1 F30,00 Z{} S{} C{} A{} [MOVE RIGHT END]".format(transferValue(pos_1),  
transferValue(s), transferValue(c), transferValue(sum1 + 2*c + a +starAngle)))]])  
        writer.writerow(["G1 F15,00 Z{} S0 [MOVE RIGHT END]".format(transferValue(pos_2)))]])  
        writer.writerow(["G1 E15,00 Y{} S0 [MOVE RIGHT END]".format(transferValue(pos_6)))]])  
        writer.writerow(["G1 S5,00 C{} A{} [ROTATION]".format(transferValue(a), transferValue(sum1  
+ 2*c + 2*a + starAngle)))]])  
        writer.writerow(["G1 E20,00 Y{} S0 [MOVE BACK FROM RIGHT END]".format(transferValue(pos_3/2  
+ pos_7)))]])  
        writer.writerow(["G1 F20,00 Z{} S0 [MOVE BACK FROM RIGHT  
END]".format(transferValue(pos_1)))]])  
  
        sum1 = (2*c + 2*a + starAngle) * i
```

V případě využití více párů pomocných přípravků byla vytvořena následující část programu. Charakteristika příkazů je velmi podobná předchozí popsané části. První část programu zajistí přesun hlavy do pozice, kde bude umístěn nový přípravek a dojde k zastavení stroje.

Při zastavení stroje dojde k upevnění nového vlákna na závitovou tyč a program bude manuálně znovu spuštěn. Následují již dříve popsané příkazy. Jediný rozdíl nastává ve vygenerovaných drahách a rychlostech které stroj vykonává.

```
if star2.lower().strip() == "ano":  
  
    writer.writerow([" "])  
    writer.writerow(["[STAR1 TO STAR2]"]])  
    writer.writerow(["G4 Z P10000 [Pause 10s]"]])  
    writer.writerow(["G1 E5 Y{}".format(transferValue(pos2_3/2+pos2_7)))]])  
    writer.writerow(["G1 F7 Z{}".format(transferValue(pos2_1)))]])  
    writer.writerow(["M0 [Wait for Button Press to Begin Winding Schedule]"]])  
  
    sum2 = sum1  
    numLayers2 = int(fibers_2 // 2 + 1)  
    for i in range(1, numLayers2):  
        s = (c/360)*(60/(pos2_4*0.9/30)) # (F=30)  
        starAngle2 = 360/numbersAngle2 - correction2  
  
        if i % numbersAngle2 == 0:  
            pos2_2 -= 2  
  
        if i == (round(numLayers2*0.8)):  
            pos2_7 = pos2_7 + 10  
  
    writer.writerow(["[---]"]])  
    writer.writerow(["[STAR2]"]])
```

```
        writer.writerow(["[Layer {}]".format(i)])
        writer.writerow(["G1 F40,00 Z{} S0 [MOVE LEFT END]".format(transferValue((pos2_1 +
pos2_4*0.1))))
        writer.writerow(["G1 F30,00 Z{} S{} C{} A{} [MOVE LEFT
END]".format(transferValue(pos2_1+pos2_4), transferValue(s), transferValue(c), transferValue(sum2 +
c)))]
        writer.writerow(["G1 F15,00 Z{} S0 [MOVE LEFT END]".format(transferValue((pos2_1 -
pos2_2) * 1 + pos2_1 + pos2_4)))]
        writer.writerow(["G1 E15,00 Y{} S0 [MOVE LEFT END]".format(transferValue(pos2_6)))]
        writer.writerow(["G1 S5,00 C{} A{} [ROTATION]".format(transferValue(a + starAngle2),
transferValue(sum2 + c + a + starAngle2)))]
        writer.writerow(["G1 E20,00 Y{} S0 [MOVE BACK FROM LEFT
END]".format(transferValue(pos2_3/2 + pos2_7)))]
        writer.writerow(["G1 F20,00 Z{} S0 [MOVE BACK FROM LEFT
END]".format(transferValue(pos2_1 + pos2_4)))]
        writer.writerow(["G1 F40,00 Z{} S0 [MOVE LEFT
END]".format(transferValue((pos2_1+pos2_4*0.9)))]
        writer.writerow(["G1 F30,00 Z{} S{} C{} A{} [MOVE RIGHT
END]".format(transferValue(pos2_1), transferValue(s), transferValue(c), transferValue(sum2 + 2*c + a
+starAngle2)))]
        writer.writerow(["G1 F15,00 Z{} S0 [MOVE RIGHT END]".format(transferValue(pos2_2)))]
        writer.writerow(["G1 E15,00 Y{} S0 [MOVE RIGHT END]".format(transferValue(pos2_6)))]
        writer.writerow(["G1 S5,00 C{} A{} [ROTATION]".format(transferValue(a),
transferValue(sum2 + 2*c + 2*a + starAngle2)))]
        writer.writerow(["G1 E20,00 Y{} S0 [MOVE BACK FROM RIGHT
END]".format(transferValue(pos2_3/2 + pos2_7)))]
        writer.writerow(["G1 F20,00 Z{} S0 [MOVE BACK FROM RIGHT
END]".format(transferValue(pos2_1)))]

        sum2 = sum1 + (2*c + 2*a + starAngle2) * i
```

Poslední řádek zajišťuje spuštění programu.

```
G_Code()
```

Popsaný program nabízí do budoucna možnost implementovat řadu dalších vylepšení. Dosud popsaná část programu by měla sloužit jako jádro, ke kterému se budou připojovat další části programu. Jedno z možných dalších vylepšení spočívá v automatickém generování různých struktur vláken, návrhu přípravku na základě zadaných parametrů, návrhu programu s konstantním sklonem vláken vzhledem k ose výměníku, odhadu počtu vláken na základě zadaných parametrů apod.

#### 4.5.4 Program pro navíjení pláště výměníku

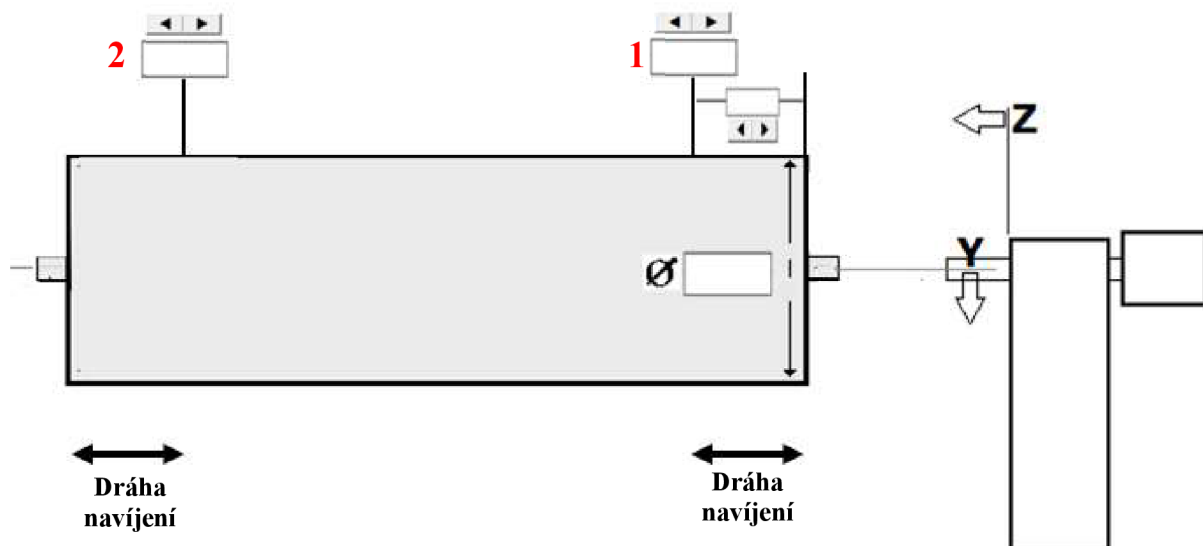
Při navíjení pláště výměníku se nepředpokládá změna vnějšího průměru výměníku, a proto je možné pro vytvoření G-kódu využít software X-Winder Desinger.

Aplikace funguje podobně jako navržený program pro navíjení vložky výměníku. Uživatel je vyzván k zadání geometrických parametrů výměníků a následně ke zvolení geometrie navíjeného skleněného vlákna na základě úhlu svírající navíjené vlákno s osou vřetene. Následně je G-kód vygenerován a připravený ke spuštění.

#### 4.5.5 Program pro navíjení pomocných ploch

Po navíjení pláště výměníku je potřeba navinout na krajích výměníku pomocné plochy, které budou využity při spojování přírub výměníku a funkční části výměníku.

Pro tyto účely byl vytvořen program v jazyce Python. Počáteční část programu je velmi podobná programu určenému pro navíjení polymerních dutých vláken. V první části uživatel zadá název vygenerovaného souboru, požadované parametry geometrie, tedy počáteční místo navíjení na obou stranách výměníku (Obr. 4.25), šířku pomocných ploch a průměr výměníku.



Obr. 4.25 Geometrické parametry programu pro navíjení pomocných ploch.

