

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV PROCESNÍ A ZPRACOVATELSKÉ TECHNIKY

**KALIBRACE TERMOAKTIVNÍCH (TLC) BAREV**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Medek** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **459585**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav procesní a zpracovatelské techniky**  
Studijní program: **Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Procesní technika**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Kalibrace termoaktivních (TLC) barev**

Název diplomové práce anglicky:

**Thermochromic liquid crystals (TLC) calibration**

Pokyny pro vypracování:

Termoaktivní barvy mohou sloužit jako indikátory teploty a pro jejich správnou funkci je potřeba je nakalibrovat (tedy zjistit závislost barvy TLC vrstvy a teploty). Předmětem práce je navrhnout aparaturu a sestavit metodiku kalibrace TLC barev v celém teplotním rozsahu.

Seznam doporučené literatury:

Dle doporučení vedoucího.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Stanislav Solnař, ústav procesní a zpracovatelské techniky FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **14.08.2020**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2020**

Ing. Stanislav Solnař  
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Praze dne .....

.....

Jan Medek

## **Poděkování**

Touto cestou bych rád poděkoval panu Ing. Stanislavovi Solnařovi za jeho ochotu, odborné konzultace, cenné rady, konstruktivní připomínky, a hlavně nesmírnou trpělivost v čase stráveném vedením mé práce.

# Anotační list

<b>Jméno autora:</b>	Jan
<b>Příjmení autora:</b>	Medek
<b>Název práce česky:</b>	Kalibrace termoaktivních (TLC) barev
<b>Název práce anglicky:</b>	Thermochromic liquid crystals (TLC) calibration
<b>Rozsah práce:</b>	počet stran: 91 počet obrázků: 85 počet tabulek: 30 počet příloh: 22
<b>Akademický rok:</b>	2019/2020
<b>Jazyk práce:</b>	český
<b>Ústav:</b>	Ú12118 – Ústav procesní a zpracovatelské techniky
<b>Studijní program:</b>	Strojní inženýrství – Procesní technika
<b>Vedoucí práce:</b>	Ing. Stanislav Solnař
<b>Oponent:</b>	Ing. Martin Dostál, Ph.D.
<b>Zadavatel:</b>	ČVUT v Praze

**Anotace česky:**

Tato práce se zabývá návrhem experimentální aparatury a metodologie ke sledování dynamického chování termochromních kapalných krystalů (Thermochromic liquid crystals, TLC). Teoretická část práce obsahuje teoretický základ a shrnutí provedené literární rešerše se zaměřením na proběhlé experimenty s využitím TLC. Praktická část obsahuje postup návrhu experimentální aparatury, výběr komponent, popis realizace, průběh měření dynamického chování TLC, vyhodnocení a porovnání s numerickým modelem.

**Anotace anglicky:**

The aim of this thesis is to design an experimental apparatus and a methodology for monitoring the dynamic behaviour of thermochromic liquid crystals (TLC). The theoretical part contains a theoretical basis and a research of literature focused on the previously performed experiments with the application of TLC. The empirical part describes the method used to design the experimental apparatus, the selection of components and the description of the experiment itself, together with the process of measuring the dynamic behaviour of TLC, evaluation of the results and their comparison with the numerical model.

**Klíčová slova:** termochromní kapalně krystaly, dynamické chování, kalibrace

**Klíčová slova anglicky:** thermochromic liquid crystals, dynamic behaviour, calibration

**Využití:** ČVUT v Praze

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Teoretický základ</b>	<b>10</b>
2.1	Barevnost.....	10
2.2	Teplota.....	17
2.3	Kapalné krystaly.....	22
2.4	Přechodové stavy.....	26
2.5	Numerické simulace.....	28
<b>3</b>	<b>Literární rešerše</b>	<b>29</b>
3.1	Historie experimentů s TLC.....	29
3.2	Využití TLC v praxi.....	35
3.3	Výhody a nevýhody TLC.....	36
<b>4</b>	<b>Návrh experimentální aparatury</b>	<b>37</b>
4.1	Stanovení parametrů aparatury.....	37
4.2	Návrh použitého kalibrátoru.....	49
4.3	Návrh zapojení aparatury.....	54
<b>5</b>	<b>Realizace aparatury</b>	<b>55</b>
5.1	Příprava kalibrátoru a TLC.....	55
5.2	Parametry použité techniky.....	57
5.3	Zapojení aparatury.....	63
<b>6</b>	<b>Experimentální měření</b>	<b>65</b>
6.1	Metodika měření.....	65
6.2	Vyhodnocení.....	66
6.3	Matematický model.....	78
<b>7</b>	<b>Numerická simulace</b>	<b>80</b>
<b>8</b>	<b>Závěr</b>	<b>84</b>

## Seznam znaků a zkratk

Re Reynoldsovo číslo (-)

$\bar{u}$  střední rychlost ( $\text{m s}^{-1}$ )

$\rho$  hustota ( $\text{kg m}^{-3}$ )

$\mu$  dynamická viskozita ( $\text{Pa s}$ )

$\varepsilon$  emisivita (-)



# Kapitola 1 Úvod

Teplota má výrazný vliv na průběh většiny známých procesů v přírodě, patří mezi nejčastěji sledované fyzikální veličiny a zasahuje tak do širokého spektra oborů lidské činnosti. Nejstarším a nejrozšířenějším způsobem měření teploty je využití závislosti změny objemu řady látek, především kapalin, právě na teplotě. Poloha hladiny rtuťového sloupce v uzavřené kapiláře uvnitř skleněného válce umístěného na vnější straně okna domu řadu let dostatečně přesně informuje o teplotě vnějšího vzduchu.

V dnešní době dochází k rozšiřování i jiných způsobů měření teploty, založených například na termoelektrickém jevu nebo sledování infračerveného záření, které mohou mnohdy nabídnout přesnější výsledky pro zvolenou aplikaci než běžné dilatační teploměry. Jako indikátory teploty mohou sloužit i termoaktivní barvy, v nichž obsažené termochromní kapalné krystaly vlivem své schopnosti selektivně odrážet světlo informují o změně teploty změnou své barvy. Pro správnou funkci je třeba termoaktivní barvy kalibrovat, tedy zjistit závislost jejich barevného projevu na hodnotě teploty, které jsou vystaveny. Taková statická kalibrace je popsána ve velkém množství publikovaných experimentů. V dostupné literatuře je ale poměrně málo informací o tom, jak rychle jsou termoaktivní barvy schopny reagovat na změnu teploty a zda je obecně možné použít TLC pro zobrazení lokálních teplot při dynamických metodách.

Cílem této práce je navrhnout a realizovat experimentální aparaturu, která umožní dynamické chování termochromních kapalných krystalů sledovat. Součástí praktické části práce bylo i provedení dvou zkušebních měření na navržené aparatuře, sloužících především k ověření její funkčnosti a vyhodnocení získaných dat pro diskusi případných vylepšujících úprav aparatury. V rámci návrhu a optimalizace aparatury byly vytvořeny orientační numerické modely proudění vody vnitřním elementem kalibrátoru v prostředí ANSYS Fluent. Při vyhodnocení provedených měření byly výsledky porovnány s vytvořeným matematickým modelem měření a numerickou simulací podmíněnou reálnými parametry zjištěnými při měření.

# Kapitola 2 Teoretický základ

## 2.1 Barevnost

Lidským okem viditelné světlo se jako elektromagnetické vlnění nachází v rozsahu vlnových délek přibližně od 380 nm do 780 nm. Je-li intenzita vlnění rovnoměrně rozložena v celém viditelném spektru, jeví se světlo pro lidský zrak jako bílé. Zvýrazněný interval nebo izolované vlnění ve viditelném spektru světla působí zrakový vjem charakteristické barvy, odpovídající uvedenému rozsahu délek v tabulce níže. Krátké vlny pod nižším prahem viditelného spektra se řadí mezi ultrafialová záření, značena UV. Vlnové délky nad vyšším prahem rozsahu spadají do záření infračerveného, značeno IČ (Vejražka 2008, s. 2).

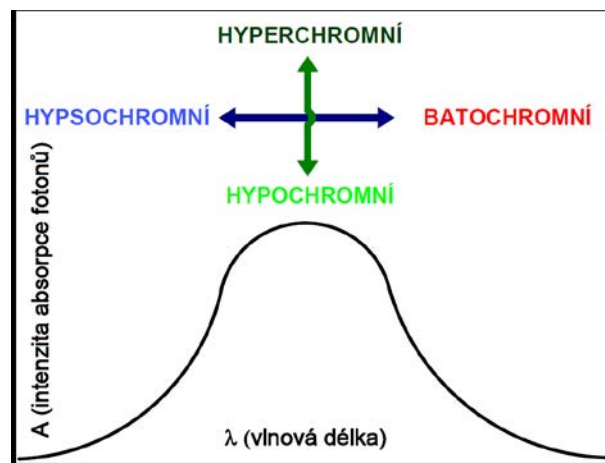
vlnová délka [nm]	charakteristická barva	doplňková barva
400 - 435	fialová	zelenožlutá
435 - 480	modrá	žlutá
480 - 490	zelenomodrá	oranžová
490 - 500	modrozelená	červená
500 - 560	zelená	purpurová
560 - 580	zelenožlutá	fialová
580 - 595	žlutá	modrá
595 - 605	oranžová	zelenomodrá
605 - 700	červená	modrozelená

*Tab. 2.1: Přibližné rozsahy vlnových délek záření a jim odpovídající charakteristické a doplňkové barvy (Vejražka 2008, s.2)*



*Obr. 2.1: Přibližné vyobrazení průběhu barevných přechodů viditelného spektra (Vejražka 2008, s. 2)*

Řada organických barviv, označována jako chromogeny, je schopna ve specifickém množství pohlcovat elektromagnetické záření. Tím je zapříčiněna selektivní absorpce určité vlnové délky nebo rozsahu záření. Barvivo pohltí vždy jen takové záření, jehož energie je shodná nebo velmi podobná vnitřní energii částic barviva (Viková 2016, s. 1).






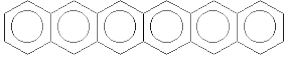


**Obr. 2.2:** Charakteristika organických barviv v závislosti na intenzitě absorpce záření a spektru vlnových délek (Viková 2016, s. 1)

Chromogen obsahuje ve své subatomární struktuře valenční elektron, který může být vlivem elektromagnetického záření excitován do vyšší energetické hladiny. Taková látka pak absorbuje vlny o energii odpovídající přechodu valenčního elektronu mezi energetickými hladinami (Viková 2016, s. 1).

Dopadá-li na látku bílé světlo a absorbované záření leží ve viditelné části spektra, bude se lidskému oku látka jevit barevná a bude mít barvu doplňkovou k charakteristické barvě absorbovaného světla. (viz tabulka 2.1) Vjem doplňkové barvy je zapříčiněn absencí absorbovaného záření v odraženém světle od barviva, na kterou záření dopadá (Vejražka 2008, s. 2).

Za předpokladu, že barvivo vždy přijímá takové množství energie, které je potřebné k přechodu ze základního stavu do stavu excitovaného, tedy do vyšší energetické hladiny, platí, že hranice, kdy se jeví látka barevná, odpovídá excitační energii 158 až 300 kJ mol<sup>-1</sup> látky. Tato hranice je patrná v tabulce 2.2 (Viková 2016, s. 2).

sloučenina vzorec	Excitační energie [kJ mol <sup>-1</sup> ]	Pohlcovaná vlnová délka [nm]	barva
benzen 	471	255	bez barvy
naftalen 	383	311	bez barvy
anthracen 	324	370	bez barvy
tetracen 	261	460	oranžová
pentacen 	207	560	fialová
hexacen 	173	693	modrozelená

*Tab. 2.2: Tabulka excitačních energií a dlouhovlnných absorpčních pásů aromatů (Viková 2016, s. 3)*

Chromismus je schopnost látky vratně či nevratně měnit barvu v závislosti na určitém podnětu. Dle druhu podnětu lze chromismy dělit (viz tabulka 2.3) (Viková 2016, s. 5).

<b>Druh chromismu</b>	<b>Druh podnětu</b>
Chemochromismus	Indikace chemikálií
Elektrochromismus	Indikace elektrického napětí
Fotochromismus	Indikace elektromagnetického záření
Ionochromismus	Indikace iontů
Halochromismus	Indikace pH
Hygrochromismus	Indikace vlhkosti
Piezochromismus	Indikace působení tlaku
Solvatochromismus	Indikace přítomnosti nebo rozpouštědla
Termochromismus	Indikace teploty

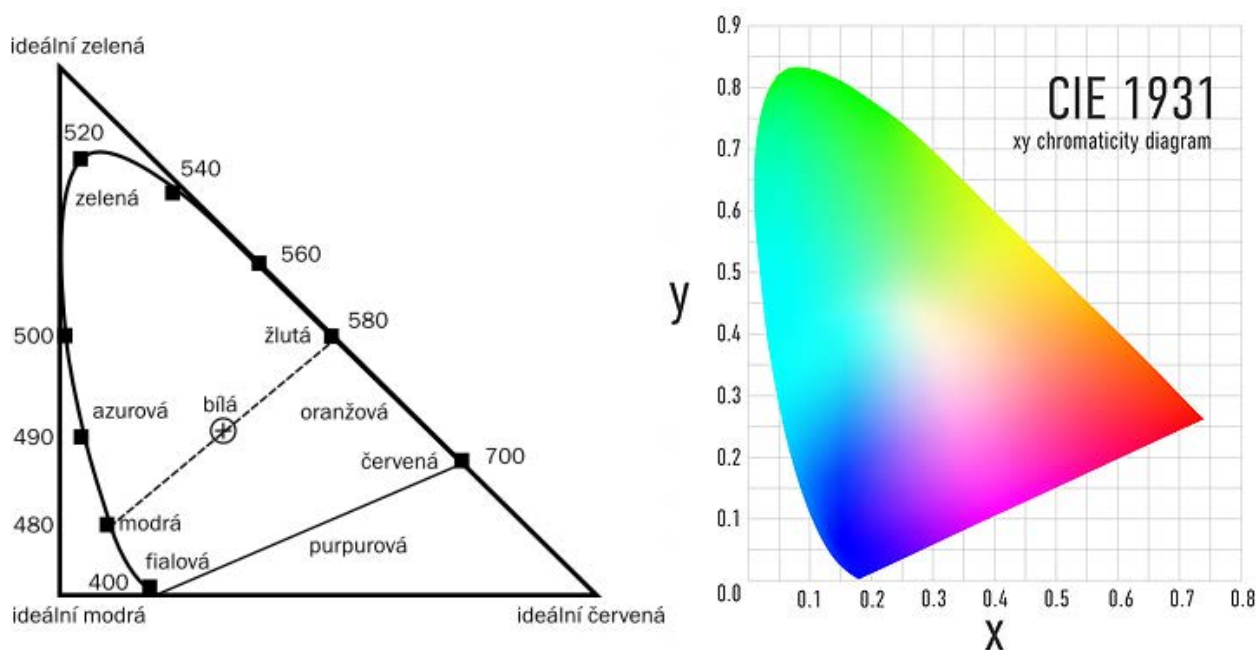
*Tab. 2.3: Rozdělení chromismů podle příslušných podnětů (Viková 2016, s. 5)*

Princip změny barvy v závislosti na změně teploty, tedy termochromismu, spočívá ve změně vlnové délky elektromagnetického záření odraženého od látky. Touto vlastností disponují dvě skupiny látek, leukobarviva a kapalné krystaly (Viková 2016, s. 6).

