



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

## VLIV PŘÍMĚSÍ VE VODĚ NA SPRCHOVÉ CHLAZENÍ HORKÝCH KOVOVÝCH POVRCHŮ

INFLUENCE OF WATER ADDITIVES ON THE SPRAY COOLING OF HOT METAL SURFACES

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Hrnčířík

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Chabičovský, Ph.D.

BRNO 2025

# Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav  
Student: **Tomáš Hrnčířik**  
Studijní program: Základy strojního inženýrství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Martin Chabičovský, Ph.D.**  
Akademický rok: 2024/25

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 bakalářské práce:

## **Vliv příměsí ve vodě na sprchové chlazení horkých kovových povrchů**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Při sprchovém chlazení je voda rozprašovaná na chlazený povrch tryskami, přičemž dochází k rozpadu proudu vody na kapky. Sprchové chlazení horkých povrchů lze charakterizovat jako nucenou konvekci za přítomnosti varu. Tento fyzikálně komplikovaný děj je ovlivňován mnoha faktory. Jedním z nich jsou i různé příměsí ve vodě. Tato práce se zaměří na teoretické případně i experimentální posouzení vlivu různých příměsí ve vodě (oleje, soli, surfaktanty, pevné nanočástice, ...) na součinitel přestupu tepla a charakteristické body křivky varu.

### **Cíle bakalářské práce:**

V rámci práce bude teoreticky studováno, jak se mění vlastnosti vody (viskozita, hustota, měrná tepelná kapacita a součinitel tepelné vodivosti) pro různé koncentrace příměsí. Na základě existující teorie bude posouzen vliv různých příměsí na velikost kapek vycházejících z trysek. Pomocí těchto poznatků bude následně provedeno porovnání jednotlivých příměsí a s využitím existujících korelací bude posouzen vliv na součinitel přestupu tepla a na charakteristické body křivky varu. Dále bude zhodnoceno, které existující korelace správně reagují na přítomnost příměsí ve vodě.

V rámci práce je plánováno též provedení zjednodušeného experimentálního výzkumu s vybranými příměsemi, který bude mít za cíl validovat či doplnit chybějící údaje o jejich vlivu na chlazení. Student tak bude mít možnost se prakticky seznámit s měřením (a následným výpočtem) součinitele přestupu tepla v Laboratoři přenosu tepla a proudění na FSI VUT.

### **Seznam doporučené literatury:**

[1] LUTY, W. Cooling Media and Their Properties. In: LIŠČIC, B.; TENSI, H. M.; CANALE, L.; TOTTEN, G. E., eds. Quenching theory and technology. 2nd ed., CRC Press Taylor & Francis Group, 2010, str. 359-443, ISBN 978-0-8493-9279-5

[2] HORÁK, A.; RAUDENSKÝ, M.; POHANKA, M.; BELLEROVÁ, H.; REICHERDT, T. Research on Cooling Efficiencies of Water, Emulsions and Oil. Metallurgical and Mining Industry, 2010, roč.2, č. 4, str. 271-278.

[3] CHABIČOVSKÝ, M. Faktory ovlivňující sprchové chlazení za vysokých teplot. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 105 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Miroslav Raudenský, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2024/25

V Brně, dne

L. S.

---

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

---

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce se zabývá vlivem různých příměsí ve vodě, na účinnost sprchového chlazení horkých ocelových povrchů. Pomocí existujících rovnic je zkoumána změna vlastností vody (viskozita, hustota, měrná tepelná kapacita, součinitel tepelné vodivosti a povrchové napětí) pro různé koncentrace příměsí. Dále za pomoci existujících korelací byly provedeny predikce pro změnu součinitele přestupu tepla a Leidenfrostovy teploty pro 3 druhy příměsí (olej, ethanol a sůl). V Laboratoři přenosu tepla a proudění na FSI VUT byla během experimentálního výzkumu charakterizována změna součinitele přestupu tepla a Leidenfrostovy teploty pro různé koncentrace soli a ethanolu ve vodě a výsledky následně porovnány s predikcemi a existující teorií. Výrazný pokles součinitele přestupu tepla byl predikován pro směsi vody a oleje. Nejvyšší účinnost chlazení byla experimentálně prokázána u směsi ze solí.

## **Klíčová slova**

Sprchové chlazení, vlastnosti kapalin, vlastnosti směsí, součinitel přestupu tepla, příměsí ve vodě, Leidenforostova teplota

## **ABSTRACT**

This bachelor's thesis focuses on the effect of various additives in water on the effectiveness of spray cooling of hot steel surfaces. Using existing equations, changes in the properties of water (viscosity, density, specific heat capacity, thermal conductivity coefficient, and surface tension) are examined for different concentrations of additives. While utilizing of existing correlations, predictions were made for changes in the heat transfer coefficient and Leidenfrost temperature for three types of additives (oil, ethanol, and salt). In the Laboratory of Heat Transfer and Fluid Flow at the Faculty of Mechanical Engineering, Brno University of Technology, experimental research was conducted to characterize changes in the heat transfer coefficient and Leidenfrost temperature for various concentrations of salt and ethanol in water. The results were then compared with the predictions and existing theory. Theoretical predictions indicated a significant drop in the heat transfer coefficient for water-oil mixtures. Experimental results showed that the salt mixture achieved the highest cooling efficiency.

## **Key words**

Spray cooling, properties of liquids, properties of mixtures, heat transfer coefficient, additives in water, Leidenfrost temperature

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

HRNČIŘÍK, Tomáš. *Vliv příměsí ve vodě na sprchové chlazení horkých kovových povrchů*. Bakalářská práce. Martin CHABIČOVSKÝ (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2025.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Vliv příměsí ve vodě na sprchové chlazení horkých kovových povrchů** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

---

Datum

---

*Tomáš Hrnčířik*

## **PODĚKOVÁNÍ**

Na tomto místě bych rád vyjádřil poděkování mému vedoucímu práce Ing. Martinu Chabičovskému, Ph.D. za odborné vedení, cenné připomínky a metodické rady, které mi poskytoval během celého řešení této práce. Zároveň bych chtěl poděkovat své rodině za trpělivost, podporu a motivaci, kterou mi poskytovala po celou dobu studia.

## OBSAH

ÚVOD .....	9
1 Přenos tepla .....	10
1.1 Vedení .....	10
1.2 Konvekce .....	11
1.3 Záření .....	13
1.4 Var.....	14
2 Sprchové chlazení .....	17
2.1 Trysky .....	17
2.2 Odhad součinitele přestupu tepla .....	19
2.3 Leidenfrostova teplota.....	19
2.4 Parametry sprchového chlazení .....	20
2.5 Chladicí médium .....	20
2.6 Vlastnosti ovlivňující účinnost chladicího média .....	21
3 Predikce vlastností sprchového chlazení.....	39
3.1 Směs vody a oleje .....	39
3.2 Směs vody a ethanolu .....	41
3.3 Směs vody a soli .....	43
4 Laboratorní měření.....	46
4.1 Experimentální zařízení a popis měření.....	46
4.2 Výsledky měření .....	49
4.2.1 Referenční hodnoty vody .....	49
4.2.2 Směs vody a technického lihu.....	52
4.2.3 Směs vody a soli (NaCl) .....	56
ZÁVĚR .....	62
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	63
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	66
SEZNAM OBRÁZKŮ .....	68
SEZNAM TABULEK.....	70
PŘÍLOHY .....	71

## ÚVOD

Sprchové chlazení představuje účinnou metodu odvodu tepla, která je využívána zejména v procesech, kde je potřebné rychle a účinně ochladit silně přehřáté povrchy. Používá se převážně v metalurgii, jaderné energetice nebo u výkonné elektroniky, kde se často pracuje s povrchy, jejichž teplota výrazně přesahuje bod varu chladicí kapaliny.

Princip sprchového chlazení spočívá v rozprašování malých kapiček kapaliny (nejčastěji vody) na horký povrch. Po dopadu se kapky rozprostřou, absorbují teplo z povrchu a následně se částečně nebo zcela odpaří. Tento proces je doprovázen intenzivní fázovou změnou, která umožňuje odvod velkého množství tepla díky vysoké latentní tepelné kapacitě vody. Sprchové chlazení je považováno za kombinaci nucené konvekce a přestupu tepla při varu, což jej činí velmi účinným při vysokých tepelných tocích.

Proces přestupu tepla během sprchového chlazení je složitý a závisí na několika fázích varu. Při nižších teplotách povrchu dochází k přestupu tepla především vedením, kdy se kapka pouze ohřívá, aniž by došlo k jejímu okamžitému vypaření. Zvýšením teploty povrchu dochází k nástupu bublinkového varu, čímž vznikají parní bubliny na místech nečistot a povrchových nerovností. Tento režim je považován za nejefektivnější z hlediska přestupu tepla. Při dalším zvýšení teploty dochází ke vzniku stabilní parní vrstvy (filmový var), která brání přímému kontaktu kapky s povrchem. V tomto stavu kapka klouže po vrstvě páry a dochází k podstatnému snížení tepelného toku, protože pára má velmi nízkou tepelnou vodivost. Přejít mezi těmito režimy je závislý nejen na teplotě, ale také na fyzikálních vlastnostech kapaliny, tlaku prostředí, velikosti kapky a dalších parametrech.

Účinnost sprchového chlazení je určena komplexní souhrou několika parametrů. Mezi hlavní fyzikální faktory patří: teplota povrchu, tepelná vodivost a struktura povrchu, rychlost a velikost dopadajících kapek, typ trysky, pracovní tlak, a v neposlední řadě také vlastnosti samotné kapaliny. Dále je důležitý i úhel dopadu kapek, frekvence a rozložení dopadů, případně interakce mezi kapkami. To vše ovlivňuje kontaktní dobu kapky s povrchem, intenzitu varu a celkový součinitel přestupu tepla. Proto se i drobné změny v chemickém složení kapaliny mohou významně promítnout do tepelné účinnosti celého procesu.

Přítomnost různých příměsí ve vodě zásadním způsobem ovlivňuje její fyzikálně-chemické vlastnosti a tím i samotné chování během sprchového chlazení. V této práci byly analyzovány příměsi typu sůl (NaCl), ethanol a olej. Pomocí dostupných teoretických rovnic byla sledována změna vlastností jako je viskozita (vliv na proudění a rozptyl), hustota (vliv na setrvačnost kapek), měrná tepelná kapacita (vliv na množství absorbovaného tepla), součinitel tepelné vodivosti (vliv na šíření tepla v kapce) a povrchové napětí (vliv na kontakt s povrchem a var). Například ethanol snižuje povrchové napětí a viskozitu, což napomáhá lepšímu rozprostření kapky po povrchu, ale zároveň snižuje bod varu, což může vést k předčasnému vypaření. Sůl naopak bod varu zvyšuje a při vyšších koncentracích může způsobovat nežádoucí usazeniny. Oleje mají tendenci vytvářet na povrchu ochranný film, který výrazně snižuje efektivitu přestupu tepla.

Na základě modifikovaných korelací z odborné literatury byly v práci provedeny predikce změn součinitele přestupu tepla a Leidenfrostovy teploty pro výše uvedené příměsi. Pro každou z nich byla vyhodnocena závislost na koncentraci a její dopad na výsledný průběh chlazení.

Pro ověření teoretických závěrů a modelových výpočtů byly v rámci této práce v Laboratoři přenosu tepla a proudění na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně provedeny řízené experimenty, díky kterým byla vypočtena změna součinitele přestupu tepla a Leidenfrostovy teploty u roztoků s různými koncentracemi ethanolu a soli ve vodě.

## 1 Přenos tepla

Teplu lze definovat jako formu energie, která může být přenášena z jednoho systému do druhého díky jejich teplotnímu rozdílu. Mezi tři základní mechanismy přenosu tepla patří vedení (kondukce), konvekce (proudění) a záření (radiace, sálání). Teplu vždy přechází z teplejšího tělesa na chladnější těleso, dokud se jejich vzájemné teploty nevyrovnají. [1]

### 1.1 Vedení

Přenos tepla vedením lze definovat jako přenos energie z částice s vyšší energií na částici s nižší energií. Čím vyšší je teplota, tím vyšší je energie částic a pokud je v látce teplotní gradient, dochází k přenosu tepla ve směru klesající teploty. [2]

Vedení probíhá v pevných látkách, kapalinách a plynech. V plynech a kapalinách dochází k náhodnému pohybu molekul z oblasti s vyšší energií do oblasti s nižší energií. Tento náhodný pohyb nazýváme difúzí energie, a tudíž lze vedení tepla také označovat jako proces tepelné difuze. V pevných látkách je vedení tepla výsledkem kombinace vlnového pohybu krystalické mřížky a přenosu energie volnými elektrony. [2] [1]

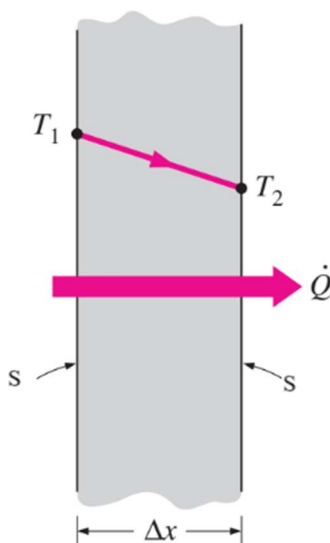
Vedení tepla lze matematicky popsat pomocí Fourierova zákona ve tvaru:

$$\dot{q} = -\lambda \text{grad}T, \quad (1.1)$$

kde  $\dot{q}$  [ $\text{Wm}^{-2}$ ] je hustota tepelného toku,  $-\lambda$  [ $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ] je součinitel tepelné vodivosti a  $\text{grad}T$  je teplotní gradient.

Na obrázku 1.1 je patrný přenos tepla vedením přes rovinnou stěnu o ploše  $S$  a o tloušťce  $\Delta x$  ve směru osy  $x$  a další dva rozměry považujeme za nekonečné, tudíž mají nekonečně velký odpor a tímto směrem se teplo nevede. Na levé straně stěny je teplota stěny  $T_1$  a na druhé je teplota  $T_2$ , a přitom  $T_1 > T_2$ . Pro tento jednoduchý jednorozměrný příklad lze Fourierův zákon upravit a hustota tepelného toku ve směru osy  $x$  je pak dána vztahem

$$\dot{q}_x = -\lambda \frac{dT}{dx} = -\lambda \frac{T_2 - T_1}{\Delta x}.$$



Obrázek 1.1 Vedení tepla přes rovinnou stěnu [1]

(1.2)

Pro celkový tepelný tok přenášený povrchem o ploše  $S$ , kolmým na směr tepelného toku platí následující vztah:

$$\dot{Q}_x = -\lambda S \frac{T_2 - T_1}{\Delta x}.$$

(1.3)

Součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  je fyzikální vlastnost látky a zároveň také konstanta úměrnosti ve Fourierově zákoně (1.1). Téměř u všech látek je tepelná vodivost funkcí teploty a u nehomogenních látek závisí na poloze v tělese. U plynů je tepelná vodivost úměrná druhé odmocnině termodynamické teploty a nepřímo úměrná druhé odmocnině molární hmotnosti. Proto se tepelná vodivost plynu zvyšuje se zvyšující se teplotou a klesající molární hmotností. [2]

Mechanismus součinitele tepelné vodivosti v kapalině je komplikovanější tím, že molekuly jsou blíže u sebe a vyvíjejí tedy silnější intermolekulární silové pole. Na rozdíl od plynů se součinitel tepelné vodivosti většiny kapalin s rostoucí teplotou snižuje, ale voda je výjimkou. U plynů se vodivost kapalin s rostoucí molární hmotností snižuje. [1]

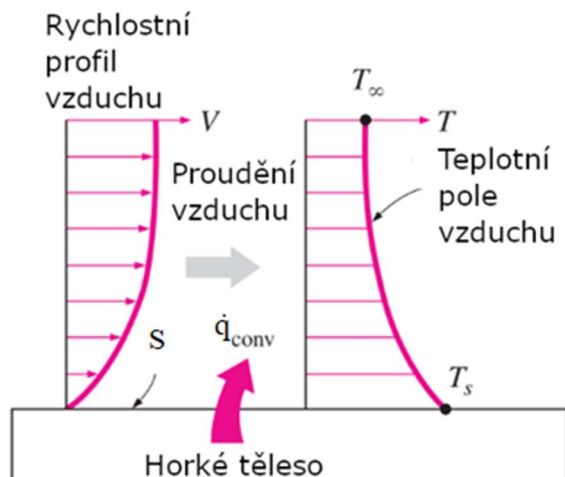
## 1.2 Konvekce

Je způsob přenosu tepla mezi proudící tekutinou a omezujícím povrchem, přičemž oba mají různou teplotu. Tento přenos je složen ze dvou mechanismů, a to je difúze a advekce. Difúze je základní náhodný pohyb molekul a lze ji primárně pozorovat na rozhraní mezi tekutinou a povrchem, jelikož v blízkosti pevného povrchu se rychlost proudění blíží 0. Advekce je objemový, makroskopický pohyb tekutiny, což znamená, že v každém okamžiku se velké množství molekul pohybuje kolektivně. Čím vyšší je rychlost proudění kapaliny, tím vyšší je přenos tepla konvekcí.

Konvekci lze dále rozdělovat dle povahy proudění:

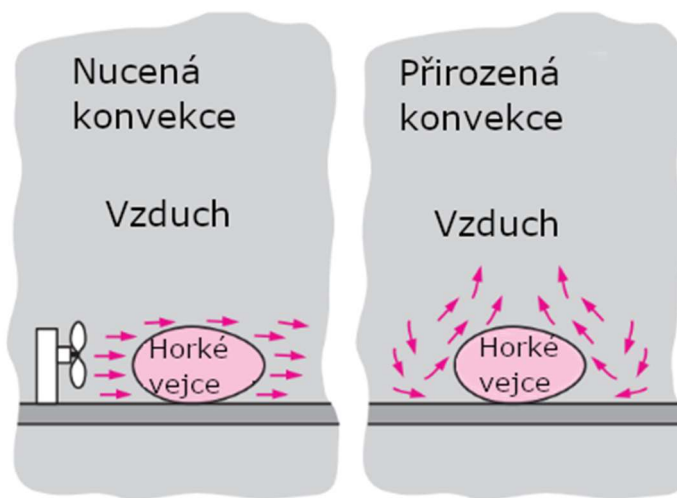
- Nucená konvekce
- Přírozená konvekce (volná)
- Kombinovaná konvekce

Na obrázku 1.2 lze vidět rychlostní profil vzduchu a teplotní pole vzduchu. Na horkém povrchu je nulová rychlost a teplota vzduchu je stejná jako teplota horkého povrchu, zde je využíváno k přenosu tepla vedení. Toto teplo je následně odnášeno od povrchu konvekcí, která je způsobena pohybem vzduchu a odvádí ohřátý vzduch z blízkosti povrchu a nahrazuje ho chladnějším vzduchem.



Obrázek 1.2 Přenos tepla z horkého povrchu do vzduchu konvekcí [1]

Obrázek 1.3 ukazuje rozdíl mezi nucenou a přirozenou konvekcí. Nucená konvekce je vyvolána vnějšími účinky, třeba pomocí ventilátoru či čerpadla. Přirozená konvekce vzniká v důsledku vztlakových sil. Tyto síly jsou vyvolány díky rozdílům v hustotě tekutiny a v důsledku změny teploty v tekutině. Takže lehčí teplejší tekutina stoupá vzhůru zatímco chladnější těžší tekutina klesá dolů, aby zaplnila její místo.



Obrázek 1.3 příklady nucené a přirozené konvekce. [1]

Existují také konvektivní procesy, u kterých probíhá též přenos latentního tepla. Tyto procesy jsou spojeny s fázovou přeměnou – var a kondenzace. Bez ohledu na charakter konvekce platí pro přenášenou hustotu tepelného toku vztah zvaný Newtonův ochlazovací zákon:

$$\dot{q} = \alpha(T_w - T_\infty), \quad (1.4)$$

kde  $\alpha[\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}]$  je součinitel přestupu tepla, který ovšem není přímou vlastností tekutiny. Jedná se o převážně experimentálně určený parametr, jehož hodnota závisí na všech proměnných ovlivňujících konvekci, jako je geometrie povrchu, povaha pohybu kapaliny,

vlastnosti kapaliny a rychlost kapaliny.  $T_w$  je teplota povrchu obtékaného tělesa a  $T_\infty$  je teplota tekutiny v dostatečné vzdálenosti od povrchu obtékaného tělesa. [1] [2]

### 1.3 Záření

Přenos tepla zářením (radiací) je jedním ze tří základních mechanismů přenosu tepla, spolu s vedením (kondukcí) a prouděním (konvekci). Na rozdíl od těchto dvou způsobů nevyžaduje k šíření žádné látkové prostředí a může tak probíhat i ve vakuu. Záření je formou elektromagnetických vln, přičemž pro tepelný přenos je nejvýznamnější infračervené spektrum.

Záření se šíří rychlostí světla a je vyzařováno všemi tělesy s teplotou vyšší než absolutní nula. Intenzita a spektrum vyzařovaného tepla závisejí na teplotě a emisivitě povrchu tělesa. Díky své nezávislosti na prostředí je záření dominantním mechanismem přenosu tepla v kosmu.

V praktických situacích se často kombinují všechny tři způsoby přenosu tepla, přičemž jejich význam se liší podle konkrétního děje. Například u slunečního záření převažuje radiace, zatímco při ohřevu vzduchu topným tělesem může dominovat vedení a konvekce. [1] [2]

Maximální hustota tepelného toku, kterou lze z povrchu emitovat, je dána Stefan-Boltzmanovým zákonem:

$$\dot{q} = E_0 = \sigma_0 T_w^4, \quad (1.5)$$

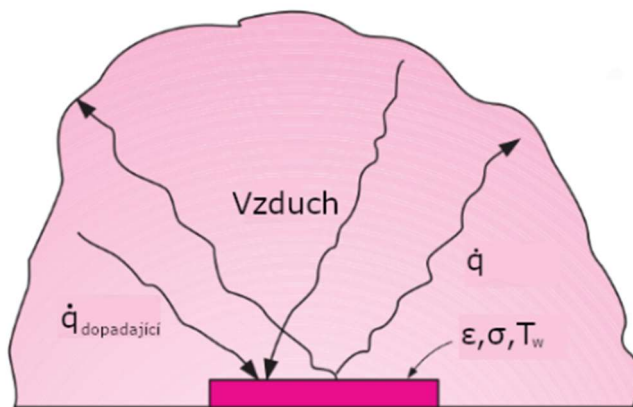
kde  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} [\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}]$  je Stefan-Boltzmanova konstanta a  $T_w$  je teplota povrchu. Dolní index 0 značí, že se jedná o tzv. černé těleso. Černým tělesem je označován ideální zářič, který vyzařuje maximální možnou energii. Pro reálné povrchy platí:

$$E_0 = \varepsilon \sigma_0 T_w^4, \quad (1.6)$$

kde  $\varepsilon$  je poměrná zářivost (emisivita) povrchu, která nabývá hodnot  $0 \leq \varepsilon \leq 1$  a díky ní lze hodnotit účinnost záření z povrchu v porovnání s ideálním zářičem neboli černým tělesem.

Záření dopadající na povrch může být z části absorbováno. Kolik záření dokáže povrch absorbovat určuje veličina nazývaná absorptance, neboli poměrná pohltivost. Absorptance nabývá hodnot  $0 \leq a \leq 1$  a pro energii pohlcenou povrchem platí:  $\dot{q} = a \dot{q}_{\text{dopadající}}$ . [2]

Obrázek 1.4 znázorňuje tepelný tok způsobený radiací mezi povrchem a okolním prostředím (vzduchem).



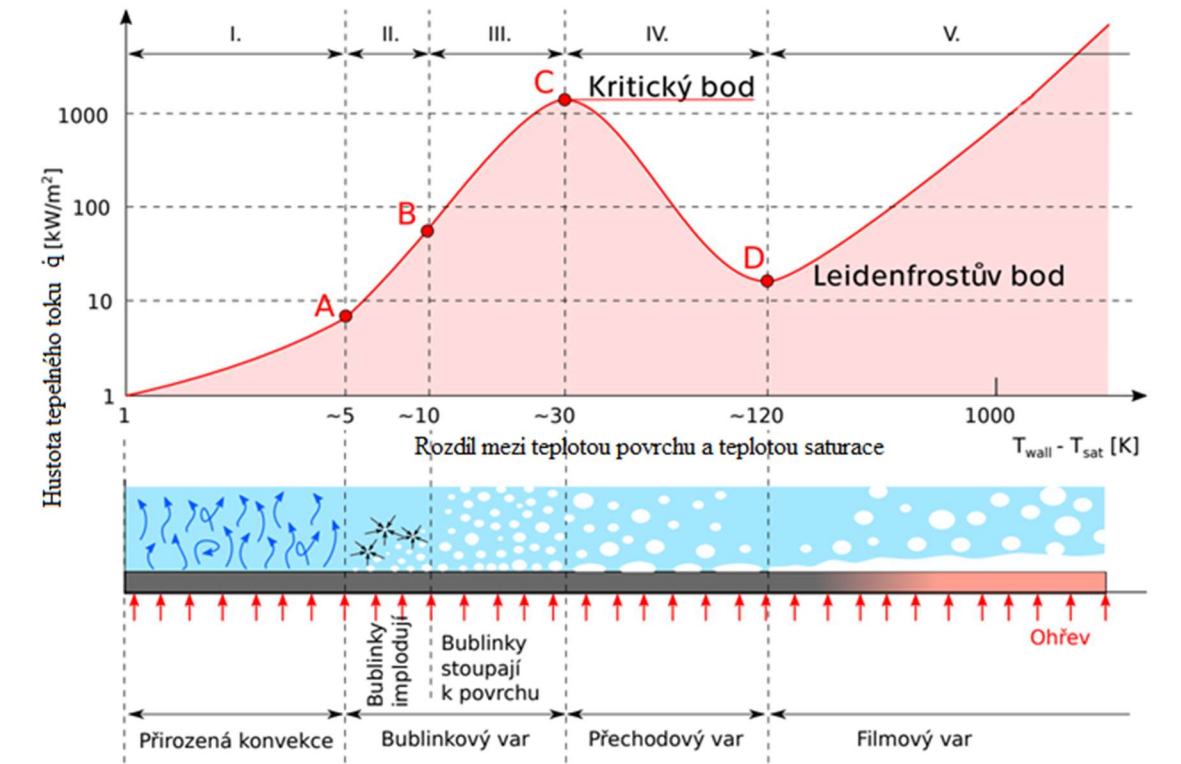
Obrázek 1.4 Přenos tepla zářením mezi povrchem a okolním prostředím [1]

## 1.4 Var

Pro účinnost chlazení je významný také bod varu. Při varu dochází k přeměně kapaliny na plyn nejen na jejím povrchu, ale i v celém objemu. Var nastává tehdy, když tlak nasycené páry kapaliny dosáhne hodnoty okolního tlaku. V tomto bodě dochází ke vzniku bublin páry uvnitř kapaliny, které stoupají na povrch. Na rozdíl od vypařování, které probíhá pouze na povrchu kapaliny při jakékoli teplotě, var je děj probíhající při určité teplotě v celém objemu kapaliny. Při dosažení bodu varu se teplota kapaliny dále nezvyšuje. Veškerá dodaná tepelná energie je využita na překonání vazeb mezi částicemi a slouží jako skryté (latentní) teplo varu. Bod varu závisí na okolním tlaku, s rostoucím tlakem se zvyšuje, s klesajícím tlakem se naopak snižuje. [3]

Na obrázku 1.5 je v horní části znázorněna křivka varu ve velkém objemu pro nepohybující se kapalinu (bez nucené konvekce) nad rovinnou deskou. V jeho spodní části se nacházejí jednotlivé režimy varu pro dané oblasti křivky. Tyto oblasti jsou

1. Přirozená konvekce (oblast I): Kapalina nemá v celém objemu teplotu saturace a pohyb kapaliny je způsoben pouze přirozenou konvekcí.
2. Bublínkový var (oblast II a III): Tento var tvoří 2 podoblasti. V první podoblasti se začínají tvořit izolovaná varná jádra (body A-B), na kterých vznikají bubliny. S narůstající teplotní diferencí se vytváří stále více těchto jader. V druhé oblasti se díky stoupající teplotě povrchu aktivuje více bublinových jader. Tvorba bublin se tak zvyšuje a bublinová jádra rostou a oddělují se od horkého povrchu (body B-C). Zvýšená tvorba bublin způsobuje zintenzivnění promíchávání kapaliny.
3. Přechodový var (oblast IV): Jedná se o přechodný režim mezi bublínkovým a filmovým varem. Je zde dosaženo maximálního tepelného toku (bod C), který následně klesá v důsledku velmi rychlé tvorby bublin. Na povrchu se začíná tvořit nesouvislá vrstva páry izolující povrch. V kterémkoli bodě povrchu se mohou střídát podmínky mezi bublínkovým a filmovým varem. Podíl vrstvy par pokrývající povrch se zvyšuje s rostoucí teplotou. Vzhledem k tomu, že tepelná vodivost páry je mnohem nižší než tepelná vodivost kapaliny, součinitel přestupu tepla a hustota tepelného toku se s rostoucí hodnotou tepelné difference snižují.
4. Filmový var (blánový) (oblast V): Vzniká vytvářením stálé vrstvy páry mezi horkým povrchem a kapalinou a zabraňuje tak smáčení povrchu kapalinou. Přenos tepla mezi horkým povrchem a kapalinou probíhá vedením a sáláním přes parní vrstvu. Bubliny se netvoří na horkém povrchu, ale na rozhraní mezi vrstvou páry a kapalinou. S rostoucí teplotou povrchu se zintenzivňuje přenos tepla sáláním a zvyšuje se hustota tepelného toku mezi horkým povrchem a kapalinou. [2] [4]

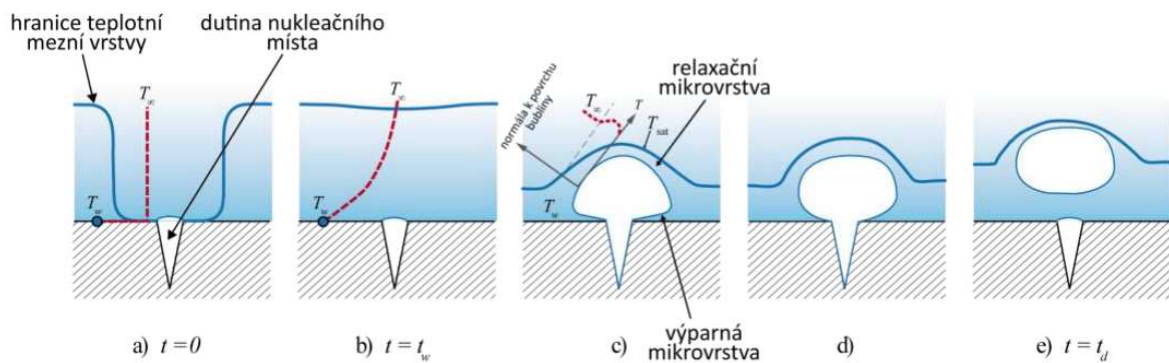


Obrázek 1.5 Křivka varu [32]

Na rozhraní mezi jednotlivými režimy varu se nachází přechodové body. Tři již byly popsány u objasnění jednotlivých druhů varu. Poslední nepopsaný bod D se nachází na rozhraní mezi přechodovým a filmovým varem. Hustota tepelného toku dosahuje v tomto bodě minima a teplota, při které je tohoto minima dosaženo, se nazývá Leidenfrostova teplota. Tato teplota se někdy označuje jako teplota smáčení povrchu. Leidenfrostova teplota je velmi závislá na procesu chlazení a vlastnostech kapaliny, jakož i na podmínkách povrchu, jako je jeho drsnost, povrchové vrstvy oxidů a tepelná vodivost materiálu. [4]

Zmíněný popis varu platí pro var ve velkém objemu. Pro var při nucené konvekcii, obzvláště při chlazení vodními tryskami (značně turbulentní proudění) dochází ke stejným režimům varu, avšak křivka varu může mít trochu jiný tvar (téměř konstantní při filmovém varu) [4]

Na obrázku 1.6 lze vidět jednotlivá stadia vzniku a vývoje parní bubliny u přehřátého pevného povrchu obklopeného kapalinou při teplotě varu.



Obrázek 1.6 Stadia vzniku a vývoje parní bubliny u přehřátého pevného povrchu [31]

Na obrázku 1.6a a lze pozorovat vyplnění dutiny nukleačního místa kapalinou, která se dostane do kontaktu s přehřátým horkým povrchem. Po velmi krátký časový interval teplo z horkého povrchu přechází přímo do kapaliny a ohřívá ji, aniž by docházelo ke vzniku parní bubliny. Tento interval se označuje jako vyčkávací perioda  $t_w$ .