```
import csv
from datetime import datetime
import os

name = input("Zadejte název souboru: ")
postition_1 = float(input("Zadejte hodnotu na pozici 1: "))
postition_2 = float(input("Zadejte hodnotu na pozici 2: "))
postition_3 = float(input("Zadejte šířku pomocné plochy: "))
postition_4 = float(input("Zadejte průměr výměníku: "))

def G_Code():
    nameFile = name + ".X4G"
    nameFilePath = os.path.abspath(nameFile)
```

```
def transferValue(valueOld):
    valueNew = str(":{.2f}".format(valueOld)).replace(".", ",")
    return valueNew

with open(nameFile, 'w', newline='') as file:
    writer = csv.writer(file, delimiter='$')
    writer.writerow(["G-CODE GENERATED BY PYTHON on {}".format(datetime.now())])
    writer.writerow(["FileName = {}".format(nameFile)])
    writer.writerow(["Units are in MILLIMETERS"])
    writer.writerow(["FilePath = {}".format(nameFilePath)])
    writer.writerow(["---"])

    writer.writerow(["INITIALIZE WINDING SESSION"])
    writer.writerow(["C C1 [DECIMAL COMMA FORMAT = YES]"])
    writer.writerow(["G21 [Units are Millimeters]"])
    writer.writerow(["G90 [Absolute Positioning]"])
    writer.writerow(["X V417,000 T4 Z47,752"])

    writer.writerow(["ENABLE STEPPERS AND MOVE TO STARTING POSITION"])
    writer.writerow(["M17 [Enable Steppers]"])
    writer.writerow(["G1 I10 J10 K10 N10 O10 T10 [Linear and Angular Acceleration Settings of
Axes]"])
    writer.writerow(["G28 E50,800 R4 F25,400 C0,00 [Move Axes to Limit Switches]"])
    writer.writerow(["G4 P1000 [Pause 1s at Carriage Limit Switch]"])
    writer.writerow(["G1 J1,250 K1,250 O1,250 T10 [Set Axes Accels]"])
    writer.writerow(["G4 Z P1000 [Pause 1s]"])
    writer.writerow(["G1 F15,40 Z{} Y{} E15,40 B0 R10 S0".format(transferValue(postition_1),
transferValue(postition_4 + 5))])

    writer.writerow(["BEGIN 4-AXIS WINDING WITH FLAT ENDS"])
    writer.writerow(["D0 ST=Winding Schedule"])
    writer.writerow(["M0 [Wait for Button Press to Begin Winding Schedule]"])
    writer.writerow(["M601 [MARK THE MANDREL REFERFENCE ANGLE]"])
```

Následuje část programu určená pro samotné navíjení pomocných ploch.

```
def transferValue(valueOld):
    valueNew = str(":{.2f}".format(valueOld)).replace(".", ",")
    return valueNew

for i in range(0, 10):
    writer.writerow(["G1 F1,00 Z{} S20 B-10 R10 C{} [MOVE LEFT
END]".format(transferValue(postition_1-postition_3), transferValue(s))])
    writer.writerow(["G1 F1,00 Z{} S20 B10 R10 C{} [MOVE RIGHT
END]".format(transferValue(postition_1), transferValue(s))])
```

```
writer.writerow(["M601 [MARK THE MANDREL REFERENCE ANGLE]"])

for i in range(0, 10):
    writer.writerow(["G1 F1,00 Z{} S20 B10 R10 C{} [MOVE LEFT
END].format(transferValue(postition_2), transferValue(s))]
    writer.writerow(["G1 F1,00 Z{} S20 B-10 R10 C{} [MOVE RIGHT
END].format(transferValue(postition_2-postition_3), transferValue(s))]
    writer.writerow(["M601 [MARK THE MANDREL REFERENCE ANGLE]"])