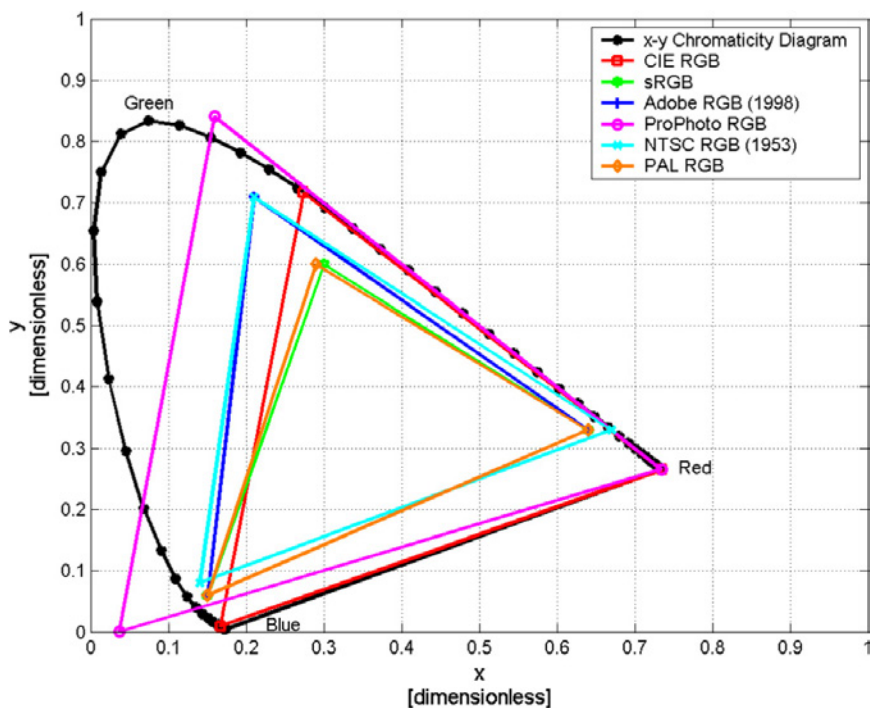
Označení barevný prostor nese definovaný souřadnicový systém, v němž leží množina bodů, kterými lze popsat barvu. V dostupné literatuře existuje také pojem gamut, který na rozdíl od barevného prostoru označuje pouze dosažitelnou oblast barevného prostoru, ke kterému je gamut vztažen, a určuje tedy rozsah barevného vnímání, rozlišitelnost barvy nebo barevné reprodukce, zobrazitelnost barev. Gamut hraje důležitou roli ve specifikaci zobrazovacích zařízení či zařízení pro snímání obrazových dat (Rambousek 2017, s. 2).

Barevné prostory jsou popisovány barevnými modely a mají standardizované odstíny základních barev.

Na obrázku 2.3 vlevo lze vidět přibližný gamut lidského oka, transformovaný do roviny x-y. Vpravo je zobrazen jeden z prvních matematicky definovaných nezávislých barevných modelů CIE 1931, rovněž transformovaný do roviny x-y (Rambousek 2017, s. 22).

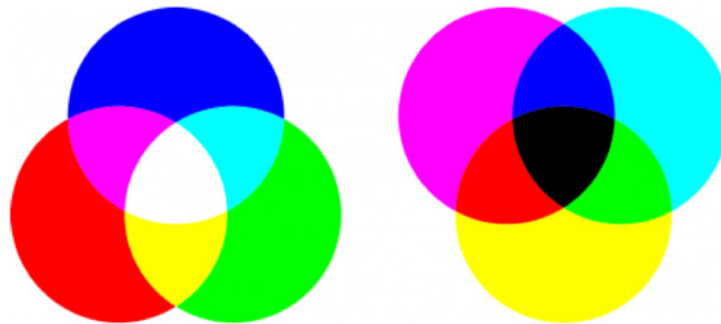


**Obr. 2.3:** Přibližné vnímání barev lidským okem (vlevo), hodnoty vlnových délek uvedeny v nm (Mojr 2016, s. 2)  
 CIE 1931 – jeden z prvních matematicky definovaných barevných modelů (vlevo) (Unravel 2016, s. 1)



**Obr. 2.4:** Porovnání dnes využívaných barevných modelů a CIE 1931 (Abdullah 2010, s. 13)

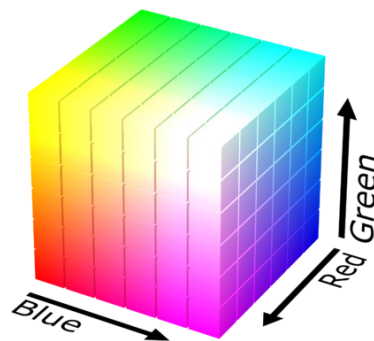
Obrázek 2.4 ukazuje, jak velkou část viditelných barev zaujímají dnes rozšířené barevné prostory, například sRGB, Adobe RGB a ProPhoto RGB.



*Obr. 2.5: Barevný model RGB (vlevo) a CMYK (vpravo) (Mojr 2016, s. 3)*

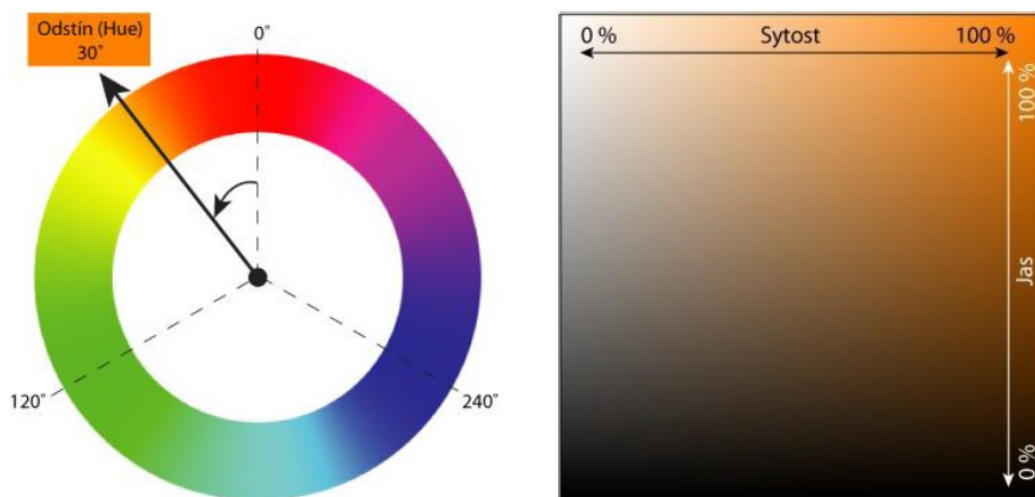
Obrázek 2.5 zobrazuje základní barvy a jejich směsi modelů RGB (red-green-blue) a CMYK (cyan-magenta-yellow-black). Z obrázku je patrné, že základní barvy modelu CMYK vznikají směsí základních barev RGB a naopak. S využitím barevného modelu CMYK pracuje například barevná inkoustová tiskárna (Mojr 2016, s. 2).

Barevné odstíny lze v modelu RGB a podobně u CMYK vyjádřit v trojrozměrném souřadnicovém systému (viz obrázek 2.6).



*Obr. 2.6: RGB krychle (Mojr 2016, s. 2)*

Pro tuto práci je vhodné zmínit barevný model HSV, někdy označován i jako HSB. Je popsán opět třemi parametry, barevným odstínem – HUE, sytostí barvy – Saturation a hodnotou jasu – Value, Brightness. Výhodou tohoto modelu je, že o odstínu barvy rozhoduje pouze jediný parametr, a to hodnota HUE udávána ve stupních. Hodnoty sytosti a jasu, které jsou udány v procentech, barevný odstín neovlivní (Rambousek 2017, s. 18).



*Obr. 2.7: Barevný model HSV (HSB) (Rambousek 2017, s. 18)*

Pro převod obrazových dat z barevného modelu RGB do HSV existují přepočtové vztahy. V kapitole 7 této práce je podrobněji popsán příklad převodu obrazových dat, zachycených RGB kamerou, právě do barevného modelu HSV.



## 2.2 Teplota

Dle kinetické teorie hmoty přísluší každé nepřetržitě a neuspořádaně pohybující se částici látky průměrná kinetická energie, která je úměrná právě absolutní teplotě částice. Z teorie tedy plyne, že dosáhne-li teplota částice absolutní nuly, tedy 0 K, odpovídající  $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , bude průměrná kinetická energie částice rovněž nulová. (Bird, Chivers 1993, s. 442).

Teplota, jako jedna ze základních fyzikálních veličin soustavy SI, charakterizuje tepelný stav hmoty a má vliv na průběh většiny procesů v přírodě, ať už jsou to změny rozměrů, tvarů nebo skupenství látek. V procesním inženýrství je tedy teplota významným parametrem a je mnohdy důležité zajistit přesné sledování jejich hodnot (Volf, Jenčík 2003, s. 47).

Přístroje sloužící k vyhodnocení teploty se nazývají teploměry. Hodnotu teploty na nich ale nelze naměřit přímou cestou, pouze odvozením ze závislosti na jiném, již známém fyzikálním jevu, který je teplotou ovlivněn (Volf, Jenčík 2003, s. 47).

Nejčastěji a historicky nejdéle je k vyhodnocení teploty využíváno jevu známého jako teplotní roztažnost, tedy změny objemu látky v závislosti na množství tepla do ní dodaného či z ní odebraného. Na tomto principu pracují dilatační teploměry. Takový přístroj funguje správně pouze tehdy, je-li v přímém kontaktu s tělesem nebo prostředím, jehož teplotu je třeba sledovat. Podmínkou funkce je tedy ustavení termodynamické rovnováhy mezi teploměrem a měřeným objektem. Takový teploměr se řadí do skupiny teploměrů dotkových, určených ke kontaktnímu měření (viz tabulka 2.4) (Volf, Jenčík 2003, s. 47).

Kontaktní teploměry	Fyzikální princip	Měřicí rozsah [ $^{\circ}\text{C}$ ]
Dilatační	teplotní roztažnosti látek, kapalin a plynů	-30 až 1000
Parní	teplotní závislosti tlaku syté páry teploměřové kapaliny	-50 až 200
Odporové	teplotní závislosti elektrického odporu vodičů a polovodičů	-270 až 1000 (dle materiálu)
Termoelektrické	termoelektrického napětí a termoelektrického článku	-200 až 2500 (dle materiálu článku)
Speciální	využití jiné fyzikální vlastnosti materiálu (tavení, index lomu, barevná indikace, atd)	(Rozsahy se liší dle vlastností materiálu)

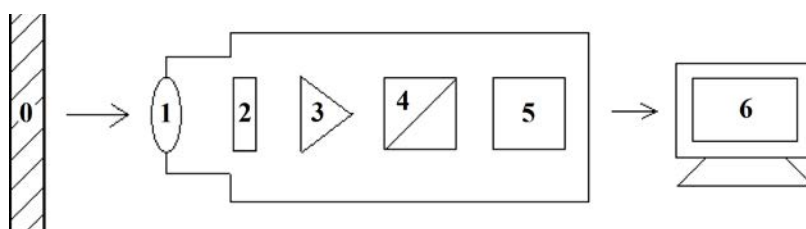
*Tab. 2.4: Charakteristika a druhy kontaktních teploměrů (Volf, Jenčík 2003, s. 48)*

S pomocí k tomu konstrukčně uzpůsobených zařízení je ale možné změřit teplotu i bezkontaktně, tedy bez nutnosti přímého dotyku teploměru se sledovaným objektem. Bezkontaktní teploměry lze dále dělit na přímoměřicí a zobrazovací (Volf, Jenčík 2003, s. 48).

Bezkontaktní teploměry	Fyzikální princip	Měřicí rozsah [°C]
Pyrometr (přímoměřicí)	sledování tepelného záření v konkrétním bodě a případně jeho blízkém okolí	50 až 3500
Termovize (zobrazovací)	kamera s detektorem tepelného záření, zobrazení rozložení teploty po povrchu	-50 až 650
Fototermometrie (zobrazovací)	fotoaparát citlivý na tepelné záření, zobrazení rozložení teploty po povrchu	-50 až 1500

**Tab. 2.5:** Charakteristika a druhy bezkontaktních teploměrů (Volf, Jenčík 2003, s. 48)

V tabulce 2.4 zmíněné kontaktní teploměry jsou určeny k využití především v místech, kde je dostačující sledovat hodnotou teploty v jednom konkrétním bodě a případně jeho blízkém okolí. V technické praxi ale existují případy, ve kterých je důležité znát rozložení hodnot teploty na rozsáhlé ploše povrchu tělesa. Takové měření dokáže zprostředkovat právě v tabulce 2.5 zmíněná termovize, tedy termokamera, často značena jako IRC (Volf, Jenčík 2003, s. 48).



**Obr. 2.8:** Uspořádání pyrometru (Vrána 2010, s. 18)

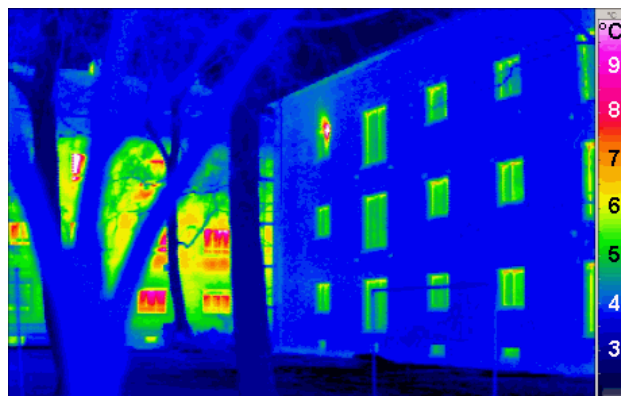
0 – měřený objekt (zdroj IČ záření), 1 – optika, 2 – IČ detektor, 3 – zesilovač,  
4 analogově digitální převodník, 5 – procesor, 6 - obrazovka

Termokamera využívá k vyhodnocení rozložení teploty po povrchu tělesa jeho infračerveného záření podobně jako pyrometr, jehož schéma je uvedeno na obrázku 2.8. Skrz optickou soustavu se vlnění šíří k citlivému senzoru. Vyhodnocení je zajištěno převodem dat z detektoru do grafické podoby a zobrazením termogramu s rozlišením v barevných odstínech závislých na stanovené teplotě (viz obrázek 2.9). Pyrometr na rozdíl od termokamer nezobrazuje výsledek měření graficky, pouze vyčíslí hodnotu pro zvolený bod, případně průměrnou hodnotu pro okolní kruhovou oblast zvoleného bodu (Volf, Jenčík 2003, s. 48).