Po ukončení vyčkávací periody je parní bublina uzavřena v dutině nukleačního místa (viz obrázek 1.6b) a teplo potřebné k odpařování je předáváno z kapaliny přiléhající k povrchu bubliny. V tomto počátečním stádiu vývoje bubliny je kapalina silně přehřátá.

Jakmile zárodečná bublina přeroste prostor nukleačního místa, dojde k její rychlé expanzi, a to v důsledku rychlého růstu poloměru a jejího zakřivení. V tomto stadiu má bublina polokulovitý tvar (viz obrázek 1.6c) a také lze pozorovat tzv. výparnou mikro vrstvu kapaliny mezi dolním povrchem bubliny a topnou plochou.

Tenká oblast kapaliny, která přiléhá k povrchu parní bubliny je nazývána jako relaxační mikro vrstva. Ta se v průběhu růstu bubliny přehřívá a její objem klesá. Její teplotní profil lze vidět na obrázku 1.6c. Na rozhraní mezi kapalinou a párou je teplota rovna saturační teplotě odpovídající lokálnímu tlaku v kapalině. S rostoucí vzdáleností od rozhraní teplota roste, prochází maximem, a nakonec se ustaluje na teplotě okolní kapaliny.

Následným zvětšením bubliny se tlakové a inerciální síly stávají relativně malými a mezifázové napětí mezi kapalinou a párou činí tvar bubliny bližší tvaru sférickému (viz obrázek 1.6d), V této fázi se mění tvar parních bublin z polokulovitého tvaru na kulovitý.

Během růstu bubliny ji v daném místě povrchu udržuje mezifázové napětí působící na kontaktní linii mezi bublinou a topným povrchem. Ovšem vztlaková síla, odporová síla a setrvačné síly vyvolané působením okolní kapaliny na parní bublinu se ji snaží od topného povrchu odtrhnout. Tyto síly rostou s rostoucí velikostí bubliny, až ji nakonec od topného povrchu odtrhnou (viz obrázek 1.6e) [30] [31].

## 2 Sprchové chlazení

Sprchové chlazení využívá rozprašování malých kapiček dopadajících na zahřátý povrch. Sprchové chlazení se široce používá v různých oblastech, jako je chlazení značně horkých povrchů v hutnictví [29] (válcování, kontinuální lití...) a vysoce výkonných elektronických zařízení. Dále se také využívá např. v. požární ochraně [27], dermatologických provozech [28] a potravinářském průmyslu [49]. Výhodou sprchového chlazení oproti klasickému chlazení vnořením je široký rozsah dosahovaných hustot tepelného toku a jeho snadná a rychlá regulace. [5] [7]

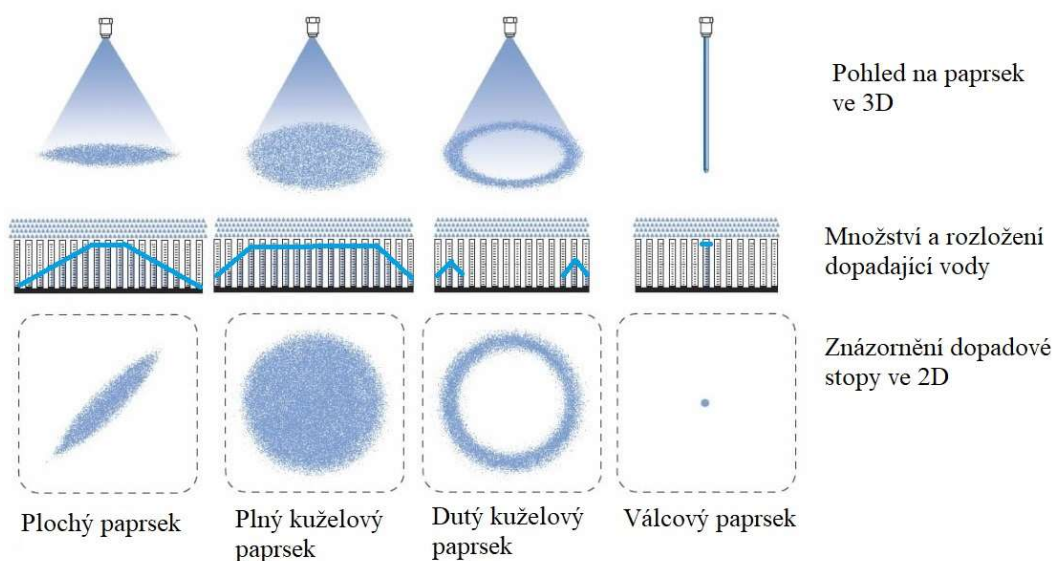
### 2.1 Trysky

Jedná se o zařízení, používající se pro ovládání směru či charakteristiky proudění tekutiny, která vystupuje z uzavřené komory nebo potrubí. Pomocí trysek dochází k rozpadu proudu kapaliny na kapky. [4]

U sprchového chlazení se využívají různé typy trysek, které pomocí atomizace zvyšují jeho účinnost. Samotný výběr trysky významně ovlivňuje charakteristiky chlazení, jako velikost kapek, jejich rychlost, úhel rozstříku a hmotnostní průtok. [7]

Obecně se v průmyslu používají dva typy trysek, a to trysky využívající k atomizaci plyn (nejčastěji vzduch) i kapalinu a trysky využívající pouze kapalinu. Trysky vodo-vzdušné vytvářejí velice malé kapičky a vynikají větší regulovatelností chladicí intenzity s možností dosažení i velice malých chladicích intenzit. Jejich konstrukce, cena a provozní náklady jsou však významně vyšší než u čistě kapalinových trysek. Tyto trysky nacházejí uplatnění ve speciálních aplikacích s potřebou regulace (např. pro sekundární chlazení při plynulém odlévání oceli).

Dále trysky rozdělujeme podle tvaru paprsku a dopadové stopy. Na obrázku 2.1 jsou zobrazeny čtyři nejčastější typy trysek používaných v mnoha průmyslových odvětvích: plný kužel, dutý kužel plochý, válcový a plochý. Trysky s plným kuželem rozdělují kapky kapaliny po celém dopadovém kruhu, a proto jsou preferovány u mnoha aplikací sprchového chlazení. Trysky s dutým kuželem koncentrují většinu kapek blízko periferie dopadového kruhu a ploché trysky vytvářejí úzkou oválnou zónu dopadu. Trysky s válcovým paprskem nejčastěji poskytují ostrý a koncentrovaný vysokotlaký proud, díky tomu nabízejí větší energii paprsku než jiné typy trysek při stejných provozních tlacích a průtocích [34]



Obrázek 2.1 Paprsky trysek a dopadové stopy. [33]

Kapalina se po opuštění trysky začne rozpadat. Před dopadem na chlazený povrch se vytvoří kapky s různými průměry, rychlostmi a trajektoriemi. Pro objasnění sprchového chlazení je vhodnější pracovat s průměrným průměrem kapek než s úplným rozdělením průměrů. Koncept středního průměru byl zaveden a standardizován Mugelem a Evansem. Nejčastěji se u sprchového chlazení využívá tzv. Sauterův průměr, který je definován jako průměr kapky, jejíž poměr povrchu k objemu se rovná střední hodnotě poměrů povrchu k objemu všech kapek v daném rozdělení velikostí kapek. [10]

$$d_{32} = \frac{\sum_i n_{di} d_i^3}{\sum_i n_{di} d_i^2}, \quad (2.1)$$

kde  $n_{di}$  je počet kapek a  $d_i$  je průměr kapek.

Pro trysky s plným kuzelem lze použít pro výpočet  $d_{32}$  korelaci Estese a Mudwara [11]

$$\frac{d_{32}}{d_0} = 3,67 (We_0^{1/2} Re_0)^{-0,259}, \quad (2.2)$$

kde  $d_0$  je průměr trysky a Weberovo a Reynoldsovo číslo pro danou korelaci jsou definovány jako:

$$We_0 = \frac{\rho_g \left( \frac{2\Delta p}{\rho_f} \right) d_0}{\sigma}, \quad (2.3)$$

$$Re_0 = \frac{\rho_f \left( \frac{2\Delta p}{\rho_f} \right)^{1/2} d_0}{\mu_f}. \quad (2.4)$$

Ve výše uvedených rovnicích  $\Delta p$  představuje pokles tlaku napříč tryskou a člen  $\left( \frac{2\Delta p}{\rho_f} \right)^{1/2}$  vyjadřuje rychlost kapaliny,  $\rho_g$  je hustota okolního prostředí,  $\rho_f$  je hustota kapaliny,  $\sigma$  je povrchové napětí mezi kapalinou a okolním prostředím,  $\mu_f$  je dynamická viskozita kapaliny.

Další korelace pro trysky s plným kuzelem vytvořil Cheng [12]

$$\frac{d_{32}}{d_0} = 13,62 We_0^{-0,12} Re_0^{-0,26} \left( \frac{H}{D} \right)^{0,36} \left( \frac{R}{D} \right)^{0,39} \exp \left( -107 \frac{R}{D} \right), \quad (2.5)$$

kde  $H$  je vzdálenost trysky od povrchu,  $R$  poloměr průřezu rozstříku při určité výšce rozstříku a  $D$  je průměr chlazeného povrchu. Weberovo a Reynoldsovo číslo je zde definováno jako

$$We_0 = \frac{\rho_f u_0^2 d_0}{\sigma}, \quad (2.6)$$

$$Re_0 = \frac{\rho_g u_0 d_0}{\mu}, \quad (2.7)$$

$u_0$  je průměrná rychlost kapky vycházející z trysky a lze ji určit pomocí modifikované Bernoulliho rovnice vytvořené Ghodbanem a Holmanem [13]

$$u_0 = \left( u^2 + \frac{2\Delta p}{\rho_f} - \frac{12\sigma}{\rho_f d_{32}} \right)^{1/2}, \quad (2.8)$$

kde  $u$  je rychlost proudění kapaliny a poslední člen v rovnici značí energii potřebnou na rozbití proudu kapaliny.

## 2.2 Odhad součinitele přestupu tepla

Součinitel přestupu tepla, pro sprchové chlazení pro teploty nižší než je teplota varu dané kapaliny, kterou publikoval Ribicki [24]:

$$Nu_{D_{32}} = 4,7 Re_{D_{32}}^{0,61} Pr^{0,32}, \quad (2.9)$$

kde  $Re$  je Reynoldsovo číslo, které je zde definováno jako:

$$Re_{D_{32}} = \frac{\rho_f Q'' d_{32}}{\mu_f}, \quad (2.10)$$

kde  $Q''$  je objemový tok kapaliny. Prandlovo číslo ( $Pr$ ) je definováno jako:

$$Pr = \frac{c_p \mu_f}{\lambda_f}, \quad (2.11)$$

kde  $c_p$  je měrná tepelná kapacita kapaliny a  $\lambda_f$  je součinitel tepelné vodivosti kapaliny.

Nusseltovo číslo vyjadřuje vliv proudění na tepelný tok stěnou a závisí na geometrickém referenčním parametru a jeho hodnota specifikuje poměr konvekce ku kondukcii. Nusseltovo číslo pro odhad součinitele přestupu tepla u sprchového chlazení je definováno:

$$Nu_{D_{32}} = \frac{\alpha d_{32}}{\lambda_f}. \quad (2.12)$$

## 2.3 Leidenfrostova teplota

Jedná se o přechodový bod na křivce varu mezi přechodovým a blánovým varem. V tomto bodě křivky dosahuje hustota tepelného toku svého minima a teplota, při níž je minima dosaženo se nazývá Leidenfrostova teplota. [25]

Pro sprchové chlazení, lze použít pro odhad Leidenfrostovi teploty Weberovo číslo [26]:

$$T_L = 1400We_s^{0,13}, \quad (2.13)$$

kde Weberovo číslo je pro odhad Leidenfrostovy teploty u sprchového chlazení definováno:

$$We_s = \frac{\dot{m}_L^2 d_{32}}{\rho_f \sigma} \quad (2.14)$$

kde  $\dot{m}_L^2$  je hustota dopadající kapaliny.

## 2.4 Parametry sprchového chlazení

Sprchové chlazení je ovlivněno několika parametry. Lze je rozdělit do dvou skupin. První skupina se zabývá parametry sprchového chlazení, jako je objemový (hmotnostní) tok, teplota vody, příměsí ve vodě a velikost a rychlost kapek. Druhá skupina se týká chlazeného povrchu: teplota, drsnost, tepelná difuzivita a přítomnost oxidů na povrchu. Klíčovými faktory jsou objemový tok spreje a teplota chlazeného povrchu. Ostatní faktory (např. vliv příměsí, orientace trysky...) jsou méně důležité, ale v moderním průmyslu, kde je vyžadována přesná regulace procesu chlazení, by neměly být zanedbávány. [6]

Určení chladicího výkonu je závislé na:

- Termofyzikálních vlastnostech chladicího média: hustota, viskozita, tepelná vodivost, měrná tepelná kapacita, povrchové napětí, latentní teplo varu.
- Parametrech povrchu: povrchová teplota, drsnost povrchu, přítomnost oxidů, teplotní vodivost
- Parametrech proudu média: průtok, pokles tlaku napříč tryskou
- Geometrických parametrech trysky: průměr otvoru, tvar paprsku, úhel rozstříku, orientace trysky, vzdálenost trysky od povrchu

Vliv výše uvedených charakteristik postřiku se odráží ve třech klíčových parametrech sprchového chlazení, a to velikosti kapek, rychlosti kapek a lokálním objemovém toku kapaliny. Pro celkový výkon chlazení je důležité prostorové rozložení těchto parametrů na chlazeném povrchu. Když více kapek dopadá na chlazený povrch vysokou rychlostí, vytvoří se souvislá vrstva kapaliny, jejíž tloušťka může mít významný vliv na chlazení. Drsnost povrchu je také zásadní parametr, jelikož ovlivňuje kontakt kapek s povrchem, pohyb páry v parní vrstvě, Leidenfrostovu teplotu a kritickou hustotu tepelného toku. [8] [9]

## 2.5 Chladící médium

Různé kapaliny nebo kapalné směsi se používají k dosažení maximální účinnosti přenosu tepla. Lze použít různé příměsi v konkrétních koncentracích ke zvýšení součinitele přenosu tepla. Ve většině případů se jedná o vodní chladiva, například čistá voda, methanol, vodný roztok ethylenglykolu, roztok NaCl, propylenglykol a vodný roztok ethanolu [15]. Tyto chladiva vykazují vysoké měrné teplo, vysokou tepelnou vodivost a nízkou viskozitu. Rozšířeným chladivem je voda, která je levná, nehořlavá, snadno dostupná a má vysoké latentní teplo varu. [14] [16]

Z několika studií bylo prokázáno, že lepší chladicího účinku lze dosáhnout při použití ethanolového roztoku. V roce 2015 experimentálně zjistil Karpov[40], že nejlepší účinnost přenosu tepla byla dosažena při použití 50 % roztoku ethanolu. V tomto případě, se oproti čisté

vodě zvýšil maximální součinitel přestupu tepla téměř o 35 % a kritický tepelný tok o 24,9 %, využito bylo pulzního tryskového systému. V roce 2017 bylo zjištěno, že výkon chlazení se s objemovým zlomkem ethanolu zvyšuje v porovnání s čistou vodou. Optimální podíl ethanolu byl 4 % a součinitel přestupu tepla vzrostl o 38,4 %, dle studie Honga [39].

Ve sprejovém chlazení lze také použít vysoce alkoholový surfaktant (HAS - 2-Ethylhexan-1-ol nebo Oktan-1-ol), který zlepšuje schopnost tepelné výměny. Přidání alkoholového surfaktantu snižuje povrchové napětí pracovního média, což přispívá k tvorbě menších atomizovaných kapek. [17]

Při chlazení sprejem lze jako chladící medium využít také kapaliny s přidávanými nanočásticemi (nanokapaliny). Mezi velmi často používané nanokapaliny se využívá  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (oxid hlinitý). V roce 2020 provedl Kim [18] experiment s několika nanokapalinami. Při použití nanokapaliny  $\text{Al}_2\text{O}_3$  zjistil výrazné zlepšení maximální hodnoty hustoty tepelného toku. Během bublinkového varu však začalo docházet k usazování nanočástic a vytváření porézní vrstvy na chlazeném povrchu.

Ke zlepšení přenosu tepla pomocí  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nastává, když je tepelný tok nízký a teplota ohřívajícího povrchu není příliš vysoká. Pokud teplota chladícího média dosáhla saturační teploty, tak se účinnost přenosu tepla zhoršila. Čím vyšší byla koncentrace nanokapaliny, tím výraznější byl účinek zhoršení přenosu tepla. [19]

Čisté oleje s nízkou viskozitou používané pro sprchové chlazení a lubrikaci, mají přibližně 3–5krát menší chladicí intenzitu než voda s ekvivalentní hustotou dopadu. Směsi oleje a emulze způsobují významný pokles intenzity chlazení (až o 40 %) ve srovnání s čistou vodou za stejných podmínek [20]. Emulze vykazují významné snížení chladicí intenzity i při obsahu oleje 0,1 % ve vodě. Přidáním surfaktantů do emulze zlepšení její stability a též zvýší součinitel přestupu tepla.

## 2.6 Vlastnosti ovlivňující účinnost chladícího média

Práce se v následujících kapitolách bude zabývat chladícím médiem, jehož základem bude demineralizovaná voda a další příměs viz. olej, sůl, ethanol. Vlastnosti chladícího média budou v závislosti na teplotě, jednotlivých příměsích a vody uvedeny pod jejich definicemi. Také budou uvedeny grafy se změnou dané vlastnosti v závislosti na koncentraci dané směsi.

Ve výpočtu pro směsi vody a oleje jsou využity hodnoty pro vodu [5], palmový olej [38], pro směs vody a ethanolu tabulková data [36] a pro směs vody a soli NaCl tabulková data pro směsi vody a soli v různých koncentracích závislých na teplotě [37].

### Hustota

Hustota je základní fyzikální veličina, která vyjadřuje hmotnost jednotkového objemu dané látky. Hustota je závislá na složení látek a také je možné ji ovlivnit pomocí změny tlaku či teploty. [23]

Základní vztah pro výpočet hustoty:

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (2.15)$$

kde  $m$  je hmotnost a  $V$  je objem.

Pro výpočet hustoty směsi lze využít lineárního pravidla pro výpočet specifického objemu

$$v_{mix} = \sum_i \tilde{x}_i v_i,$$

(2.16)

kde  $\tilde{x}_i$  je hmotnostní zlomek složky a  $v_i$  objem složky

$$\tilde{x}_i = \frac{m_i}{m},$$

(2.17)

kde  $m_i$  je hmotnost složky a  $m$  je celková hmotnost směsi

$$m = \sum_i m_i.$$

(2.18)

Při využití rovnice (2.16) se nejedná o přímý výpočet hustoty, jelikož je zanedbán přebytečný objem. Nepřesnost výsledku rovnice (2.16) není vyšší než 2-3 %.

Pro přesnější výpočet lze využít rovnici:

$$\rho_f^{mix} = \left( \sum_i x_i \rho_{f,i}^{-1} \right)^{-1},$$

(2.19)

kde  $x_i$  je molární zlomek složky a  $\rho'_{liq,i}$  je hustota dané složky

$$x_i = \frac{n_i}{n},$$

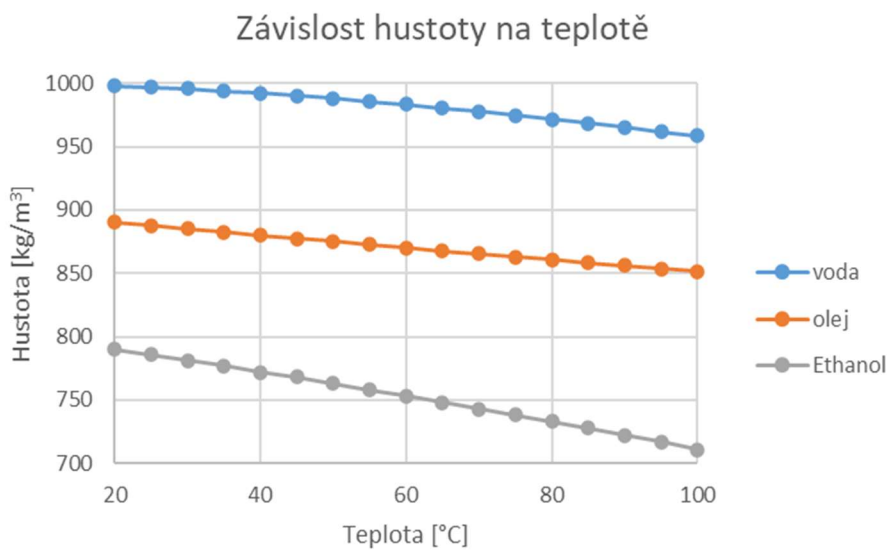
(2.20)

kde  $n_i$  je látkové množství směsi a  $n$  je celkové látkové množství [21]

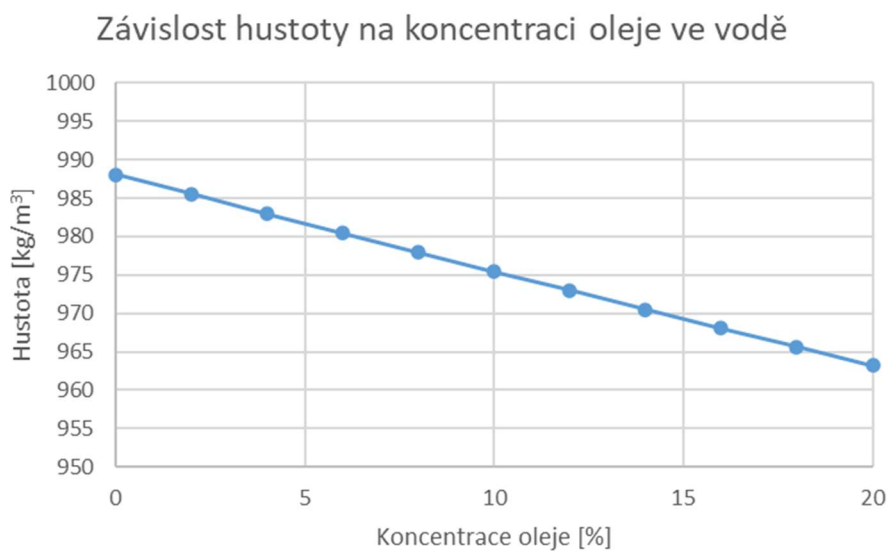
$$n = \sum_i n_i.$$

(2.21)

Na obrázku 2.2 lze pozorovat změnu závislosti hustoty na teplotě pro vodu, olej a ethanol. Na obrázku 2.3 až 2.5 lze pozorovat změnu hustoty při změnách koncentrací jednotlivých příměsí.

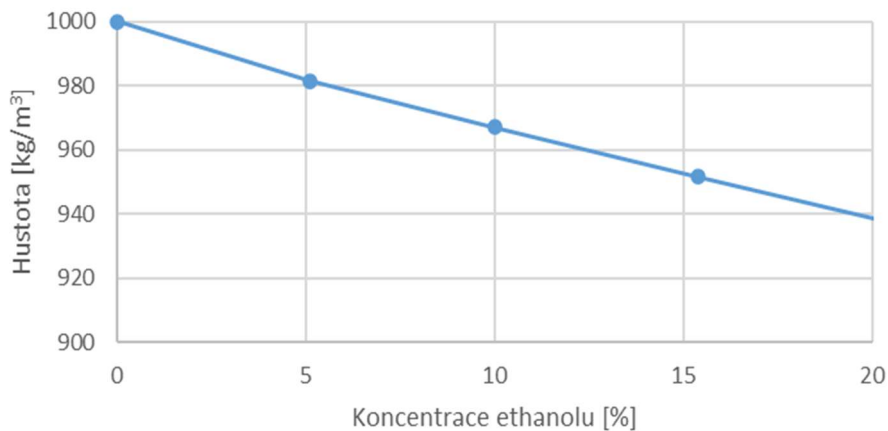


Obrázek 2.2 Závislost hustoty na teplotě [36], [5]



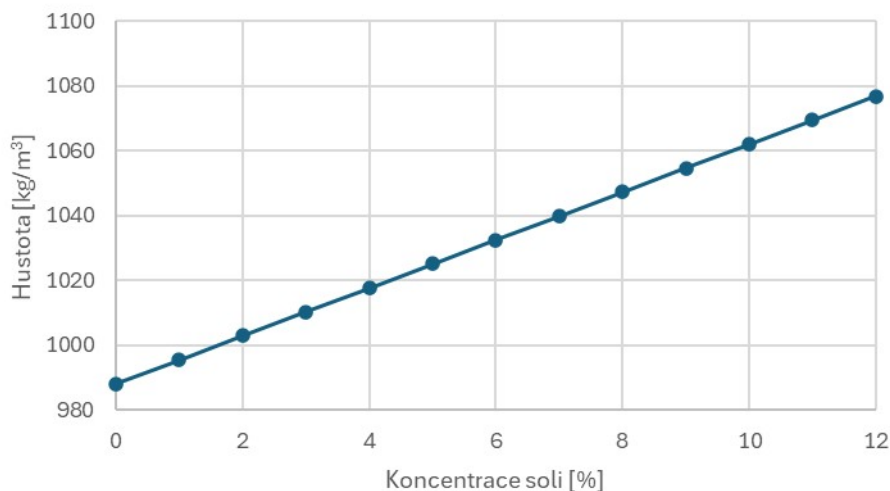
Obrázek 2.3 Závislost hustoty na koncentraci oleje ve vodě při 50 °C

Závislost hustoty na koncentraci ethanolu ve vodě



Obrázek 2.4 Závislost hustoty na koncentraci ethanolu ve vodě při 20 °C [36]

Závislost hustoty na koncentraci soli ve vodě



Obrázek 2.5 Závislost hustoty na koncentraci soli ve vodě při 50 °C [37]

### Měrná tepelná kapacita

Měrná tepelná kapacita je množství tepla potřebné k ohřátí 1 kg látky o 1 teplotní stupeň. Stejně jako většina vlastností kapalin je i měrná tepelná kapacita závislá na teplotě a na tlaku. [22]

Definice tepelné kapacity je:

$$c = \frac{\delta Q}{dT}, \quad (2.22)$$

kde  $\delta Q$  je elementární teplo dodané tělesu a  $dT$  je přírůstek termodynamické teploty tělesa.

Měrná tepelná kapacita  $c$  se velmi používá v technické praxi a pro nestlačitelné látky (pevné látky a kapaliny) je tato kapacita nezávislá na okrajových podmínkách, za kterých se teplo předává. U stlačitelných látek rozlišujeme měrnou tepelnou kapacitu za konstantního tlaku  $c_p$  a měrnou tepelnou kapacitu za konstantního objemu  $c_v$ . Vztah mezi těmito měrnými kapacitami je nazýván jako Mayerův vztah:

$$c_p = c_v + r, \quad (2.23)$$

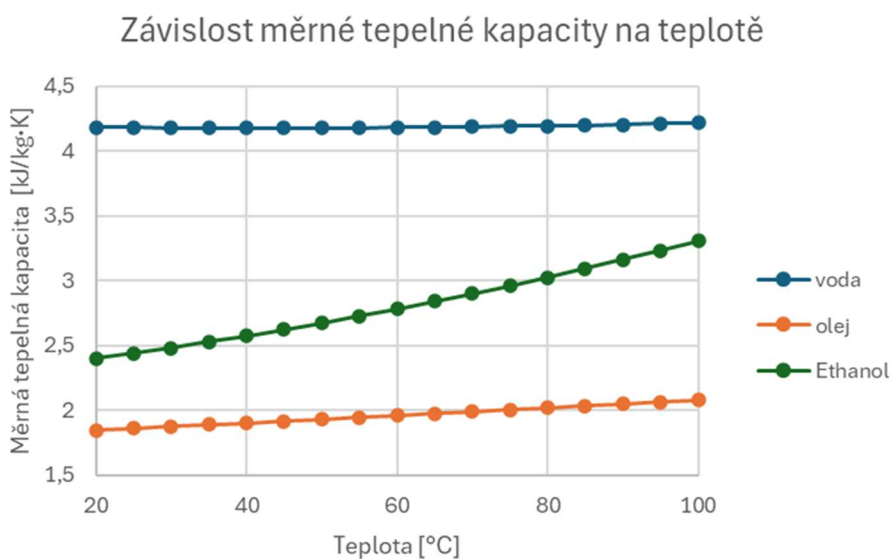
kde  $r$  je měrná plynová konstanta.

Pro výpočet měrné tepelné kapacity směsi lze použít lineárního směšovacího vzorce [21]:

$$c_{mix} = \sum_i c_i x_i, \quad (2.24)$$

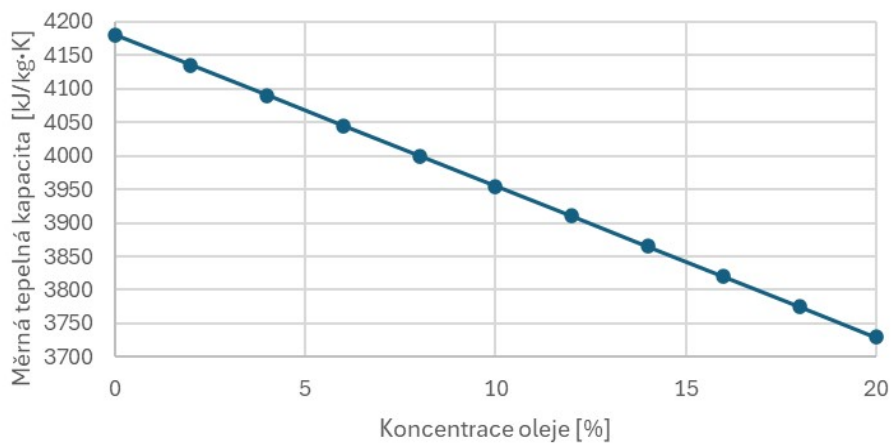
kde  $c_i$  je měrná tepelná kapacita  $i$ -té složky.

Na obrázku 2.6 lze pozorovat změnu závislosti měrné tepelné kapacity na teplotě pro vodu, olej a ethanol. Na obrázku 2.7 až 2.9 lze pozorovat změnu hustoty při změnách koncentrací jednotlivých příměsí.



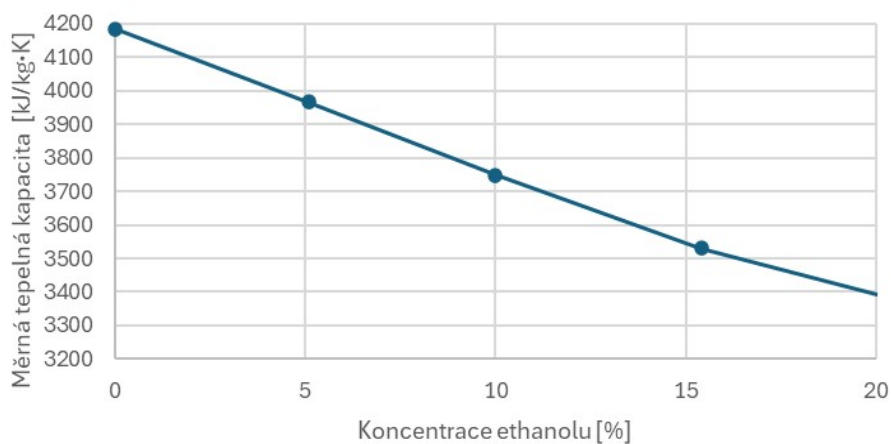
Obrázek 2.6 Závislost měrné tepelné kapacity na teplotě [36], [5]

Závislost měrné tepelné kapacity na koncentraci oleje ve vodě

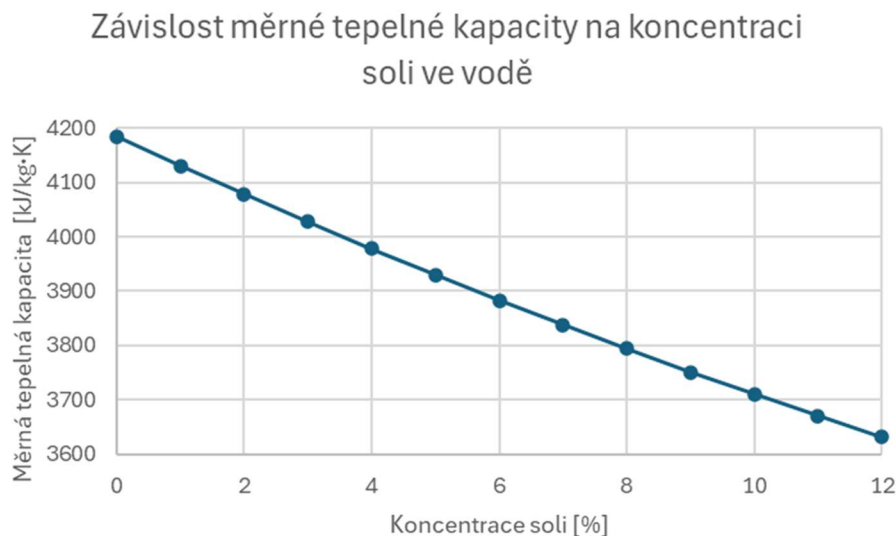


Obrázek 2.7 Závislost měrné tepelné kapacity na koncentraci oleje ve vodě při 50 °C

Závislost měrné tepelné kapacity na koncentraci ethanolu ve vodě



Obrázek 2.8 Závislost tepelné kapacity na koncentraci ethanolu ve vodě při 20 °C [36]



Obrázek 2.9 Závislost tepelné kapacity na koncentraci soli ve vodě při 50 °C [37]

### Dynamická viskozita

Pokud je na jakoukoli část uzavřeného kapalného prostředí aplikováno smykové napětí, kapalina se bude pohybovat s gradientem rychlosti, přičemž maximální rychlost bude na místě, kde je napětí aplikováno. Pokud je místní smykové napětí na jednotkovou plochu v libovolném bodě děleno gradientem rychlosti, získaný poměr je definován jako viskozita média. Viskozita je tedy měřítkem vnitřního tření kapaliny, které má tendenci odporovat jakékoli dynamické změně v pohybu kapaliny. Aplikovaná smyková síla povede k velkému gradientu rychlosti při nízké viskozitě. Zvýšená viskozita způsobuje, že každá vrstva kapaliny vyvíjí větší třecí odpor na sousední vrstvy, což následně snižuje rychlostní gradient.