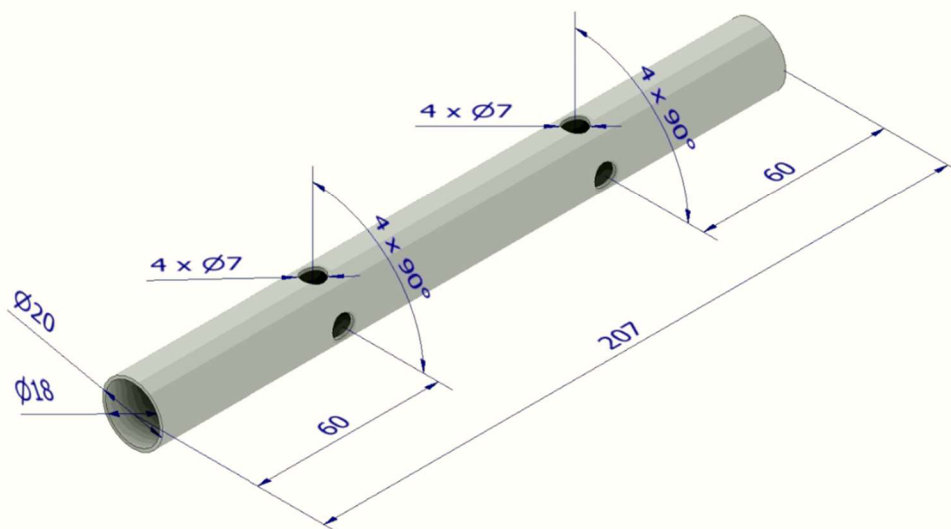
G_Code()
```

## 4.6 Proces navíjení výměníku

### 4.6.1 Výroba jádra výměníku

Jádro výměníku slouží pro přívod a následný odvod chlazeného média, motorového oleje, z funkční části výměníku. Jádro bylo vyrobeno z karbonové trubky s vnějším průměrem 20 mm a tloušťce stěny 1 mm. Navržená trubka měla celkovou délku 207 mm a v jejím středu byla vytvořena zátka z dvousložkového lepidla. Zátka znemožňuje průtok pracovního média vnitřním středem trubky. V následujícím kroku bylo v trubce vyvrtáno 8 otvorů, první 4 otvory slouží pro distribuci motorového oleje do aktivní části výměníku a zbylé 4 otvory slouží pro odvod motorového oleje z aktivní části výměníku, viz Obr. 4.26.

Obě krajní části trubky, tedy od vyvrtaných otvorů po konce trubky, nejsou součástí aktivní části výměníku, ale slouží jako nezbytné plochy pro vytvoření konců aktivní části výměníku. V průběhu navíjení zde docházelo k nanášení vrstvy dvousložkového lepidla za účelem vytvoření těsnění. U krajních částí trubky byla taky provedena povrchová úprava za účelem zdrsnění povrchů. Zdrsněný povrch umožní snadnější přichycení prvních vrstev polymerních vláken na karbonovou trubku. Po úplném navinutí výměníku došlo k odřezání těchto koncových částí.

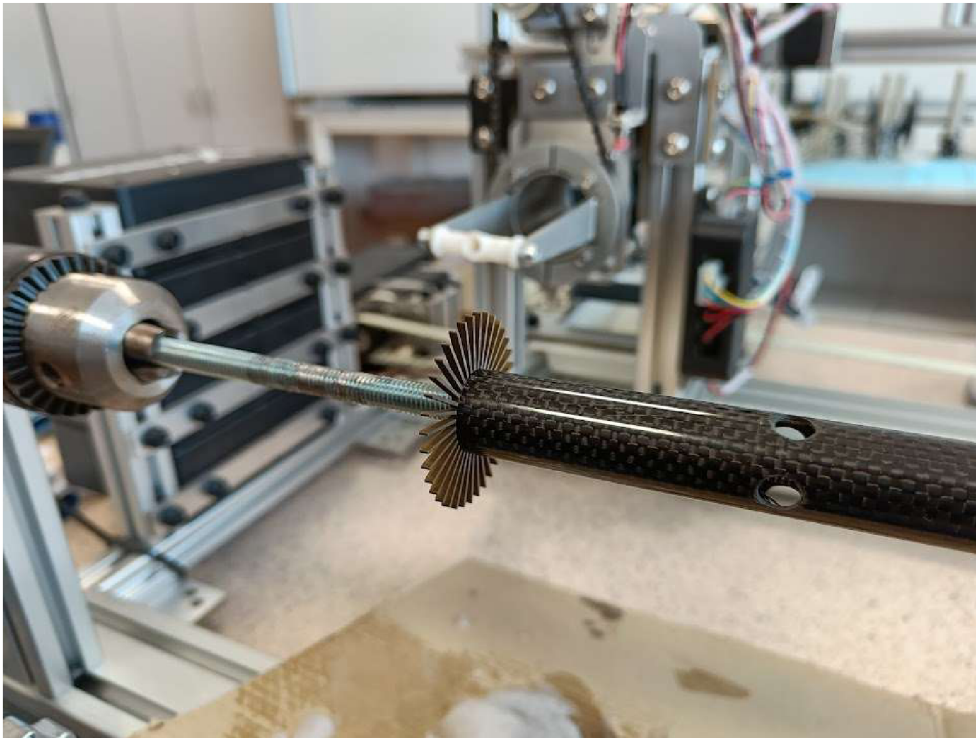


Obr. 4.26 Karbonová trubka vytvářející jádro výměníku.



#### 4.6.2 Příprava procesu navíjení

Jádro výměníku bylo pomocí vnitřních závitových otvorů přípravků upevněno na závitové tyči, která byla upevněna ve sklíčidlech přístroje, viz Obr. 4.27. Přípravek s jádrem je potřeba umístit do předem definované pozice v ose Z. Přípravek ležící blíže k nulovému bodu v ose Z se umísťuje obvykle do pozice Z110. Po samotném spuštění programu dojde k zastavení navíjecí hlavy ve zmíněné pozici v ose Z, kde by měl být upevněn přípravek. V případě špatného umístění jádra s přípravky je potřeba umístění upravit.

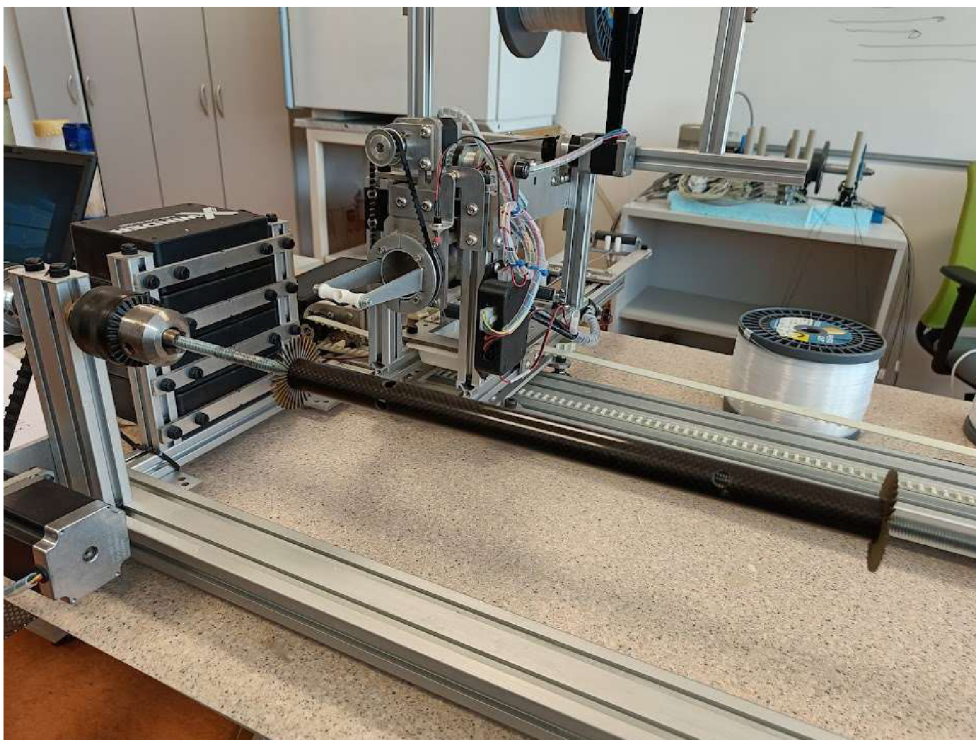


Obr. 4.27 Upevněné jádro pomocí přípravku a závitové tyče.

Následně byla na stroj namontována podávací hlava určená k navíjení polymerního dutého vlákna a přichystána cívka s požadovaným navíjecím materiálem, v tomto případě tedy s polymerním dutým vláknem. Bylo použito vlákno s vnějším průměrem 1 mm a tloušťkou stěny 0,1 mm z Polyamidu 11 (PA 11).

Další krok zahrnoval přípravu epoxidu, který byl nanášen v koncových částech jádra výměníku. Epoxid se skládá ze dvou složek, pryskyřice a tužidla, a zahušťovadla k upravení viskozity nanášeného lepidla. Výsledná viskozita by měla být dostatečně tekutá, aby došlo k zaplnění mezivláknových mezer ale zároveň aby bylo zajištěno co nejmenší stékání směsi z navíjeného jádra.

Jeho hlavní funkcí je vytvoření těsnění v části, kde dojde po navíjecím procesu k rozříznutí výměníků za účelem vytvoření vstupních a výstupních otvorů chladicího média. Obr. 4.28 znázorňuje navíjecí stroj připravený pro proces navíjení dutých vláken výměníku.



Obr. 4.28 Připravený stroj pro navíjení dutých vláken výměníku.

#### 4.6.3 Proces navíjení

Po spuštění G-kódu určeného pro navíjení dutých vláken dojde k přesunutí hlavy navíjecího zařízení do startovací pozice, kde dojde k zastavení. Následně bylo připraveno duté vlákno k závitové tyči pomocí lepicí pásky a posléze došlo k opětovnému spuštění programu. Obr. 4.29 zobrazuje strukturu vláken v průběhu navíjení.



Obr. 4.29 Struktura dutých vláken v průběhu navíjení vložky výměníku.



V průběhu navíjení dochází ke kontinuálnímu nanášení epoxidu. Po navinutí požadovaného počtu vláken dojde k ukončení programu. Následně je potřeba zapnout otáčení vřetene se závitovou tyčí a to do doby než dojde k zaschnutí epoxidu. Obr. 4.30 ukazuje konečnou strukturu navíjených dutých vláken vložky výměníku. Zaschnutí epoxidu trvá přibližně 6 hodin.

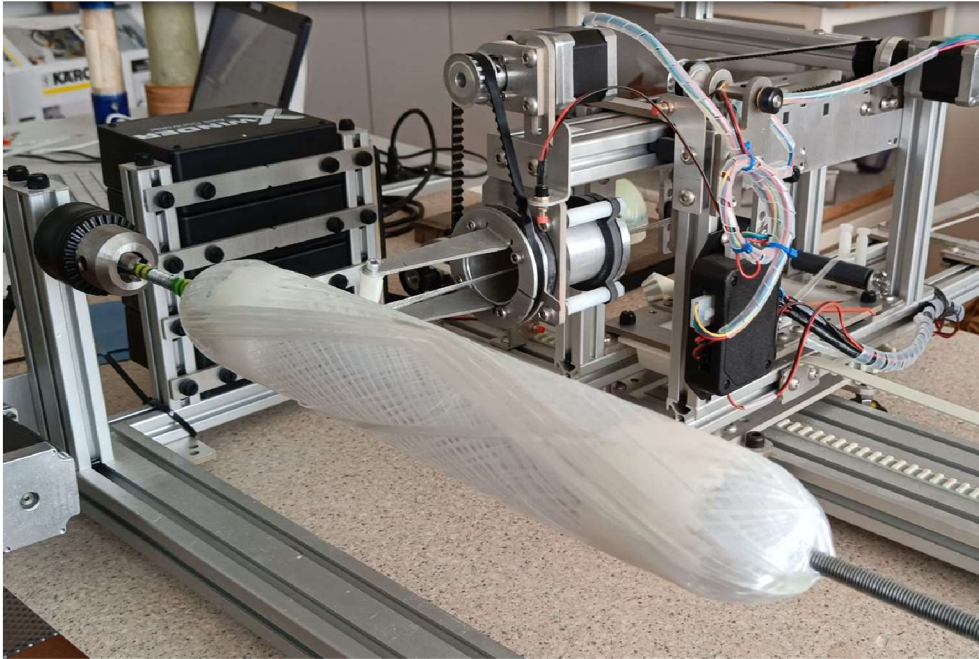


*Obr. 4.30 Konečná struktura dutých vláken ve vložce výměníku.*