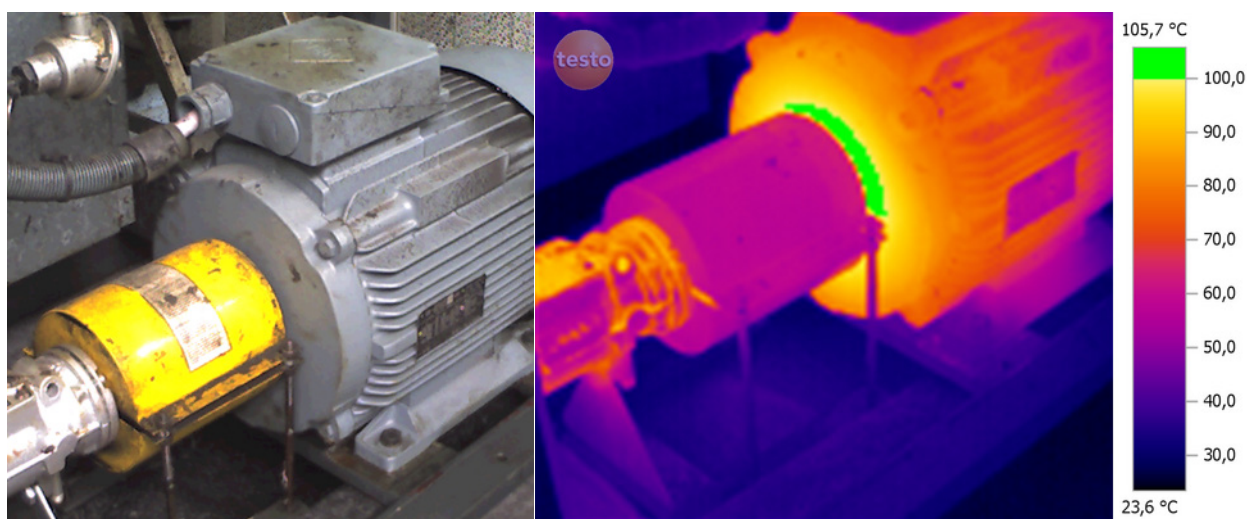
Ve světě termodiagnostiky termokamerou je třeba mít na paměti, že termokamerou nedochází doslova k měření teploty, ale spíš k jejímu stanovení na základě předem zadaných okrajových podmínek. Vyhodnocení rozložení teploty po povrchu sledovaného tělesa je tedy funkcí parametrů jako je emisivita povrchu tělesa, podmínek v okolním prostředí a vlastností samotného detektoru v kameře. Pro co nejpřesnější vyobrazení povrchové teploty je tedy třeba předem změřit a specifikovat zdánlivou odraženou teplotu neboli teplotu pozadí, emisivitu povrchu tělesa, vzdálenost tělesa od kamery, relativní vlhkost vzduchu a jeho teplotu v prostředí měření (Štajnrt 2014, s. 4).

Konstrukce termokamery je velmi podobná konstrukci běžné digitální kamery nebo fotoaparátu. Výraznější rozdíl je až v samotném senzoru a zpracování zachycených obrazových dat (Tesař 2013, s. 1).

IRC najde využití například ve stavebnictví při zjišťování tepelných ztrát budov (viz obrázek 2.9) vlivem poruch tepelných izolací a defektů rozvodů topných médií. Dále ve strojírenství při tepleném namáhání strojních součástí (viz obrázek 2.10). Dále v diagnostice přetížených elektroinstalací a obecně tvarem komplikovaných či hůře přístupných konstrukcí (viz obrázek 2.11), u kterých není možné sledovaný povrch přizpůsobit jiné metodě měření (Štajnrt 2014, s. 7).



*Obr. 2.9: Termogram kontroly teplených ztrát pasivní budovy (vpravo) (Wikipedie 2001)*



*Obr. 2.10: Termogram elektromotoru – pravděpodobná závada na ložisku (Vogelbacher 2010, s. 1)*



*Obr. 2.11: Inspekce pásových dopravníků – Severočeské Doly a.s. (Aerovision Group 2020)  
Využití dronu DJI M300 RTK a termokamery H20T*

Výhodou termovize je rychlost, a tedy i možnost přímého sledování a zaznamenávání změn povrchových teplot v téměř reálném čase (Volf, Jenčík 2003, s. 75).

Pokročilou funkcí vyspělé termokamery je například i možnost zvýraznit a sledovat zvolenou teplotu či teplotní rozsah. Na obrázku 2.10 je uveden příklad využití funkce Izoterm, zvýraznění oblasti, kde teplota přesahuje hodnotu 100 °C (Vogelbacher 2010, s. 3).

Mezi nevýhody využití termokamery patří nutnost kalibrace a specifikace sledovaného prostředí před samotným měřením. Dále je vhodné pro objektivní a přesné měření opatřit sledovanou plochu tělesa materiálem s dobrou tepelnou vodivostí, nízkou tepelnou kapacitou a známou emisivitou, například využitím hliníkové folie s černým matným nátěrem, nebo alespoň samotným černým matným nátěrem, jehož emisivitu je možné specifikovat. Při správném nastavení jsou pak výsledky velmi přesné. Další nevýhodou vysoká pořizovací cena IRC technologie. (Tesař 2013, s. 1).

Speciálním případem indikace teploty, spadajícím dle dostupné teorie do kontaktního měření, byť jeho vyhodnocení probíhá bezkontaktně, je využití barvy s termochromními kapalnými krystaly, nanesenými na povrch sledovaného tělesa (Volf, Jenčík 2000, s. 66).

Kapalné krystaly jsou organické sloučeniny, které v charakteristickém teplotním rozsahu mění svou strukturu a vlastnosti, především index lomu bílého světla (Volf, Jenčík 2003, s. 66).

Termochromních kapalných krystalů lze využít k indikaci povrchových teplot, resp. rozložení teplotního pole. Nejjednodušším způsobem aplikace je nátěr o síle několika setin milimetru přímo na povrch sledovaného objektu. Podklad musí být černý. Při jiné barvě povrchu je nutno nanést před aplikací barev nejprve černý základ. Barevná změna je vratná s rychlou odezvou. (Volf, Jenčík 2003, s. 66).

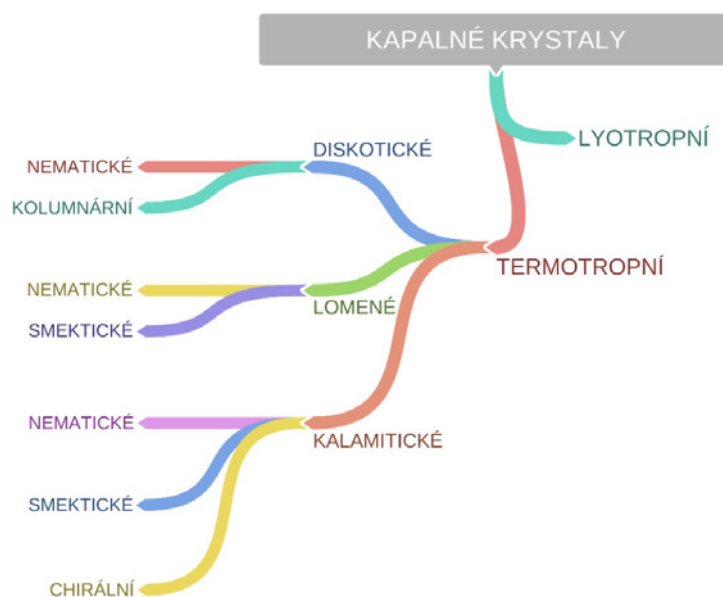
Nevýhodou kapalných krystalů volně natřených na povrchu je působení okolního prostředí na jejich účinnost. Nechráněný nátěr po několika hodinách mění své parametry (Volf, Jenčík 2003, s. 66).

Velkou výhodou kapalných krystalů je jejich nízká cena a v určitých aplikacích odpadá nutnost přídavných vyhodnocovacích zařízení (Volf, Jenčík 2003, s. 67).

## 2.3 Kapaln  krystaly

Objev kapaln  krystalů je připisován rakouskému botanikovi Friedrichu Reinitzerovi, kter  v roce 1888 zaznamenal u syntetizovaného cholesterylbenzo tu dvě teploty tání. V ur it m rozmezí teplot sledoval v kapalině zákal s krystalickou strukturou. N meck  fyzik Otto Lehmann, kter  v d iv j m  době podobn  jev post rehl také, objev přezkoumal a nazval ho stavem kapaln  krystalick m. Kapaln  krystaly však už v první polovině 19. století zkoumala trojice Virchow, Mettenheimer a Valentin. Pod polarizačním mikroskopem sledovali vzorek kapaliny, kter  vykazoval optick  vlastnosti krystalů (Fisch 2004, s. 10).

Při vyhledávání informací o kapaln  krystalech v dostupné literatuře lze narazit na pojem mezofáze, kter  označuje f zov  rozhraní, ve kter m se kapaln  krystaly nachází. Organick  látka, která je schopn  vytv a et za určitých podmínek strukturu kapaln  krystalů, je odvozen m označována jako mezogen. Kapaln  krystaly lze rozdělit do dvou základních skupin na termotropní a lyotropní (Svoboda, Glogarová 2005, s. 2).

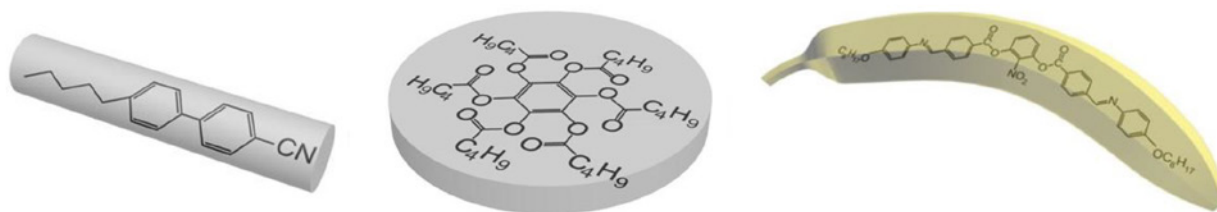


*Obr. 2.12: Základní d len  kapaln  krystalů (Svoboda, Glogarová 2009, s. 4)*

Pro utvoření stabilní mezofáze u lyotropní kapaln  krystalů je nejv znamn j m  jejich koncentrace v roztoku, ve kter m jsou obsaženy. Jin  vn j m  podněty, a tedy ani změna teploty, na jejich strukturu nemají v razn  vliv (Svoboda, Glogarová 2005, s. 4).

Termotropní kapaln  krystaly m n  strukturu v závislosti na teplotě. Důsledkem tepelného pohybu tedy dochází k jejich p euspo ad n . Mezofáze se nachází vždy v ur it m teplotním intervalu od teploty tání po teplotu kritickou (Svoboda, Glogarová 2005, s. 5).

Termotropní kapalné krystaly lze dle tvarové charakteristiky dělit do tří podskupin:

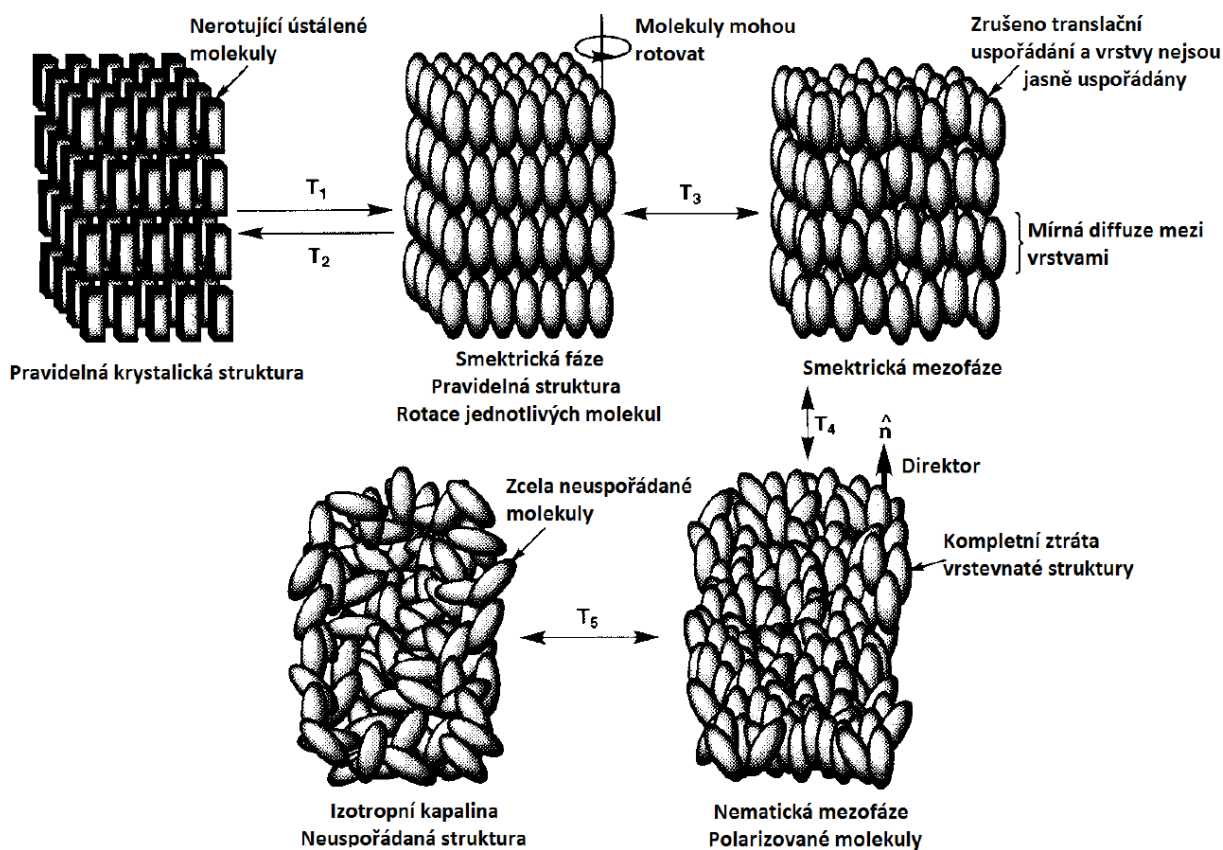


**Obr. 2.13:** Kalamitické (tyčinkovité) (vlevo), diskotické (diskovité) (uprostřed) a lomené (banánovité) (vpravo)  
(Gaj 2017, s. 5)

Tyčinkovité, tedy kalamitické, jsou nejnámější, nejstarší a zatím nejčastěji pozorované (Svoboda, Glogarová 2005, s. 5).

Pro tuto práci je dostačující zaměřit se pouze na termotropní kalamitické kapalné krystaly.