Dynamickou viskozitu lze definovat pomocí vztahu:

$$\mu = \frac{\tau}{\gamma}, \quad (2.25)$$

kde  $\tau$  je smykové napětí a  $\gamma$  je smyková rychlost. Další používanou formou je viskozita kinematická, která je definována jako:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}. \quad (2.26)$$

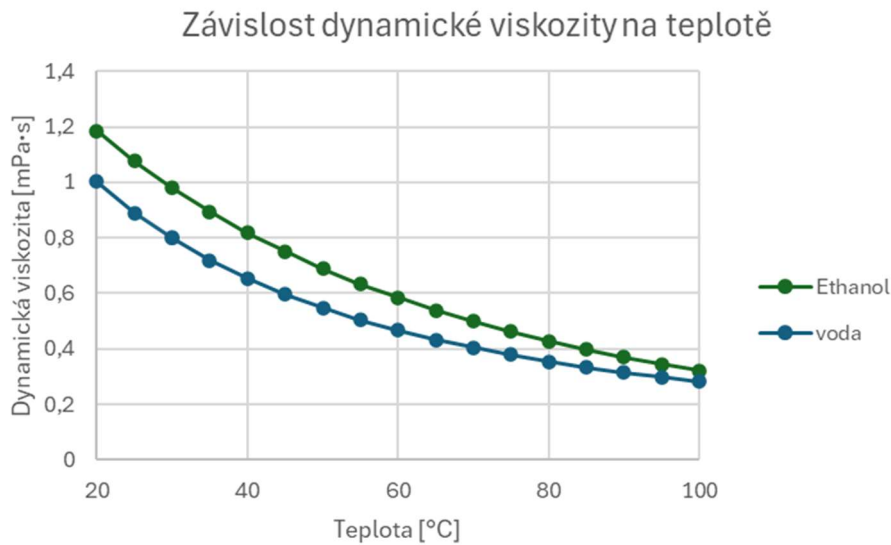
Pro výpočet viskozity směsi lze použít rovnici [21]:

$$\ln(\eta) = \sum_i \tilde{x}_i \ln(\eta_i), \quad (2.27)$$

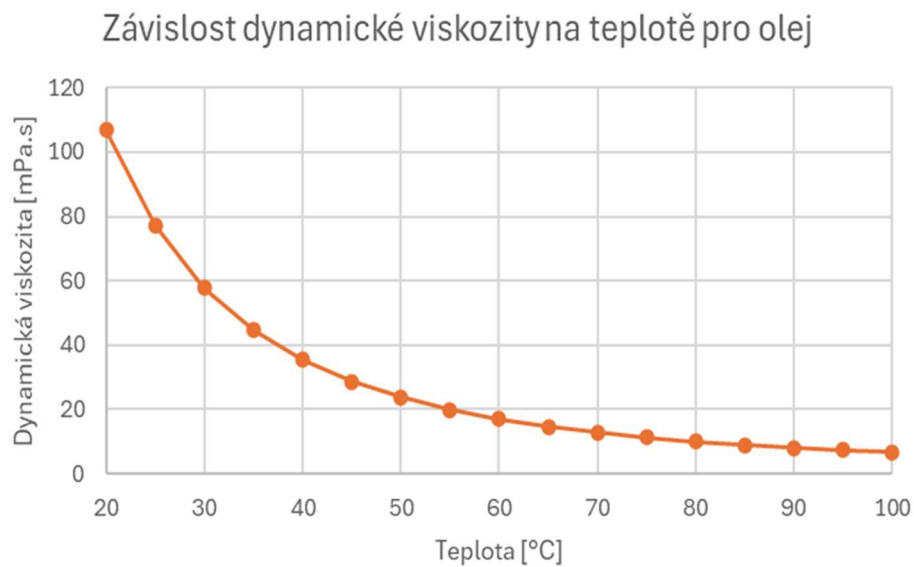
z rovnice (2.27) získáme jen teoretickou hodnotu viskozity směsi, jelikož její výpočet je podstatně složitější. Pro získání relevantnějších výsledků hodnot viskozity směsí, je třeba využívat experimentálně naměřená data a z nich vycházet. [21]

Na obrázku 2.10 lze pozorovat změnu závislosti dynamické viskozity na teplotě pro vodu a ethanol a na obrázku 2.11 změnu dynamické viskozity na teplotě pro olej. Na obrázku 2.12

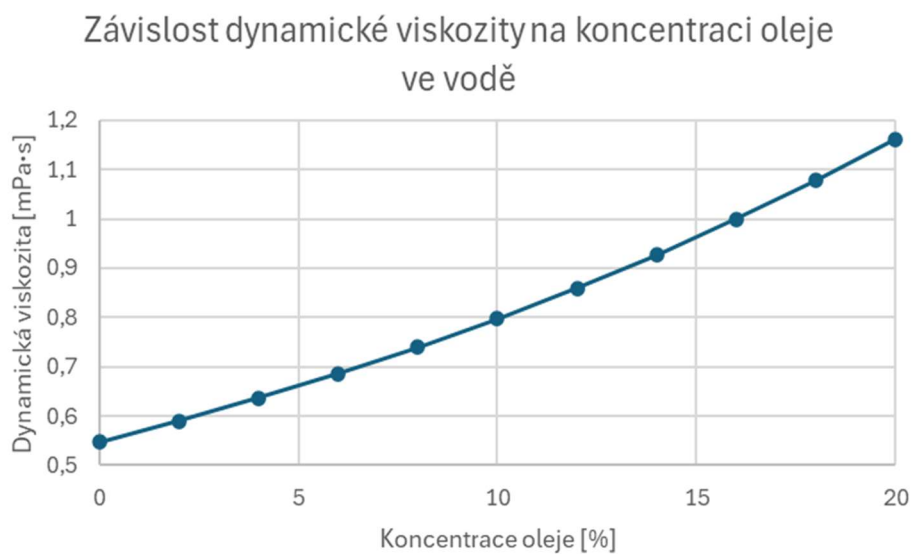
až 2.14 lze pozorovat změnu dynamické viskozity při změnách koncentrací jednotlivých příměsí.



Obrázek 2.10 Závislost dynamické viskozity na teplotě [36], [5]



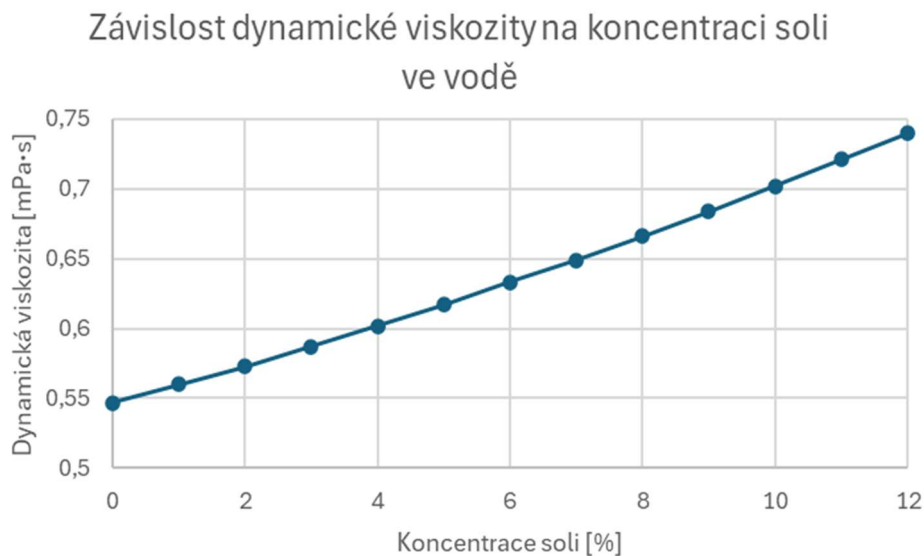
Obrázek 2.11 Závislost dynamické viskozity oleje na teplotě



Obrázek 2.12 Závislost dynamické viskozity na koncentraci oleje ve vodě při 50 °C



Obrázek 2.13 Závislost dynamické viskozity na koncentraci ethanolu ve vodě při 20 °C [36]



Obrázek 2.14 Závislost dynamické viskozity na koncentraci soli ve vodě při 50 °C [37]

### Součinitel tepelné vodivosti

Značíme ho  $\lambda$ . Je definován jako množství tepla, které při ustáleném tepelném toku projde za jednotku času materiálem o jednotkové tloušťce při jednotkovém tepelném spádu. Jedná se o materiálovou konstantu, která vyjadřuje schopnost materiálu vést teplo a nejčastěji se určuje experimentálně. Čím je hodnota součinitele tepelné vodivosti menší, tím lepší má materiál tepelně izolační vlastnosti.

Pro určení tepelné vodivosti směsi lze použít rovnici [21]:

$$\lambda_{mix} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{2\phi_i\phi_j}{\lambda_i^{-1} + \lambda_j^{-1}}, \quad (2.28)$$

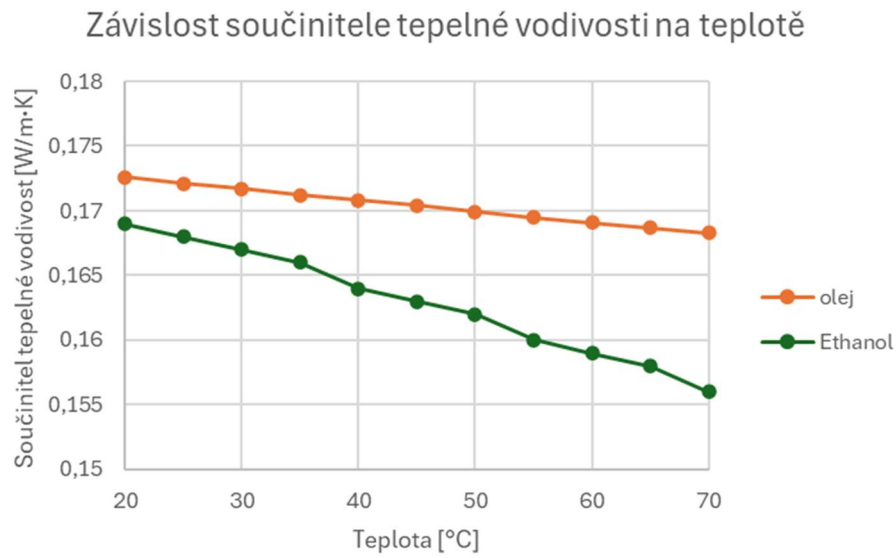
kde  $\lambda_i$  a  $\lambda_j$  jsou hodnoty součinitele tepelné vodivosti jednotlivých složek a  $\phi_i$  je definováno jako:

$$\phi_i = \frac{\tilde{x}_i v_{xi}}{\sum_{j=1}^n \tilde{x}_j v_{xj}}, \quad (2.29)$$

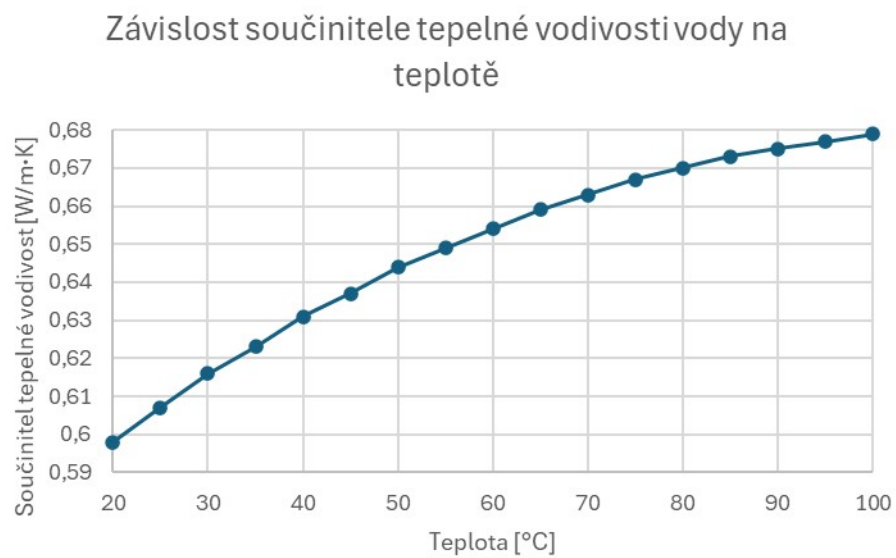
kde  $v_{xi}$  je molární objem. Při dvousložkové směsi lze pro  $\phi_j$  využít vztahu: [21]

$$\phi_j = 1 - \phi_i. \quad (2.30)$$

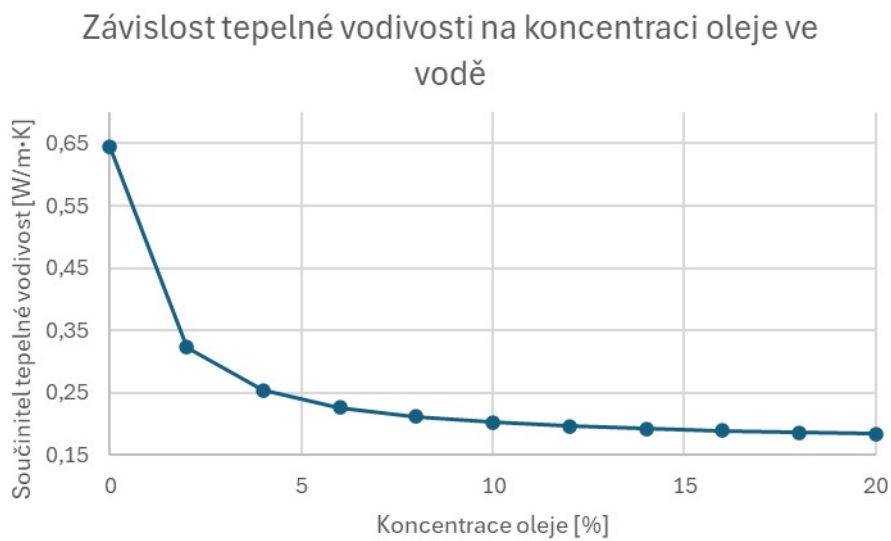
Na obrázku 2.15 a 2.16 lze pozorovat změnu závislosti součinitele tepelné vodivosti na teplotě, a to pro vodu, olej a ethanol. Na obrázku 2.17 až 2.19 lze pozorovat změnu součinitele tepelné vodivosti při změnách koncentrací jednotlivých příměsí.



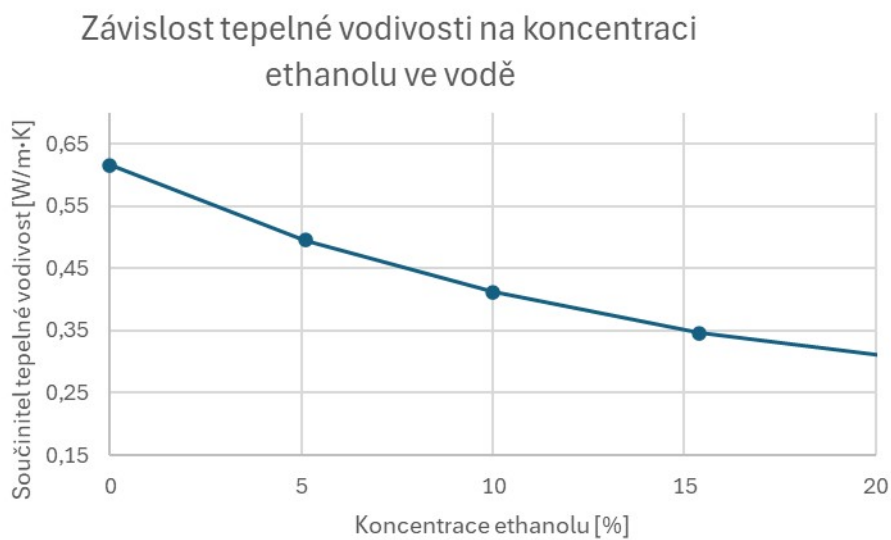
Obrázek 2.15 Závislost tepelné vodivosti na teplotě [36]



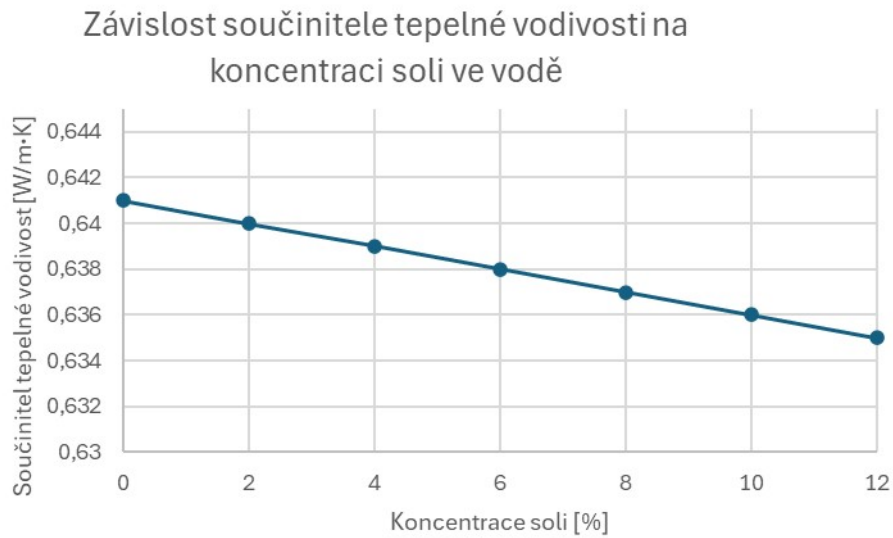
Obrázek 2.16 Závislost tepelné vodivosti vody na teplotě [5]



Obrázek 2.17 Závislost součinitele tepelné vodivosti na koncentraci oleje ve vodě pro 50 °C



Obrázek 2.18 Závislost součinitele tepelné vodivosti na koncentraci ethanolu ve vodě pro 20 °C [36]



Obrázek 2.19 Závislost součinitele tepelné vodivosti na koncentraci soli ve vodě pro 50 °C [37]

### Povrchové napětí

Povrchové napětí je vlastností volné hladiny všech kapalin a je příčinou jevu, při kterém se povrch kapaliny chová jako pružná fólie. Silové působení na částice pod hladinou je rovnoměrné ze všech stran. V případě, kdy se utváří volná hladina kapaliny, jsou tyto částice v případě slabé adheze s okolní fází silněji vázány k sousedním povrchovým částicím. Tento jev způsobuje to, že drobné předměty s vyšší průměrnou hustotou, než má kapalina, se nepotopí, pokud neprorazí tento pružný povrch.

Povrchové napětí lze vyjádřit vztahem

$$\sigma = \frac{dF}{dl}, \quad (2.31)$$

kde  $dl$  je element délky a  $dF$  je element síly působící v povrchu kapaliny z obou stran kolmo.

Pro určení povrchového napětí směsi lze využít vztah [21]:

$$\sigma_{mix} = (P_{mix}^{lig} \rho_f^{mix} - P_{mix}^{vap} \rho_{vap}^{mix}), \quad (2.32)$$

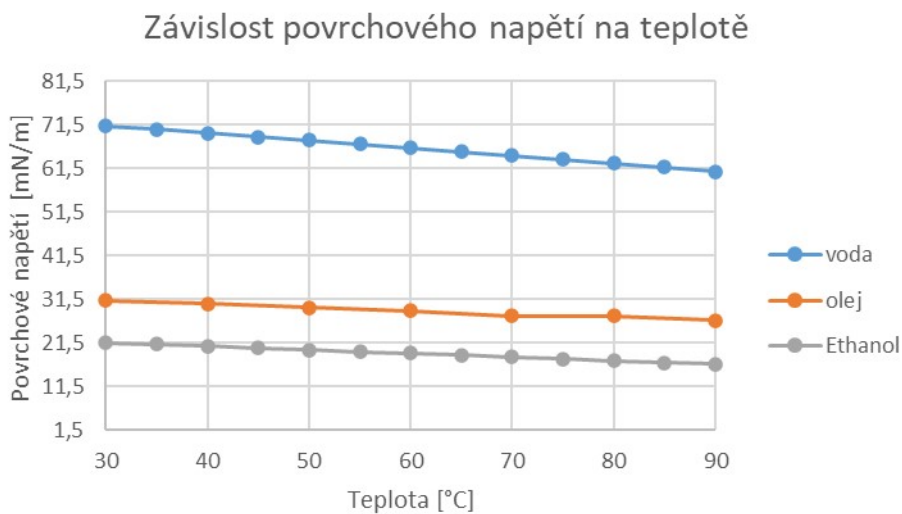
kde  $P_{mix}$  je definováno jako

$$P_{mix} = \sum_i \sum_j \tilde{x}_i \tilde{x}_j \frac{P_i + P_j}{2}, \quad (2.33)$$

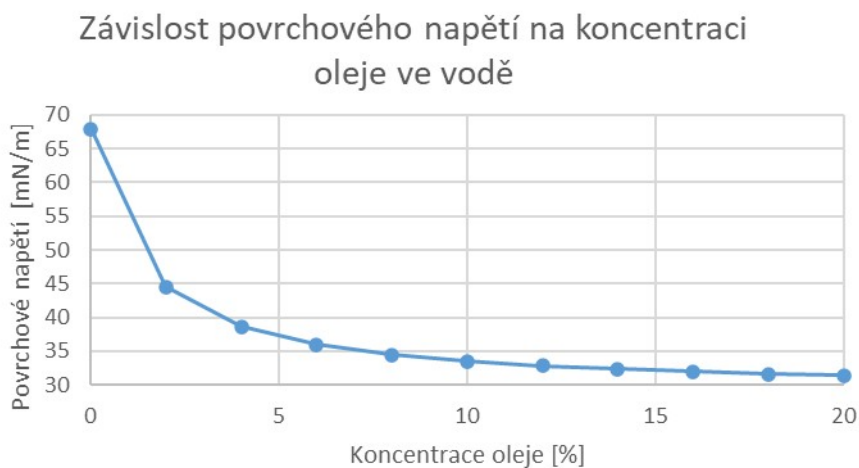
kde parametr  $P$  je definován pomocí vztahu [21]:

$$P_i = (\tilde{\rho}_i)^{-1} (\sigma_i)^{1/4}. \quad (2.33)$$

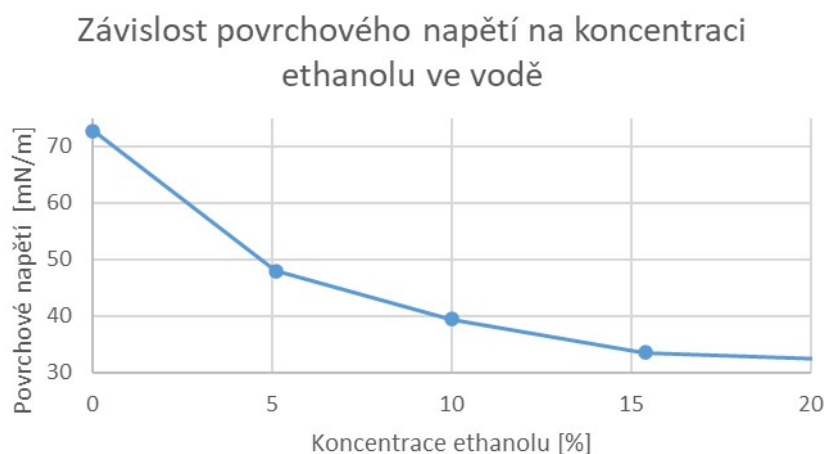
Na obrázku 2.20 lze pozorovat změnu závislosti povrchového napětí na teplotě pro vodu, olej a ethanol. Na obrázku 2.21 až 2.23 lze pozorovat změnu povrchového napětí při změnách koncentrací jednotlivých příměsí.



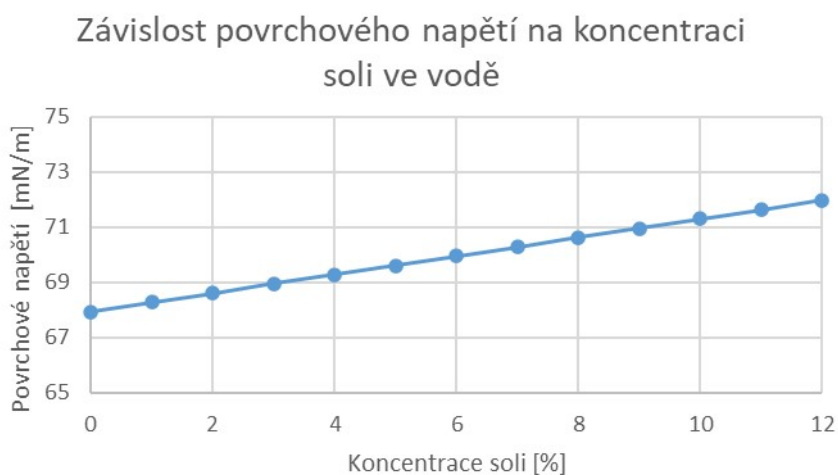
Obrázek 2.20 Závislost povrchového napětí na teplotě [5], [36], [37]



Obrázek 2.21 Závislost povrchového napětí na koncentraci oleje ve vodě pro 50 °C



Obrázek 2.22 Závislost povrchového napětí na koncentraci ethanolu ve vodě pro 20 °C [36]



Obrázek 2.23 Závislost povrchového napětí na koncentraci soli ve vodě pro 50 °C [37]

## Shrnutí

V kapitole 2.6 jsou vysvětleny vlastnosti chladicí kapaliny, které ovlivňují predikce uvedené v kapitole 2.1 až 2.3. Pro výpočet vlastností směsi vody a oleje bylo využito rovnice (2.15) až (2.33). Z vypočítaných hodnot byly vytvořeny grafy pod popisy jednotlivých vlastností.

Při výpočtu vlastností směsi vody a ethanolu byly také využity stejné rovnice (2.15) až (2.33). Vypočtené hodnoty se v některých vlastnostech výrazně lišily od experimentálně naměřených hodnot. V tabulce 2.1 lze vidět hodnoty vlastností jednotlivých koncentrací směsi vody a ethanolu vypočtené pomocí rovnic. V tabulce 2.2 jsou tyto hodnoty převzaté z práce G. Belašaka [36]. Mezi vypočtenými hodnotami pomocí výše zmiňovaných rovnic a hodnotami tabulkovými, jsou určité odchylky. Jejich procentuální hodnotu lze vidět v tabulce 2.3.

Tabulka 2.1 Vypočtené hodnoty směsi vody a ethanolu

% Ethanolu	0	5,1	10	15,4	22,7
Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	998,21	984,97	972,58	959,28	941,86
Tepelná kapacita [kJ/kg·K]	4185,00	4093,91	4006,40	3909,96	3779,58
Dynamická viskozita [mPa·s]	1,00	1,01	1,02	1,03	1,04
Součinitel tepelné vodivosti [W/m·K]	0,60	0,23	0,20	0,19	0,18
Povrchové napětí [mN/m]	72,75	30,34	26,53	24,99	24,03

Tabulka 2.2 Převzaté hodnoty směsi vody a ethanolu pro 20 °C [36]

%Ethanolu	0	5,1	10	15,4	22,7
Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	1000,00	981,45	967,03	951,52	931,37
Tepelná kapacita [kJ/kg·K]	4184,00	3966,00	3748,00	3530,00	3312,00
Dynamická viskozita [mPa·s]	1,00	1,63	2,18	2,59	2,90
Součinitel tepelná vodivosti [W/m·K]	0,62	0,50	0,41	0,35	0,29
Povrchové napětí [mN/m]	72,80	47,96	39,44	33,52	31,74

Tabulka 2.3 Procentuální rozdíl mezi predikovanými a převzatými hodnotami

%Ethanolu	0	5,1	10	15,4	22,7
Změna hustoty [%]	0,18	-0,36	-0,57	-0,81	-1,11
Změna tepelné kapacity [%]	-0,02	-3,12	-6,45	-9,72	-12,37
Změna dynamické viskozity [%]	-0,20	61,68	114,03	152,15	178,84
Změna součinitele tepelná vodivosti [%]	2,89	119,88	109,62	86,15	62,65
Změna povrchového napětí [%]	0,07	58,08	48,68	34,16	32,12

Rovnice (2.16) až (2.34) nelze využít při výpočtu vlastností směsi vody a soli. Proto byla při vytváření grafů a výpočtu predikcí použita tabulková data [37].

U závislosti hustoty na teplotě lze vidět na obrázku 2.2 pro jednotlivé látky stejný trend, kdy se se zvyšující teplotou hustota vody snižuje. U vody je pokles hustoty mezi 20 °C až 100 °C okolo 3,9 %, pro olej je pokles 4,3 % a u ethanolu 10 %. Závislost hustoty na koncentraci oleje, ethanolu a soli ve vodě lze vidět na obrázku 2.3 až 2.5. Pro olej i ethanol dochází k poklesu hustoty se zvyšující se koncentrací příměsí a tento pokles je také lineární. Pro 10 % koncentraci příměsí oleje je pokles 2,3 % a pro stejnou koncentraci ethanolu je pokles 3,3 %, tudíž lze tvrdit, že na změnu hustoty má zvyšující se koncentrace oleje i ethanolu podobný vliv. Ovšem při zvyšující se koncentraci soli ve vodě nastává lineární nárůst hustoty a při 10 % koncentraci soli ve vodě je tento nárůst 7,6 %. Z tabulky 2.3 lze vidět jen nepatrnou odchylku (1,1 %) při nejvyšší uvedené koncentraci mezi výpočtem a převzatými daty, takže pro výpočet hustoty by i pro ethanol bylo možné využít rovnici (2.19).

Na obrázku 2.6 je vykreslena závislost tepelné kapacity na teplotě ukazující rozdíly mezi jednotlivými látkami. Pro rozmezí 20 °C až 100 °C se tepelná kapacita téměř nemění (nárůst 0,8 %), u oleje dochází ke zvýšení tepelné kapacity se zvyšující teplotou a to o 12,6 %. Ethanol vykazuje nejvyšší nárůst, a to o 37,8 %. I když olej i ethanol vykazují nárůst tepelné kapacity při zvyšující se teplotě, tak i při 100 °C je hodnota tepelné kapacity vody vyšší o 0,9 kJ·kg<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup> oproti ethanolu a oproti oleji o 2,136 kJ·kg<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>. Závislost tepelné kapacity na koncentraci příměsí lze pozorovat na obrázku 2.7 až 2.9. Jedná se o lineární pokles u všech příměsí. Při koncentraci 10 % příměsí oleje je pokles tepelné kapacity 5,4 %, u ethanolu 10,4 % a u soli 11,3 %. Z tabulky 2.3 lze vidět u 22,7 % koncentrace ethanolu odchylku mezi

výpočtem a tabulkovou hodnotou 12,4 % a i pro tepelnou kapacitu směsi ethanolu lze využít rovnici (2.24).

Závislost dynamické viskozity na teplotě má opět pro všechny látky podobný tvar, a to rychlejší pokles v rozmezí 20 °C až 50 °C a pak je patrné následné zpomalení poklesu. Tyto závislosti lze vidět na obrázku 2.10 s 2.11. Dva grafy byly použity kvůli výrazným rozdílům hodnot, protože olej má výrazně vyšší viskozitu než voda a ethanol. Pokles dynamické viskozity mezi 20 °C až 50 °C je pro vodu 49,7 %, pro ethanol 46,6 % a u oleje 77,8 %. Závislost dynamické viskozity na koncentraci příměsí ukazují grafy na obrázku 2.12 až 2.14. Všechny tyto grafy vykazují nárůst a to při 10 % koncentraci příměsí oleje o 45,7 %, u ethanolu je to 118,1 % a u soli 28,3 %. V tabulce 2.3 pro koncentraci 22,7 % ethanolu je odchylka mezi vypočtenou a tabulkovou hodnotou 178,8 %. Dynamická viskozita vody je přibližně 1 mPa·s a dynamická viskozita ethanolu je přibližně 1,12 mPa·s. Při směsi vody a ethanolu, začne dynamická viskozita stoupat a při koncentraci přibližně 50 % ethanolu ve vodě dosahuje dynamická viskozita přibližně hodnoty 2,7 mPa·s a pak následně začne klesat na hodnotu ethanolu. Tuto změnu dynamické viskozity není rovnice (2.27) schopna určit, a proto na výpočet dynamické viskozity u ethanolu je rovnice (2.27) nevhodná.