Cílem dalšího kroku bylo vytvořit plášť výměníku. Pro vytvoření pláště byla využita skelná vlákna, pro které se využívá rozdílná navíjecí hlava, proto bylo potřeba v prvním kroku vyměnit navíjecí hlavu. Při navíjení skelného se opět využívá epoxid. Na rozdíl však od navíjení dutých vláken, kde dochází k manuálnímu nanášení, při navíjení pláště je epoxid umístěn v zásobníku, kterým je vedeno skelné vlákno.

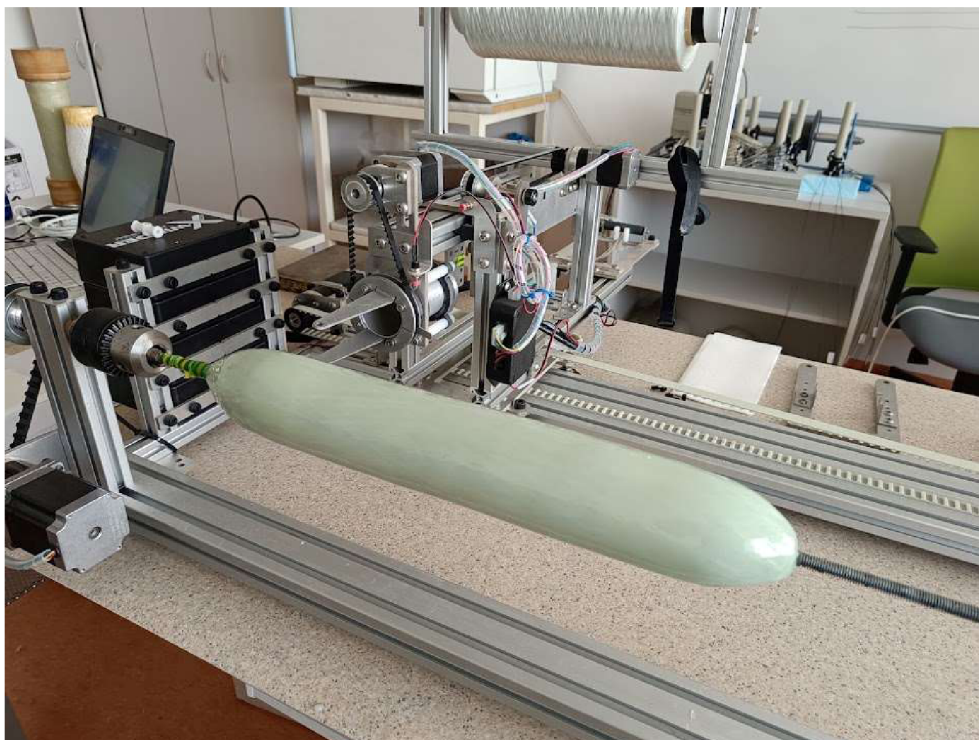
Po spuštění příslušného G-kódu dojde opět k přesunutí navíjecí hlavy do počáteční pozici a zastavení. Po zastavení bylo skelné vlákno připevněno k závitové tyči a proces byl manuálně spuštěn. Obr. 4.31 ukazuje počátek procesu navíjení pláště výměníku.

Vlivem nanášení vrstev skelného vlákna s epoxidem na dutá vlákna dochází k mírnému stečení epoxidu ze skelného vlákna do vložky výměníku. Z dřívějších zkušeností se předpokládá, že jedna vrstva vláken umístěných pod pláštěm výměníku bude nefunkční.



*Obr. 4.31 Počátek procesu navíjení pláště výměníku.*

Po navinutí třech vrstev skelného vlákna je vrstva pláště dostatečně silná. Následně byla manuálně nastavena rotace vřetene se závitovou tyčí a to až do chvíle zaschnutí epoxidu. Zaschnutí epoxidu trvá přibližně 3 hodiny v závislosti na okolních podmínkách. Obr. 4.32 zobrazuje výslednou konstrukci po procesu navíjení pláště.



*Obr. 4.32 Výsledná struktura vložky po navinutí pláště výměníku.*



V dalším kroku byly vytvořeny pomocné plochy na plášti výměníku. Plochy budou sloužit pro vystředění výměníku a konečnému spojení těla a přírub výměníku. Pro navíjení pomocných ploch bude opět využito skelné vlákno a proto nebylo potřeba žádných konstrukčních úprav navíjecího zařízení.

Po spuštění programu dojde k zastavení hlavy v počáteční poloze. Následuje připevnění skelného vlákna k závitové tyči a spuštění stroje. Po navinutí několika milimetrů vrstvy skleného vlákna dojde k zastavení programu navíjení. Následně je opět spuštěna rotace vřetene se závitovou tyčí za účelem rovnoměrného rozložení epoxidu při vysychání. Zaschnutí epoxidu trvá přibližně 3 hodiny. Obr. 4.33 zobrazuje konečný výsledek navíjecího procesu.



*Obr. 4.33 Konečná konstrukce vložky výměníku po navíjecím procesu.*

Po ukončení procesu navíjení je potřeba očistit všechny pohyblivé části stroje a mechanismus podávající vlákno od dvousložkového lepidla.

#### **4.6.4 Připojení přírub výměníku**

V dalším kroku dojde k vyjmutí navinuté vložky z navíjecího stroje a následuje řada manuálních úprav. Pomocné plochy jsou obrobeny na soustruhu za účelem vytvoření vyhovující válcovitosti plochy, aby válcové plochy mohli být využiti k připojení ke přírubám výměníku.

V následující části je potřeba odřezat koncové části výměníku. Tím dojde k otevření vláken výměníku a vytvoření vstupů a výstupů do chlazené části chladiče. Zároveň k otevření vstupu a výstupu do jádra výměníku. Obr. 4.34 a Obr. 4.35 zobrazují výslednou podobu navrženého chladiče.



*Obr. 4.34 Navržený chladič.*



*Obr. 4.35 Navržený chladič.*



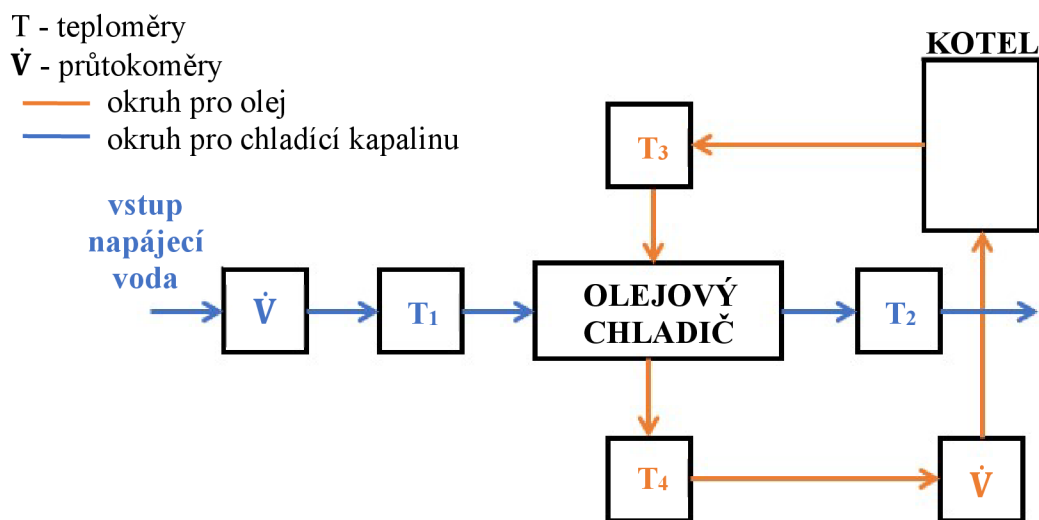
#### 4.7 Měření tepelných výkonů chladičů

Navržený chladič byl v poslední části práce porovnán s reálně využívaným chladičem pro závodní automobil v rámci měření ve zkušební komoře Laboratoří přenosu tepla a proudění Vysokého učení technického v Brně.

Zkušební komora nebyla navržena pro měření olejových chladičů, a proto nedisponuje možností využití oleje jako teplotnosného média. Při měření byly použity jako teplotnosná média na obou stranách chladiče voda, tedy jak v části pro chlazení oleje, tak v části pro chladičí kapalinu. Práce předpokládá, že při dosažení vyšších tepelných výkonů, při identických vstupních parametrech teplotnosných médií, pro navržený chladič při porovnání s originálním chladičem pro závodní automobil bude navrhovaný chladič disponovat vyšším, a tedy dostatečným tepelným výkonem i v případě využití správných teplotnosných médií.