Tvorbu mezofází lze chápat jako jev postupného tání krystalů. V rozmezí na obrázku 2.14 uvedených teplot může mít struktura mezofáze kalamitických termotropních kapalných krystalů několik podob (Svoboda, Glogarová 2005, s. 5):

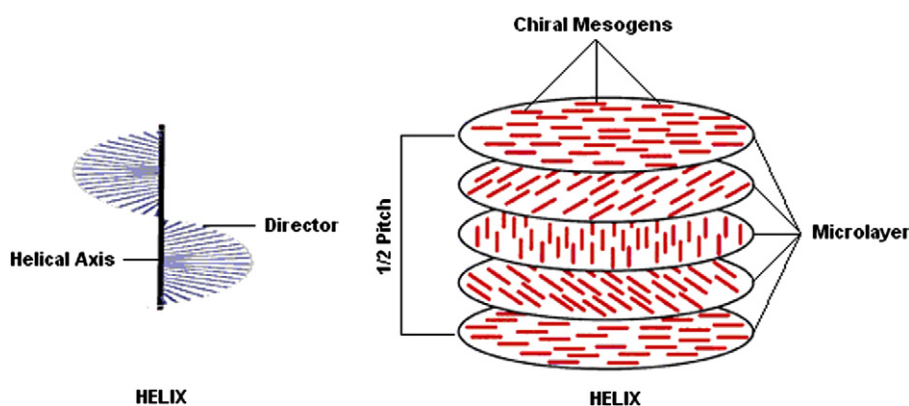


**Obr. 2.14:** Vývoj kalamitické struktury v závislosti na změně teploty (Klimeš 2017, s. 19)

Molekuly kalamitických kapalných krystalů tvoří pevné jádro a flexibilní řetězec viz obrázek 2.13. S rostoucí teplotou dochází k rozvolňování vazeb krystalické struktury, následně tvorbě smektických a nematických mezofází. Obrázek 2.14 obsahuje popis postupného rozpadu krystalického uspořádání v závislosti na rostoucí teplotě, tedy za předpokladu  $T_1 < T_3 < T_4 < T_5$ . Žádný kapalně-krystalický materiál však nevykazuje všechny kapalně-krystalické fáze. Mnohé sloučeniny tvoří jednu až tři mezofáze (Svoboda, Glogarová 2005, s. 6).

Nematická mezofáze je ze všech nejméně uspořádaná a charakteristická nízkou viskozitou. Dlouhé osy kalamitických molekul dodržují preferovaný směr daný direktorem, viz obrázek 2.14. Fakt, že orientaci direktoru lze měnit v elektrickém poli, umožňuje konstrukci zobrazovacích zařízení (Svoboda, Glogarová 2005, s. 6).

U cholesterylbenzoátu, na kterém byl kapalně-krystalický stav poprvé pozorován, byla objevena mezofáze chirálně-nematická, dříve označována jako cholesterická. V uvedené mezofázi dochází k mírné a postupné rotaci direktoru. Nematická mezofáze je tedy zkroucena podél jedné osy, která je kolmá na direktor. Krystaly se organizují do pravotočivých či levotočivých spirálových struktur, viz obrázek 2.15 (Svoboda, Glogarová 2005, s. 7).



*Obr. 2.15: Spirálovitá struktura cholesterické mezofáze (Abdullah 2010, s. 3)*

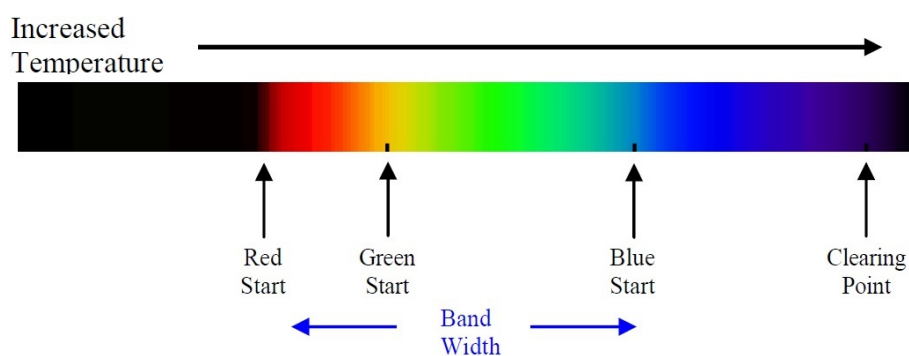
Stoupání závitů (na obrázku 2.15 značeno pitch) vytvořené spirály (helix) je teplotně závislé. Při vyšší teplotě mají zúčastněné molekuly vyšší termickou energii, změna úhlu direktoru je větší, stoupání závitů je kratší. Poklesem teploty se naopak délka závitů prodlužuje. Spirálová struktura má schopnost selektivně odrážet světlo o vlnové délce rovné délce stoupání helixu (Svoboda, Glogarová 2005, s. 7).

Zjednodušeně lze říct, že vrstva barvy s termochromními kapalnými krystaly při zvýšení teploty prostředí odráží z dopadajícího bílého světla pouze kratší vlnové délky. Způsobený barevný vjem je poté blízký chladným odstínům modré. Při snížení teploty v prostředí barvy odráží delší vlny viditelného spektra a působí barvami teplých odstínů blízkých červené.



Dále je vhodné zmínit, že barevné projevy termochromních kapalných krystalů lze pozorovat pouze v rozsahu dvou kritických teplot. První určuje minimální bod, od kterého začnou kapalně krystaly projevovat zbarvení. Pokud se látka nachází pod touto hranicí, tak se krystaly jeví jako transparentní. Po překročení maximální teploty dojde opět ke zprůhlednění látky, a to v důsledku jejího zkapalnění (viz obrázek 2.14 a 2.16 – clearing point) (Klimeš 2017, s. 25).

Vzhledem k jevu popsanému v odstavci výše se termochromní kapalně krystaly běžně aplikují v kombinaci s černým pozadím. To zajistí, že světlo, které projde vrstvou kapalných krystalů, bude černým základem pohlceno (Hallcrest 2015, s. 5).



**Obr. 2.16:** Barevný projev TLC v závislosti na teplotě (Hallcrest 2015, s. 4)

Barvy s termochromními kapalnými krystaly jsou dostupné v různých podobách přizpůsobených jejich aplikaci. Hallcrest nabízí své barvy ve třech základních provedeních (Hallcrest 2015, s. 5).

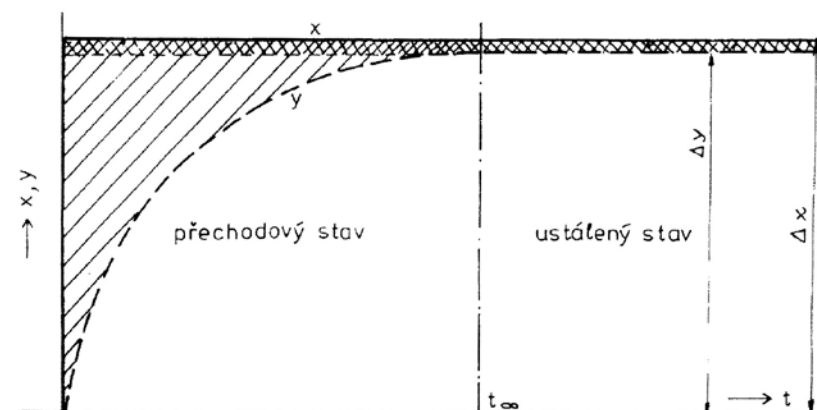
Prvním provedením je olejovitý roztok, který lze aplikovat nátěrem, nástřikem, tiskem či máčením. Výsledkem aplikace je tenká vrstva barvy v rozsahu od 5  $\mu\text{m}$  do 50  $\mu\text{m}$  v závislosti na složení použité barvy. Nevýhodou této formy je nízká odolnost vůči vnějším vlivům, tedy absorpci kyslíku, vlhkosti, organických rozpouštědel, tuků a usazování prachu. Životnost nátěru je v řádu hodin až dní (Hallcrest 2015, s. 9).

Oblíbenou formou jsou kapalně krystaly zapouzdřené v mikrokapslích, které chrání krystaly před vnějšími vlivy a prodlužují jejich životnost, zvyšují odolnost a zpřesňují výsledky měření. Mikrokapsle lze aplikovat opět nástřikem, nátěrem či máčením (Hallcrest 2015, s. 11).

Třetí formou je vrstva barvy na polyethylenové folii, která se aplikuje lepením na sledovaný povrch. Najde využití tam, kde nelze barvu aplikovat žádným z výše zmíněných způsobů. Barva je v tomto provedení nejodolnější (Hallcrest 2015, s. 15).

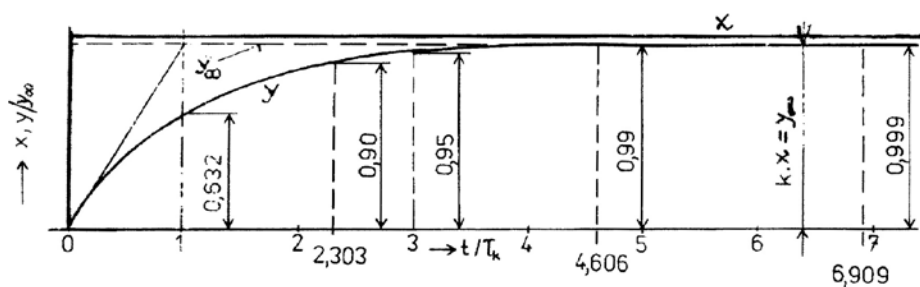
## 2.4 Přechodové stavy

Dynamické chování měřicího přístroje se určuje v přechodovém stavu, tedy v průběhu reakce na skokovou změnu měřené veličiny. Výstupní signál měřicího zařízení není v přechodovém stavu ustálený, ale proměnný v čase. Příklad odezvy měřicího přístroje na skokovou změnu měřené veličiny je na obrázku 2.17 (Volf, Jenčík 2003, s. 11).



Obr. 2.17: Odezva měřicího přístroje na skokovou změnu měřené veličiny (Volf, Jenčík 2003, s. 11)

Dynamické vlastnosti jednoduchých měřicích přístrojů a snímačů lze popsat z přechodového stavu výsledovanou přechodovou charakteristikou, kterou lze vyjádřit diferenciálními rovnicemi řádu nultého a prvního s konstantními koeficienty (viz rovnice 2.1). Příklad přechodové charakteristiky 1. řádu uvádí obrázek 2.18. a lze ji popsat rovnicí 2.2. s uvedenými parametry – časovou konstantou a statickým zesílením (Volf, Jenčík 2003, s. 19).



Obr. 2.18: Přechodová charakteristika 1. řádu (Volf, Jenčík 2003, s.19)

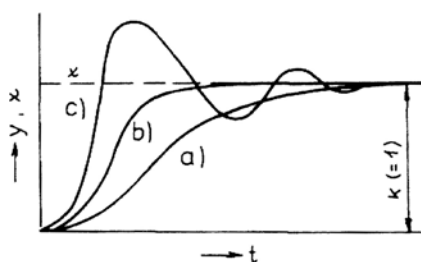
$$a_n \cdot y^{(n)} + \dots + a_2 \cdot \ddot{y} + a_1 \cdot \dot{y} + a_0 \cdot y = x \quad (2.1)$$

$$a_1 \cdot \dot{y} + a_0 \cdot y = x, \text{ resp. } \tau_k \cdot \dot{y} + y = k \cdot x \quad (2.2)$$

$$\tau_k = a_1/a_0 - \text{časová konstanta přístroje}$$

$$k = 1/a_0 - \text{statická konstanta, statické zesílení přístroje}$$

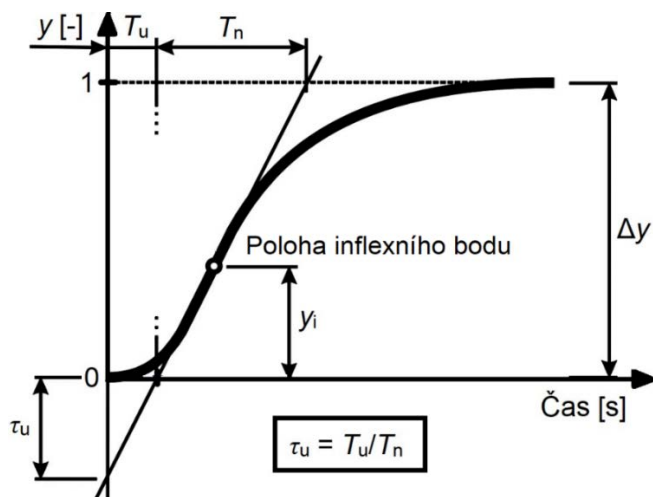
Složitější zařízení mnohdy vyžaduje popis rovnicí vyššího řádu. Charakteristiky druhého řádu zobrazuje obrázek 2.19 (Volf, Jenčík 2003, s. 19).



**Obr. 2.19:** Přechodové charakteristiky druhého řádu:

a) aperiodická, b) na mezí aperiodicity, c) kmitavá (Volf, Jenčík 2003, s. 20)

Tato práce se v pozdějších kapitolách zabývá vyhodnocením přechodových charakteristik s aperiodickým průběhem. Cílem práce ale není vyjádřit přesné parametry pro popis přechodových jevů, tedy časových konstant a zesílení. Postačujícím klíčovým krokem vyhodnocení je nalezení inflexního bodu přechodové charakteristiky, tedy určení jeho polohy souřadnicemi na svislé i vodorovné ose. Důvody tohoto přístupu k vyhodnocení jsou uvedeny v kapitole 6.



**Obr. 2.20:** Aproximace metodou dle Strejce (Boháč 2019, s. 55)

## 2.5 Numerické simulace

Součástí praktické části této práce je také CFD (Computational Fluid Dynamics) simulace měřeného experimentu. Jde o simulaci procesů z mechaniky tekutin a sdílení tepla na základě transportních a stavových rovnic (Horáková 2010, s. 9).

Pro tuto práci byla simulace provedena metodou konečných objemů v prostředí ANSYS Fluent. V tomto případě princip numerické metody konečných objemů spočívá v diskretizaci spojitého kontinua, tedy jeho rozdělení do určitého množství menších objemů, ve kterých následně probíhají výpočty. Zjemnění objemů je provedeno za účelem zpřesnění výsledku.

Fluent je schopen řešit a vyhodnocovat 2D i 3D simulace proudění tekutin, přenosu tepla a spalovacích procesů. Umožňuje simulovat laminární i turbulentní proudění, vícefázové proudění, chemické procesy a vzájemné kombinace uvedeného výčtu (Horáková 2010, s. 9).