Součinitel tepelné vodivosti v závislosti na teplotě u oleje i ethanolu při zvyšující se teplotě klesá (viz obrázek 2.15). Pokles na rozmezí mezi 20 °C až 70 °C je u oleje o 2,5 % a u ethanolu o 7,7 %. U vody součinitel tepelné vodivosti stoupá, jak můžeme vidět na obrázku 2.16, a ve stejném rozmezí teplot jeho hodnota vzroste o 10,9 %. Závislost součinitele tepelné vodivosti na koncentraci má sice u všech směsí klesající tendenci ovšem lineární chování má jen směs ethanolu a směs soli. Na obrázku 2.18 a 2.19 lze pozorovat pokles těchto dvou směsí a pro 10 % koncentraci ethanolu je pokles součinitele tepelné vodivosti o 32 % zatímco u soli je pokles pouze 0,8 %. U oleje lze na obrázku 2.17 vidět největší pokles součinitele přestupu tepla na prvních 2 % koncentrace oleje ve vodě, kde jeho pokles činí dokonce 49,8 % a při koncentraci 10% oleje je pokles součinitele přenosu tepla 68,5 %, ale následně se pokles ještě více zpomalí a má skoro konstantní hodnotu. V tabulce 2.3 lze pozorovat stejně jak při výpočtu dynamické viskozity velkou odchylku mezi vypočtenými hodnotami a hodnotami tabulkovými. Při 5,1 % koncentraci ethanolu je odchylka 119,9 % následně tato odchylka klesá a při hodnotě 22,7 % koncentrace alkoholu dosahuje 62,7 %.

Na obrázku 2.20 je zobrazena závislost povrchového napětí na teplotě. Všechny vyznačené látky se chovají lineárně a jejich hodnota povrchového napětí klesá. V rozmezí mezi 30 °C až 90 °C hodnota povrchového napětí u vody a ethanolu klesne stejně o 14,6 % a u soli je pokles lehce vyšší a to 23,2 %. Na obrázku 2.21 a 2.22 lze vidět rychlý pokles hodnoty povrchového napětí již při nízkých koncentracích média. U oleje, podobně jako u součinitele tepelné vodivosti, dochází k nejrychlejšímu poklesu při koncentraci 4 %, kdy tento činí 34,4 % a při 10 % koncentraci oleje je pokles o 50,7 % a následně se rychlost poklesu hodnoty povrchového napětí zpomaluje. U ethanolu nastává také rychlý pokles hodnot povrchového napětí, ale není tak výrazný jako u oleje již při nízkých koncentracích. Při koncentraci 10 % ethanolu je pokles hodnot povrchového napětí 45,8 %. K výraznějšímu zpomalení tohoto poklesu dochází až po 15 % koncentraci ethanolu, za kterou se tento pokles zpomaluje a hodnota povrchového napětí zůstává téměř konstantní. Na obrázku 2.23 je zobrazen graf závislosti povrchového napětí na koncentraci soli ve vodě a lze na něm pozorovat zvyšující se lineární závislost. Při hodnotě 10 % koncentrace soli se povrchová hodnota zvýší o 5 %. V tabulce 2.3 lze pozorovat odchylku mezi vypočtenými hodnotami a hodnotami tabulkovými při 5,1 % koncentraci ethanolu je odchylka 58,1 % následně tato odchylka klesá a při hodnotě 22,7 % koncentrace alkoholu dosahuje 32,1 %.

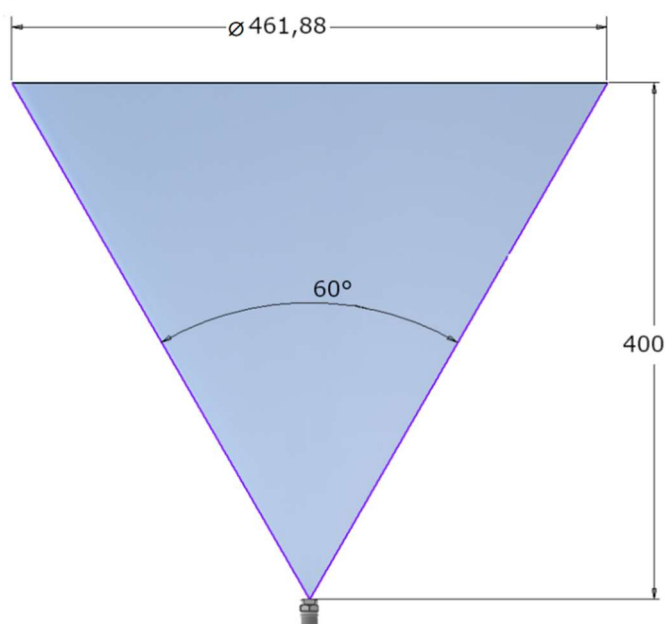
Lze tedy shrnout, že rovnice (2.15) až (2.34) jsou pro ethanol spolehlivě použitelné pouze pro výpočet hustoty a tepelné kapacity. Pro ostatní vlastnosti je vhodnější využít experimentálně naměřená data.

### 3 Predikce vlastností sprchového chlazení

Pomocí rovnic uvedených v kapitole 2 se v této kapitole vypočítávají a určují predikce vlastností u sprchového chlazení. Vypočítány budou směsi vody a palmového oleje, vody a ethanolu a vody a soli (NaCl).

Pro výpočet predikcí parametrů sprchového chlazení byly vybrány trysky 490.604 a 490.844. Tryska 490.604 má průměr trysky  $d_0 = 2.05$  mm a predikce byly počítány na tlak 2 bary při průtoku 3.15 l/min a na tlak 10 barů při průtoku 6 l/min. Tryska 490.844 má průměr trysky  $d_0 = 2.05$  mm a predikce byly počítány na tlak 2 bary při průtoku 12,5 l/min a na tlak 10 barů při průtoku 23,8 l/min.

Při predikcích se počítalo, že vzdálenost mezi tryskou a chlazeným povrchem činí 400 mm. Obě trysky jsou kuželové a mají rozptyl  $60^\circ$ . Na obrázku 3.1 lze vidět trysku s jejím paprskem a s hodnotou průměru dopadového kužele.



Obrázek 3.1 Kuželová tryska s paprskem

Do rovnice (2.11) dosazujeme hodnotu  $Q''$ , kterou definujeme jako:

$$Q'' = \frac{4\dot{V}}{\pi d_{DK}^2} \rho_f \quad (3.1)$$

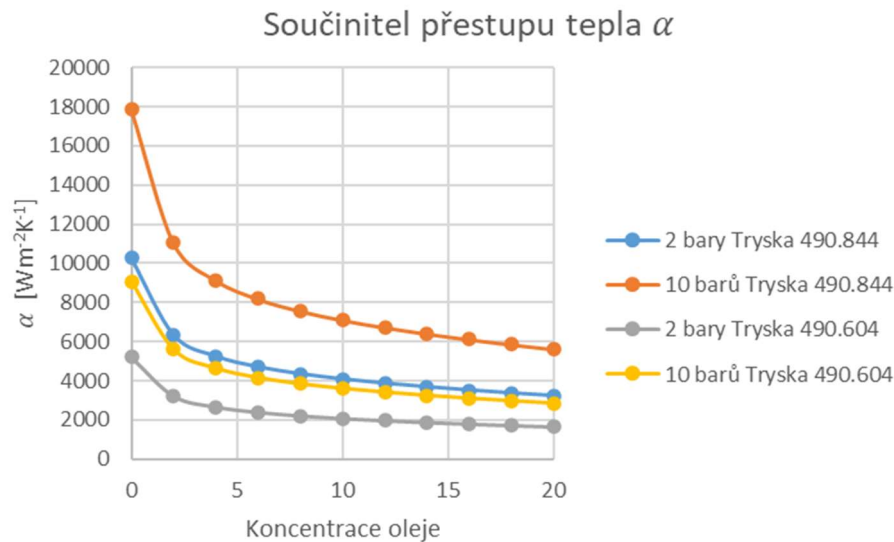
kde  $\dot{V}$  je průtok trysky,  $d_{DK}^2$  je poloměr dopadového kužele

#### 3.1 Směs vody a oleje

Pomocí rovnic (2.16) až (2.34) byly vypočítány hodnoty jednotlivých vlastností směsi vody a palmového oleje pro teplotu  $50^\circ\text{C}$  a tyto hodnoty byly použity v rovnicích pro výpočet predikcí součinitele přestupu tepla, Sauterova průměru kapek a Leidenfrostovy teploty.

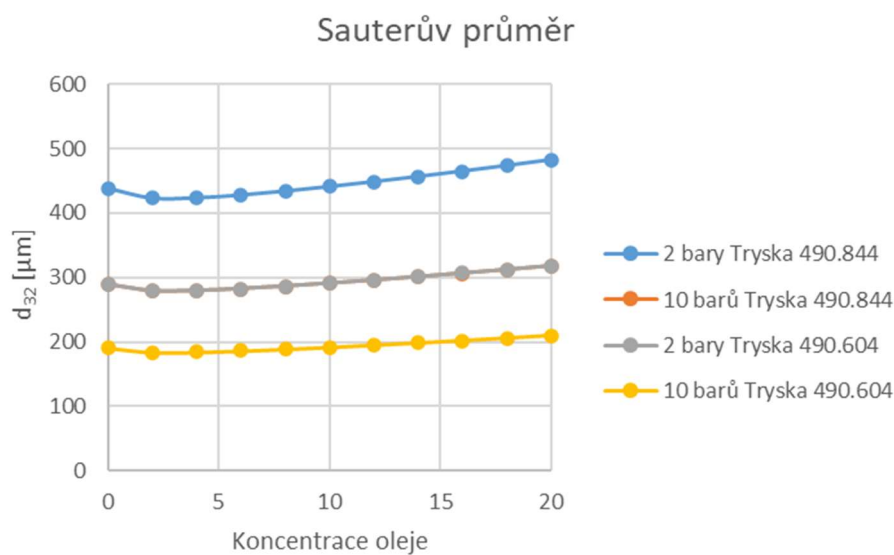
Za pomoci rovnic (2.10) až (2.13) byla vypočtena hodnota součinitele přestupu tepla bez přítomnosti varu. Na grafu z obrázku 3.2 lze pozorovat velký pokles součinitele přestupu tepla při nízkých koncentracích oleje, a to přibližně do 4 %. Následně se tento rychlý pokles zpomalí. U všech vykreslených křivek lze pozorovat na prvních 2 % koncentrace oleje pokles hodnoty součinitele přestupu tepla o 38,2 %. Lze tedy z grafu usoudit, že pokles součinitele přestupu

tepla u směsi vody a oleje není nijak závislý na druhu trysky ani na velikosti pracovního tlaku trysky. Při hodnotě 20% koncentrace oleje by dle predikce nastal pokles u všech vykreslených křivek o 68,6 %.



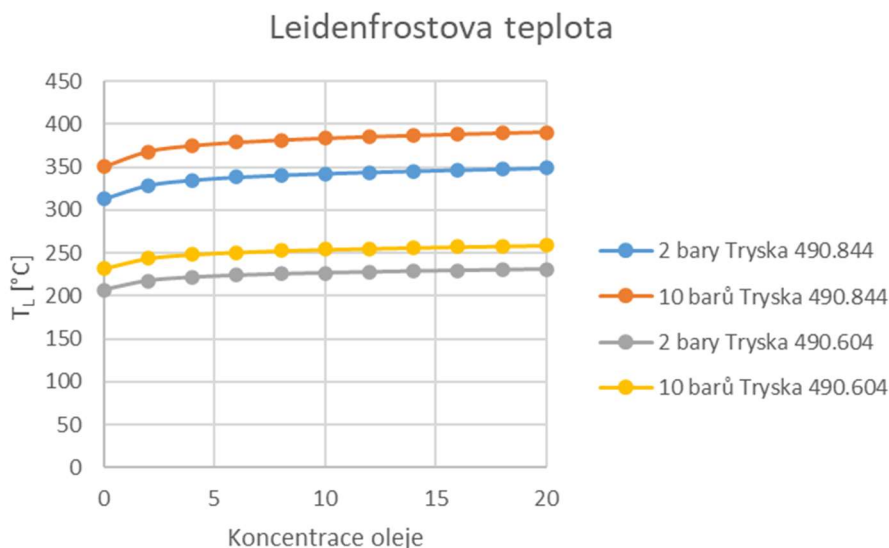
Obrázek 3.2 Predikce součinitele přestupu tepla pro směs vody a oleje

Sauterův průměr pro jednotlivé koncentrace je počítán pomocí rovnic (2.3) až (2.5). Na obrázku 3.3 lze pozorovat změnu Sauterova průměru v závislosti na koncentraci oleje ve vodě. Křivka s tryskou 490.604 při pracovním tlaku 2 bary a křivka s tryskou 490.844 při pracovním tlaku 10 barů se navzájem téměř překrývají. Hodnota  $d_{32}$  pro první zmíněnou trysku je při hodnotě 2% koncentrace oleje rovna dle predikce 279,25  $\mu\text{m}$  a u druhé zmíněvané trysky je  $d_{32}$  rovno 279,11  $\mu\text{m}$ . U všech křivek je predikováno zmenšení Sauterova průměru o 3,5 % při koncentraci 2% oleje ve směsi. Následně dochází ke zvětšování  $d_{32}$  a při 20 % koncentrace oleje je u všech křivek predikováno zvětšení o 10 %.



Obrázek 3.3 Predikce Sauterova průměru pro směs vody a oleje

Na obrázku 3.4 je znázorněna Leidenfrostova teplota v závislosti na koncentraci oleje ve vodě. Predikce Leidenfrostovy teploty byla pro jednotlivé koncentrace počítána pomocí rovnic (2.14) a (2.15). Nejrychlejší nárůst Leidenfrostovy teploty je na prvních 2 % koncentrace oleje ve vodě, a to je pro všechny zobrazené křivky 5,1 %. Celkový nárůst Leidenfrostovy teploty je při zobrazené koncentraci 20% oleje ve vodě pro všechny křivky 11,6 %.

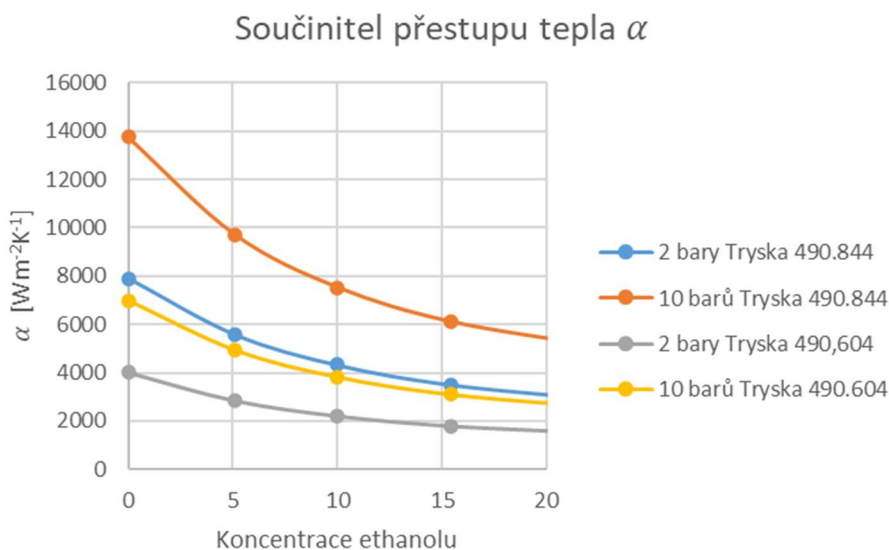


Obrázek 3.4 Predikce Leidenfrostovy teploty pro směs vody a oleje

### 3.2 Směs vody a ethanolu

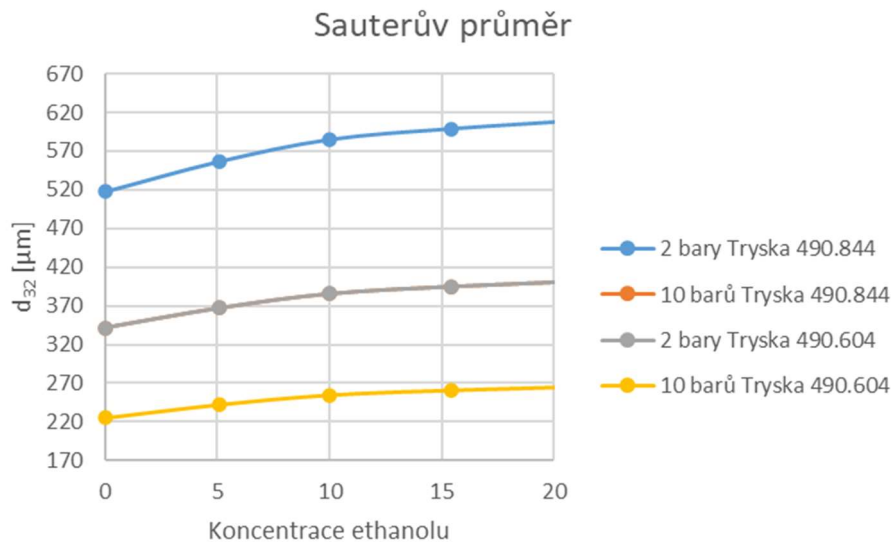
Predikce součinitele přestupu tepla je počítána pomocí rovnic (2.10) až (2.13). Na obrázku 3.5 lze vidět křivky součinitele přestupu tepla. Jako vstupy do predikcí byly použity data z tabulky 2.2.

Součinitel přestupu tepla klesá se zvyšující se koncentrací ethanolu ve vodě. U všech křivek predikce součinitele přestupu tepla klesnula hodnota o 55,5 % při koncentraci 15,4 % ethanolu ve vodě.



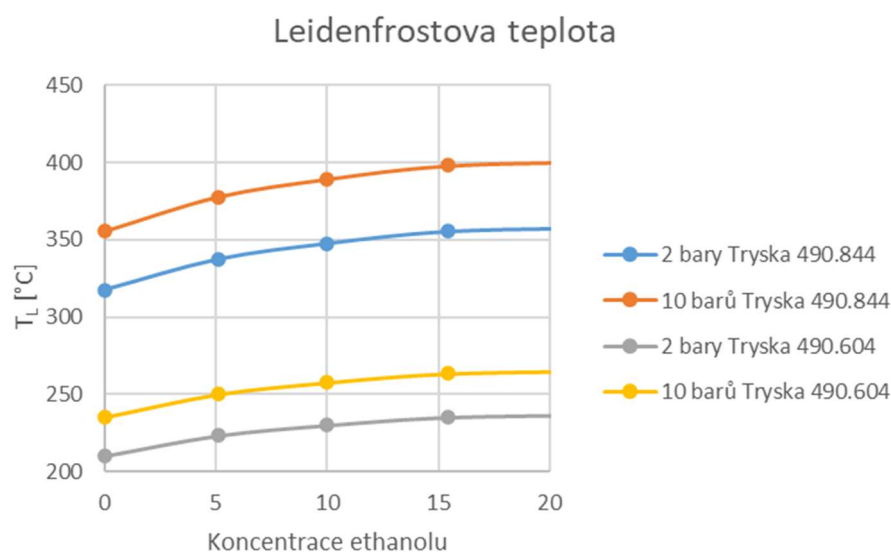
Obrázek 3.5 Predikce součinitele přestupu tepla pro směs vody a ethanolu

Sauterův průměr pro jednotlivé koncentrace je počítán pomocí rovnic (2.3) až (2.5). Na obrázku 3.6 lze pozorovat změnu Sauterova průměru, který se s vyšší koncentrací ethanolu ve směsi zvětšuje. Křivka s tryskou 490.604 při pracovním tlaku 2 bary a křivka s tryskou 490.844 při pracovním tlaku 10 barů se navzájem opět skoro překrývají stejně jako u predikce  $d_{32}$  u směsi vody a oleje. Predikované zvětšení Sauterova průměru je u všech křivek 15,8 % při koncentraci 15,4 % ethanolu ve vodě.



Obrázek 3.6 Predikce Sauterova průměru pro směs vody a ethanolu

Změna Leidenfrostovy teploty v závislosti na koncentraci ethanolu ve vodě je vidět na obrázku 3.7. Byly použity rovnice (2.14) a (2.15) pro výpočet predikce Leidenfrostovy teploty jednotlivých koncentrací. Lze pozorovat nárůst Leidenfrostovy teploty se zvyšující se koncentrací ethanolu. Při koncentraci 15,4 % ethanolu ve vodě se dle predikce zvýší Leidenfrostova teplota o 12 %.

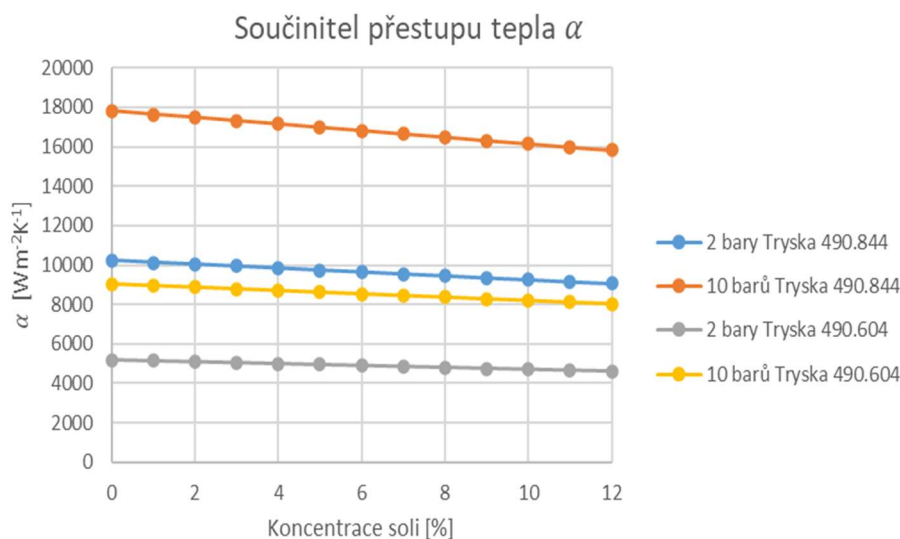


Obrázek 3.7 Predikce Leidenfrostovy teploty pro směs vody a ethanolu

### 3.3 Směs vody a soli

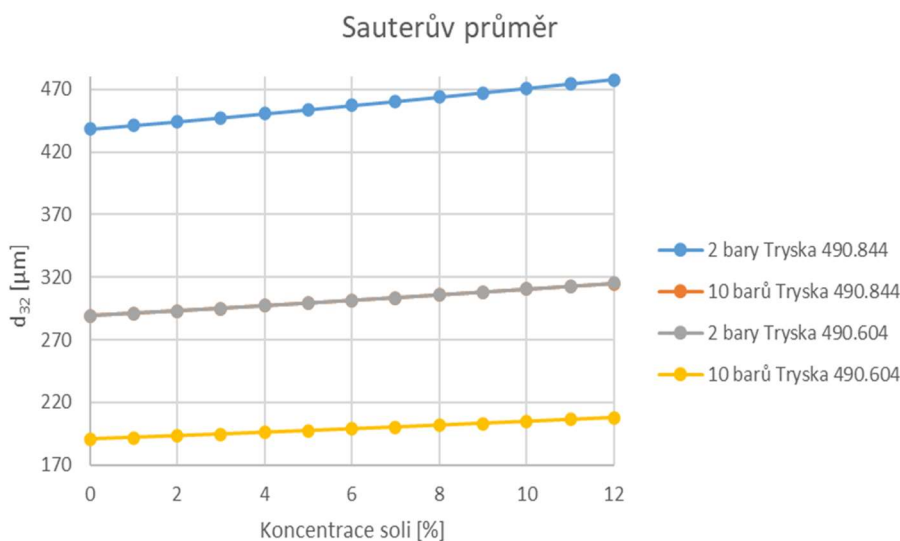
Pro výpočet predikcí vlastností sprchového chlazení při směsi vody a soli bylo využito tabulkových hodnot vlastností daného roztoku pro 50 °C z práce K. G. Nayara [37].

Pro predikci součinitele přestupu tepla byly využity vzorce (2.10) až (2.13). Graf na obrázku 3.8 predikuje pokles součinitele přestupu tepla se zvyšující se koncentrací soli ve vodě. Při 12 % koncentraci soli ve vodě klesne součinitel přestupu tepla u všech zobrazovaných křivek o 11,2 %.



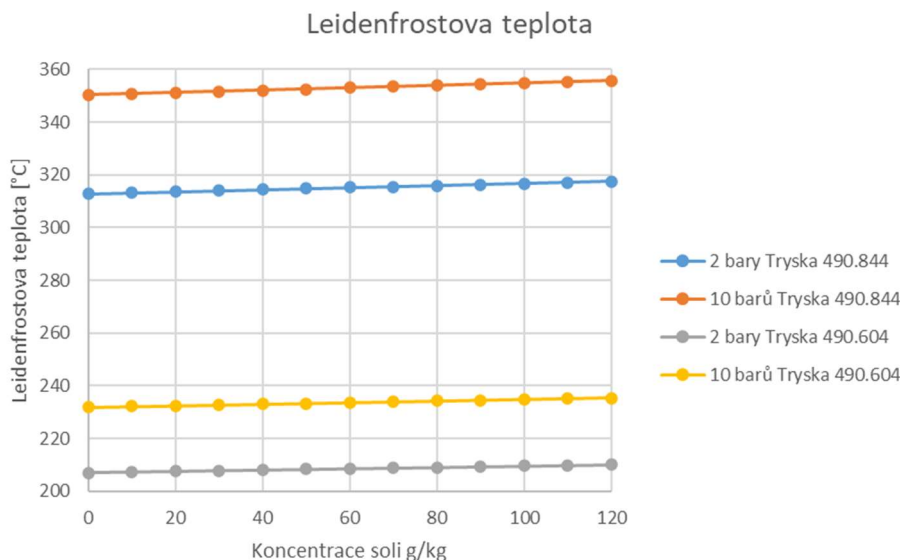
Obrázek 3.8 Predikce součinitele přestupu tepla pro směs vody a soli

Predikce Sauterova průměru byla vypočítána pomocí vzorců (2.3) až (2.5). Z obrázku 3.9 je patrné zvyšování Sauterova průměru kapek při zvyšující se koncentraci soli. Při 12 % koncentraci soli je zvětšení průměru o 8,95 % oproti čisté vodě, lze pozorovat překrytí křivky s tryskou 490.604 při pracovním tlaku 2 bary a křivky s tryskou 490.844 při pracovním tlaku 10 barů, stejně jako u výše zmiňovaných predikcí Sauterova průměru.



Obrázek 3.9 Predikce Sauterova průměru pro směs vody a soli

Dle predikce na změnu Leidenfrostovy teploty vypočítané pomocí rovnic (2.14) a (2.15), lze pozorovat na obrázku 3.10 nárůst Leidenfrostovy teploty, se zvyšující se koncentrací soli. Nárůst je dle predikce nepatrný a při 12 % koncentraci soli je predikován pro všechny zobrazené křivky nárůst pouze 1,50 %.



Obrázek 3.10 Predikce Leidenfrostovy teploty pro směs vody a soli

## Shrnutí

V predikci součinitele přestupu tepla u směsi vody a palmového oleje je předpovídán pokles tohoto součinitele o 26,7 % při koncentraci 1 % oleje ve směsi, o 38,2 % při koncentraci 2 % oleje a dokonce o 48,9 % při koncentraci 4 %.

Ve studii Hnízdila [35] byl při 1 % koncentraci oleje na bázi sádla zjištěn pokles součinitele přestupu tepla o přibližně 26 % při teplotě 100 °C, což dobře koresponduje s výše uvedenou predikcí. V této práci je dále uvedeno, že vliv na součinitel přestupu tepla je pro palmový olej a olej na bázi sádla velmi podobný. Lze tedy předpokládat, že uvedená predikce je dobře použitelná pro teploty nižší, než je teplota varu.

Podle práce Horáka [20] dochází již při 2 % koncentraci minerálního oleje k poklesu součinitele přestupu tepla o 16 %, a při 4 % koncentraci k poklesu o 21 %. Tento pokles není tak výrazný jako v případě predikce v této práci nebo výsledků uvedených Hnízdilem, což lze přičíst rozdílným fyzikálním vlastnostem minerálního oleje oproti palmovému oleji či oleji na bázi sádla. Přesto je i v Horákově studii patrný výrazný pokles součinitele přestupu tepla už při nízkých koncentracích oleje, což potvrzuje trend předpovězený touto bakalářskou prací.

V případě směsi vody a ethanolu predikce ukazuje pokles součinitele přestupu tepla, což však není v souladu s experimentálními výsledky prací Honga [39] a Karapova [40], kde naopak při přidání ethanolu docházelo k výraznému zlepšení účinnosti chlazení. Například ve studii Honga byl při použití 4 % ethanolu zaznamenán nárůst součinitele přestupu tepla o 38,4 %, zatímco podle této práce je při koncentraci 5,1 % predikován pokles o 29,3 %.

U solného roztoku vykazují predikce pouze mírné změny. Nejmenší vliv má sůl dle výpočtů na změnu Leidenfrostovy teploty. Nicméně podle několika experimentálních studií,

například od Chen-Kanga [41], dochází při použití solného roztoku k usazování soli na horkém povrchu, což může sloužit jako iniciační místa pro tvorbu bublin. Usazování soli je považováno za jeden z faktorů, které vedou ke zvýšení Leidenfrostovy teploty. Dalším důvodem je potlačení koalescence (spojování) bublin, které rovněž omezuje vznik stabilní parní vrstvy. Zlepšení přestupu tepla při použití solného roztoku bylo prokázáno ve studiích Chenga [42] a Cui [43]. Naproti tomu predikce v této práci ukazuje, že při zvyšující se koncentraci soli dochází k poklesu součinitele přestupu tepla – při koncentraci 12 % je predikován pokles o 11,2 %. V práci Chenga [42] bylo zjištěno, že při použití 1,72 % koncentrace NaCl ve vodě bylo při teplotě 80 °C dosaženo vyšší hustota tepelného toku a to o 29 %.

## 4 Laboratorní měření

Ve většině teoretických modelů jako chladivo uvažována čistá voda, v reálných provozních podmínkách je tato voda často kontaminována nebo upravována různými příměsemi, které výrazně mění její fyzikální vlastnosti a tím i chování při varu a přestupu tepla. Tento výzkum se zaměřuje zejména na vliv chloridu sodného (soli) a ethanolu.

Sůl (NaCl) se do vody dostává například z průmyslových prostředí, chladicích okruhů nebo jako důsledek úpravy vody. Je známo, že zvyšuje bod varu a může tak oddalovat nástup varného režimu, ale zároveň podporuje tvorbu usazenin, které mohou ovlivnit kontaktní plochu a změnit účinnost chlazení.

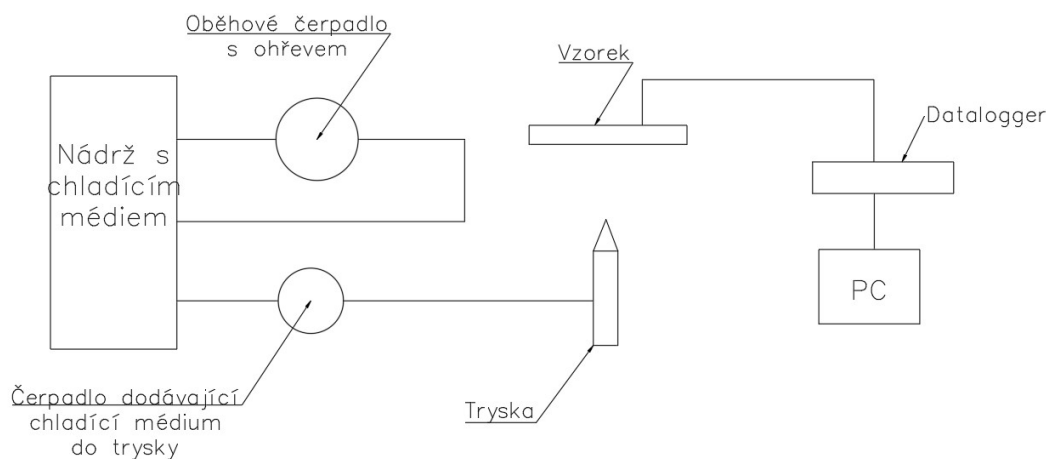
Ethanol, který je často přítomný jako součást chladicích směsí nebo zbytkových chemikálií, působí zcela opačně, protože výrazně snižuje povrchové napětí a bod varu směsi, což může vést k dřívějšímu dosažení Leidenfrostovy teploty.