Měřicí komora byla navržena pro měření pouze jednoho tepelného okruhu. Komora ale disponuje možností zapojit druhý tepelný okruh, avšak okruh je potřeba vybavit měřicí technikou.

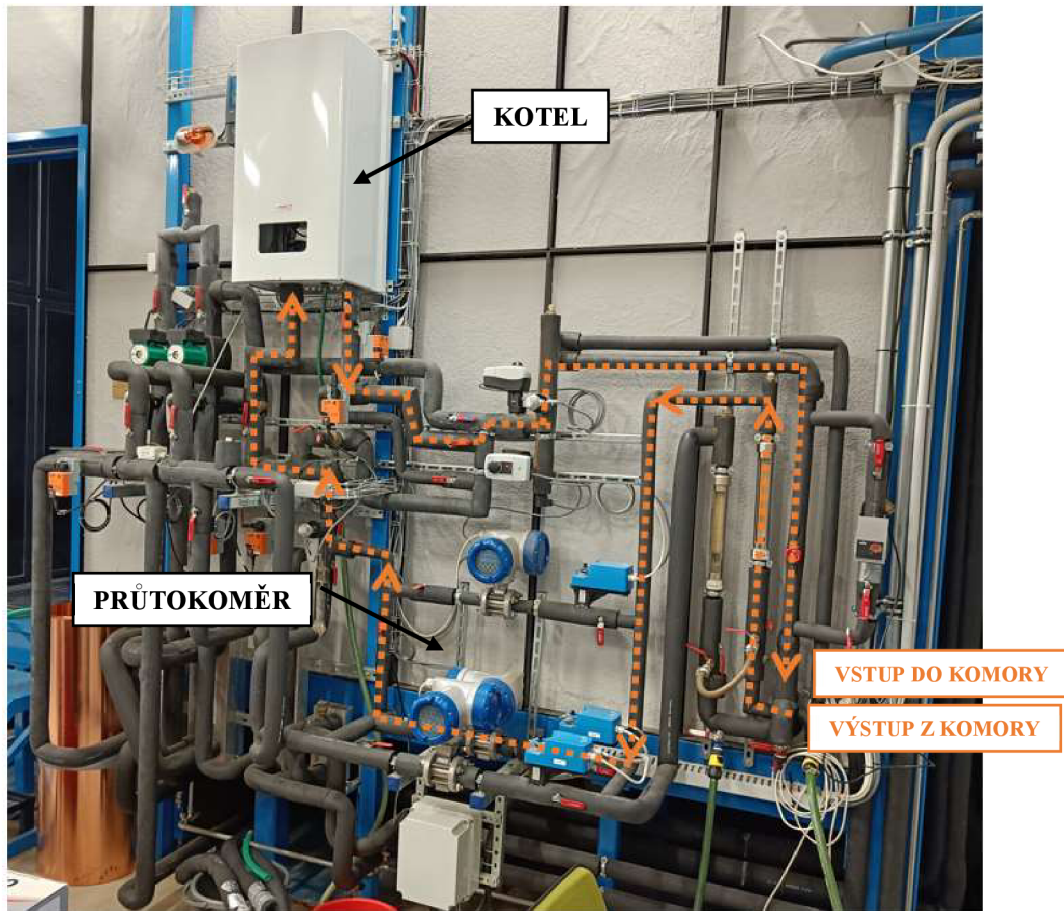
Zjednodušené schéma zapojení měřicí komory je znázorněno na Obr. 4.36.



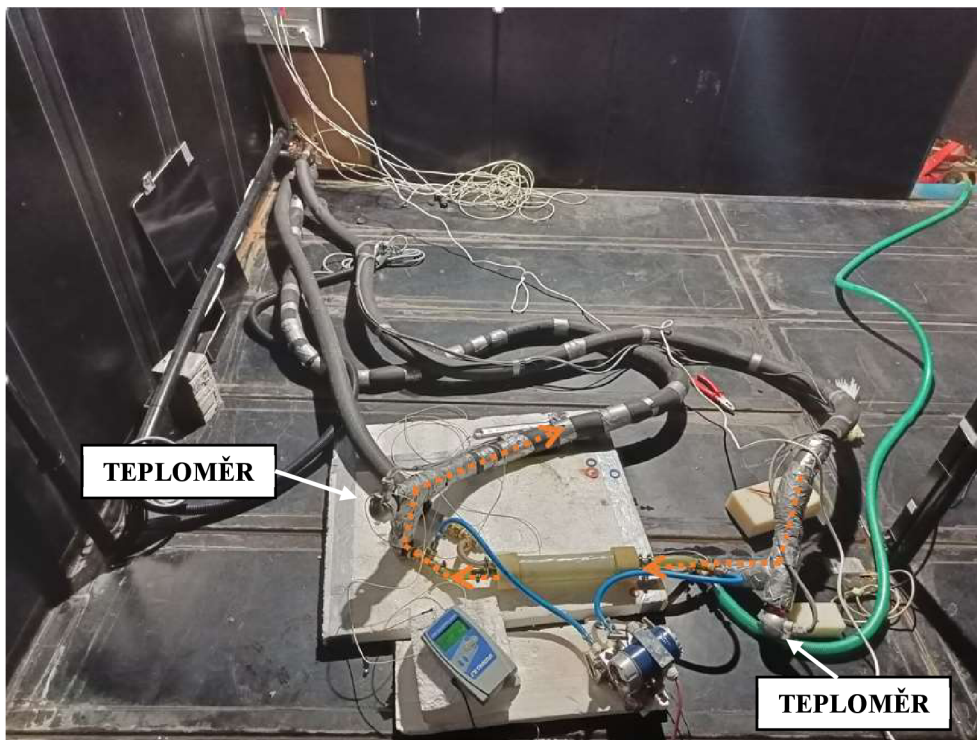
Obr. 4.36 Zjednodušené schéma zapojení chladiče v měřicí komoře

Olejová strana chladiče byla připojena na originální okruh měřicí komory. Okruh je vybaven kotlem který bude ohřívat cirkulující kapalinu a simulovat tak ohřátý olej proudící z motoru. Systém je dále vybaven několika magneticko-indukčními průtokoměry  $c$ , určenými pro měření rozdílných rozsahů průtoků pracovního média. Měření teploty zajišťují odporové sondy Pt100. Obr. 4.37 a Obr. 4.38 Ukazuje zapojení olejové strany chladiče. Chladič byl před začátkem měření tepelně izolován.

Část chladiče určená pro chladičí kapalinu je připojena na druhý okruh tepelné komory, který není vybaven měřicí technikou. Do okruhu byly připojeny dvě odporové sondy Pt100 pro měření tepelné diference a měření průtoku obstarává objemová měřidlo.



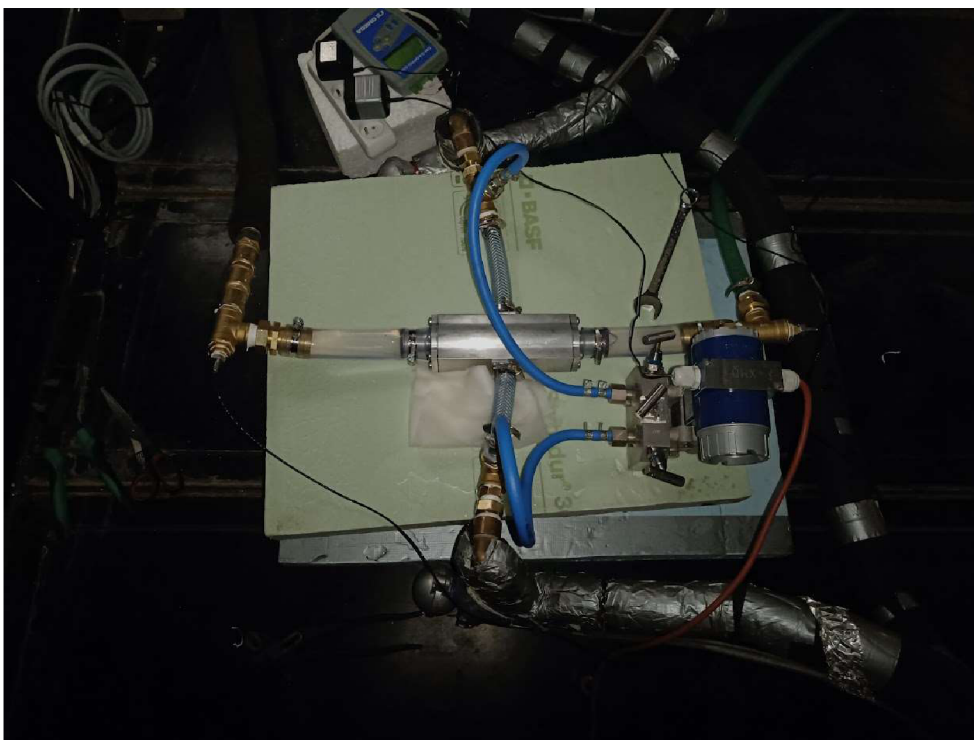
Obr. 4.37 Část okruhu olejové strany chladiče vně měřicí komory.



Obr. 4.38 Část okruhu olejové strany chladiče uvnitř měřicí komory.

#### 4.7.1 Měření chladiče závodního automobilu

Byla provedena dvě základní měření. Při prvním měření nebyla použita přepážka usměrňující proudění chladicí kapaliny do mezikruhových kanálků chladiče a při druhém měření byla přepážka namontována do chladiče. Zapojení olejového chladiče v měřicí komoře je znázorněno na Obr. 4.39. Při měření byl chladič tepelně izolován.



Obr. 4.39 Zapojení olejového chladiče v měřicí komoře.

Obě měření byla provedena pro konstantní průtok na straně chladicí kapaliny olejového chladiče, konkrétně pro průtok  $1 \text{ m}^3/\text{h}$  a pro vstupní teplotu do chladiče  $7,6 \text{ }^\circ\text{C}$ . V olejové straně chladiče byla hodnota průtoku postupně nastavena na hodnoty  $0,03 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $0,05 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $0,07 \text{ m}^3/\text{h}$  a  $0,1 \text{ m}^3/\text{h}$  při konstantní vstupní teplotě  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Tab. 1 Změřené parametry olejového chladiče, konstrukce bez přepážky.

Strana chladiče pro chladicí kapalinu		Strana chladiče pro olej		
$\dot{V}$ [ $\text{m}^3/\text{hod}$ ]	$t_1$ [ $^\circ\text{C}$ ]	$\dot{V}$ [ $\text{m}^3/\text{hod}$ ]	$t_1$ [ $^\circ\text{C}$ ]	$t_2$ [ $^\circ\text{C}$ ]
1	7,65	0,030	70,03	25,30
1	7,65	0,050	70,19	33,60
1	7,65	0,071	70,05	39,63
1	7,65	0,100	70,09	45,60

Tab. 1 shrnuje naměřená data při druhém měření, tedy při konstrukci chladiče bez použití přepážky.



Tab. 2 Změřené parametry olejového chladiče, konstrukce s přepážkou.

Strana chladiče pro chladicí kapalinu		Strana chladiče pro olej		
$\dot{V}$ [m <sup>3</sup> /hod]	$t_1$ [°C]	$\dot{V}$ [m <sup>3</sup> /hod]	$t_1$ [°C]	$t_2$ [°C]
1	7,65	0,030	70,02	12,90
1	7,65	0,050	70,13	17,00
1	7,65	0,071	70,23	21,70
1	7,65	0,100	69,82	27,18

Tab. 2 shrnuje naměřená data při druhém měření, tedy při konstrukci chladiče s použitím přepážky. Při porovnání difference teplot v olejové části chladiče v Tab. 2 a Tab. 1 je patrný výrazný pokles odvodu tepla z olejové části chladiče v případě konstrukce chladiče bez přepážky.

#### 4.7.2 Měření navrženého chladiče

Navržený olejový chladič byl v měřící komoře (Obr. 4.40) měřen pro konstantní průtok na straně chladicí kapalinu olejového chladiče, konkrétně pro průtok 1 m<sup>3</sup>/h se vstupní teplotou do chladiče 9,15 °C. V olejové straně chladiče měla být hodnota průtoku postupně nastavena na hodnoty 0,03 m<sup>3</sup>/h, 0,05 m<sup>3</sup>/h, 0,07 m<sup>3</sup>/h a 0,1 m<sup>3</sup>/h při konstantní vstupní teplotě 70 °C. Při měření byl chladič tepelně izolován.



Obr. 4.40 Zapojení navrženého olejového chladiče v komoře.