Strategie řešení podobného problému, jako je v této práci by mohla vypadat takto:

- preprocessing
  - o definice geometrie
  - o tvorba diskretizační sítě
  - o definice okrajových podmínek
  - o definice počátečních podmínek
- procesing
  - o materiálová charakteristika
  - o výběr vhodného modelu
  - o výpočet
- postprocessing
  - o vyhodnocení výsledků výpočtu
  - o tvorba vizualizací výsledků

## Kapitola 3 Literární řešerše

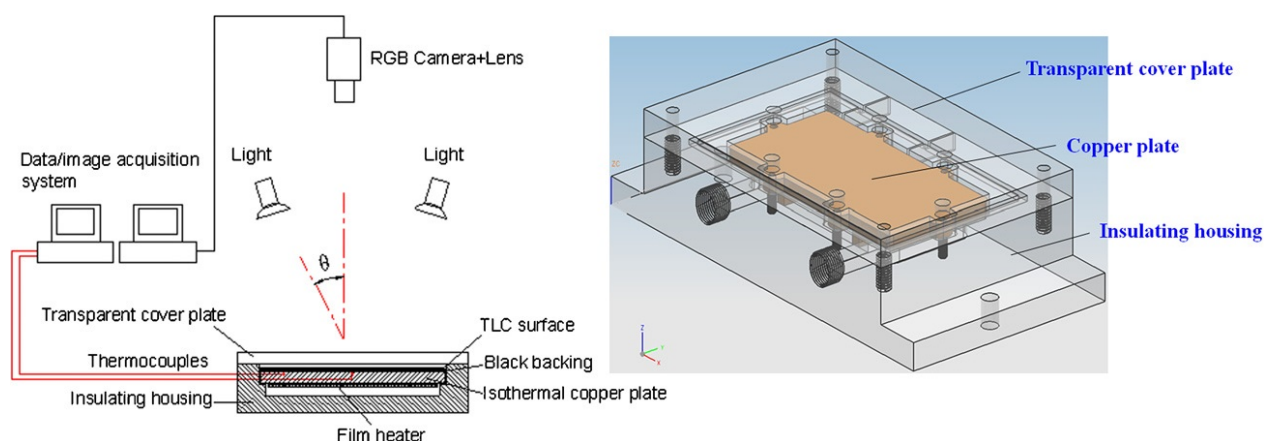
### 3.1 Historie experimentů s TLC

V roce 2009 na univerzitě Shanghai Jiaotong provedli autoři Rao a Zang statickou kalibraci TLC s označením Hallcrest SPNR40C20W v rozsahu od 40 °C do 60 °C. Pozornost věnovali především tomu, jak velký vliv má na nejistotu měření tloušťka a kvalita nanesené vrstvy barev, úhel dopadu umělého osvětlení na snímáný vzorek a redukce barevných posunů sousedních pixelů. Na obrazová data z RGB kamery ve vyhodnocení aplikovali nelineární mediánový filtr pro redukci šumu ve snaze eliminovat náhodné barevné odchylky v okolí sledovaných pixelů. Ve vyhodnocení obrazových dat využili převodu trojrozměrného barevného prostoru RGB na hodnoty barevných odstínů HUE ve stupních. V prostředí Matlab využili funkce `rgb2hsv`, která je založena na uvedených vztazích 3.1-3.3 (Rao, Zang 2009, s. 4).

$$R = \text{Max } H = \frac{G - B}{6(R - \min(R, G, B))} \quad (3.1)$$

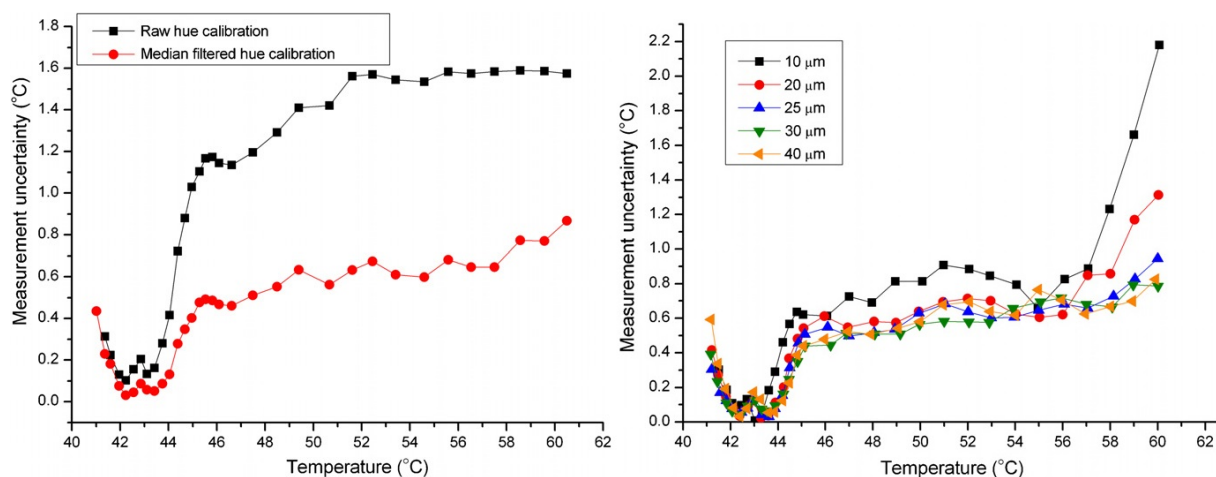
$$G = \text{Max } H = \frac{2 + B - R}{6(G - \min(R, G, B))} \quad (3.2)$$

$$B = \text{Max } H = \frac{4 + R - G}{6(B - \min(R, G, B))} \quad (3.3)$$

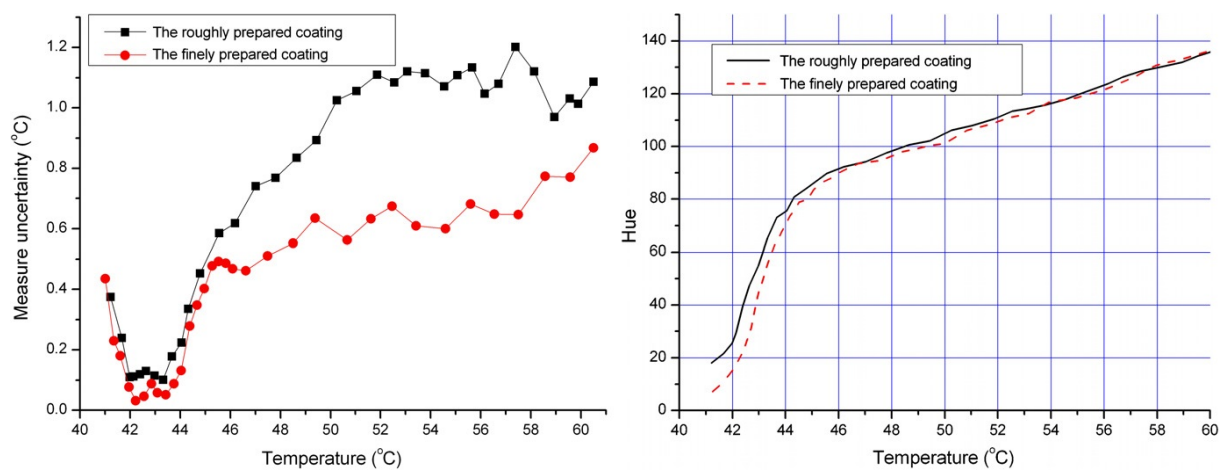


*Obr. 3.1: Kalibrační aparatura (vlevo) a detail těla kalibrátoru (vpravo) (Rao, Zang 2009, s. 2)*

Na základě měření autoři uvádí, že jimi doporučená tloušťka vrstvy barev pro nejnižší odchylky měření leží v rozsahu 20  $\mu\text{m}$  až 30  $\mu\text{m}$ . Vyšší kvalita nanesené vrstvy zvyšuje rozlišení barevného spektra. Úhel osvětlení sledovaného vzorku nemá na nejistotu měření výrazný vliv. Redukce šumu mediánovým filtrem 5 x 5 odchylky hodnot HUE výrazně snižuje. Vybrané závěry shrnují obrázky 3.2 a 3.3 (Rao, Zang 2009, s. 6).

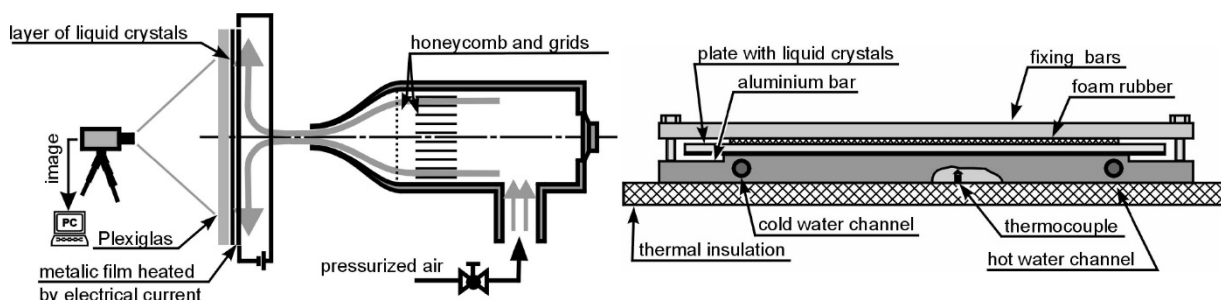


**Obr. 3.2:** Nejistota měření při použití redukce šumu (vlevo) a vliv tloušťky vrstvy barvy (vpravo)  
(Rao, Zang 2009, s. 6)



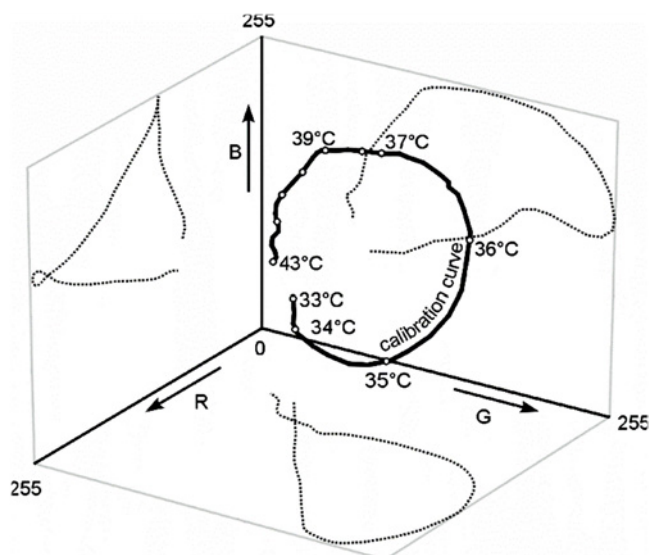
**Obr. 3.3:** Nejistota měření (vlevo) a kalibrační křivka (vpravo) v závislosti na kvalitě nanesené vrstvy  
(Rao, Zang 2009, s. 7)

Jiří Vejražka a Philippe Marthy v roce 2007 vydali článek, ve kterém popisují jednu z komplikovanějších metod kalibrace TLC, konkrétně přípravku Hallcrest R35C1W, za účelem zpřesnění plošné vizualizace přenosů tepla, především pro případy, kde není možné využít IRC ani jiné metody sledování plošného rozložení teploty (Vejražka, Marthy 2007, s. 2).



*Obr. 3.4: Experimentální aparatura (vlevo) a detail kalibrátoru (vpravo) (Vejražka, Marthy 2007)*

Autoři při vyhodnocení obrazových dat pro kalibraci nevyužili přímého převodu vektorů RGB na hodnotu HUE. Mohli tak následně kompenzovat v obrazových datech intenzitu osvětlení a vyvážení bílé. Tyto faktory výrazně zvyšují nejistotu měření. Redukce šumu a snížení barevných odchylek sousedních pixelů ve snímcích autoři docílili kombinací série dvaceti snímků do jednoho, ze kterého čerpali data (Vejražka, Marthy 2007, s. 5).

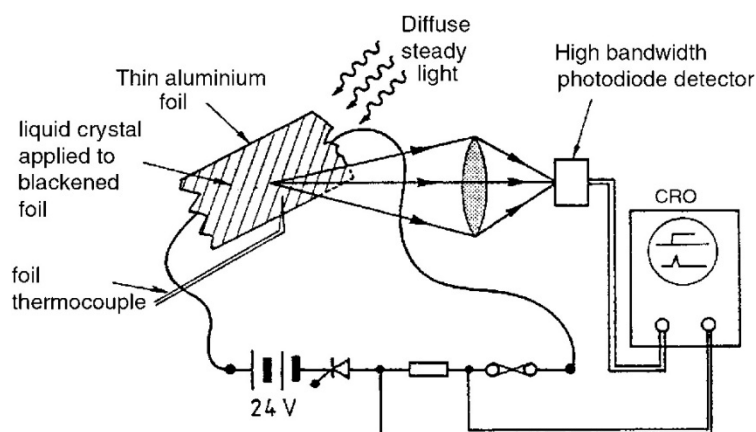


*Obr. 3.5: Kalibrační křivka v RGB prostoru (Vejražka, Marthy 2007, s. 7)*

Převod vektorů RGB do hodnot HUE autoři článku provedli až v posledním kroku kalibrace. V článku je dále popsán experiment, ve kterém byly kalibrované barvy použity a jimi určené hodnoty teploty porovnané s hodnotami získanými prostřednictvím termočlánků rozmístěných ve sledované ploše (Vejražka, Marthy 2007, s. 7).

Závěrem článku jsou doporučeni využít při měření kvalitního osvětlení měřeného vzorku barvy a vyvarovat se nanášení barev na tvarově komplikované plochy nebo výrazné textury povrchů. Dle autorů je potenciál využitelnosti TLC barev hlavně v oblastech, kde je třeba téměř okamžité vizualizace rozložení teploty po povrchu a není možné právě využít termokameru, například u ploch ponořených v kapalině (Vejražka, Marthy 2007, s. 8).

Autoři Ireland a Jones provedli v roce 2000 rešerši provedených experimentů s TLC. Stručně shrnují i výsledky jejich experimentu z roku 1987, kdy při ohřevu vrstvy TLC o tloušťce 10  $\mu\text{m}$  na černém základu tenké hliníkové folie dle schématu v obrázku 3.6, sledovali vyčíslitelnou dynamickou odezvu na časový přírůstek teploty povrchu až nad hranicí 2000  $^{\circ}\text{C s}^{-1}$ . S uvedeným přírůstkem teploty povrchu uvádí, že odezva TLC není vyšší než v řádu jednotek milisekund. Rešerše mimo jiné shrnuje i možnost využití kapalných krystalů při měření součinitele přestupu tepla nebo smykového napětí (Ireland, Jones 2000, s. 2).