Vzhledem k těmto rozdílným účinkům je cílem výzkumu experimentálně ověřit, jak se mění klíčové parametry přestupu tepla, a to součinitel přestupu tepla, Leidenfrostova teplota a hodnoty tepelného toku v závislosti na koncentraci těchto dvou příměsí ve vodě.

Během sprchového chlazení může olej vytvořit tenký film na povrchu kapek nebo přímo na horkém povrchu a tam následně ulpět. Následně by se vzorek musel vždy důkladně chemicky a mechanicky vyčistit, aby při opakovaných měřeních nedocházelo k značnému ovlivnění parametrů sprchového chlazení od změny na povrchu. Jelikož se predikce součinitele přestupu tepla a uvedená teorie shodovaly, bylo experimentální měření s olejem nakonec vynecháno.

### 4.1 Experimentální zařízení a popis měření

V rámci této bakalářské práce bylo v Laboratoři přenosu tepla a proudění sestaveno z hliníkových profilů, čerpadel, nádrže a trysky experimentální zařízení. Na obrázku 4.1 lze vidět schéma tohoto zařízení.



Obrázek 4.1 Schéma experimentálního zařízení

Na obrázku 4.2 lze vidět sestavenou konstrukci z hliníkových profilů, umístění a uchycení vzorku, pozici trysky a její uchycení a umístění pece. Vzorek i tryska jsou uchyceny napevno na konstrukci, zatímco pec je na pohyblivé části.



Obrázek 4.2 Uchycení vzorku, pece a trysky na experimentálním zařízení

Před začátkem experimentálního měření bylo potřeba vyrobit zkušební vzorek se zabudovanými termočládky. Pro experimenty měřené v této bakalářské práci byl použit zkušební vzorek z austenitické nerezové oceli (EN 1.4828) o rozměrech 180 mm x 180 mm x 25 mm. Do vzorku byly vyvrtány díry o průměru 0,52mm, do kterých bylo vloženo 5 termočládků typ K o průměru pláště 0,5mm s uzemněným provedením. Termočládky byly zarovnané s povrchem desky a následně zavařeny. Povrch v místě svaru byl následně zdrsněn, aby odpovídal okolnímu povrchu (hrubý válcovaný povrch). Toto je standardní postup výroby v Laboratoři přenosu tepla a proudění a výroba zkušební desky byla realizována jejími zaměstnanci. Pozice termočládků a vzorek lze vidět na obrázku 4.3.

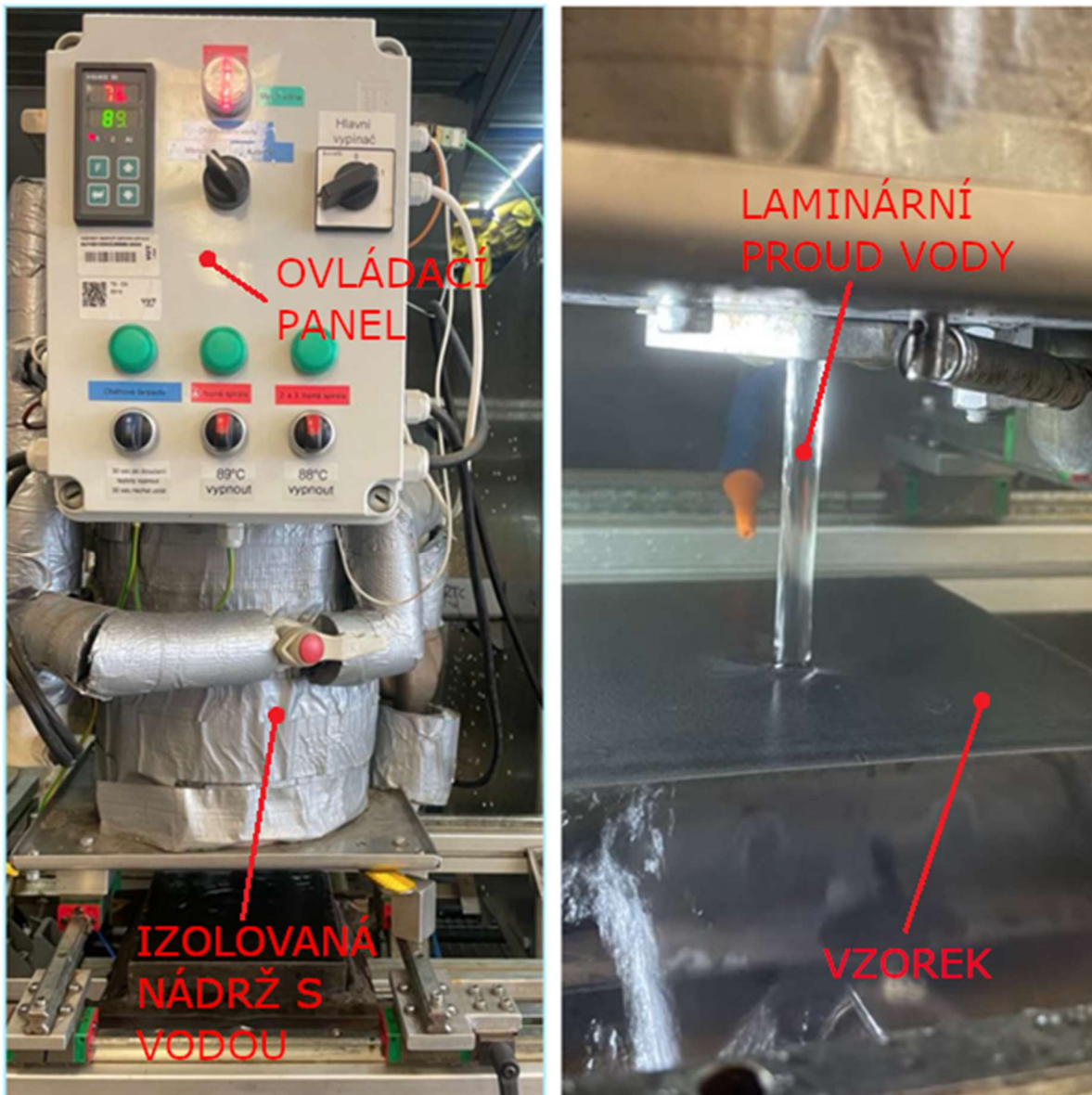


Obrázek 4.3 Vzorek s vyznačenou polohou termočládků

Pro zjištění přesné pozice měřícího místa termočládků od chlazeného povrchu byla provedena kalibrace pomocí speciálního zařízení v Laboratoři přenosu tepla a proudění.

Kalibrace se provádí pomocí zařízení na obrázku 4.4. Při kalibraci je provedena série měření, při které se měří 3x každý termočládek na vzorku. Před začátkem měření je třeba vystředit paprsek vody tak, aby dopadal přímo na vyznačenou polohu termočládku. Následně je voda v nádrži, která je součástí zařízení, ohřata na 89 °C. Poté se spustí proud vody (viz. obrázek 4.4) na vzorek a pomocí dataloggeru a počítače od firmy Dewesoft jsou zaznamenávána data z daného termočládku.

Změřená data byla následně vyfiltrována pomocí programu DataloggerHt800. K filtraci dat byla využita konvoluce s gaussovským jádrem, která se využívá k odstranění šumu v naměřených datech. Následným inverzním výpočtem, který byl proveden zaměstnanci Laboratoře, byla z naměřených a následně vyhodnocených dat, zjištěna hloubka měřícího hrotu termočlánků od chlazeného povrchu: T1=0,67 mm, T2=0,86 mm T3=0,88 mm, T4=0,64 mm T5=0,65 mm. Tyto hloubky odpovídají kalibrované hodnotě součinitele přestupu tepla od vodního proudu 17000 W/(m<sup>2</sup>K).



Obrázek 4.4 Zařízení pro kalibraci termočlánků

V Laboratoři přenosu tepla a proudění bylo na sestaveném experimentálním měřícím zařízení provedeno 10 měření, které jsou popsány v tabulce 4.1. Pro měření byla využita tryska od firmy Lechler s označením 490.644 s plným kuželovým paprskem a úhlem rozstříku 60°. Tryska byla umístěna pod střed vzorku ve vzdálenosti 383 mm. Pracovní tlak byl přesně nastavován na 2 bary a teplota chladícího média byla okolo 30 °C. Vzorek byl pomocí pece

ohřát na 740 °C a následné chlazení tryskou začínalo vždy při teplotě 700 °C na termočlátku T5. Před každým měřením byl povrch očištěn a po experimentech s příměsemi byl proveden kontrolní experiment s čistou demineralizovanou vodou pro zjištění případných povrchových změn u vzorku, které by mohly ovlivňovat měření.

Tabulka 4.1 Experiment s tryskou 490.644

Experiment	Příměs	Hmotnostní koncentrace příměsí [%]
BC 1	ne	0
BC 2	tech. líh	1
BC 3	tech líh	5
BC 4	tech líh	10
BC 5	ne	0
BC 6	sůl	1
BC 7	sůl	5
BC 8	sůl	10
BC 9	sůl	12
BC 10	ne	0

## 4.2 Výsledky měření

V této části jsou prezentovány výsledky experimentálního měření sprchového chlazení, které bylo provedeno s cílem analyzovat vliv různých příměsí rozpuštěných ve vodě na účinnost chlazení horkého kovového povrchu. Experimentální měření bylo zaměřeno především na změnu součinitele přestupu tepla při filmovém varu a změnu Leidenfrostovy teploty při použití různých koncentrací ethanolu a soli. Získaná data poskytují přehled o tom, jak jednotlivé látky ovlivňují charakter varu a účinnost přestupu tepla a umožňují tak porovnat experimentální výsledky s teoretickými predikcemi uvedenými v kapitole 2. Výpočet součinitele přestupu tepla byl proveden pomocí programu běžně využívaném v Laboratoři přenosu tepla a proudění. Pomocí inverzní metody byly vypočteny okrajové podmínky, a to teplota povrchu a součinitel přestupu tepla. Podrobnější informace o výpočtech lze najít v pracích [44-48].

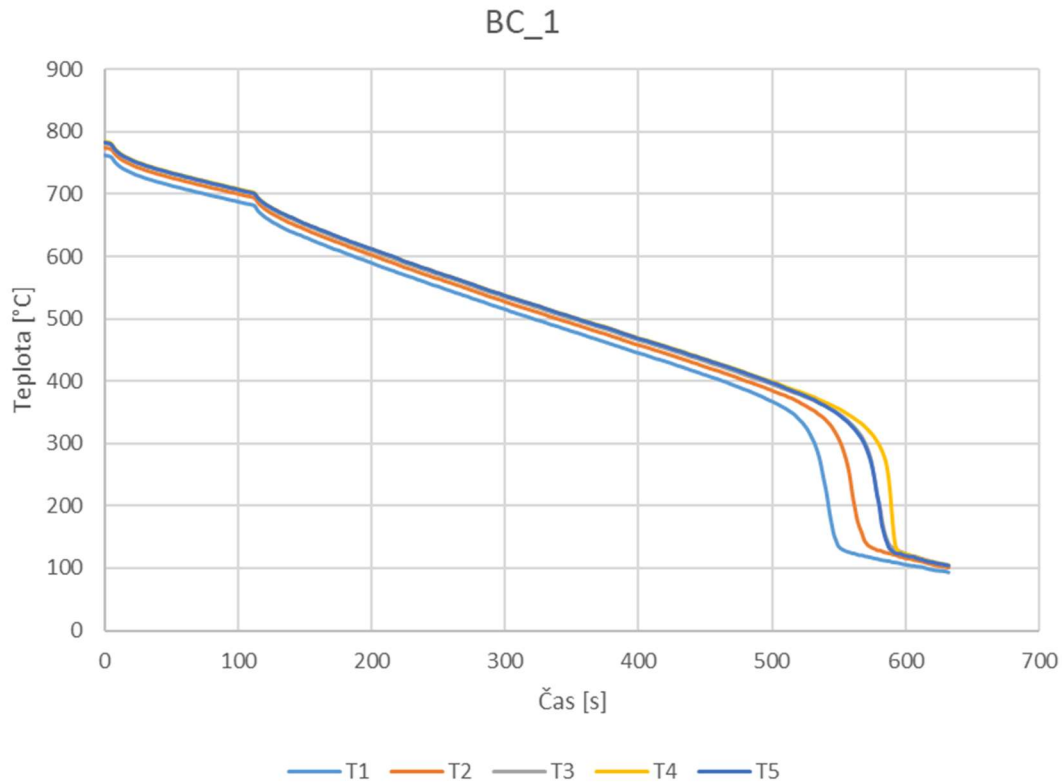
### 4.2.1 Referenční hodnoty vody

Jako první bylo provedeno měření s čistou vodou pro zjištění referenčních hodnot součinitele přestupu tepla, Leidenfrostovy teploty a tepelného toku.

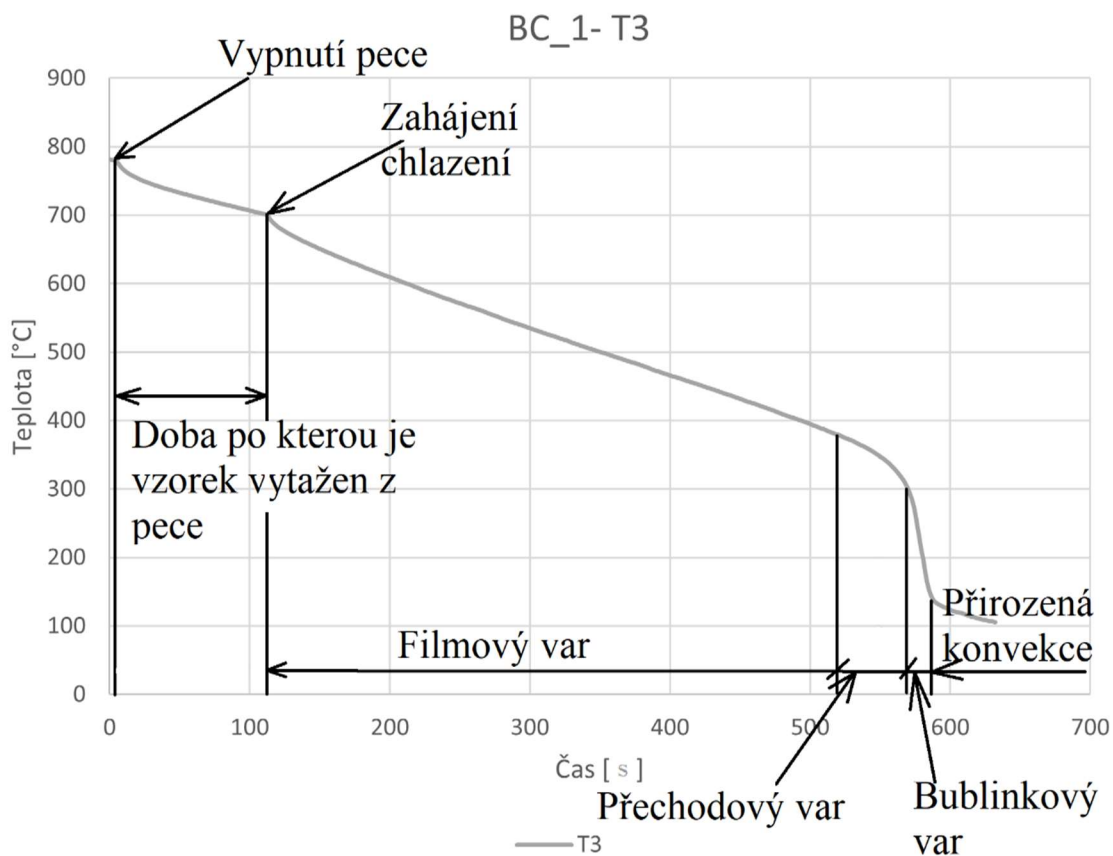
Grafy pro jednotlivé termočlásky jednotlivých experimentů jsou z důvodu přehlednosti uvedeny až v příloze. Na obrázku 4.5 lze vidět graf naměřených teplot jednotlivých termočlásků v čase. Na obrázku 4.6 lze pozorovat, jak se mění teplota v čase u termočlásku T3 a také Obrázek 4.6 popisuje jednotlivé fáze chlazení (konec ohřevu pece, oddělení pece od vzorku, spuštění chlazení) a fáze varu (filmový, přechodný, bublinkový a přirozená konvekce). Graf na obrázku 4.7 ukazuje, jak se mění teplota termočlásku T3, jak se mění vypočtená teplota povrchu a jak se mění hodnota vypočteného součinitele přestupu tepla v čase. Na obrázku 4.8 lze pozorovat vypočtené součinitele přestupu tepla pro termočlásky T2, T3 a T4 (termočlásky T1 a T5 pro lepší přehlednost nejsou prezentovány) a jejich společnou průměrnou hodnotu v závislosti na teplotě povrchu

Z výše popsáných grafů lze určit, že průměrná hodnota součinitele přestupu tepla pro teploty v rozmezí teplot 575 °C až 625 °C z průměru hodnot na termočláscích T2, T3 a T4 je

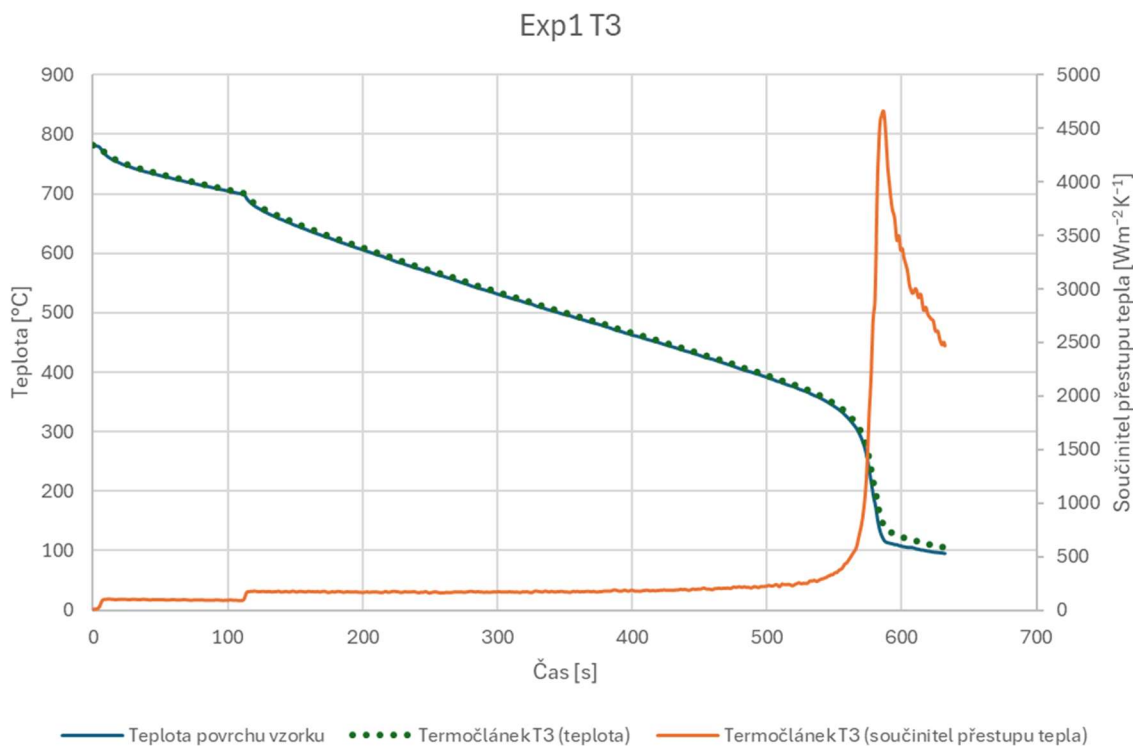
$169,3 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$ . Pro hodnotu teploty povrchu  $111 \text{ }^\circ\text{C}$  je z průměru hodnot na termočláncích T2, T3 a T4 hodnota součinitele přestupu tepla  $4498 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$  a maximální hodnota součinitele přestupu tepla je  $5263 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$ . Díky minimální hustotě tepelného toku, která činí  $77143,86 \text{ Wm}^{-2}$ , lze určit Leidenfrostovu teplotu, která je  $450 \text{ }^\circ\text{C}$  pro čistou vodu za daných podmínek sprchového chlazení. Maximální hustota tepelného toku je  $538243 \text{ Wm}^{-2}$ .



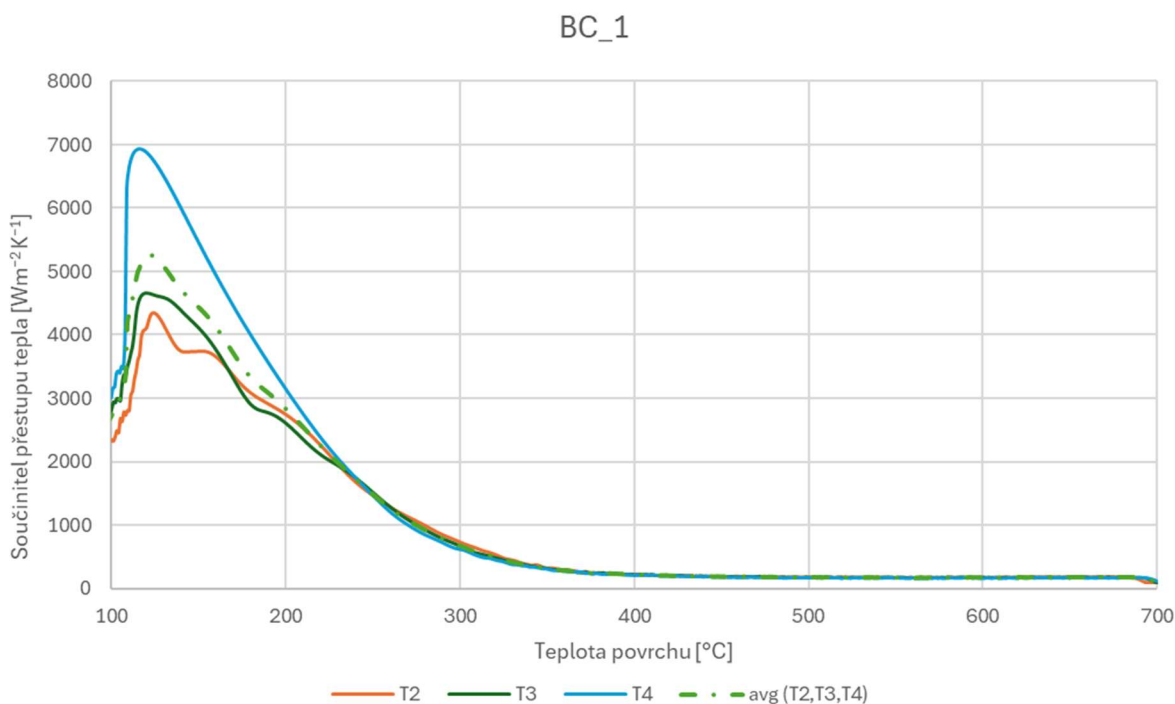
Obrázek 4.5 Graf změřených teplot jednotlivých termočlánců v průběhu chlazení



Obrázek 4.6 Graf změřených hodnot pouze pro termočlánek T3



Obrázek 4.7 Změřená teplota na termočláneku T3, vypočtená hodnota součinitele přestupu tepla a povrchová teplota v závislosti na době chlazení



Obrázek 4.8 Součinitele přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě vzorku pro termočlánky T2, T3, T4 a jejich průměr ( $avg(T2, T3, T4)$ )

#### 4.2.2 Směs vody a technického lihu

Pro vyhodnocení vlivu koncentrace technického lihu (dále jen lihu) ve vodě bylo provedeno 5 měření. Jedná se o měření patrné v tabulce 4.1, experiment BC\_1 až BC\_5. Byl použit technický líh. Jedná se o denaturovaný líh s obsahem ethanolu vyšším než 93 %.

Na obrázku 4.9 vidíme křivky chlazení. Pro jednotlivá měření byla doba od začátku chlazení (700 °C) po dosažení teploty 124 °C téměř neměnná. Pro čistou vodu před použitím lihu to bylo 8,1 minuty. Pro směs vody a lihu s 1 % koncentrací lihu je tato doba 8,2 minuty. Pro směs s 5% koncentrací lihu je to 8,3 minuty, pro 10 % koncentrací lihu je to 8,1 minuty a pro čistou vodu po použití lihu je to 8 minut. Z těchto hodnot lze vidět že se doba chlazení s přidáním lihu skoro nemění.

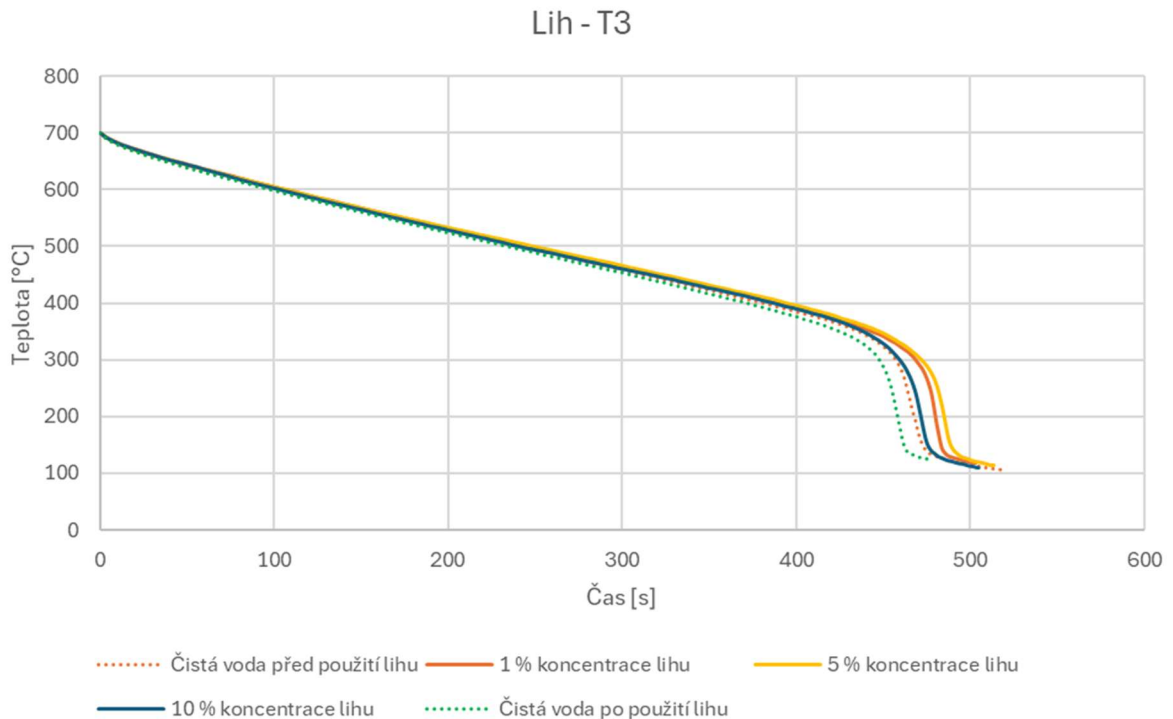
Změna součinitele přestupu tepla (obrázek 4.10) a změna hustoty tepelného toku (obrázek 4.11) je u jednotlivých koncentrací nevýrazná.

Průměrný součinitel přestupu tepla byl určen pomocí vypočtených hodnot na termočláncích T2, T3 a T4. Průměrná hodnota součinitele přestupu tepla v rozmezí teplot 575 °C až 625 °C ve filmovém varu byla určena pro jednotlivá měření a lze tyto hodnoty vidět na obrázku 4.13. Pro čistou vodu před použitím lihu je průměrná hodnota součinitele přestupu 169,3  $Wm^{-2}K^{-1}$ . Pro 1 % koncentrací lihu byla průměrná hodnota součinitele přestupu tepla 165,1  $Wm^{-2}K^{-1}$ , pro 5 % koncentrací to bylo 161  $Wm^{-2}K^{-1}$  a pro 10 % koncentrací 168  $Wm^{-2}K^{-1}$ . Při kontrolním měření čistou vodou pro zjištění, zda nedošlo k ovlivnění povrchu mezi jednotlivými měřeními, vyšla průměrná hodnota součinitele přestupu tepla 162,6  $Wm^{-2}K^{-1}$ . Z jednotlivých výsledků měření lze pozorovat minimální změnu součinitele přestupu tepla při přidání lihu. Pro vodu a 5 % koncentrací lihu, je největší rozdíl průměrného součinitele přestupu tepla 4,9 %.

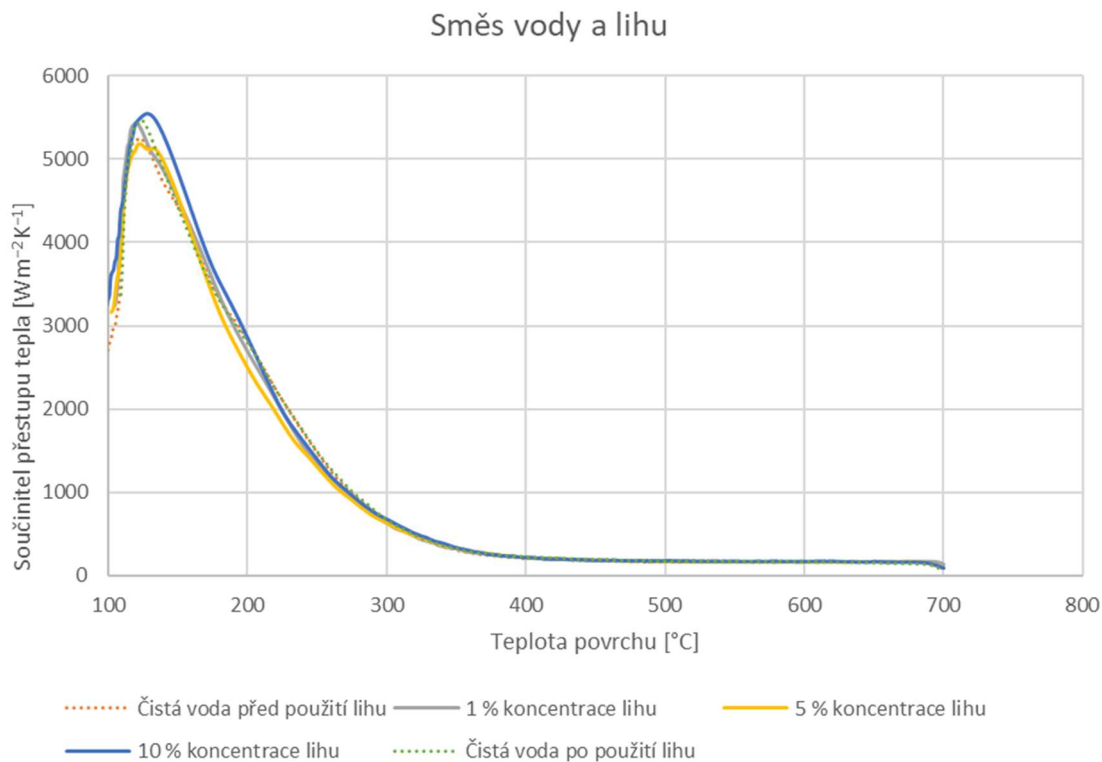
Velmi podobných rozdílů průměrného součinitele přestupu tepla při filmovém varu dosahuje i maximální součinitel přestupu tepla, jehož hodnoty lze pozorovat na obrázku 4.14.

Ten pro čistou vodu při prvním měření dosahoval hodnoty  $5263 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$  a pro 10 % koncentraci lihu ve vodě dosahoval hodnoty  $5543 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ , což je rozdíl 5,3 %.