Tab. 3 Změřené parametry navrženého olejového chladiče.

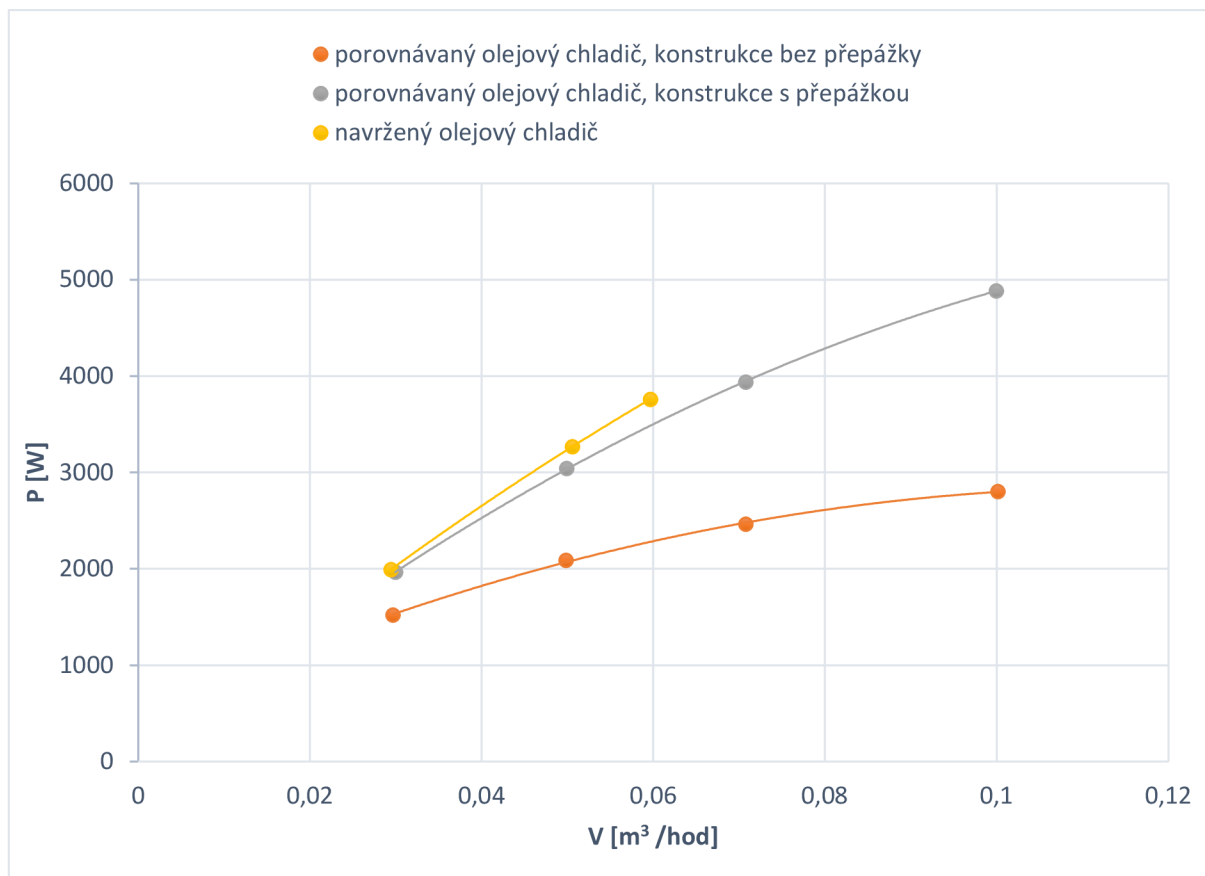
Strana chladiče pro chladicí kapalinu		Strana chladiče pro olej		
$\dot{V}$ [m <sup>3</sup> /hod]	$t_1$ [°C]	$\dot{V}$ [m <sup>3</sup> /hod]	$t_1$ [°C]	$t_2$ [°C]
1	9,2	0,029	70,13	11,16
1	9,2	0,051	70,32	14,03
1	9,2	0,060	70,12	15,19

Z Tab. 3 je patrné, že byly naměřeny pouze tři hodnoty průtoků na olejové straně chladiče. Při průtoku 0,07 m<sup>3</sup>/h nastal problém s dosažením teploty pracovního média 70 °C při vstupu do navrženého chladiče z důvodu nedostatečného výkonu kotle měřící komory. I přesto je patrné, že výstupní teploty ohřátého teplotnosného média jsou při všech měřeních nižší než u porovnávaného chladiče.

Při měření porovnávaného a navrženého chladiče nastala mírná diference v teplotě chladicího média na vstupu do výměníku. Při prvním měření byla teplota 7,65 °C a při druhém 9,2 °C.

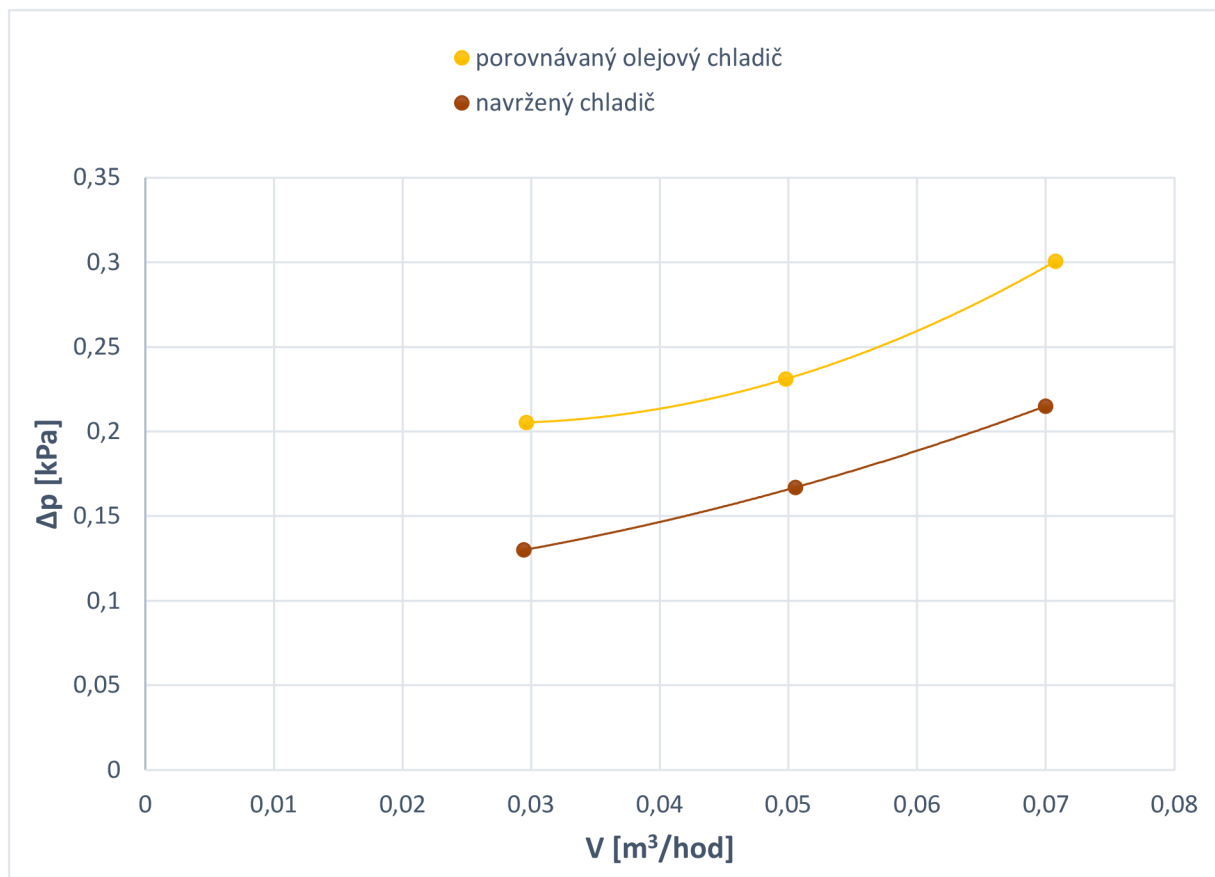
Obr. 4.41 zobrazuje porovnání tepelných výkonů olejových chladičů při měnícím se průtoku chlazeného média. Je patrné, že vliv přepážky u porovnávaného chladiče na jeho tepelný výkon je výrazný. I přes negativní vliv diference teplot chladicího média u porovnávaného a navrženého chladiče na vstupu do výměníku a nezrealizování všech porovnávacích měření se jeví navržený chladič jako výkonnější než porovnávaný chladič.





Obr. 4.41 Porovnání tepelných výkonů olejových chladičů při měnícím se průtoku chlazeného média.

V rámci měření byl zapojen do olejového okruhu, respektive do proudu ohřáté kapaliny, měřicí přístroj stanovující diferenci tlaku v chladiči. Z Obr. 4.42 je zřejmé, že navržený chladič má v celém průběhu měření výrazně nižší tlakové ztráty.



Obr. 4.42 Porovnání tlakových ztrát olejové části chladiče při měnícím se průtoku chlazeného média.

Budoucí výzkum chladiče ve formě měření v certifikovaných měřicích komorách při reálných parametrech pracovních médií a při využití patřičných pracovních médií se na základě získaných poznatků v rámci měření jeví jako smysluplný. V další části se předpokládá možnost testování chladiče v automobilu.

## ZÁVĚR

V rámci práce bylo dosaženo několika dílčích výsledků.

- Byl vytvořen univerzální program v jazyce Python generující G-kód pro ovládání navíjecího zařízení. Funkčnost programu byla ověřena na navrhnutém výměníku. Navržený program zaručuje možnost vytvoření pravidelné a opakovatelné struktury vláken ve vložce výměníku na základě parametrů zadaných uživatelem. Uživatel zadává počet vláken, sklon vláken, geometrii apod. To umožňuje jednoduší porovnání chladičů. Přesnější porovnání různých chladičů umožní efektivnější vylepšení jednotlivých tepelných výměníků. Vytvořená část programu by měla sloužit jako základ programu, do kterého se mohou v budoucnu připojovat další části určené pro navíjení nebo výpočet tepelných výměníků.
- V rámci práce byla popsána samotná výroba chladičů z polymerních dutých vláken. Byly popsány problémy při výrobě vložek výměníku na navíjecím stroji a implementace vylepšení.
- Práce stanovila, že využití polymerního olejového chladiče místo konvenčního olejového chladiče u závodního automobilu je reálné. Navržený výměník dokázal při porovnávacím měření v měřicí komoře Laboratoři přenosu tepla a proudění VUT v Brně ochladit teplé médium, respektive pracovní médium na olejové straně výměníku, více než konvenční olejový chladič. Při průtoku  $0,05 \text{ m}^3/\text{hod}$  v olejové části chladiče dokázal navržený chladič zchladit teplé médium ze  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  na  $14 \text{ }^\circ\text{C}$ , oproti konvenčnímu který zchladil médium jen na  $17 \text{ }^\circ\text{C}$ . V rámci měření byla stanovena i tlaková ztráta v části chladiče určené pro chlazené médium neboli olej. U navrženého chladiče bylo navrženo proudění oleje vně vláken a u porovnávaného chladiče olej proudí v mezikruhovém žebrovaném prostoru. Ze změřených parametrů vyplývá, že tlaková ztráta v navrženém výměníku je menší než u porovnávaného chladiče. Při průtoku  $0,07 \text{ m}^3/\text{hod}$  v olejové části chladiče byla tlaková ztráta v navrženém chladiči  $0,215 \text{ kPa}$ , oproti porovnávanému chladiči kde byla tlaková ztráta  $0,294 \text{ kPa}$ . Měření prokázalo, že navržený chladič má potenciál konkurovat konvenčnímu olejovému chladiči závodního vozidla, i přesto že v samotné konstrukci navrženého chladiče se objevuje spousta míst pro implementaci nových vylepšení na základě získaných zkušeností.



## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *Fundamentals of heat and mass transfer*. 7th ed. Hoboken, NJ: Wiley, c2011. ISBN 978-0470-50197-9.
- [2] BICHKAR, Pranita, Ojas DANDGAVAL, Pranita DALVI, Rhushabh GODASE a Tapobrata DEY. Study of Shell and Tube Heat Exchanger with the Effect of Types of Baffles. *Procedia Manufacturing*. 2018, **20**, 195-200. ISSN 23519789.
- [3] *X-Winder Filament Winding Machines* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://xwinder.com/>
- [4] DERBISZEWSKI, Bogdan, Marek WOZNIAK, Lukasz GRALA, Michal WALECIAK, Maksym HRYSHCHUK, Krzysztof SICZEK, Andrzej OBRANIAK a Przemyslaw KUBIAK. A Study on the Flow Resistance of Fluids Flowing in the Engine Oil-Cooler Chosen. *Lubricants*. 2021, **9**(8). ISSN 2075-4442.
- [5] XIAO, Bao Lan, Wei Ming WU, Xiao Li YU a Guo Dong LU. Optimal Design Method of Fins in Automotive Oil Cooler Based on the Thermal-Hydraulic Performances. *Advanced Materials Research*. 2012, **490-495**, 2381-2385. ISSN 1662-8985.
- [6] SAADI, Mohammed S., Mohammed ISMAIL, Shahram FOTOWAT, Md Abdul QUAIYUM a Amir FARTAJ. Study of Motor Oil Cooling at Low Reynolds Number in Multi-Port Narrow Channels. *SAE International Journal of Engines*. 2013, **6**(2), 1287-1298. ISSN 1946-3944.
- [7] *Improving engine oil cooler performance* [online]. Uppsala, 2015 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://uu.diva-portal.org/smash/get/diva2:825739/FULLTEXT02.pdf.%20Uppsala%20universitet>.
- [8] HEYWOOD, John. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. 1998. ISBN 0-07-02637-X.
- [9] CALLISTER, John R., Timothy M. COSTA, Albert R. GEORGE a Guo Dong LU. The Design of Automobile and Racing Car Cooling Systems. *Advanced Materials Research*. 2012, 1997-05-19, **490-495**, -. ISSN 1662-8985
- [10] *Effect of Cooling System Design on Engine Oil Temperature*. 2013. ISSN 1735-3572.
- [11] SPERLING, L.H. *INTRODUCTION TO PHYSICAL POLYMER SCIENCE*. FOURTH EDITION. Bethlehem, Pennsylvania, 2006. ISBN 10 0-471-70606-X.
- [12] *Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 2. vyd. Praha, 2006. ISBN 80-7080-617-6.
- [13] BARTULI, E. a M. RAUDENSKY. Numerical investigation of heat transfer on the outer surface of polymeric hollow fibers. *Materiali in tehnologije*. 2018, **52**(4), 459-463. ISSN 15802949. Dostupné z: doi:10.17222/mit.2016.221
- [14] LIU, Wei, Jane DAVIDSON a Susan MANTELL. Thermal Analysis of Polymer Heat Exchangers for Solar Water Heating: A Case Study. *Journal of Solar Energy Engineering*. 2000, **122**(2), 84-91. ISSN 0199-6231. Dostupné z: doi:10.1115/1.1288027



## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

<b>Symbol</b>	<b>Veličina</b>	<b>Jednotka</b>
$\alpha$	Součinitel přestupu tepla	$Wm^{-2}K^{-1}$
$t$	Teplota	$^{\circ}C$
$\Delta T_{ln}$	Logaritmický teplotní spád	$^{\circ}C$
$\Delta T$	Diference teplot	$^{\circ}C$
$U$	Součinitel prostupu tepla	$Wm^{-2}K^{-1}$
$P$	Výkon	$W$
$\dot{V}$	Objemový průtok	$m^3s^{-1}$

## SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1.1 Rozdělení tepelných výměníků podle konstrukce.  
Obr. 1.2 Výměník trubka v trubce. (a) Souproudý. (b) Protiproudý [1].  
Obr. 1.3 Trubkový žebrovaný výměník [1].  
Obr. 1.4 Svazkový výměník [1].  
Obr. 1.5 Konstrukce přepážek svazkového výměníku.  
(a) Segmentové. (b) Dvojité Segmentové. (c) Šroubovitě. [2]  