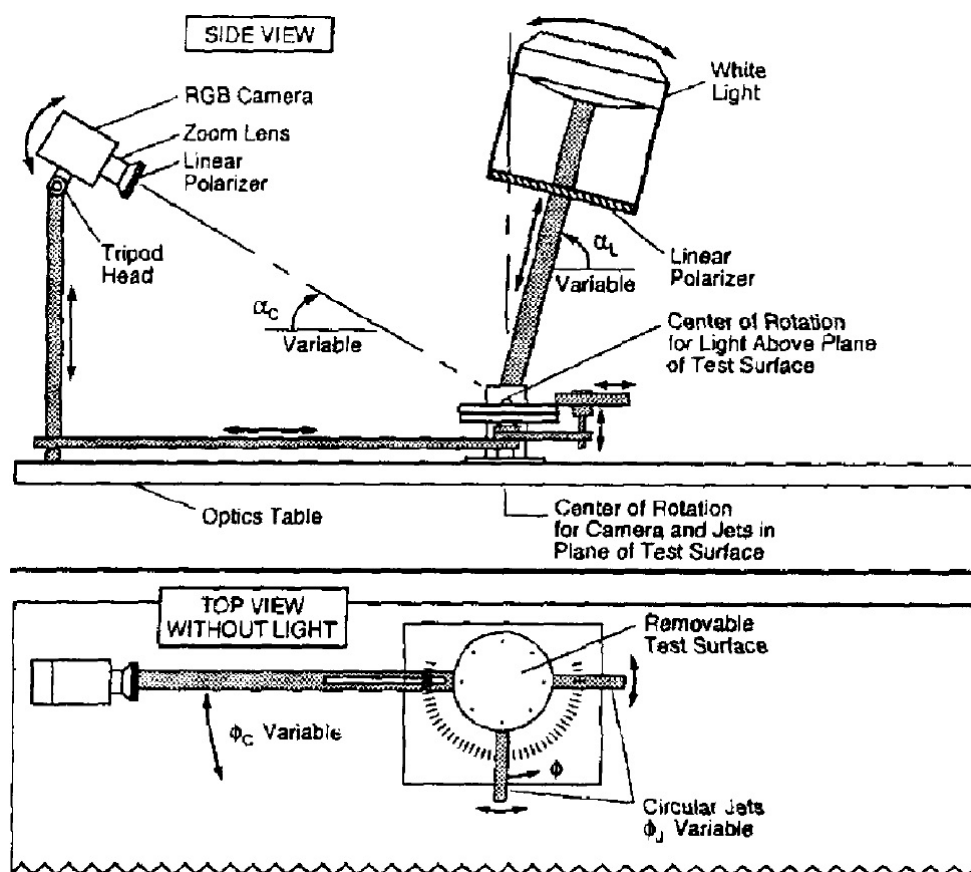
**Obr. 3.6:** Schéma měření dynamické odezvy kapalných krystalů (Ireland, Jones 2000, s. 5)

Autorka Abdullah provedla a publikovala v roce 2008 článek o kalibraci TLC Hallcrest, konkrétně barev s kapalnými krystaly v mikrokapslích. Cílem bylo posoudit vliv tloušťky vrstvy TLC v rozsahu od 10  $\mu\text{m}$  do 50  $\mu\text{m}$  na barevný projev. Pozornost věnovala nejistotám tloušťky nanesených vrstev. Tu zjišťovala stanovením podílu sušiny v objemu nanesených barev měřením váhy sušiny po odpaření rozpouštědla po dvanácti hodinách v Memmert troubě. Nanášení barev naředěných rozpouštědlem proběhlo technologií airbrush. Autorka závěrem popisuje výraznější projev zelené složky prostoru RGB s rostoucí tloušťkou vrstvy TLC a tím zvyšující se nejistotu vyjádření teploty z barevného odstínu (Abdullah 2008, s. 16).



Abdullah provedla v roce 2010 rešerši provedených kalibrací TLC a přehledně shrnula její odhadované zásady ideálního postupu kalibrace. Za významné vlivy považuje například správný výběr expozice, vyvážení bílé při snímání barevnou kamerou a využití polarizačních filtrů v optice pro eliminaci odlesků. Za vhodné považuje také dostatečné přímé osvětlení a samozřejmostí jsou stabilní teplotní a vlhkostní podmínky. Dále uvádí, že nechráněné barvy na povrchu podléhají vnějším vlivům. To lze eliminovat vyšší tloušťkou vrstvy nátěru (Abdullah 2010, s. 32).

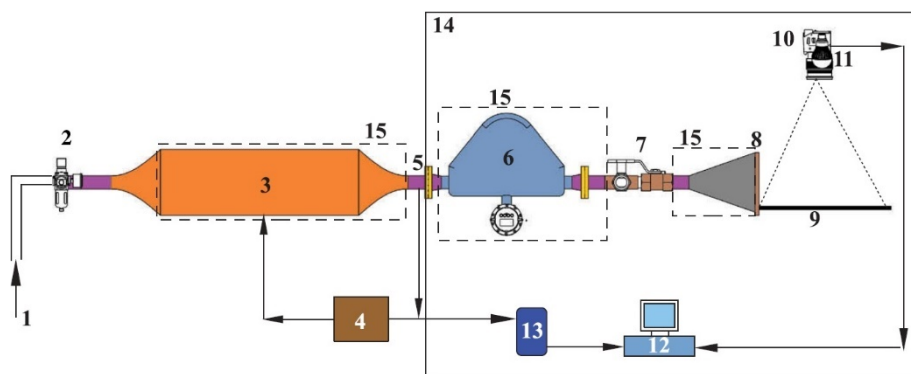
Autor Reda v roce 1997 provedl jeden z prvních kvantitativních experimentů za účelem kalibrace kapalných krystalů pro měření smykového napětí. Schéma kalibrační aparatury na obrázku 3.7. Předmětem kalibrace byl roztok kapalných krystalů Hallcrest BCN/192, který byl z různých směrů namáhán různě intenzivně vzduchovou tryskou. Obrazová data byla vždy vyhodnocena pro několik bodů testovaného vzorku (Reda 1997, s. 5).



Obr. 3.7: Schéma kalibrace kapalných krystalů k měření smykového napětí (Reda 1997, s. 5)

Bonnett v roce 1989 uvádí pro přechody teplot blízkých pokojovým teplotám časové odezvy směsi chirálně nematických struktur kapalných krystalů délky přibližně 10 ms. Směs kapalných krystalů cholesterických struktur dosahovala časové odezvy přibližně 100 ms. Bonnett na základě svého sledování konstatoval, že skutečný čas odezvy kapalných krystalů na změnu teploty je pravděpodobně nižší než naměřený, z důvodů nepřesnosti měření (Bonnett 1989, s. 9).

Godi v roce 2019 publikoval experiment, ve kterém se zabýval měřením součinitele přestupu tepla do desky paralelně otrýskávané zahříváním vzduchem o různých parametrech (viz schéma na obrázku 3.8). Informace o rozložení teplot na povrchu desky získával z TLC a termokamery. Závěrem svého článku porovnal vhodnost využití termokamery a TLC pro podobná měření. Upřednostňuje využití termokamery pro její univerzálnost a přesnost (Godi 2019, s. 4).



- 1) Compressor line 2) Air filter and regulator 3) Heater section 4) PID controller  
 5) Thermocouple 6) Coriolis mass flow meter 7) Bypass valve 8) Jet plate  
 9) Target plate 10) Camera 11) LED bulb 12) Data/Image acquisition system  
 13) Data logger 14) Dark enclosure 15) Insulation

**Obr. 3.8:** Schéma měření součinitele přestupu tepla (Godi 2019, s. 4)

## 3.2 Využití TLC v praxi

Anders ve svém článku začátkem roku 2020 popisuje svoji práci na vývoji výpočtového mechanismu na souběžné zpracování obrazových dat z měření průtokových vlastností a teplotních polí, za účelem predikce pohybu částic v tekutině pomocí TLC. K vyhodnocení využívá neuronové sítě (ANN – Artificial Neural Networks). Neuronové sítě vrací hodnoty teploty vždy pro zadanou souřadnici pixelů obrazových dat a dat z trojrozměrného prostoru RGB získávaných senzorem barevné kamery (Anders 2020, s. 3).

Stasiek v roce 2005 publikoval článek, který shrnuje výsledky rešerše kalibrací TLC se zaměřením na problémy, kterými jsou kalibrace zatíženy. V článku popisuje využití TLC pro mapování rychlostních polí ve větrném tunelu, konkrétně při obtékání žeber vzduchem. Text obsahuje rozbor barevných modelů RGB a HSV a převodní vztahy mezi nimi (Stasiek 2005, s. 10).

Hallcrest, výrobce teploměrů a termochromních pigmentů, na svých stránkách uvádí, že jejich sortiment obsahuje i nátěry, které změní zabarvení pouze dle maximální dosažené teploty. Při poklesu teploty se zabarvení nevrací do své původní podoby. Toho lze využít například u výrobku, pro který je nutné dodržovat optimální teplotu, na kterou je konstruován. Nátěr tedy může signalizovat znehodnocení výrobku vysokou teplotou (Hallcrest 2015, s. 5).

Mimo jiné se Stasiek zmiňuje o využití TLC v medicíně a jaké je vhodné v takovém případě dodržet podmínky. TLC lze využít v onkologické diagnostice jako indikátor oblastí s nadměrným prokrvením a s tím souvisejícím nárůstem teploty v dané oblasti. Pro diagnostiku touto metodou uvádí Stasiek na základě své rešerše několik podmínek (Stasiek 2005, s. 12):

- místnost, v které diagnostika probíhá by neměla být menší než 9 m<sup>2</sup>
- všechna zařízení produkující teplo by neměla být v prostoru diagnostiky přítomna
- proudění vzduchu v místnosti by mělo být minimalizováno
- preferovaná teplota v místnosti by měla být v rozsahu od 25 °C do 27 °C
- preferovaná relativní vlhkost v rozsahu od 50 % do 70 %
- parametr teploty a vlhkosti by měl být po čas diagnostiky sledován

### 3.3 Výhody a nevýhody TLC

Z literární rešerše vybraných provedených experimentů a využití TLC v praxi plyne, že výhodou barvy s termochromními kapalnými krystaly je v dnešní době snadná dostupnost a v porovnání s nákupní cenou termokamer i nízké pořizovací náklady na pokrytí 1 m<sup>2</sup>.

TLC v kombinaci s kvalitní barevnou kamerou a osvětlením může díky většímu množství obrazových bodů nabídnout při vhodné aplikaci přesnější výsledky než termokamera, která má obecně méně obrazových bodů z důvodu potřebné vysoké citlivosti senzoru.

Při dobrých světelných podmínkách a uvážení nižší, někdy spíše orientační, přesnosti barev, může být aplikace TLC výrazně výhodnější pro vyšší četnost měření než využití termokamery. TLC je možné využít například v potravinářství pro indikaci optimální teploty výrobku. Nátěr s obsahem TLC s nízkým barevným rozlišením, například jen o dvou barvách, může být umístěn na obalu produktu a informovat o vhodné či nevhodné teplotě. Takto může být signalizováno nežádoucí tepelné namáhání.

Dostupné jsou i takové barvy s TLC, které jsou netoxické a zdraví nezávadné. To umožňuje jejich využití v medicíně při diagnostice vizualizací prokrvení tkání.

Dále je třeba vzít v úvahu pravděpodobně nižší uživatelský komfort při využití TLC, spojený nejen s mnohdy komplikovanější aplikací na sledovaný povrch, ale i vyhodnocením obrazových dat. Výsledky měření jsou dále ovlivněny kvalitou povrchu, kvalitou nátěru a vnějšími vlivy.

Podle dostupných informací lze TLC využít jen v rozsahu od -30 °C do 120 °C. Pro vyšší a nižší teploty je nutné využít termokameru.

TLC mohou být poškozeny vystavením vysokým dávkám UV záření.

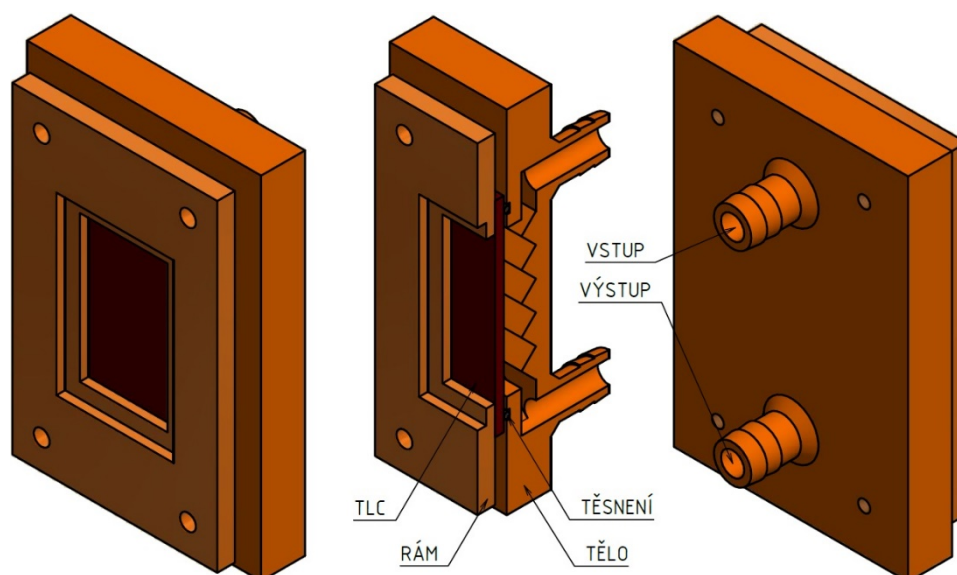
U barev s TLC dle dostupných informací nebyly prokázány hysterezní vlastnosti.

# Kapitola 4 Návrh experimentální aparatury

## 4.1 Stanovení parametrů aparatury

Hlavním prvkem navržené experimentální aparatury je samotný kalibrátor, který umožní vizuální projev barev s termochromními kapalnými krystaly v závislosti na změně jejich teploty sledovat a zaznamenat. Konstrukčních modelů bylo v průběhu zpracování diplomové práce navrženo celkem šest, z toho tři byly 3D tiskem realizovány a podrobeny zkoušce těsnosti. Nejvýraznější konstrukční rozdíly byly právě mezi třemi realizovanými modely, které jsou následně popsány.

V prostředí Autodesk Inventor bylo tělo první realizované verze kalibrátoru navrženo mimo spojovacího materiálu, těsnění a destičky se vzorkem TLC jako dvoudílná sestava (viz příloha 1 a obrázek 4.1).



*Obr. 4.1: 3D model první verze TLC kalibrátoru*

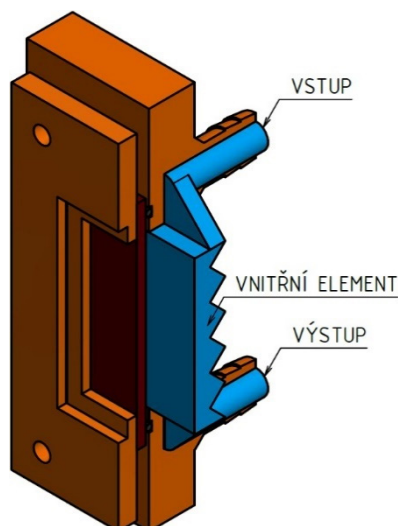
Kalibrátor tvoří profilovaný rám, který je čtyřmi šrouby přichycen k tělu a tlačí desku s nátěrem TLC orientovaným do vnitřního prostoru na pryžové těsnění v drážce kolem otvoru do vnitřního elementu.

Pro připojení přívodu a zpátečky teplotonosného média hadicí slouží tvarové trny o vnějším průměru 12,75 mm. Vnitřní průměr hrdel vstupu a výstupu je 8 mm.