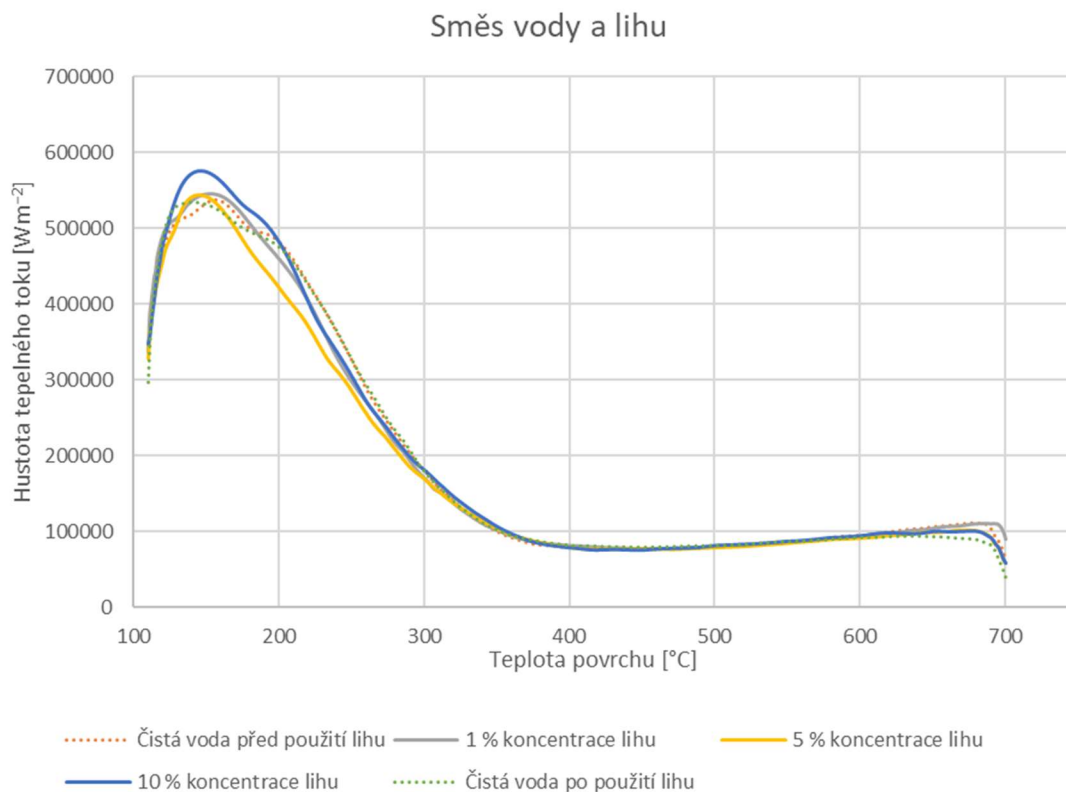
Změna Leidenfrostovy teploty, stejně jako hodnoty součinitele přestupu tepla, vykazuje minimální změny a jsou uvedeny na obrázku 4.12. Při přidání lihu lze na výsledcích vidět nízký pokles Leidenfrostovi teploty. Ovšem až na měření s 5 % koncentrací lihu není tento pokles vyšší než 3 °C. Tudíž je u provedených měření Leidenfrostova teplota téměř neměnná.



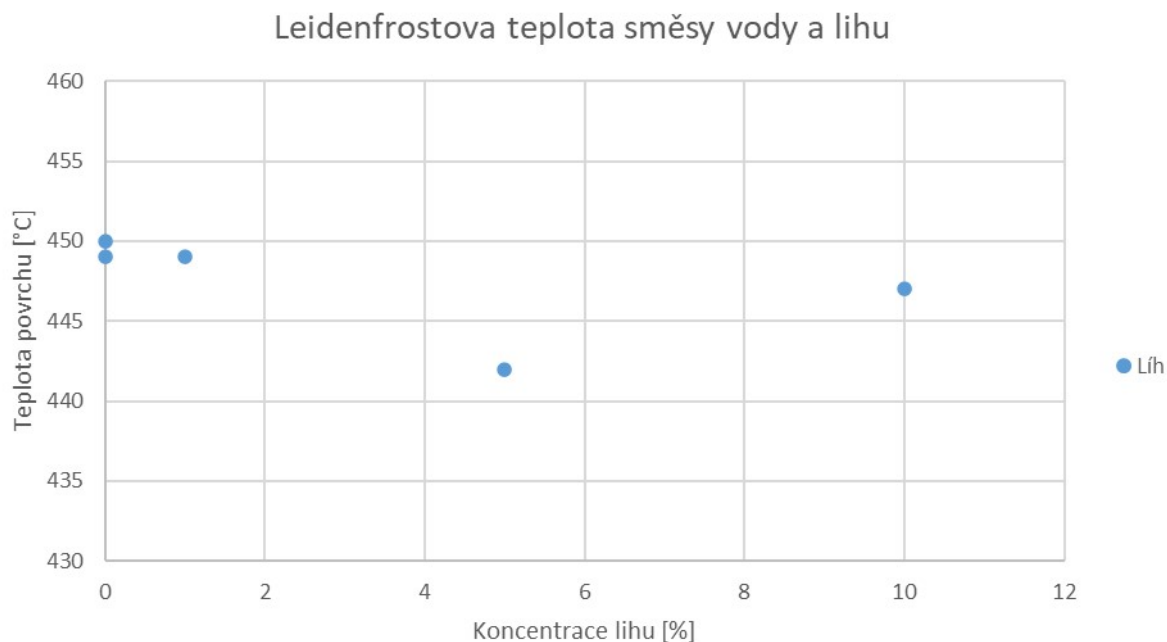
Obrázek 4.9 Změřené teploty na termočláncu T3 pro jednotlivé koncentrace lihu ve vodě v čase



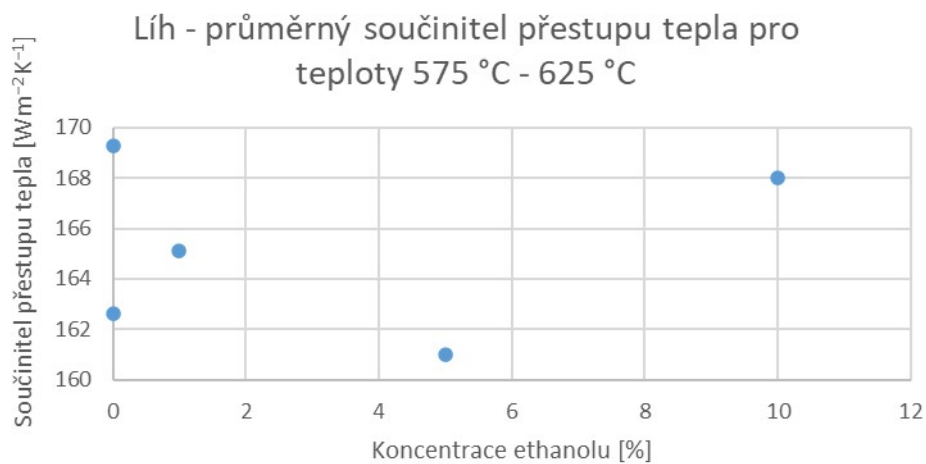
Obrázek 4.10 Graf průměrného součinitele přestupu tepla pro jednotlivé koncentrace lihu ve vodě v závislosti na teplotě povrchu



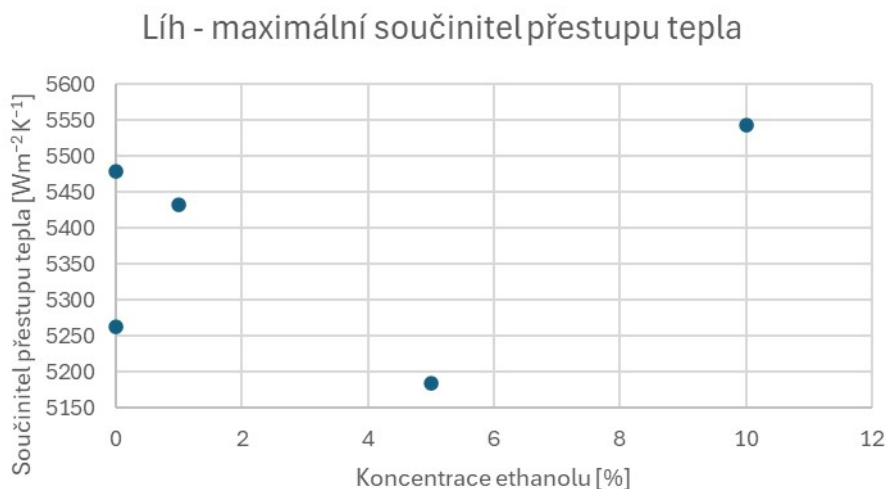
Obrázek 4.11 Průměrná hodnota tepelného toku vypočtená v závislosti na teplotě povrchu vzorku pro jednotlivé koncentrace lihu



Obrázek 4.12 Změna Leidenfrostovy teploty v závislosti na koncentraci směsi vody a lihu



Obrázek 4.13 Průměrný součinitel přestupu tepla při filmovém varu v závislosti na koncentraci lihu ve vodě



Obrázek 4.14 Maximální součinitel přestupu tepla v závislosti na koncentraci lihu ve vodě

### 4.2.3 Směs vody a soli (NaCl)

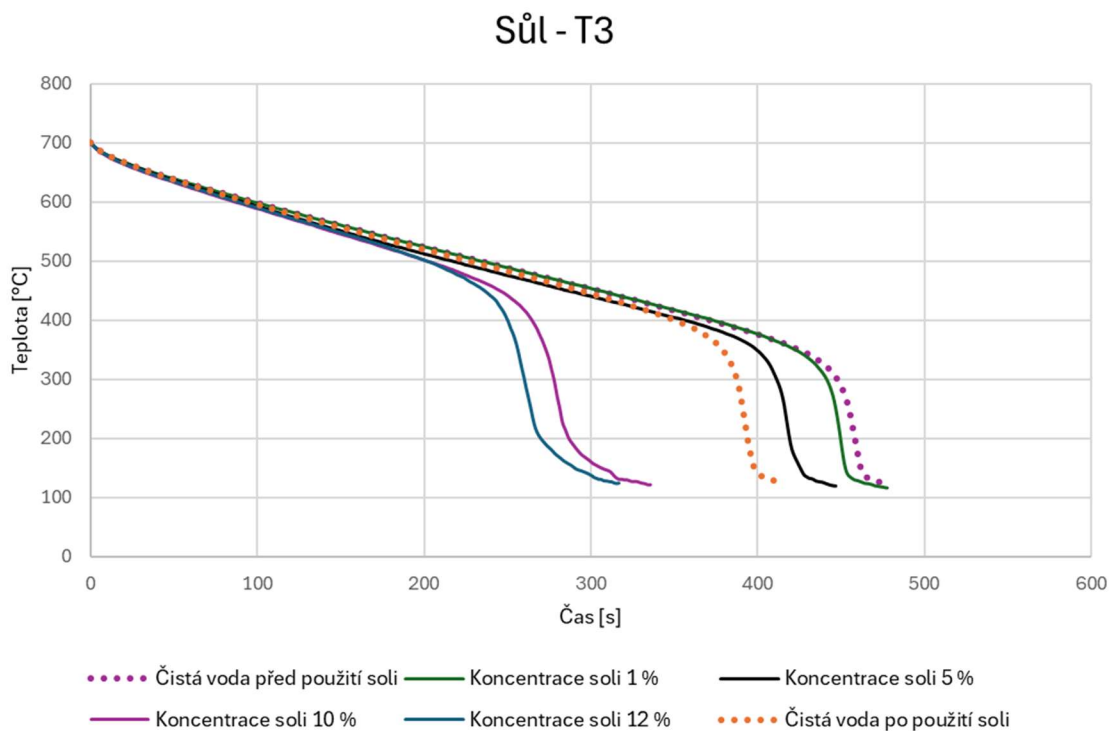
Pro vyhodnocení vlivu koncentrace soli ve vodě bylo provedeno 6 měření. Jedná se o měření z tabulky 4.1 experiment BC\_5 až BC\_10. Pro experiment byla použita tabletová sůl s obsahem chloridu sodného vyššího než 99,9 %. Tato sůl byla rozpuštěna ve vodě v předem určených koncentracích (viz tabulka 4.1).

Na obrázku 4.15 lze pozorovat dobu chlazení jednotlivých experimentů. Od 700 °C po 124 °C se doba, na rozdíl od měření s lihem, výrazněji liší. U čisté vody před použitím soli je doba chlazení 8 minut. Pro 1 % koncentraci soli je doba chlazení 7,5 min, pro 5 % koncentraci je to 7,2 min. Výrazné zrychlení ochlazování lze pozorovat u 10 % koncentrace soli, kde doba chlazení trvá 5,5 minuty a u 12 % soli je to 5,2 minuty.

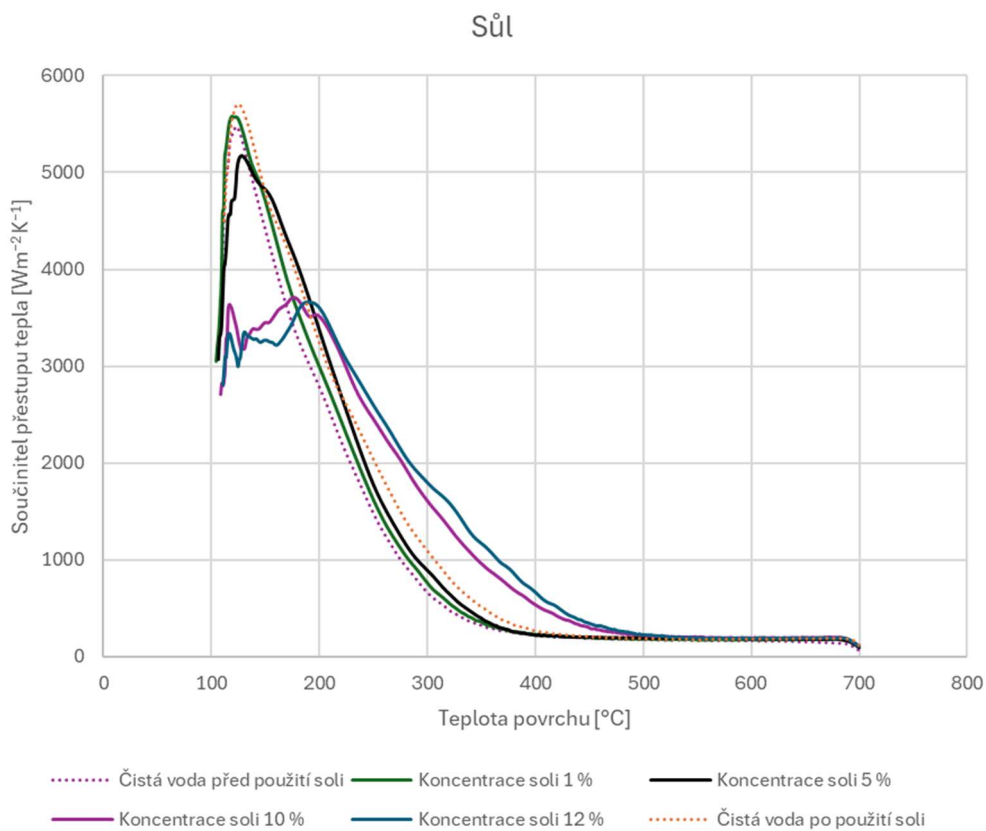
Na grafu z obrázku 4.16 lze pozorovat změny průměrného součinitele přestupu tepla, který byl počítán stejně jako u lihu. Na grafu lze pozorovat snižování maximální hodnoty součinitele přestupu tepla (výjimku tvoří 1% koncentrace soli, kde jde o zvýšení o 2 %). Toto snížení lze vidět podrobněji na obrázku 4.20. Při 12 % koncentraci soli ve vodě dosahuje snížení maximální hodnoty součinitele přestupu tepla 33,2 %. Z obrázku 4.19 vidíme, že průměrná hodnota součinitele přestupu tepla ve filmovém varu stoupá se zvyšující se koncentrací soli. Pro 1 % koncentraci soli je nárůst 4,2 % ovšem pro 10 % koncentraci soli je toto navýšení 16,4 %.

Změna Leidenfrostovy teploty, která se určuje z minimálního tepelného toku, je vidět na obrázku 4.18. Na rozdíl od lihu je i u Leidenfrostovy teploty vidět nárůst při vyšších koncentracích. Pro 12 % koncentraci soli ve vodě je nárůst Leidenfrostovy teploty o 19,8 %.

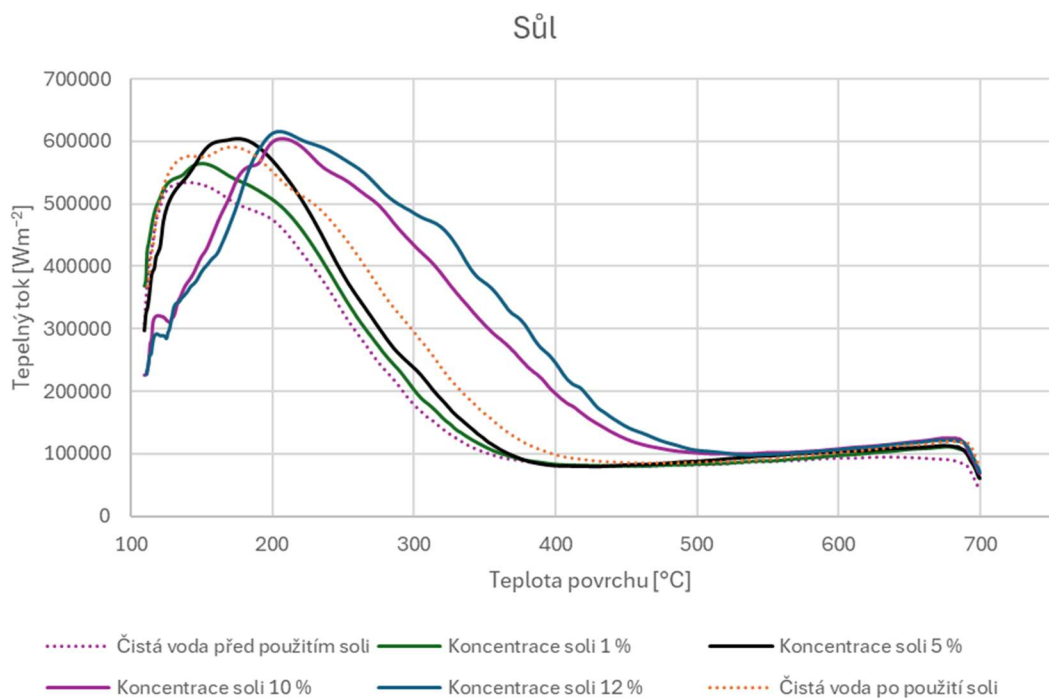
U hustoty tepelného toku na obrázku 4.17 vidíme posun maximálního tepelného toku. S vyšší koncentrací soli se maximum tepelného toku posouvá k vyšším hodnotám chlazeného povrchu vzorku. Stejná situace nastává i u hodnoty minimální hustoty tepelného toku.



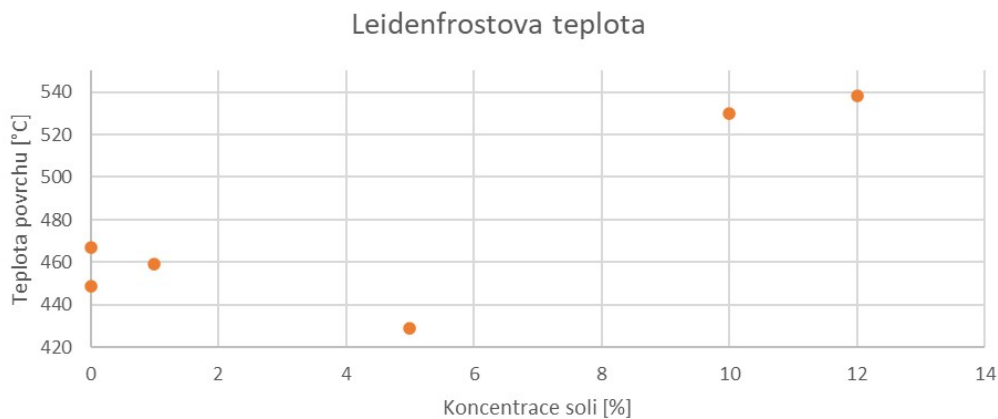
Obrázek 4.15 Měřené teploty v čase na termočlánek T3 pro jednotlivé koncentrace soli ve vodě



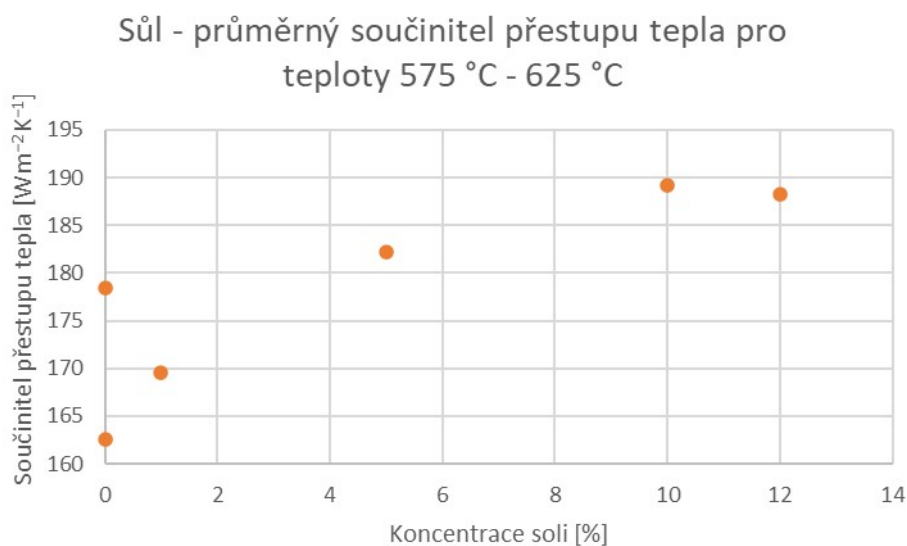
Obrázek 4.16 Graf průměrného součinitele přestupu tepla pro jednotlivé koncentrace soli ve vodě v závislosti na teplotě povrchu



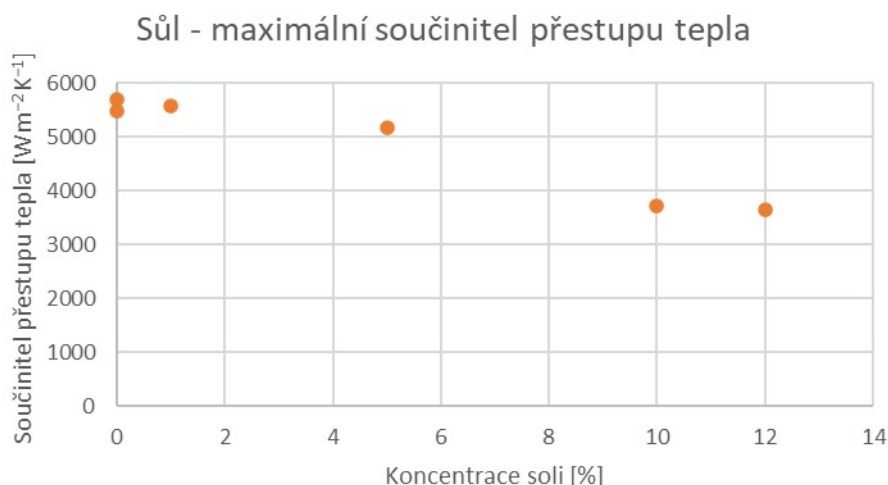
Obrázek 4.17 Průměrná hodnota hustoty tepelného toku vypočtená v závislosti na teplotě povrchu vzorku pro jednotlivé koncentrace soli



Obrázek 4.18 Změna Leidenfrostovy teploty v závislosti na koncentraci směsi vody a soli



Obrázek 4.19 Průměrný součinitel přestupu tepla při filmovém varu v závislosti na koncentraci soli ve vodě



Obrázek 4.20 Maximální součinitel přestupu tepla v závislosti na koncentraci soli ve vodě

## Shrnutí

V nastavených laboratorních podmínkách nebylo u lihu dosaženo žádných výrazných změn v chlazení. To neodpovídá hodnotám uvedených v literatuře Hong [39] a Karpov [40]. Nebyla pozorována téměř žádná změna součinitele přestupu tepla a Leidenfrostovy teploty. Dle vypočítaných predikcí v kapitole 2, mělo dojít ke snížení součinitele přestupu tepla o 29 % a ke zvýšení Leidenfrostovi teploty o 12 % při použití 5 % koncentraci ethanolu. K těmto jevům nedošlo. Z provedených měření nelze jednoznačně potvrdit správnost chování těchto predikcí. Je možné, že při atomizaci vody z trysky mohlo dojít k vypaření ethanolu, který se tak nedostal k horkému povrchu, a proto nemohl ovlivnit parametry sprchového chlazení.

U soli byly oproti lihu změny naměřených hodnot podstatně výraznější. S přidáním soli se výrazně zkrátila doba chlazení (zkrácení o 2,5 min), zvýšila se průměrná hodnota součinitele přestupu tepla (zvýšení o 16,4 %) a zvýšila se hodnota Leidenfrostovy teploty (zvýšení o 19,8 %). Výsledky měření se od predikce liší, jelikož byl predikován pokles součinitele přestupu tepla. Na druhou stranu k navýšení Leidenfrostovy teploty došlo jak u naměřených

výsledků, tak u predikce. V práci, kterou vypracoval Qiang Cui [43], se po přidání soli zvyšuje hodnota maximální hustoty tepelného toku, což je stejný výsledek jako u měření v této práci. Zvyšování maximální hodnoty hustoty tepelného toku lze vidět na obrázku 4.17.

Při jednotlivých měřeních byla kontrolována případná změna povrchu po jednotlivých měření. Po použití lihu nebyly pozorovány žádné výrazné změny na povrchu vzorku. Povrch vzorku po použití lihu je zobrazen na obrázku 4.21, zde je vyobrazena pěna, která se objevovala pouze při chlazení s lihem při použití 5 % a 10 % koncentrace.



Obrázek 4.21 Vzorek při použití směsi lihu a vody

Po jednotlivých měření se směsí vody a soli, bylo jasně zřetelné ulpívání soli na vzorku již pro 1 % roztok. Povrchy po jednotlivých měření lze vidět na obrázku 4.22. Po každém měření byl povrch očištěn. Ovšem z naměřených dat, která můžeme vidět na obrázku 4.15 až 4.20, lze pozorovat vyšší nárůst účinnosti chlazení s čistou vodou po použití směsí vody a soli, než při chlazení s čistou vodou před použitím směsí vody a soli. Lze předpokládat že byl povrch vzorku i po vyčištění solí částečně ovlivněn.



Obrázek 4.22 Povrch vzorku po chlazení směsí vody a soli, A) 1 % koncentrace soli, B) 5 % koncentrace soli, C) 10 % koncentrace soli, D) 12 % koncentrace soli

## ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo analyzovat jaký mají vliv různé příměsí ve vodě na účinnost sprchového chlazení. Práce se zabývala především vlivem oleje, ethanolu a soli. Hodnoceny byly vybrané fyzikální vlastnosti kapalin a jejich dopad na přestup tepla při sprchovém chlazení. Výsledky byly analyzovány pomocí predikčních modelů a ověřovány experimentálním měřením v laboratorních podmínkách.

U fyzikálních vlastností bylo prokázáno, že jejich hodnoty jsou výrazně ovlivněny jak teplotou, tak koncentrací příměsí. Hustota klesá s rostoucí teplotou u všech čistých látek, zatímco koncentrace ethanolu a oleje ji dále snižují, naopak sůl hustotu zvyšuje. Tepelná kapacita se zvyšuje především u ethanolu a oleje, ale přídavek příměsí obecně způsobuje její pokles. Dynamická viskozita výrazně klesá s teplotou, zejména u oleje, ale stoupá s rostoucí koncentrací příměsí. Nejvýraznější je tento nárůst u ethanolu. Tepelná vodivost vykazuje pokles s koncentrací příměsí, přičemž největší změny byly zaznamenány u oleje. Povrchové napětí klesá s teplotou i koncentrací ethanolu a oleje, zatímco u soli mírně roste. Pro některé látky, zejména ethanol, byly výpočtové rovnice přesné pouze u hustoty a tepelné kapacity; u ostatních vlastností se ukázala nutnost použití experimentálních dat.

Predikce vlivu příměsí na součinitel přestupu tepla ukázaly, že i malé koncentrace mohou vést k významným změnám. Největší shoda mezi predikcí a experimentem byla nalezena u směsí vody a oleje, kde byl pozorován výrazný pokles součinitele přestupu tepla, který je v souladu s literaturou. V případě ethanolu se predikce ukázaly jako nespolehlivé, protože zatímco model předpokládal snížení účinnosti chlazení, literatura naopak ukazuje její výrazné zlepšení. Podobný rozpor byl zaznamenán i u solných roztoků. Modely predikovaly mírné zhoršení přestupu tepla, ale experimenty a literatura prokázaly jeho zlepšení.

V laboratorních experimentech byly rozdíly mezi predikcí a literaturou potvrzeny u směsí vody a soli. U ethanolových směsí nebyly zaznamenány žádné výrazné změny. Oproti tomu solné roztoky vedly ke zrychlení chlazení, zvýšení součinitele přestupu tepla a výraznému zvýšení Leidenfrostovy teploty.

Celkově lze konstatovat, že existující predikční modely spolehlivě popisují chování směsí vody a oleje, avšak jejich přesnost výrazně klesá u ethanolových a solných směsí.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ÇENGEL, Yunus A. *Introduction to Thermodynamics and Heat Transfer*. Second Edition. McGraw–Hill Primis, 2008. ISBN 0–390–86122–7.
- [2] JÍCHA, M. *Přenos tepla a látky*. Akademické nakladatelství CERM, s. r. o., Brno, 2011. 160 s. ISBN 80-214-2029-4.
- [3] SPEIGHT, James G. *Chemistry and chemical technology*. In: SPEIGHT, James G. *Handbook of Industrial Hydrocarbon Processes*. Second Edition. Gulf Professional Publishing, 2020, s. 1-44. ISBN 9780128099230.
- [4] CHABIČOVSKÝ, M. *Faktory ovlivňující sprchové chlazení za vysokých teplot*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 105 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Miroslav Raudenský, CSc.
- [5] INCROPERA, F. P.; DE WITT, D. P. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 3rd ed., New York: John Wiley & Sons, 1990, 919 s., ISBN 0-471-51729-1.
- [6] KOTRBÁČEK, P., M. CHABIČOVSKÝ, J. KOMINEK, O. RESL a H. BELLEROVA. Influence of water temperature on spray cooling at high surface temperatures. *Applied Thermal Engineering*. 2022, (216). ISSN 1359-4311.
- [7] LIŠČIČ, Božidar (ed.). *Quenching theory and technology*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, c2010. ISBN 978-0-8493-9279-5.
- [8] YANG J., CHOW L.C, PAIS M.R. Nucleate boiling heat transfer in spray cooling, *J. Heat Transf.* 118 (1996) 668–671.
- [9] CEBO-RUDNICKA A., MALINOWSKI Z., BUCZEK A., The influence of selected parameters of spray cooling and thermal conductivity on heat transfer coefficient, *Int. J. Therm. Sci.* 110 (2016) 52–64
- [10] MUGLE, R. A.; EVANS, H. D. Droplet Size Distributions in Sprays., *Ind. Eng. Chem.*, 1951, Vol. 43, No. 6, str. 1317–1324.
- [11] ESTES, K. A.; MUDAWAR, I. Correlation of Sauter mean diameter and critical heat flux for spray cooling of small surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1995, Vol. 38, No. 16, str. 2985–2996.
- [12] CHENG W.-L., HAN F.-Y., LIU Q.-N., FAN H.-L, Spray characteristics and spray cooling heat transfer in the non-boiling regime, *Energy* 36 (2011) 3399–3405.
- [13] GHODBANE, M.; HOLMAN, J. P. Experimental study of spray cooling with Freon-113. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1991, Vol. 34, No.4/5, str. 1163–1174.
- [14] ZHI-FU ZHOU, BIN CHEN, RUI WANG, GUO-XIANG WANG, Comparative investigation on the spray characteristics and heat transfer dynamics of pulsed spray cooling with volatile cryogenes, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 82, 2017, str. 189-197, ISSN 0894-1777
- [15] S.M. SOHEL MURSHED, C.A. NIETO DE CASTRO, A critical review of traditional and emerging techniques and fluids for electronics cooling, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 78, 2017, Str. 821-833, ISSN 1364-0321
- [16] LIU, H.; CAI, C.; YAN, Y.; JIA, M.; YIN, B. Numerical simulation and experimental investigation on spray cooling in the non-boiling regime. *Heat Mass Transf.* 2018, 54, 3747–3760.
- [17] YUWEI, Z.; NI, L. Research progress of spray cooling with surfactant. *Electron. Compon. Mater.* 2016, 35, 18–22.
- [18] S.J. KIM, I.C. BANG, J. BUONGIORNO, L.W. HU, Surface wettability change during pool boiling of nanofluids and its effect on critical heat flux, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, 2007, str. 4105-4116, ISSN 0017-9310

- [19] BANSAL, A. Alumina Nanofluid for Spray Cooling Heat Transfer Enhancement. In Proceedings of the 2007 ASME-JSME Thermal Engineering Summer Heat Transfer Conference, Vancouver, BC, Canada, 8–12 July 2007.
- [20] HORÁK, A.; RAUDENSKÝ, M.; POHANKA, M.; BELLEROVÁ, H.; REICHERDT, T. Research on Cooling Efficiencies of Water, Emulsions and Oil. Metallurgical and Mining Industry, 2010, roč. 2, č. 4, str. 271-278.
- [21] *VDI heat atlas: with 1011 figures and 539 tables*. Springer reference. Heidelberg: Springer, [2010]. ISBN 978-3-540-77876-9.
- [22] KALČÍK, Josef. Technická termomechanika. Praha: ČAV, 1960, 514 s.
- [23] VOLKA, K., M. TKADLECOVÁ, K. ZÁRUBA. Příklady z analytické chemie pro bakaláře. Vyd. 2., rozš. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2010. ISBN 978-80-7080-743-9.
- [24] RIBICKY, J. R.; MUDAWAR, I. Single-phase and two-phase cooling characteristics of upward-facing and downward-facing sprays. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006. Vol. 49, No. 1-2, str. 5–16.
- [25] YAO, S; HENRY, R. Experiments of Quenching under pressure. In Proceedings of the Sixth International Heat Transfer Conference, 1978, Toronto, Canada.
- [26] YAO, S., COX, T.L. A general heat transfer correlation for impacting water sprays on high temperature surfaces. Experimental Heat Transfer, 2002, roč. 15, č. 4, str. 207-219.
- [27] GRANT, G., BRENTON, J., DRYSDALE, D. Fire suppression by water sprays, Progress in Energy and Combustion Science, 2000, Vol. 24, str 79-130
- [28] QENAWY, M., CHEN, Y., ZHU, Y., ALI, M., WANG, J., TIAN, J., CHEN, B., A novel coaxial air-R134a spray cooling for heat transfer enhancement of laser dermatology, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2024, Vol. 233
- [29] KITA, Y., NAKAMATSU, M., HIDAKA, S., KOHNO, M., TAKATA, Y., Quenching mechanism of spray cooling and the effect of system pressure, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, Vol. 190
- [30] KREITH, Frank, R. M. MANGLIK a Mark BOHN. *Principles of Heat Transfer*. 7th ed. Stamford: Cengage Learning, 2011. ISBN 978-0-495-66770-4.
- [31] HASAL, Pavel. TEPELNÉ PROCESY. *Ústav chemického inženýrství VŠCHT PRAHA* [online]. 2025 [cit. 2025-04-14]. Dostupné z: <https://uchi.vscht.cz/files/uzel/51582/0001~CwmIL8hPyc5JTKmMz44vKEpNyUsszk7MjTcyMDICAA.pdf?redirected>
- [32] ŠTĚPÁNEK, Jan. Krize přestupu tepla prvního druhu. *Ústav energetiky Fakulty strojní ČVUT v Praze* [online]. 2025 [cit. 2025-04-14]. Dostupné z: [https://energetika.cvut.cz/wp-content/uploads/F\\_krize\\_prestupu\\_tepla.pdf](https://energetika.cvut.cz/wp-content/uploads/F_krize_prestupu_tepla.pdf)
- [33] Spray Engineering Info. *Tecpro australia* [online]. 2025 [cit. 2025-04-14]. Dostupné z: <https://www.tecpro.com.au/technical-info/spray-engineering-info/>
- [34] Liang, G., Mudawar, I. Review of spray cooling – Part 1: Single-phase and nucleate boiling regimes, and critical heat flux, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, Vol. 115, str 1174-1205.
- [35] HNÍZDIL, M.; CHABIČOVSKÝ, M. *COOLING EFFICIENCY OF VARIOUS EMULSIONS DURING COLD ROLLING*. Technical contribution to the 11 th International Rolling Conference, October 1st-3rd, Sao Paulo, SP, Brazil: 2019. s. 1-9.
- [36] BELŠAK, G.; BAJT, S.; ŠARLER, B. Numerical Study of the Micro-Jet Formation in Double Flow Focusing Nozzle Geometry Using Different Water-Alcohol Solutions. *Materials* 2021, 14, 3614.