Obr. 1.6 Tlakové ztráty svazkového výměníku v závislosti na druhu použitých přepážek.  
(a) Segmentové. (b) Dvojité Segmentové. (c) Šroubovitě. [2]  
Obr. 1.7 Různé konstrukce kompaktních výměníků [1].  
Obr. 1.8 Regenerační rotační tepelný výměník.  
Obr. 1.9 Princip funkce olejového deskového chladiče [4].  
Obr. 1.10 Typická konstrukce žeber [5].  
Obr. 1.11 LPD a HPD uspořádání žeber v závislosti na směru proudění média [5].  
Obr. 1.12 Průběh rychlostí (první obrázek je uspořádáním LPD a druhý HPD) [5].  
Obr. 1.13 Průběh teplot (první obrázek je uspořádáním HPD a druhý LPD) [5].  
Obr. 1.14 Průběh tlaku v olejovém kanálku [5].  
Obr. 2.1 Chladicí systém automobilu [7].  
Obr. 2.2 Čerpadlo chladicího okruhu [7].  
Obr. 2.3 Olejový filtr a olejový chladič [7].  
Obr. 2.4 Píst zážehového motoru [7].  
Obr. 2.5 Píst vznětového motoru [7].  
Obr. 2.6 Zapalování ve vznětovém a zážehovém motoru [7].  
Obr. 2.7 Teplotní profil pístů [7].  
Obr. 2.8 Chlazení ostříkem [7].  
Obr. 2.9 Chlazení pístů chladícím kanálem [7].  
Obr. 2.10 Tepelný tok a teploty v pístu chlazeným chladícím kanálkem [7].  
Obr. 2.11 Tepelný tok a teploty v pístu chlazeným ostříkem [7].  
Obr. 3.1 Dělení polymerů z hlediska jejich chování za běžné a zvýšené teploty.  
Obr. 4.1 Navíjecí zařízení 4X-23 a 2X-23 se zobrazenými osami pohybu [3].  
Obr. 4.2 Rotační pohyb v ose rotace C.  
Obr. 4.3 Pohyb ve směru osy Y a rotační pohyb v ose rotace B.  
Obr. 4.4 Pohyb ve směru osy Z.  
Obr. 4.5 Původní konstrukce navíjecí hlavy [3].  
Obr. 4.6 Navíjecí hlava určená pro navíjení skleněného vlákna.  
Obr. 4.7 Navíjecí hlava určená pro navíjení polymerních dutých vláken.  
Obr. 4.8 Přípravek proti sklouzávání dutých vláken.  
Obr. 4.9 Použití přípravku proti sklouzávání dutých vláken v průběhu navíjení.  
Obr. 4.10 Olejový chladič určený pro závodní automobil.  
Obr. 4.11 Hlavní komponenty olejového chladiče pro závodní automobil.  
Obr. 4.12 Princip funkce olejového chladiče závodního automobilu.  
Obr. 4.13 Princip funkce přepážky v olejovém chladiči.  
Obr. 4.14 Schéma navrženého olejového chladiče.  
Obr. 4.16 Sklon vláken vzhledem k ose výměníku.  
Obr. 4.17 Součinitel prostupu tepla vláken na základě sklonu vláken pro pracovní medium voda-voda [13].  
Obr. 4.18 První pohyb navíjecího zařízení v průběhu navíjení vložky výměníku.  
Obr. 4.19 Druhý pohyb navíjecího zařízení v průběhu navíjení vložky výměníku.

- Obr. 4.20 Třetí pohyb navíjecího zařízení v průběhu navíjení vložky výměníku.
- Obr. 4.21 Čtvrtý pohyb navíjecího zařízení v průběhu navíjení vložky výměníku.
- Obr. 4.22 Pátý pohyb navíjecího zařízení v průběhu navíjení vložky výměníku.
- Obr. 4.23 Šestý a sedmý pohyb navíjecího zařízení v průběhu navíjení vložky výměníku.
- Obr. 4.24 Geometrické parametry pro tvorbu vložky výměníku.
- Obr. 4.25 Geometrické parametry programu pro navíjení pomocných ploch.
- Obr. 4.26 Karbonová trubka vytvářející jádro výměníku.
- Obr. 4.29 Struktura dutých vláken v průběhu navíjení vložky výměníku.
- Obr. 4.30 Konečná struktura dutých vláken ve vložce výměníku.
- Obr. 4.31 Počátek procesu navíjení pláště výměníku.
- Obr. 4.32 Výsledná struktura vložky po navinutí pláště výměníku.
- Obr. 4.33 Konečná konstrukce vložky výměníku po navíjecím procesu.
- Obr. 4.34 Navržený chladič.
- Obr. 4.35 Navržený chladič.
- Obr. 4.36 Zjednodušené schéma zapojení chladiče v měřicí komoře
- Obr. 4.37 Část okruhu olejové strany chladiče vně měřicí komory.
- Obr. 4.38 Část okruhu olejové strany chladiče uvnitř měřicí komory.
- Obr. 4.39 Zapojení olejového chladiče v měřicí komoře.
- Obr. 4.40 Zapojení navrženého olejového chladiče v komoře.
- Obr. 4.41 Porovnání tepelných výkonů olejových chladičů při měnícím se průtoku chlazeného média.

## **SEZNAM TABULEK**

- Tab. 1 Změřené parametry olejového chladiče, konstrukce bez přepážky.  
Tab. 2 Změřené parametry olejového chladiče, konstrukce s přepážkou.  
Tab. 3 Změřené parametry navrženého olejového chladiče.