Při návrhu první verze kalibrátoru byla snaha geometrii co nejvíce zjednodušit, tedy snížit počet zaoblených přechodů, čímž došlo k nárustu počtu ostrých a slepých rohů v nichž bylo následně numerické modelování proudění závěrem náročnější a ztratilo na přesnosti.

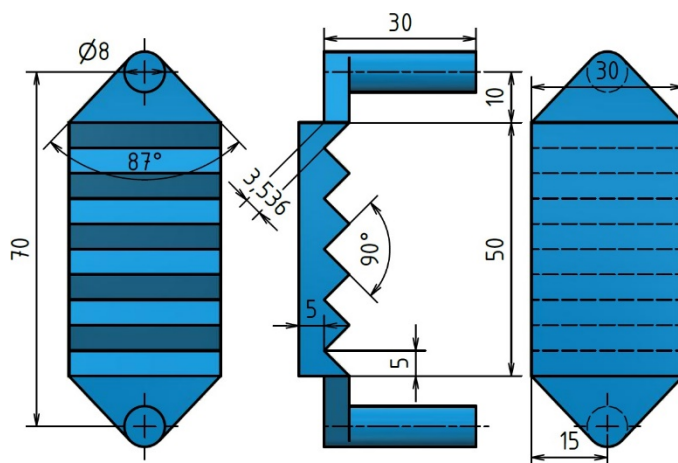
Při vytváření modelu a stanovení rozměrů byl brán ohled na dohodnutou aktivní plochu vzorku, aby bylo možné sledovat RGB kamerou alespoň 20 x 20 mm destičky s nátěrem.

Aktivní plocha destičky byla tedy včetně rezervy stanovena na 30 x 50 mm s delší stranou ve směru proudu média pro kompenzaci teplotních odchylek u stěn v blízkosti vstupu a výstupu. Vnitřní element tento rozměr dodržuje (viz obrázky 4.2 a 4.3).



**Obr. 4.2:** Řez 3D modelem prvního TLC kalibrátoru se zobrazeným vnitřním elementem

Uvnitř těla proti desce s nátěrem TLC byly vytvořeny ostré hrany s úhlem 90° do hloubky 5 mm s cílem podpořit turbulentní režim toku a eliminovat případné zkratkové proudy.



**Obr. 4.3:** Dimenze vnitřního elementu TLC kalibrátoru

Geometrie vnitřního elementu byla exportována z aplikace Autodesk Inventor do formátu \*.step a následně importována do aplikace ANSYS Design Modeler k úpravám. Výpočtová síť byla navržena v prostředí ANSYS Meshing. Samotný výpočet byl proveden v ANSYS Fluent.

Jako teplotnosné médium byla zvolena voda, pro kterou byly z databáze termofyzikálních vlastností ANSYS Fluent odečteny hodnoty hustoty a dynamické viskozity pro teplotu 20 °C, v blízkosti které měla následná kalibrace probíhat.

HUSTOTA	998.2 kg/m <sup>3</sup>
VISKOZITA DYNAMICKÁ	0.001003 Pas
(hodnoty z databáze Fluent (water-liquid) pro teplotu vody 20 °C)	

**Tab. 4.1:** Data z ANSYS Fluent (water-liquid) - závislost hustoty a dynamické viskozity vody na teplotě

Cílem návrhu provozních parametrů bylo zajistit turbulentní režim toku ve vnitřním elementu kalibrátoru. Chování proudící tekutiny charakterizuje bezrozměrné kritérium, Reynoldsovo číslo, definované vztahem 4.1.

$$Re = \frac{\bar{u}d\rho}{\mu} \quad (4.1)$$

$\bar{u}$  – střední hodnota rychlosti proudění tekutiny,  $d$  – charakteristický rozměr,  
 $\rho$  – hustota,  $\mu$  – dynamická viskozita

Na základě zjištěné hodnoty Reynoldsova čísla lze posuzovat, zda je proudění laminární nebo turbulentní.

V trubce kruhového průřezu lze očekávat:

- laminární proudění pro  $Re < 2300$
- proudění v přechodové oblasti  $2300 < Re < 4000$
- turbulentní proudění pro  $Re > 4000$

Pro návrh vhodného průtoku vody kalibrátorem bylo v blízkosti umístění destičky se vzorkem TLC nalezeno místo s nejmenším průtočným průřezem. V místě průřezu bylo zvoleno  $Re = 5000$  (viz tabulka 4.2) z turbulentní oblasti a z něj byla vypočtena střední rychlost proudění. Umístění průřezu je na straně 38 označeno v obrázku 4.3 kótou s hodnotou 3,536 mm, tedy je nejmenší vzdálenost od hrany vnitřního elementu k protější stěně.

Následující tabulky obsahují vztahy a výpočty charakteristických rozměrů pro zjištění střední vtokové rychlosti jako okrajové podmínky pro simulaci.

<b>REYNOLDSOVO ČÍSLO KRITICKÉ</b>	<b>2500</b>
<b>REYNOLDSOVO ČÍSLO OPTIMÁLNÍ</b>	<b>5000</b>

*Tab. 4.2: Žádaná hodnota Reynoldsova čísla v kritickém průřezu*

<b>RYCHLOST V OBDÉLNÍKOVÉ ČÁSTI</b>	<b>0.794147414 m/s</b>	<b>794.1474 mm/s</b>
<b>ROZMĚRY OBDÉLNÍKOVÉ ČÁSTI</b>	<b>0.003536 m</b>	<b>3.536 mm</b>
	<b>0.03 m</b>	<b>30 mm</b>
<b>PRŮŘEZ OBDÉLNÍKOVÉ ČÁSTI</b>	<b>0.00010608 m<sup>2</sup></b>	<b>106.08 mm<sup>2</sup></b>
<b>OBJEMOVÝ PRŮTOK ČÁSTÍ</b>	<b>8.42432E-05</b>	
<b>CHARAKTERISTICKÝ ROZMĚR</b>	<b>0.006326336 m</b>	<b>6.326336 mm</b>
( $De = 4 \cdot A / O$ )		
(( $4 \cdot \text{průřez} / (\text{omočený\_obvod})$ ))		
(( $4 \cdot v \cdot \check{s} / (2 \cdot (v + \check{s}))$ ))		
<b>REYNOLDSOVO ČÍSLO</b>	<b>5000</b>	
( $Re = (u \cdot De \cdot \rho) / \mu$ )		
( $Re = ((\text{rychlost}) \cdot (\text{rozměr}) \cdot (\text{hustota}) / (\text{dynamická\_viskozita}))$ )		

*Tab. 4.3: Střední rychlost a Reynoldsovo číslo v kritickém průřezu*

Tabulka 4.3 zobrazuje výslednou střední rychlost v kritickém průřezu vypočtenou ze zvoleného Reynoldsova čísla.



Tabulka 4.4 zobrazuje přepočtenou hodnotu střední rychlosti toku z kritického průřezu na průřez vstupního hrdla kalibrátoru za předpokladu zachování průtoku. Tabulka tedy stanovuje okrajovou podmínku vstupní střední rychlosti toku do hrdla.

<b>RYCHLOST PRŮTOKU V HRDLE</b>	<b>1.675964371 m/s</b>	<b>1675.964 mm/s</b>
<b>VNITŘNÍ PRŮMĚR HRDLA</b>	<b>0.008 m</b>	<b>8 mm</b>
<b>VNITŘNÍ PRŮŘEZ HRDLA</b>	<b>5.02655E-05 m<sup>2</sup></b>	<b>50.26548 mm<sup>2</sup></b>
<b>OBJEMOVÝ PRŮTOK HRDLEM</b>	<b>8.42432E-05 m<sup>3</sup>/s</b>	<b>84243.16 mm<sup>3</sup>/s</b>
CHARAKTERISTICKÝ ROZMĚR (Deo = průměr)	0.008 m	8 mm
<b>REYNOLDSOVO ČÍSLO</b>	<b>13343.55043</b>	
(Re = (u*Deo*rho/mi)		
(Re = ((rychlost)*(rozměr)*(hustota)/(dynamická_viskozita)))		

*Tab. 4.4: Střední rychlost a Reynoldsovo číslo ve vstupním hrdle*

Okrajová podmínka vstupní střední rychlosti do kalibrátoru tedy bude rovna  $1,676 \text{ m s}^{-1}$ .

Zadáním a požadavky na výpočet je dále dáno, že výstup z kalibrátoru vede do otevřené nádoby, která není zatížena přetlakem. Okrajová podmínka tlaku na výstupu z kalibrátoru tedy bude rovna 0 Pa.

Přesnost výpočtu výrazně ovlivní kvalita výpočtové sítě, kterou lze při návrhu sledovat například pomocí parametrů Aspect Ratio, Skewness a Orthogonal Quality ve statistikách funkce Meshing v prostředí Ansys Workbench. Klíčové hodnoty kvality elementů výpočtové sítě shrnuje tabulka 4.5. K zjemnění sítě u stěn kalibrátoru byla využita funkce inflation a face sizing. Celkový počet elementů zvolené výpočtové sítě je 1291862.

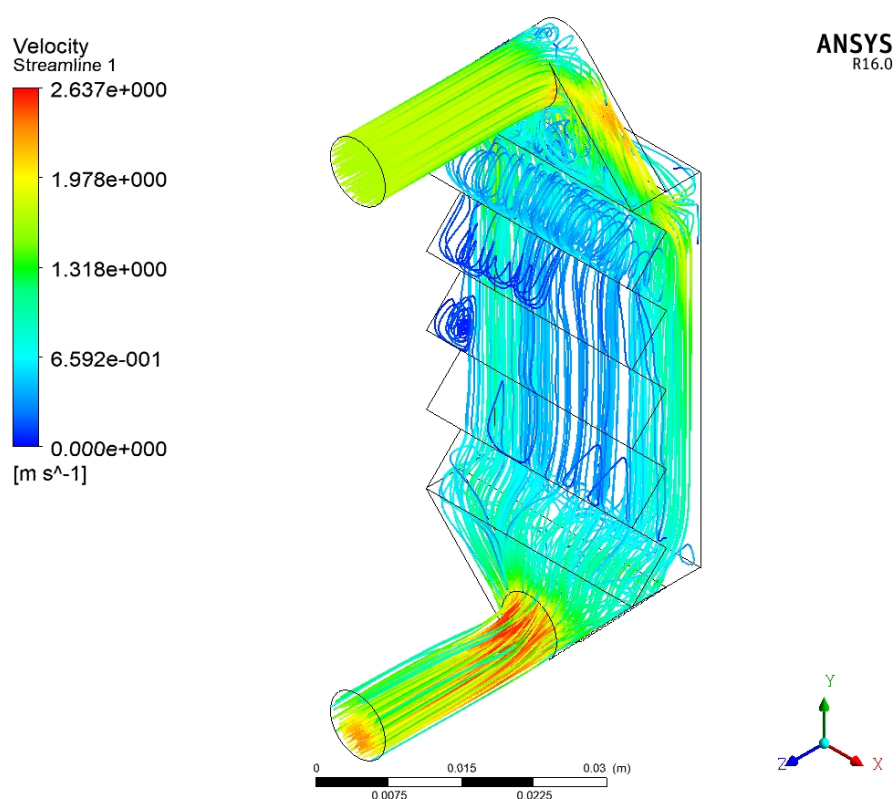
vlastnost elementu	minimum	maximum	průměrná hodnota
aspect ratio	1,1616	25,179	4,4393
skewness	0,00018233	0,95279	0,2214
orthogonal quality	0,10093	0,99991	0,88503
element quality	0,051967	0,9999	0,58463

*Tab. 4.5: Přehled parametrů hodnotících kvalitu výpočtové sítě*

Bližší informace o navržené výpočtové síti uvádí příloha 2.

Výpočet v prostředí ANSYS Fluent byl proveden pro simulaci proudění a přestupu tepla. Byl využit turbulentní model k-epsilon v režimu Enhanced Wall Treatment v kombinaci s modelem energetickým. Výpočet proběhl pro 2000 iterací dle schématu Coupled z Pressure-Velocity coupling.

Cílem výpočtu bylo simulovat především proudění a zjistit přibližnou tlakovou ztrátu v geometrii kalibrátoru pro výběr vhodného čerpadla. Tlaková ztráta od vstupu po výstup kalibrátoru byla v prostředí Fluent vyčíslena na 4807,71 Pa pro zadanou okrajovou podmínku vstupní rychlosti do hrdla (viz tabulka 4.4).



**Obr. 4.4:** Vizualizace proudění první realizované verze kalibrátoru (200 proudů)

Analýza proudění ukázala, že za vstupním hrdlem do vnitřní části kalibrátoru jsou proudy strhávány k bočním stěnám. Proudění procházející středem těla kalibrátoru se vlivem prudkého rozšíření průřezu výrazně zpomalí.

průřez hrdel	kritický průřez	minimum v komoře	maximum v komoře
50,265 mm <sup>2</sup>	106,08 mm <sup>2</sup>	150 mm <sup>2</sup>	300 mm <sup>2</sup>

**Tab. 4.6:** Tabulka průřezů

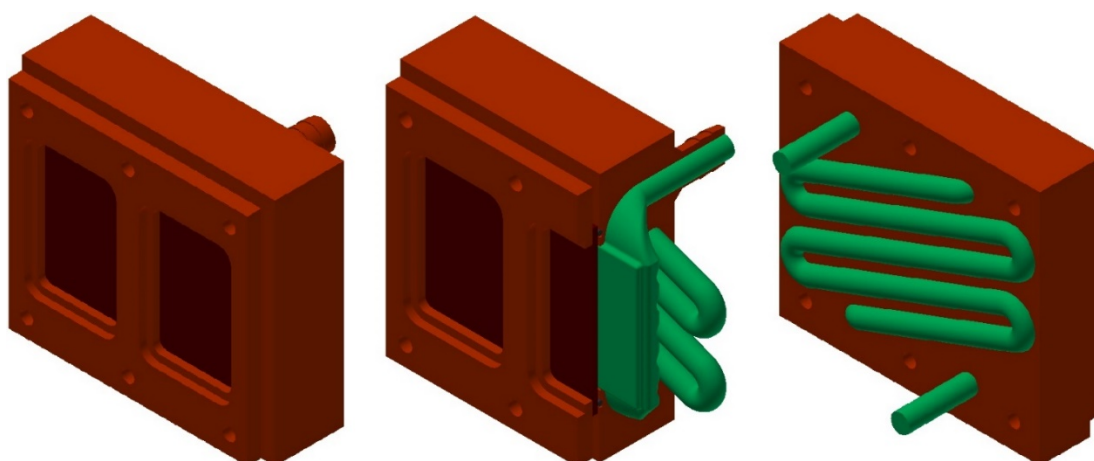
První verze kalibrátoru byla 3D tiskem realizována na tiskárně Prusa i3 MK3S z materiálu PLA. Výtisk byl sestaven a podroben zkoušce těsnosti, která bohužel neproběhla úspěšně.