- [37] NAYAR, K.G., SHARQAWY, M.H., BANCHIK, L.D., LIENHARD J.H. "Thermophysical properties of seawater: A review and new correlations that include pressure dependence," *Desalination*, Vol. 390, pp.1-24, 2016. doi:10.1016/j.desal.2016.02.024
- [38] Chempro. *TOP-NOTCH TECHNOLOGY IN PRODUCTION OF OILS AND FATS* [online]. [cit. 2025-05-03]. Dostupné z: <https://www.chempro.in>
- [39] L HONG, C CHANG, HONGCHAO, L JIA, J MING, G JULIANG. Experimental investigation on heat transfer of spray cooling with the mixture of ethanol and water, *International Journal of Thermal Sciences*, 2018, Volume 133, str. 62-68, ISSN 1290-0729
- [40] P. N. KARPOV, A. D. NAZAROV, A. F. SEROV, V. I. TEREKHOV. Evaporative Cooling by a Pulsed Jet Spray of Binary Ethanol–Water Mixture, *Technical Physics Letters*, 2015, Vol. 41, No. 7, str. 668–671, ISSN 10637850
- [41] H. CHEN-KANG, C. VAN P. The effects of dissolved salt on the Leidenfrost transition, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, Volume 50, Issues 1–2, str 269-282, ISSN 0017-9310,
- [42] W CHENG, B XIE, F HAN, H CHEN, An experimental investigation of heat transfer enhancement by addition of high-alcohol surfactant (HAS) and dissolving salt additive (DSA) in spray cooling, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2013, Volume 45, str 198-202, ISSN 0894-1777,
- [43] Q. CUI, S. CHANDRA, S. MCCAHAN, The effect of dissolving salts in water sprays used for quenching a hot surface: Part 2-Spray cooling, *J. Heat Transf. – Trans. ASME* 125 (2003) 333–338.
- [44] POHANKA, M. Technical Experiment Based Inverse Tasks in Mechanics. Brno, 2006, Ph.D. thesis. Vysoké Učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Doc. Ing. Miroslav Raudenský, CSc
- [45] RAUDENSKÝ, M.; DRUCKMULLER, M.; HORSKÝ, J. Inverse Heat Conduction Problems and Generalisation of Experimental Results. In: NELSON, R. *Proceedings of the ASME Heat Transfer Division, 1998: presented at the 1998 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, November 15-20, 1998, Anaheim, California*. New York, N.Y.: American Society of Mechanical Engineers, c1997, s. 65-72. HTD (Series), v. 361. ISBN 0-7918-1597-8
- [46] RAUDENSKÝ, M. Heat Transfer Coefficient Estimation by Inverse Conduction Algorithm. *International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow*, Vol. 3, 1993, No. 3, pp. 257-266
- [47] RAUDENSKÝ, M.; POHANKA, M.; HORSKÝ, J. Combined Inverse Heat Conduction Method for Highly Transient Processes. In *Heat Transfer VII. 3*. WITPress, 2002. s. 35-42. ISBN: 1-85312-906-2.
- [48] POHANKA, M; WOODBURY, K.A. A Downhill Simplex method for computation of interfacial heat transfer coefficients in alloy casting. In *Inverse problems in engineering*. OCT 2003. Roč. 11, č. 5, s. 409-424. ISSN 1068-2767
- [49] J. D. Oxley, *Spray cooling and spray chilling for food in-gredient and nutraceutical encapsulation*, Woodhead Pub-lishing Limited, Sawston, UK, 2012.

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
a	absorptance	
c	Měrná tepelná kapacita	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
$c_{mix}$	Měrná tepelná kapacita směsi	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
$c_p$	Měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
$c_v$	Měrná tepelná kapacita za konstantního objemu	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
d	průměr kapek	m
D	průměr chlazeného povrchu	m
$d_0$	Průměr trysky	m
$d_{32}$	Sauterův střední průměr kapek	m
$d_{DK}$	Poloměr dopadového kužele	m
$E_0$	Zářivost tělesa	$W \cdot m^{-2}$
F	Síla	N
H	Vzdálenost trysky od povrchu	m
l	délka	m
m	Hmotnost	kg
$\dot{m}_L$	Hustota dopadající kapaliny	$kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
n	Látkové množství	
$n_d$	počet kapek	
$Nu_{D32}$	Nusseltovo číslo, kde za charakteristický rozměr je brán Sauterův střední průměr kapek	
p	Tlak	Pa
$P_{mix}$	Parametr pro výpočet povrchového napětí	
Pr	Prandlovo číslo	
Q	Teplo	J
$Q''$	Objemový tok kapaliny	$m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
$\dot{Q}$	Celkový tepelný tok	W
$\dot{q}$	Hustota tepelného toku	$W \cdot m^{-2}$
r	Měrná plynová konstanta	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
R	Poloměr průřezu rozstříku	m
$Re_0$	Reynoldsovo číslo pro výpočet Sauterova středního průměru kapek	
$Re_{D32}$	Reynoldsovo číslo pro výpočet odhadu součinitele přestupu tepla	
S	Plocha	$m^2$
T	Teplota	K, °C
$T_\infty$	Teplota tekutiny v dostatečné vzdálenosti	K
$T_L$	Leidenfrostova teplota	K, °C
$T_w$	Teplota obtékaného tělesa	K

$t_w$	Vyčkávací perioda	s
$u$	Rychlost proudění kapaliny	$m \cdot s^{-1}$
$u_0$	Průměrná rychlost kapky vycházející z trysky	$m \cdot s^{-1}$
$V$	Objem	$m^3$
$\dot{V}$	Průtok trysky	$m^3 \cdot \text{min}^{-1}$
$We_0$	Weberovo číslo pro výpočet Sauterova středního průměru kapek	
$We_s$	Weberovo číslo pro výpočet Leidenfrostovi teploty	
$x$	souřadnice kartézského systému	
$x$	Molární zlomek	
$\tilde{x}$	Hmotnostní zlomek	mol
$\alpha$	Součinitel přestupu tepla	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
$\gamma$	Smyková rychlost	$s^{-1}$
$\varepsilon$	Emisivita	
$\lambda_f$	Součinitel tepelné vodivosti kapaliny	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$\lambda_{\text{mix}}$	Součinitel tepelné vodivosti	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$\mu$	Dynamická viskozita	$Pa \cdot s$
$\mu_f$	Dynamická viskozita kapaliny	$Pa \cdot s$
$\nu$	Kinematická viskozita	$m^2 \cdot s^{-1}$
$\nu_x$	molární objem	$m^3 \cdot \text{mol}^{-1}$
$\rho$	Hustota	$kg \cdot m^{-3}$
$\rho_f$	Hustota kapaliny	$kg \cdot m^{-3}$
$\rho_f^{\text{mix}}$	Hustota směsi kapaliny	$kg \cdot m^{-3}$
$\rho_g$	Hustota okolního prostředí	$kg \cdot m^{-3}$
$\sigma$	Povrchové napětí	$N \cdot m^{-1}$
$\sigma_0$	Stefan-Boltzmanova konstanta $\sigma_0=5,67 \cdot 10^{-8}$	$Wm^{-2} K^{-4}$
$\sigma_{\text{mix}}$	Povrchové napětí směsi	$N \cdot m^{-1}$
$\tau$	Smykové napětí	Pa
$\phi$	Parametr pro výpočet směsi součinitele tepelné vodivosti	

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1 Vedení tepla přes rovinnou stěnu [1] .....	10
Obrázek 1.2 Přenos tepla z horkého povrchu do vzduchu konvekcí [1] .....	12
Obrázek 1.3 příklady nucené a přirozené konvekce. [1] .....	12
Obrázek 1.4 Přenos tepla zářením mezi povrchem a okolním prostředím [1] .....	13
Obrázek 1.5 Křivka varu [32].....	15
Obrázek 1.6 Stadia vzniku a vývoje parní bubliny u přehřátého pevného povrchu [31] .....	15
Obrázek 2.1 Paprsky trysek a dopadové stopy. [33] .....	17
Obrázek 2.2 Závislost hustoty na teplotě [36], [5] .....	23
Obrázek 2.3 Závislost hustoty na koncentraci oleje ve vodě při 50 °C.....	23
Obrázek 2.4 Závislost hustoty na koncentraci ethanolu ve vodě při 20 °C [36] .....	24
Obrázek 2.5 Závislost hustoty na koncentraci soli ve vodě při 50 °C [37] .....	24
Obrázek 2.6 Závislost měrné tepelné kapacity na teplotě [36], [5].....	25
Obrázek 2.7 Závislost měrné tepelné kapacity na koncentraci soli ve vodě při 50 °C ..	26
Obrázek 2.8 Závislost tepelné kapacity na koncentraci ethanolu ve vodě při 20 °C [36].....	26
Obrázek 2.9 Závislost tepelné kapacity na koncentraci soli ve vodě při 50 °C [37].....	27
Obrázek 2.10 Závislost dynamické viskozity na teplotě [36], [5].....	28
Obrázek 2.11 Závislost dynamické viskozity oleje na teplotě .....	28
Obrázek 2.12 Závislost dynamické viskozity na koncentraci oleje ve vodě při 50 °C ..	29
Obrázek 2.13 Závislost dynamické viskozity na koncentraci ethanolu ve vodě při 20 °C [36].....	29
Obrázek 2.14 Závislost dynamické viskozity na koncentraci soli ve vodě při 50 °C [37].....	30
Obrázek 2.15 Závislost tepelné vodivosti na teplotě [36] .....	31
Obrázek 2.16 Závislost tepelné vodivosti vody na teplotě [5] .....	31
Obrázek 2.17 Závislost součinitele tepelné vodivosti na koncentraci oleje ve vodě pro 50 °C .....	32
Obrázek 2.18 Závislost součinitele tepelné vodivosti na koncentraci ethanolu ve vodě pro 20 °C [36].....	32
Obrázek 2.19 Závislost součinitele tepelné vodivosti na koncentraci soli ve vodě pro 50 °C [37].....	33
Obrázek 2.20 Závislost povrchového napětí na teplotě [5], [36], [37].....	34
Obrázek 2.21 Závislost povrchového napětí na koncentraci oleje ve vodě pro 50 °C ...	34
Obrázek 2.22 Závislost povrchového napětí na koncentraci ethanolu ve vodě pro 20 °C [36].....	35
Obrázek 2.23 Závislost povrchového napětí na koncentraci soli ve vodě pro 50 °C [37].....	35
Obrázek 3.1 Kuželová tryska s paprskem .....	39
Obrázek 3.2 Predikce součinitele přestupu tepla pro směs vody a oleje.....	40
Obrázek 3.3 Predikce Sauterova průměru pro směs vody a oleje .....	40
Obrázek 3.4 Predikce Leidenfrostovy teploty pro směs vody a oleje .....	41
Obrázek 3.5 Predikce součinitele přestupu tepla pro směs vody a ethanolu.....	41
Obrázek 3.6 Predikce Sauterova průměru pro směs vody a ethanolu .....	42
Obrázek 3.7 Predikce Leidenfrostovy teploty pro směs vody a ethanolu .....	42
Obrázek 3.8 Predikce součinitele přestupu tepla pro směs vody a soli.....	43
Obrázek 3.9 Predikce Sauterova průměru pro směs vody a soli .....	43
Obrázek 3.10 Predikce Leidenfrostovy teploty pro směs vody a soli .....	44

Obrázek 4.1 Schéma experimentálního zařízení .....	46
Obrázek 4.2 Uchycení vzorku, pece a trysky na experimentálním zařízení .....	47
Obrázek 4.3 Vzorek s vyznačenou polohou termočlánků.....	47
Obrázek 4.4 Zařízení pro kalibraci termočlánků.....	48
Obrázek 4.5 Graf změřených teplot jednotlivých termočlánků v průběhu chlazení.....	50
Obrázek 4.6 Graf změřených hodnot pouze pro termočlánek T3 .....	51
Obrázek 4.7 Změřená teplota na termočlátku T3, vypočtená hodnota součinitele přestupu tepla a povrchová teplota v závislosti na době chlazení.....	51
Obrázek 4.8 Součinitele přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě vzorku pro termočlánky T2, T3, T4 a jejich průměr (avg(T2, T3, T4)) .....	52
Obrázek 4.9 Změřené teploty na termočlátku T3 pro jednotlivé koncentrace lihu ve vodě v čase .....	53
Obrázek 4.10 Graf průměrného součinitele přestupu tepla pro jednotlivé koncentrace lihu ve vodě v závislosti na teplotě povrchu.....	54
Obrázek 4.11 Průměrná hodnota tepelného toku vypočtená v závislosti na teplotě povrchu vzorku pro jednotlivé koncentrace lihu .....	54
Obrázek 4.12 Změna Leidenfrostovy teploty v závislosti na koncentraci směsi vody a lihu .....	55
Obrázek 4.13 Průměrný součinitel přestupu tepla při filmovém varu v závislosti na koncentraci lihu ve vodě.....	55
Obrázek 4.14 Maximální součinitel přestupu tepla v závislosti na koncentraci lihu ve vodě .....	56
Obrázek 4.15 Měřené teploty v čase na termočlátku T3 pro jednotlivé koncentrace soli ve vodě.....	57
Obrázek 4.16 Graf průměrného součinitele přestupu tepla pro jednotlivé koncentrace soli ve vodě v závislosti na teplotě povrchu.....	57
Obrázek 4.17 Průměrná hodnota hustoty tepelného toku vypočtená v závislosti na teplotě povrchu vzorku pro jednotlivé koncentrace soli.....	58
Obrázek 4.18 Změna Leidenfrostovy teploty v závislosti na koncentraci směsi vody a soli.....	58
Obrázek 4.19 Průměrný součinitel přestupu tepla při filmovém varu v závislosti na koncentraci soli ve vodě .....	59
Obrázek 4.20 Maximální součinitel přestupu tepla v závislosti na koncentraci soli ve vodě.....	59
Obrázek 4.21 Vzorek při použití směsi lihu a vody.....	60
Obrázek 4.22 Povrch vzorku po chlazení směsí vody a soli, A) 1 % koncentrace soli, B) 5 % koncentrace soli, C) 10 % koncentrace soli, D) 12 % koncentrace soli.....	61

## **SEZNAM TABULEK**

Tabulka 2.1 Vypočtené hodnoty směsi vody a ethanolu

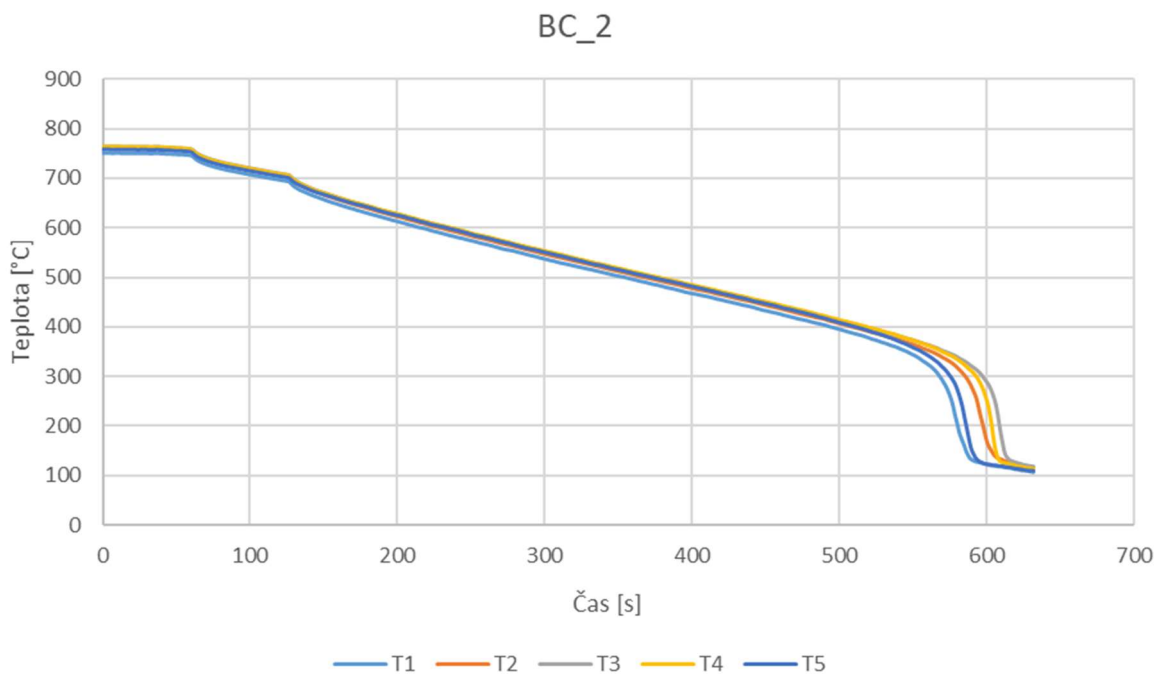
Tabulka 2.2 Převzaté hodnoty směsi vody a ethanolu pro 20 °C [36]

Tabulka 2.3 Procentuální rozdíl mezi predikovanými a převzatými hodnotami

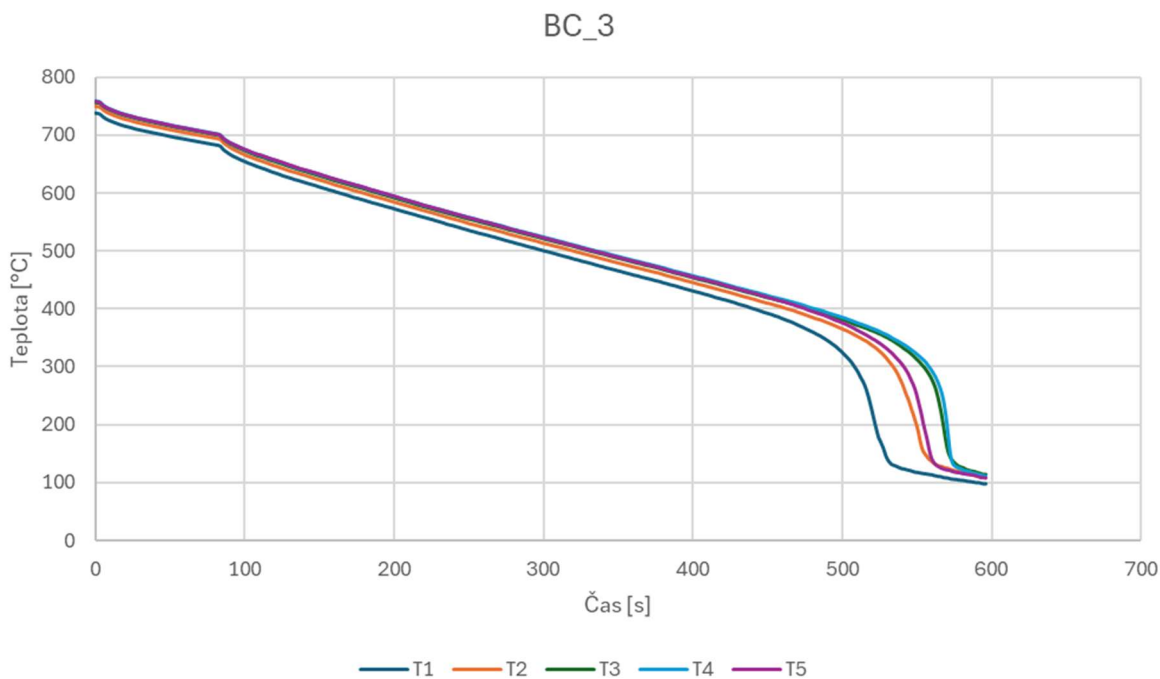
Tabulka 4.1 Experiment s tryskou 490.644

## PŘÍLOHY

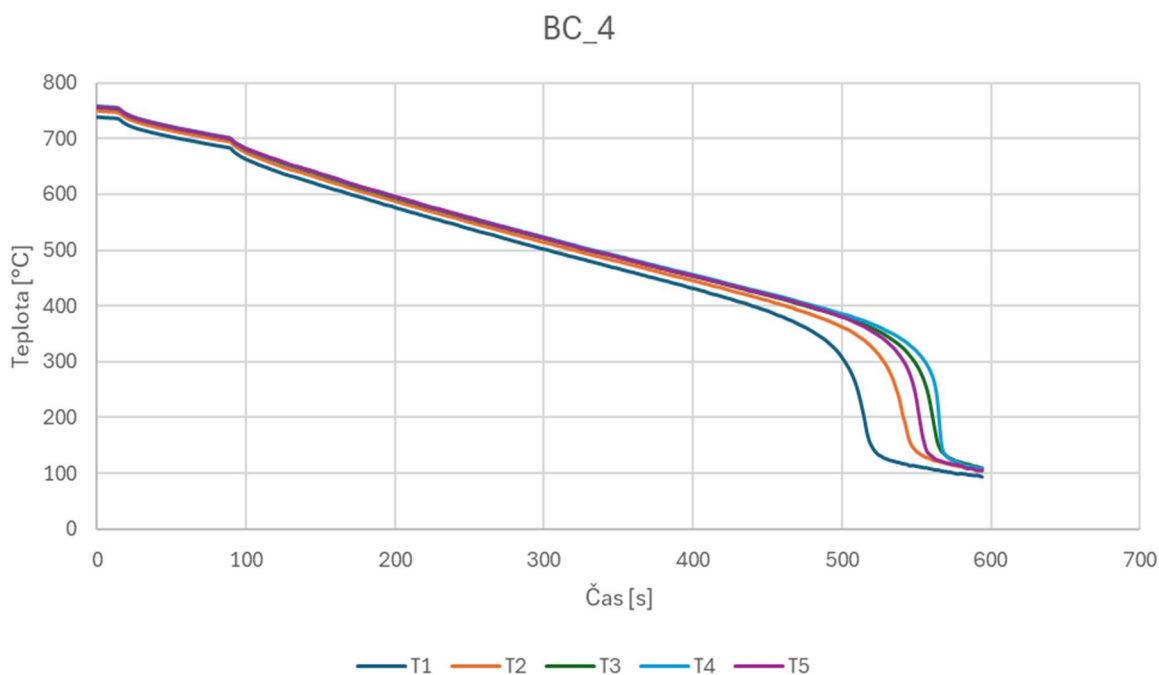
Průběhy teplot v závislosti na čase na jednotlivých termočláncích pro jednotlivá měření.



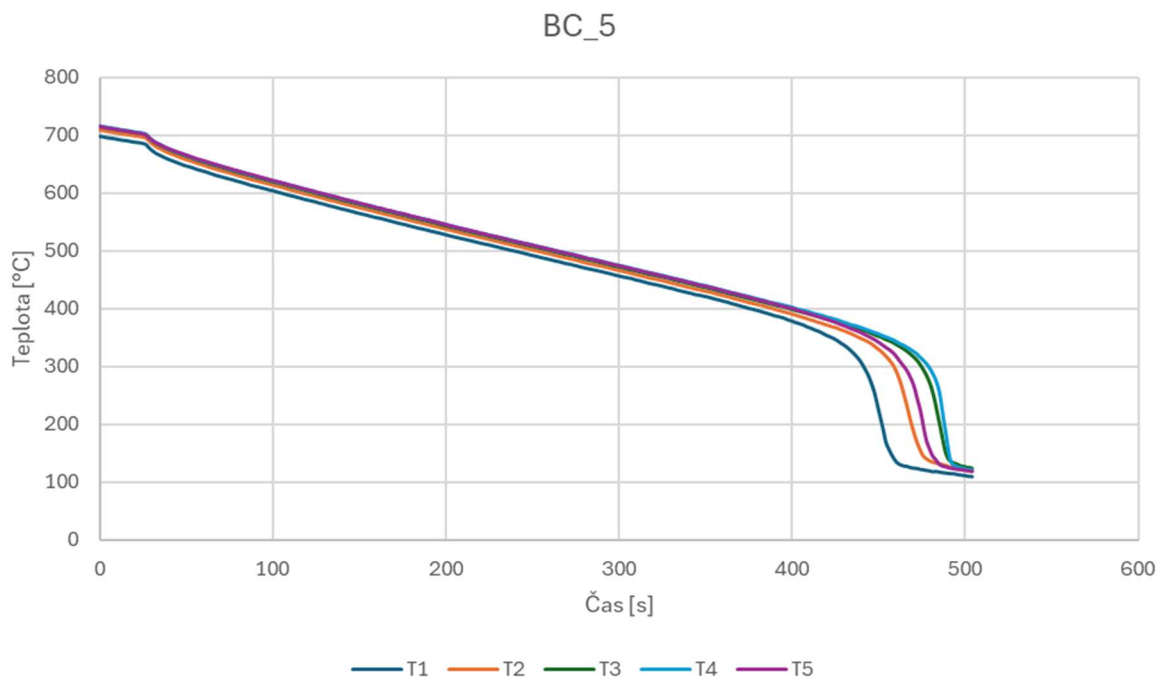
Obrázek 1 Graf změřených teplot jednotlivých termočlánců v průběhu chlazení pro 1 % koncentraci lihu ve vodě



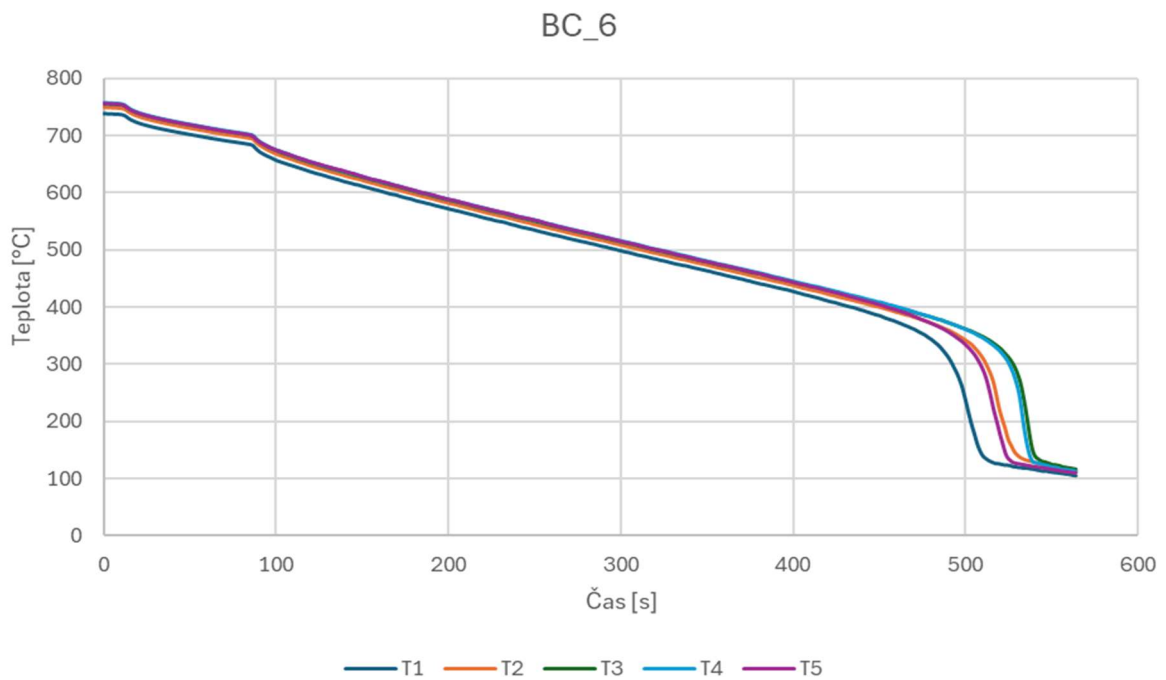
Obrázek 2 Graf změřených teplot jednotlivých termočlánců v průběhu chlazení pro 5 % koncentraci lihu ve vodě



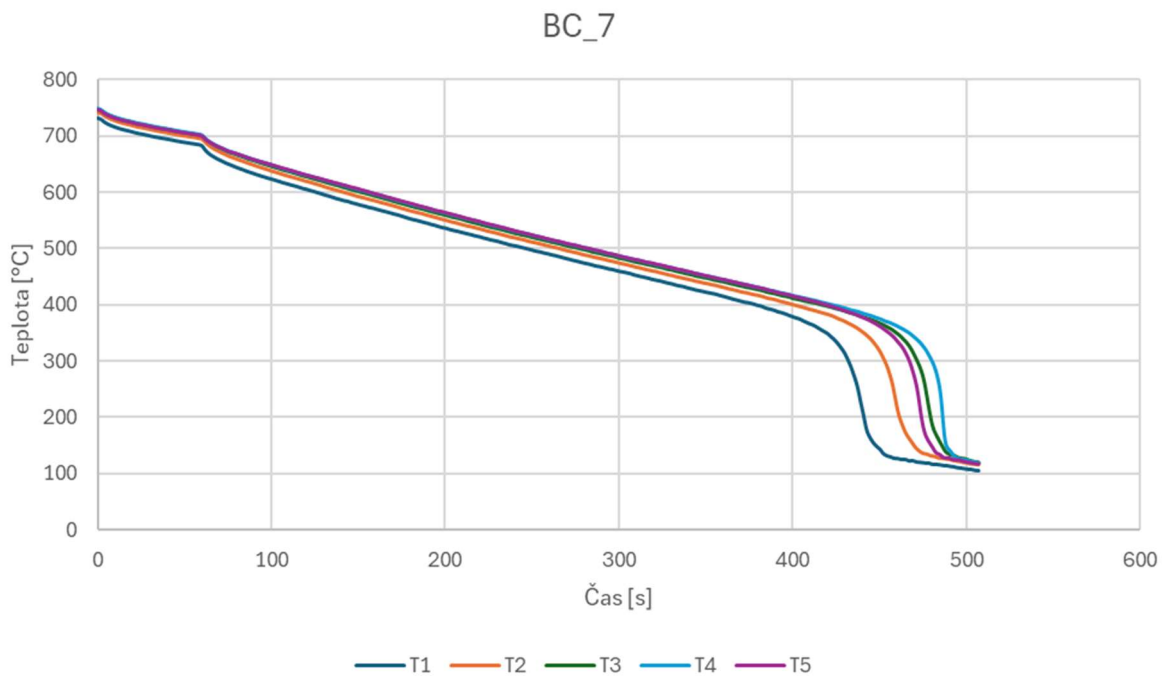
Obrázek 3 Graf změřených teplot jednotlivých termočlánků v průběhu chlazení pro 10 % koncentraci lihu ve vodě



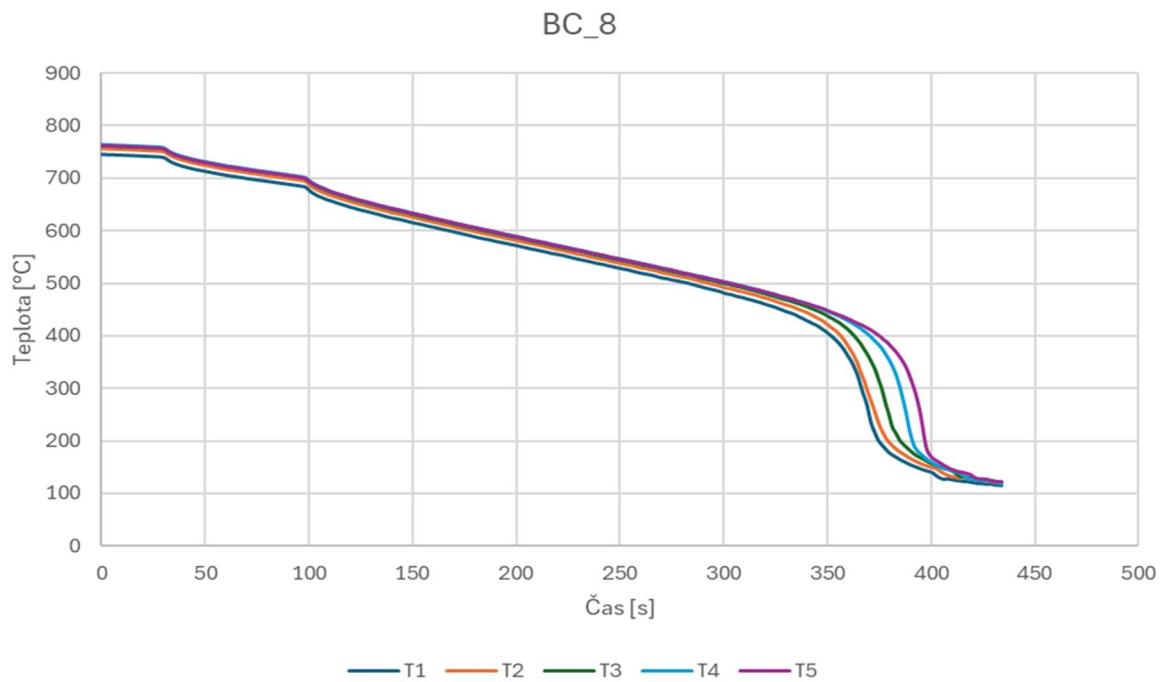
Obrázek 4 Graf změřených teplot jednotlivých termočlánků v průběhu chlazení pro demineralizovanou vodu



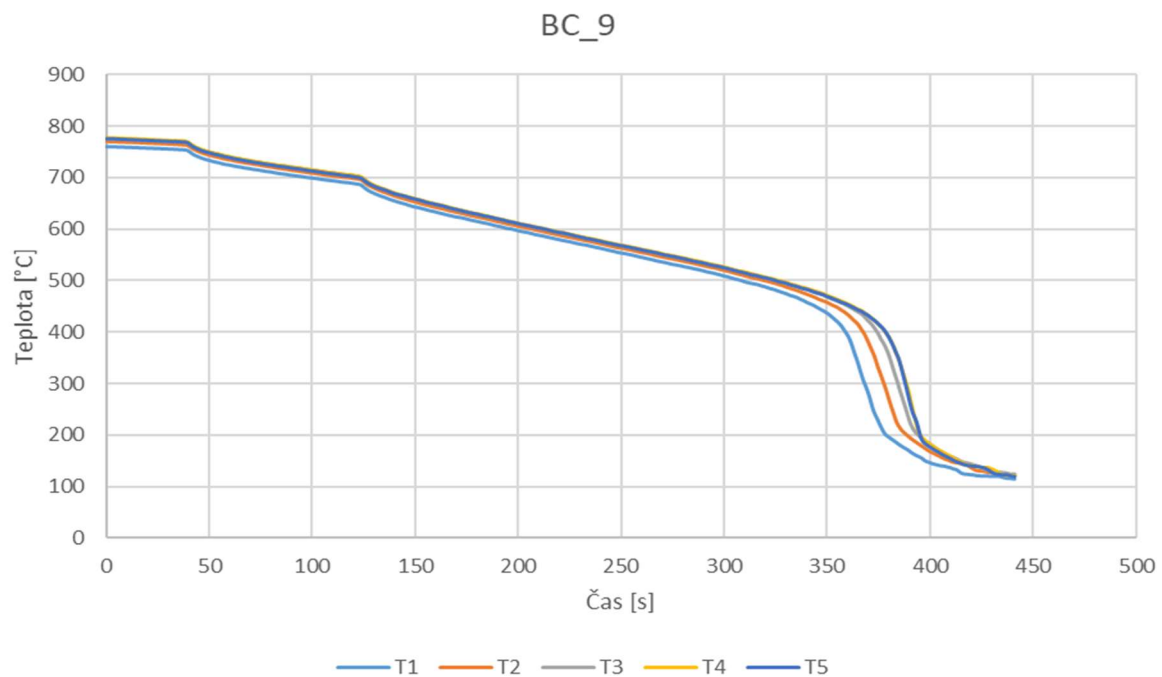
Obrázek 5 Graf změřených teplot jednotlivých termočlánků v průběhu chlazení pro 1 % koncentraci soli ve vodě



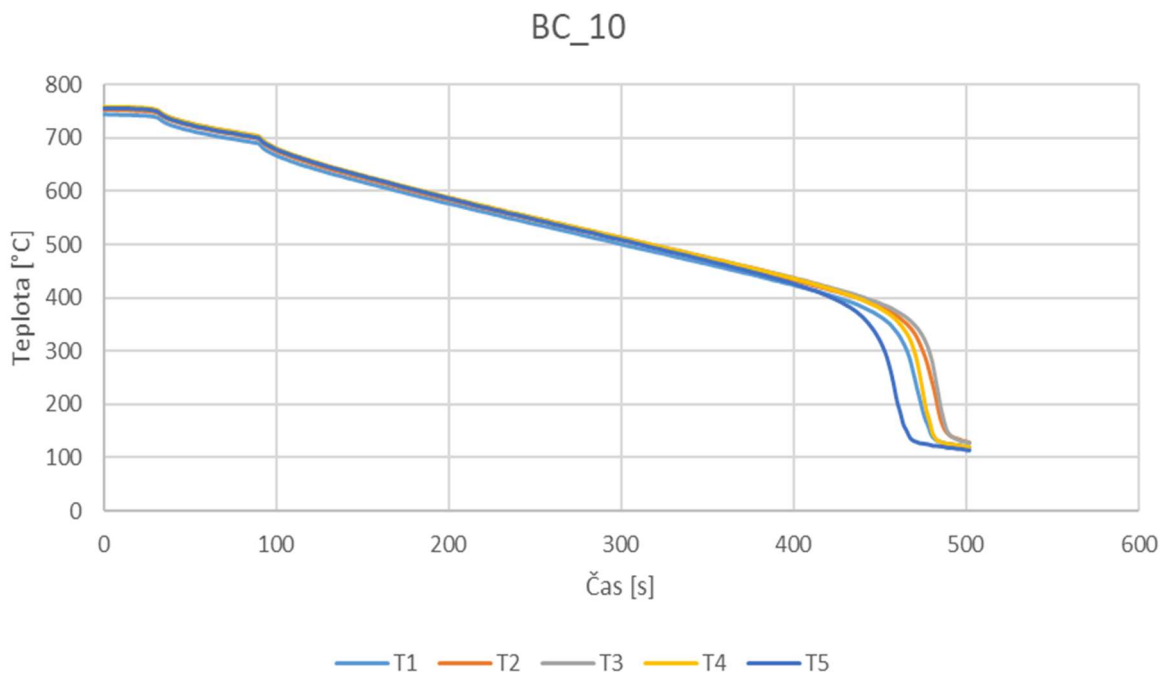
Obrázek 6 Graf změřených teplot jednotlivých termočlánků v průběhu chlazení pro 5 % koncentraci soli ve vodě



Obrázek 7 Graf změřených teplot jednotlivých termočlánků v průběhu chlazení pro 10 % koncentraci soli ve vodě

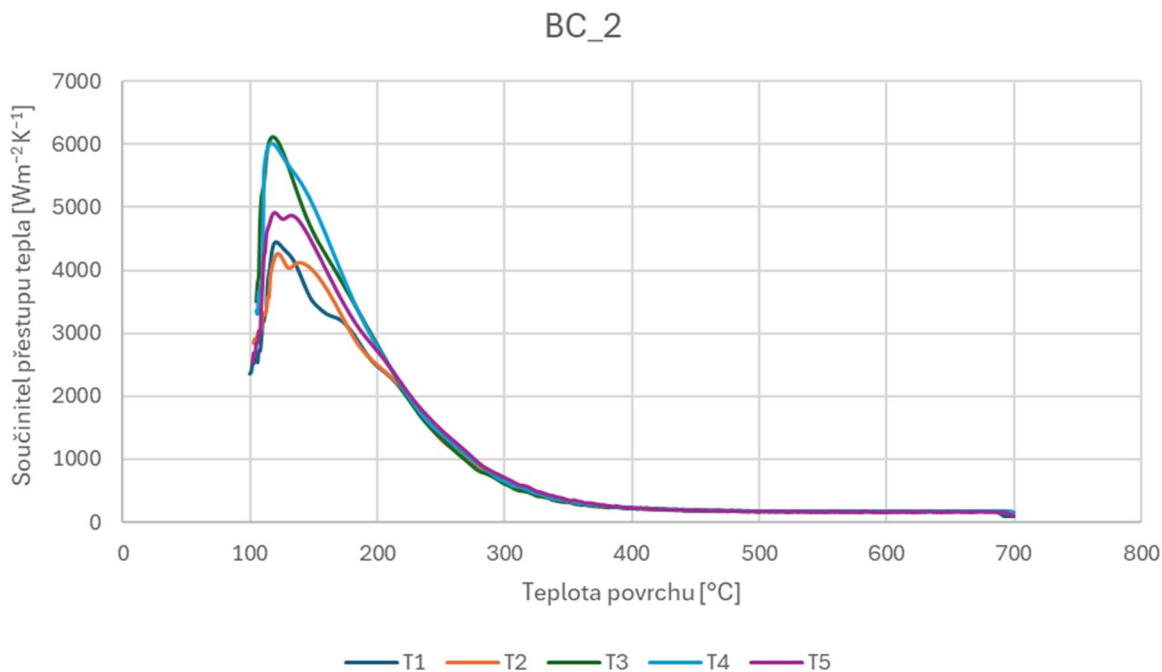


Obrázek 8 Graf změřených teplot jednotlivých termočlánků v průběhu chlazení pro 12 % koncentraci soli ve vodě

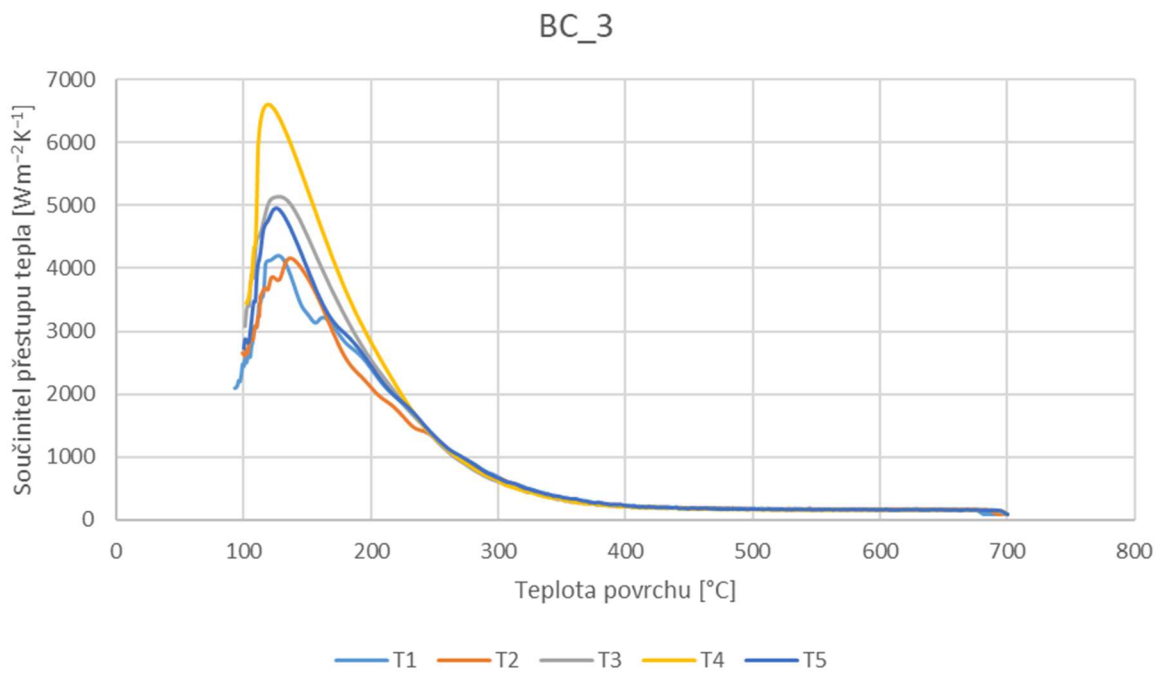


Obrázek 9 Graf změřených teplot jednotlivých termočlánků v průběhu chlazení pro demineralizovanou vodu

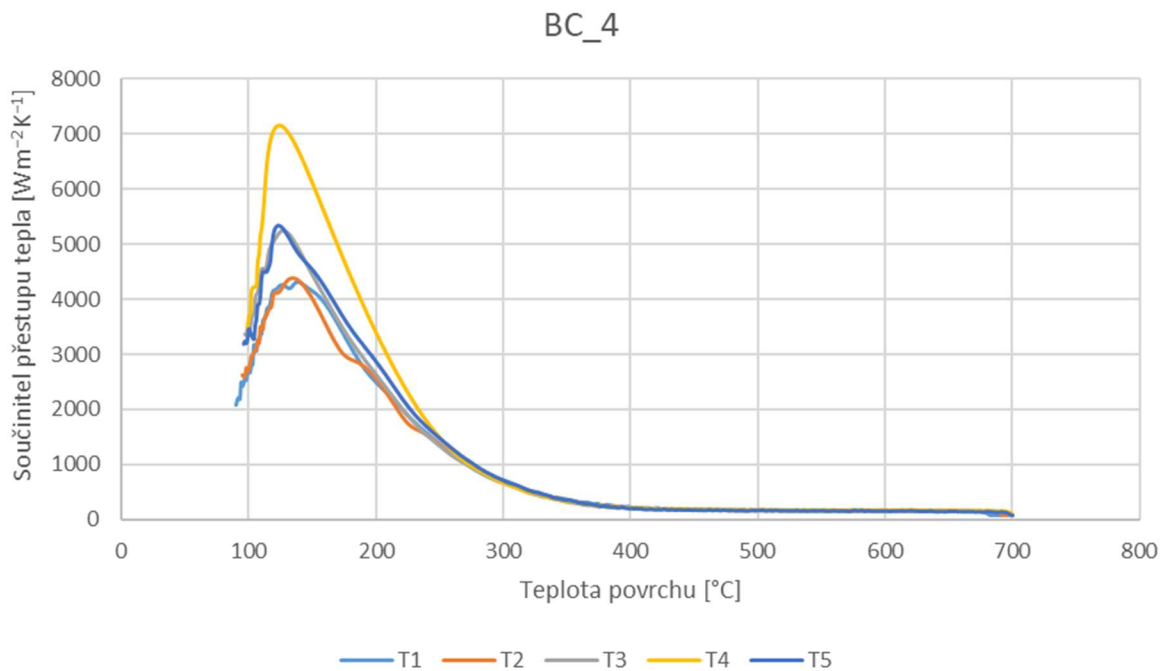
Součinitele přestupu tepla jednotlivých termočlánků v závislosti na teplotě povrchu při jednotlivých experimentálních měření.



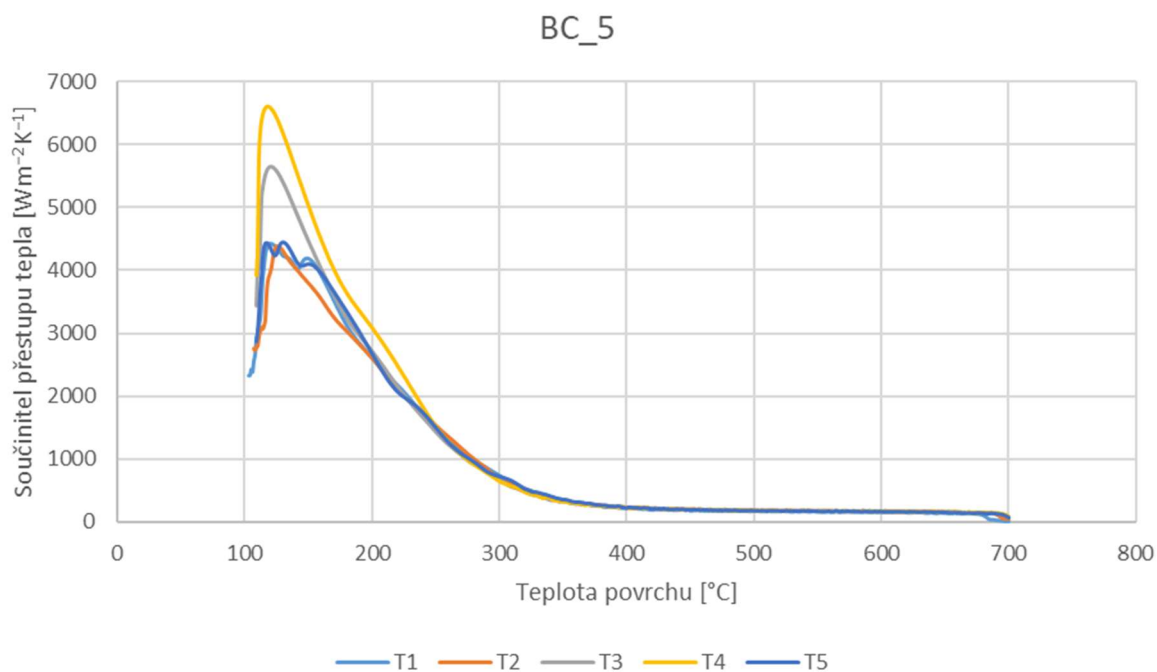
Obrázek 10 Součinitele přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě pro 1 % koncentraci lihu



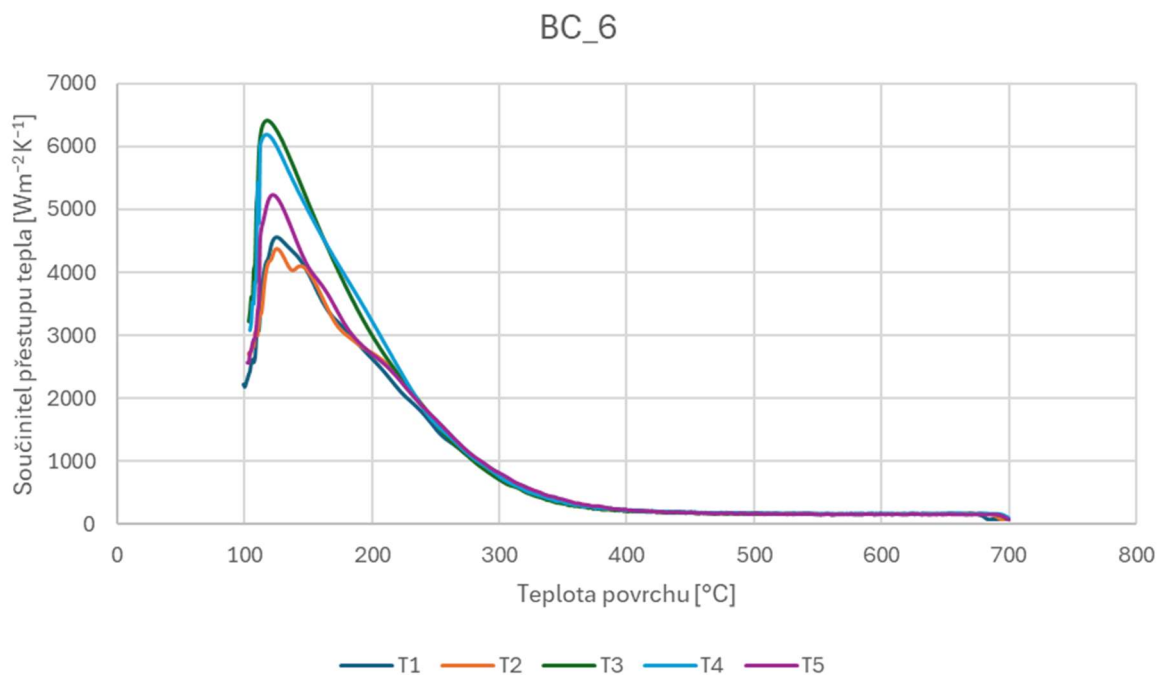
Obrázek 11 Součinitele přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě pro 5 % koncentraci lihu



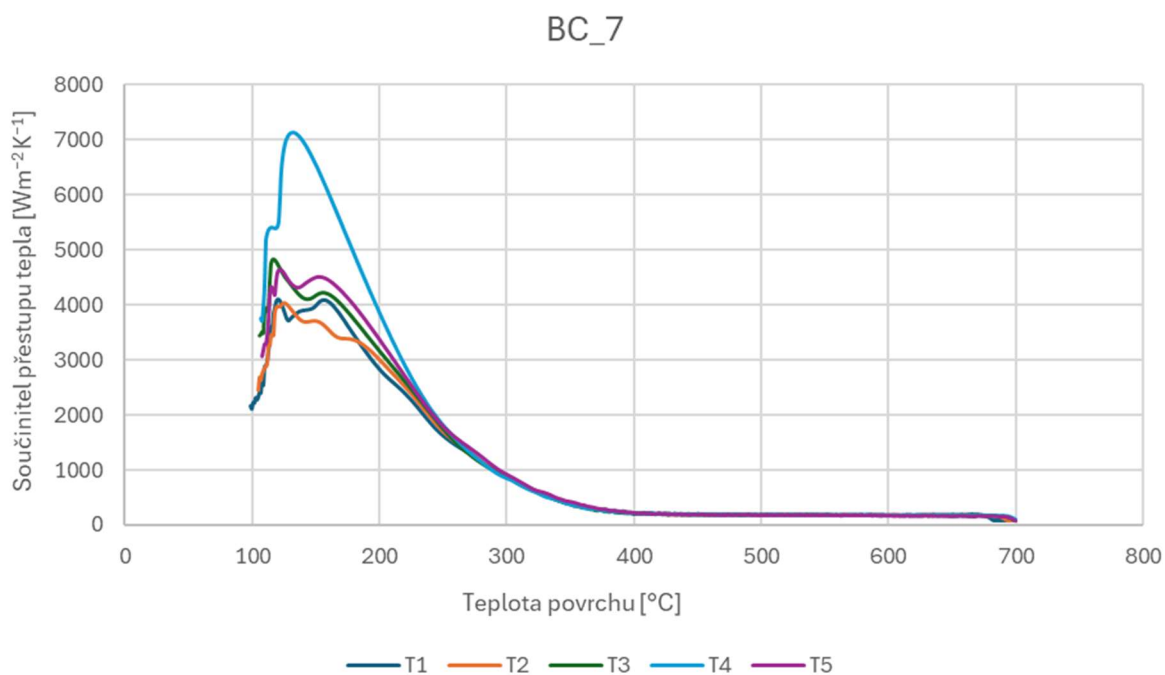
Obrázek 12 Součinitele přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě pro 10 % koncentraci lihu



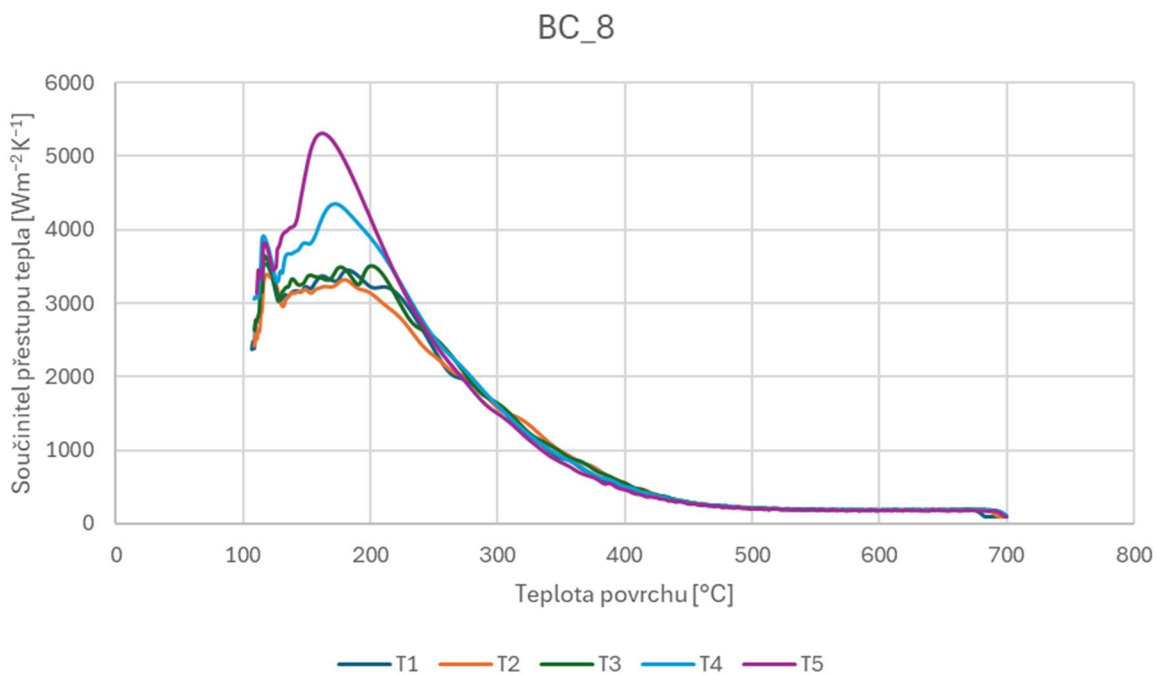
Obrázek 13 Součinitele přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě pro demineralizovanou vodu



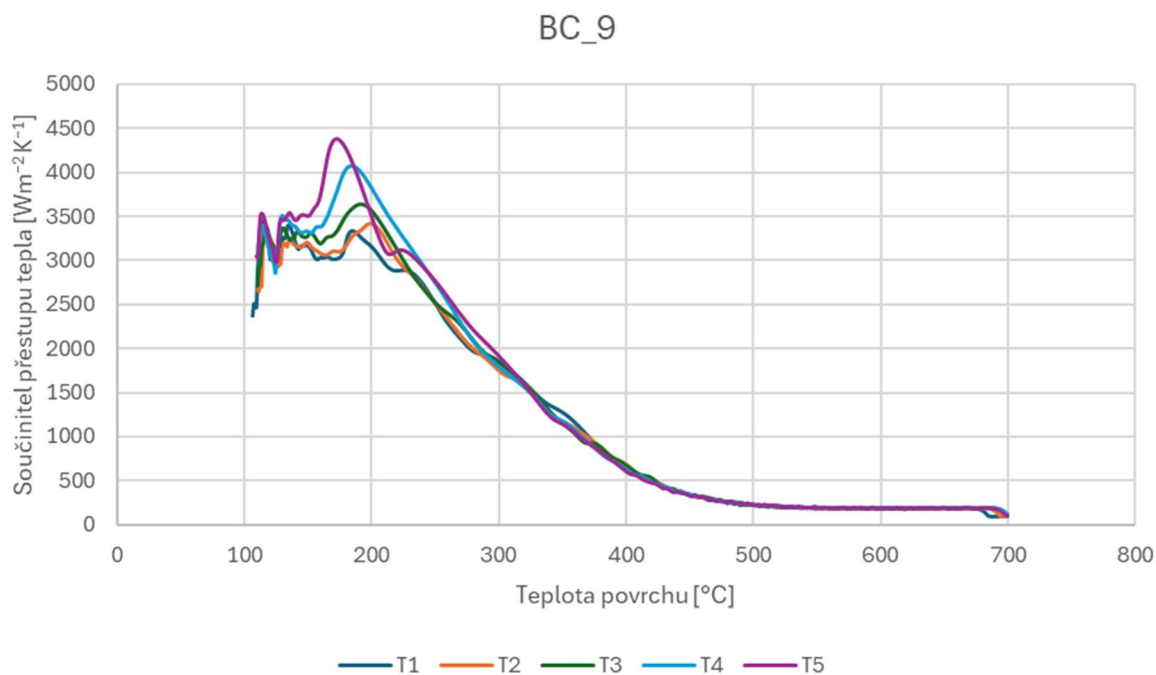
Obrázek 14 Součinitele přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě pro 1 % koncentraci soli



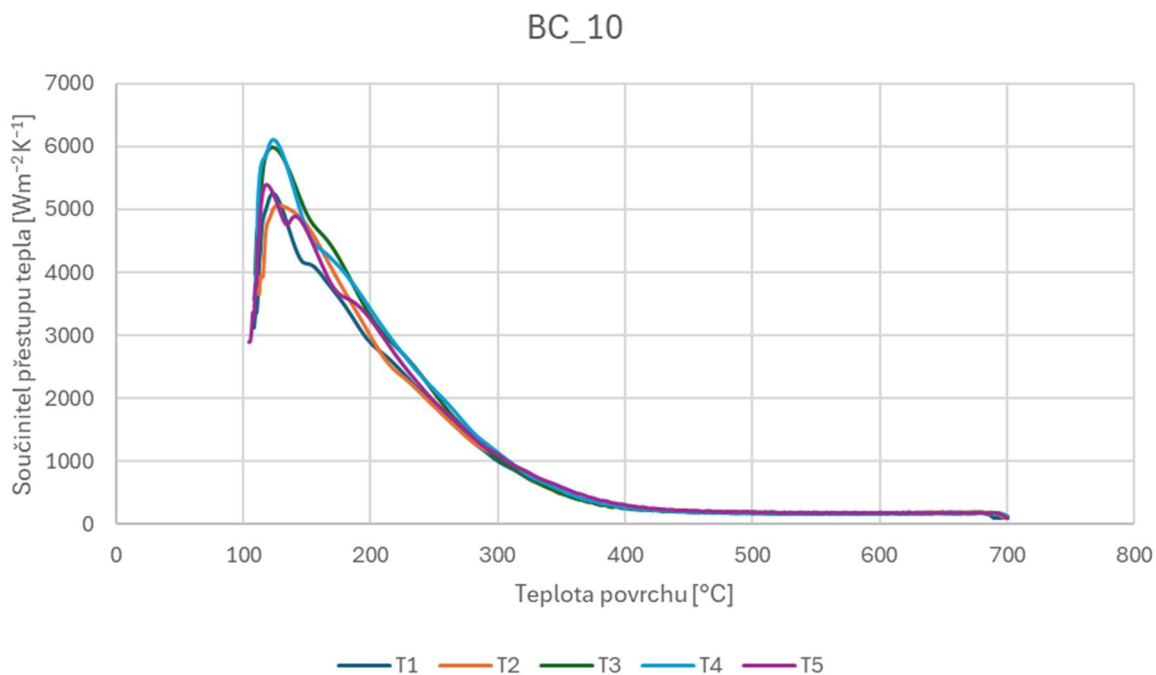
Obrázek 15 Součinitele přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě pro 5 % koncentraci soli



Obrázek 16 Součinitele přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě pro 10 % koncentraci soli



Obrázek 17 Součinitele přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě pro 12 % koncentraci soli



Obrázek 18 Součinitele přestupu tepla v závislosti na povrchové teplotě pro demineralizovanou vodu