Výroba modelů 3D tiskem je přesná, ale nezaručuje jednotnost a hladkost povrchu, která je pro modely k hydromechanickým experimentům vyžadována. Tištěný povrch je pórovitý, a tak na několika místech modelu docházelo při zkoušce těsnosti k úniku vody mimo vnitřní element.

Problém nejednotného povrchu může při podobných problémech vyřešit dodatečná úprava vrstvou vhodného plniče, laku nebo naleptáním vhodným rozpouštědlem. Následující navržené modely byly 3D tiskem realizovány z materiálu ABS, který je snadno rozpustný v acetonu či jeho parách. Bylo tedy možné po tisku využít aceton ke sjednocení a vyhlazení nerovností povrchu 3D modelů.

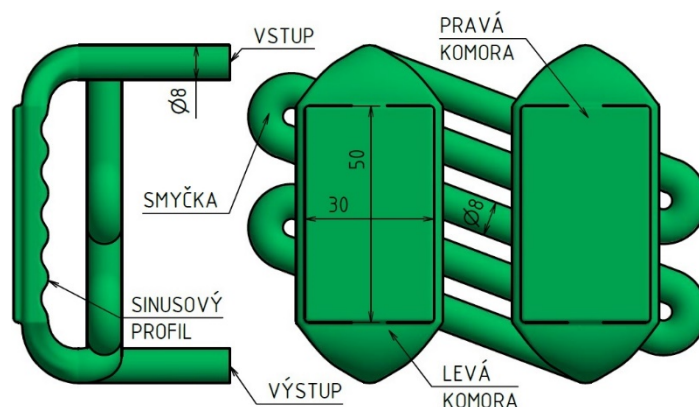
Pro zvolený způsob měření a vyhodnocení dynamické odezvy TLC barev v této práci je třeba, aby byly v kalibrační aparatuře umístěny dva vzorky zapojeny v sérii a mezi nimi umístěna smyčka, která zajistí pevně dané zpoždění protékajícího média. Komory se vzorky TLC je tedy třeba dvě, ideálně situované blízko u sebe, aby bylo možné sledovat obě plochy kamerou.

Následující navržená verze kalibrátoru obsahuje v jednom těle obě komory i zapuštěnou zpožďovací smyčku. Cílem návrhu bylo zjednodušit zapojení, izolovat smyčku a vytvořit kompaktnější tělo kalibrátoru (viz příloha 3 a obrázek 4.5).



**Obr. 4.5:** 3D model druhé verze TLC kalibrátoru se zvýrazněným vnitřním elementem s izolovanou smyčkou

Základní parametry jako je vnitřní průměr vstupního a výstupního hrdla a rozměr plochy pro styk s TLC byl zachován. Výrazně přibylo přechodových ploch, zaoblení a v opozici umístění desky s nátěrem byl vytvořen sinusový profil ve snaze snížit množství ostrých hran a zachovat původní myšlenku proměnného průřezu vnitřního elementu kalibrátoru.



Obr. 4.6: Schéma vnitřního elementu druhé verze TLC kalibrátoru

Postup návrhu a výpočtu modelu druhé verze kalibrátoru byl analogický s postupem uvedeným u verze první. Kritický průřez se nacházel za hrdlem a přechodovou plochou před vstupem do profilované komory.

PŘECHOD (VSTUP Z PŘECHODOVÉ PLOCHY DO STŘEDU KOMORY)		
RYCHLOST V OBDÉLNÍKOVÉ ČÁSTI	0.492553263 m/s	492.5533 mm/s
ROZMĚRY OBDÉLNÍKOVÉ ČÁSTI	0.006 m	6 mm
	0.034 m	34 mm
PRŮŘEZ OBDÉLNÍKOVÉ ČÁSTI	0.000204 m <sup>2</sup>	204 mm <sup>2</sup>
OBJEMOVÝ PRŮTOK ČÁSTÍ	0.000100481	
CHARAKTERISTICKÝ ROZMĚR	0.0102 m	10.2 mm
( $De = 4 \cdot A / O$ )		
(( $4 \cdot \text{průřez} / (\text{omočený\_obvod})$ ))		
(( $4 \cdot v \cdot \xi / (2 \cdot (v + \xi))$ ))		
REYNOLDSOVO ČÍSLO	5000	
( $Re = (u \cdot De \cdot \rho) / \mu$ )		
( $Re = ((\text{rychlost}) \cdot (\text{rozměr}) \cdot (\text{hustota})) / (\text{dynamická\_viskozita})$ )		

Tab. 4.7: Střední rychlost a Reynoldsovo číslo v kritickém průřezu

Numerický model proudění v prostředí ANSYS Fluent se lišil také vstupní okrajovou podmínkou, kdy byla rychlost průtoku do vstupního hrdla zvýšena na  $2 \text{ m s}^{-1}$ .

<b>RYCHLOST PRŮTOKU V HRDLE</b>	<b>1.999003305 m/s</b>	<b>1999.003 mm/s</b>
<b>VNITŘNÍ PRŮMĚR HRDLA</b>	<b>0.008 m</b>	<b>8 mm</b>
<b>VNITŘNÍ PRŮŘEZ HRDLA</b>	<b>5.02655E-05 m<sup>2</sup></b>	<b>50.26548 mm<sup>2</sup></b>
<b>OBJEMOVÝ PRŮTOK HRDLEM</b>	<b>0.000100481 m<sup>3</sup>/s</b>	<b>100480.9 mm<sup>3</sup>/s</b>
<b>CHARAKTERISTICKÝ ROZMĚR</b> (Deo = průměr)	<b>0.008 m</b>	<b>8 mm</b>
<b>REYNOLDSOVO ČÍSLO</b> (Re = (u*Deo*rho/mi) (Re = ((rychlost)*(rozměr)*(hustota)/(dynamická_viskozita)))	<b>15915.49431</b>	

*Tab. 4.8: Střední rychlost a Reynoldsovo číslo ve vstupním hrdle*

Dále byla do modelu zahrnuta i zpoždovací smyčka.

<b>RYCHLOST SMYČKOU</b>	<b>1.999003305 m/s</b>	<b>1999.003 mm/s</b>
<b>VNITŘNÍ PRŮMĚR SMYČKY</b>	<b>0.008 m</b>	<b>8 mm</b>
<b>VNITŘNÍ PRŮŘEZ SMYČKY</b>	<b>5.02655E-05 m<sup>2</sup></b>	<b>50.26548 mm<sup>2</sup></b>
<b>OBJEMOVÝ PRŮTOK SMYČKOU</b>	<b>0.000100481 m<sup>3</sup>/s</b>	<b>100480.9 mm<sup>3</sup>/s</b>
<b>CHARAKTERISTICKÝ ROZMĚR</b> (Deo = průměr)	<b>0.008 m</b>	<b>8 mm</b>
<b>REYNOLDSOVO ČÍSLO</b> (Re = (u*Deo*rho/mi) (Re = ((rychlost)*(rozměr)*(hustota)/(dynamická_viskozita)))	<b>15915.49431</b>	

*Tab. 4.9: Střední rychlost a Reynoldsovo číslo ve zpoždovací smyčce*

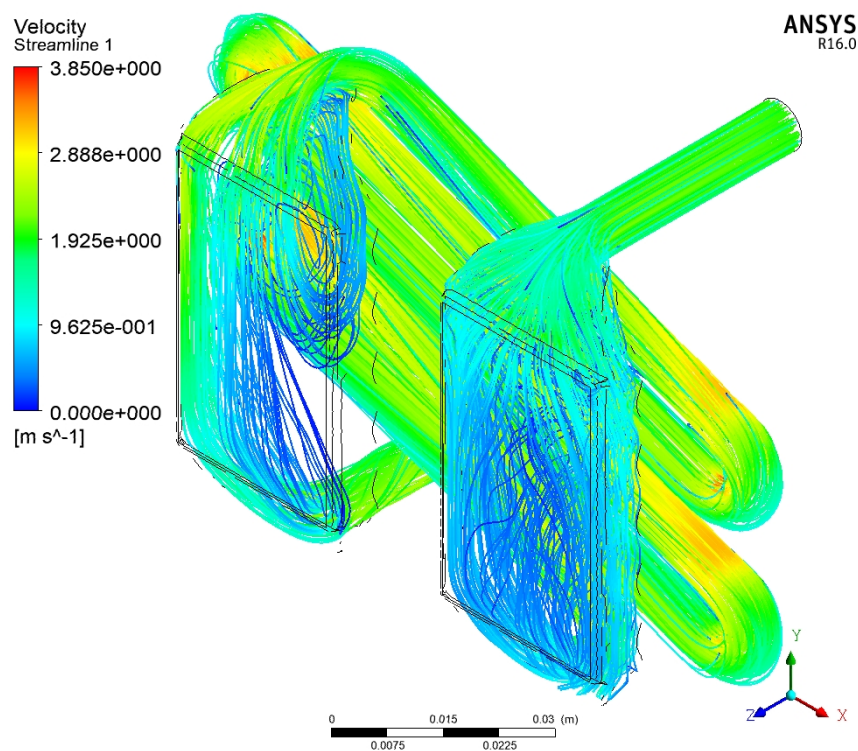
Tabulka 4.10 shrnuje hodnoty základních parametrů popisujících kvalitu výpočtové sítě. K zjemnění sítě u stěn kalibrátoru byla využita funkce inflation a face sizing. Celkový počet elementů zvolené výpočtové sítě byl vlivem její optimalizace na časově náročnější výpočet přechodových stavů zvolen nižší, konkrétně 877372.

<b>vlastnost elementu</b>	<b>minimum</b>	<b>maximum</b>	<b>průměrná hodnota</b>
aspect ratio	1,1597	90,125	3,962
skewness	0,000011187	0,98789	0,21335
orthogonal quality	0,021815	0,99994	0,89407
element quality	0,0016236	0,99999	0,60251

*Tab. 4.10: Přehled parametrů hodnotících kvalitu výpočtové sítě*

Parametry navržené výpočtové sítě shrnuje příloha 4.

K výpočtu v ANSYS Fluent byl využit turbulentní model k-epsilon v režimu Enhanced Wall Treatment v kombinaci s modelem energetickým. Proběhlo 2000 iterací dle schématu Coupled z Pressure-Velocity coupling. Tlaková ztráta pro zadanou okrajovou podmínku vstupní rychlosti byla simulací proudění vyčíslena na 17842,3 Pa.



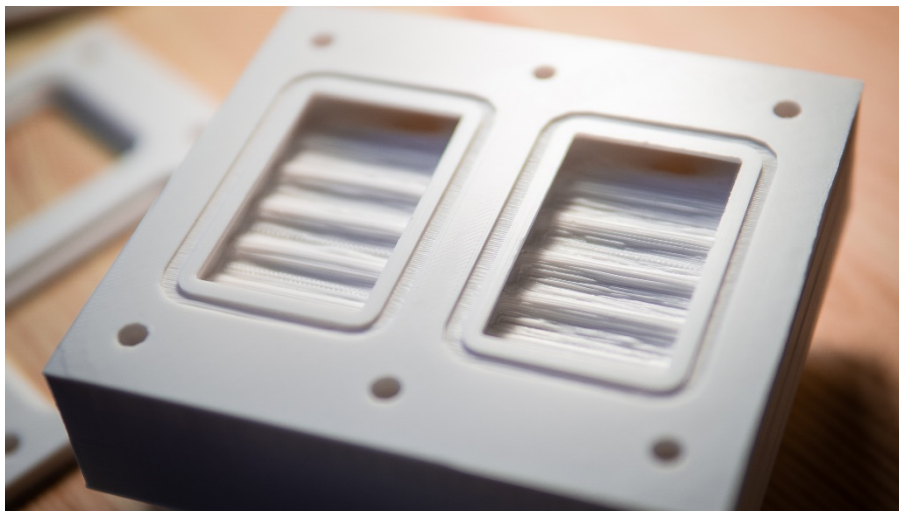
*Obr. 4.7: Vizualizace proudění druhé realizované verze kalibrátoru (200 bodů)*

Vizualizace proudění opět ukázala stržení proudů vstupujících do komor podél bočních stěn a výrazné zpomalení proudů středem kalibrátoru v pravé komoře vlivem rozšíření průřezu. Větší problém ale nastává na vstupu do levé komory. Vlivem umístění kolena za smyčkou s výrazně nižším průřezem se proudy za vstupem do rozšíření stáčí k levému boku komory a v pravé a střední části tím ještě výrazněji klesá rychlost průtoku.

průřez hrdel	kritický průřez	minimum v komoře	maximum v komoře
50,265 mm <sup>2</sup>	204 mm <sup>2</sup>	215.73 mm <sup>2</sup>	272 mm <sup>2</sup>

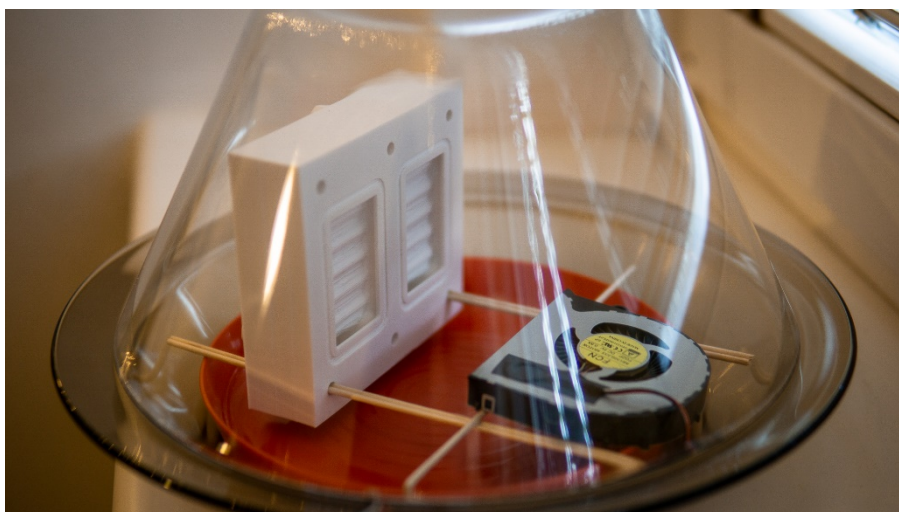
*Tab. 4.11: Tabulka průřezů*

Druhá verze kalibrátoru byla 3D tiskem realizována opět na tiskárně Prusa i3 MK3S, ale v tomto případě z materiálu ABS, který je rozpustný v acetonu nebo acetonových parách. Povrchová úprava výtisku naleptáním acetonem zjemní, sjednotí a utěsní hrubý povrch.



*Obr. 4.8: Výtisk z ABS před uložením do acetonových par*

Jako první metoda úpravy povrchu výtisku bylo zvoleno vložení do acetonových par.



*Obr. 4.9: Výtisk z ABS umístěn do acetonových par*

V acetonových parách byl výtisk uložen dle obrázku 4.9. Pro lepší cirkulaci par kolem výtisku a jejich přístupu i do uvnitř kalibrátoru uložené zpoždovací smyčky byl do utěsněného prostoru k výtisku uložen ventilátor nastavený na nízké otáčky.

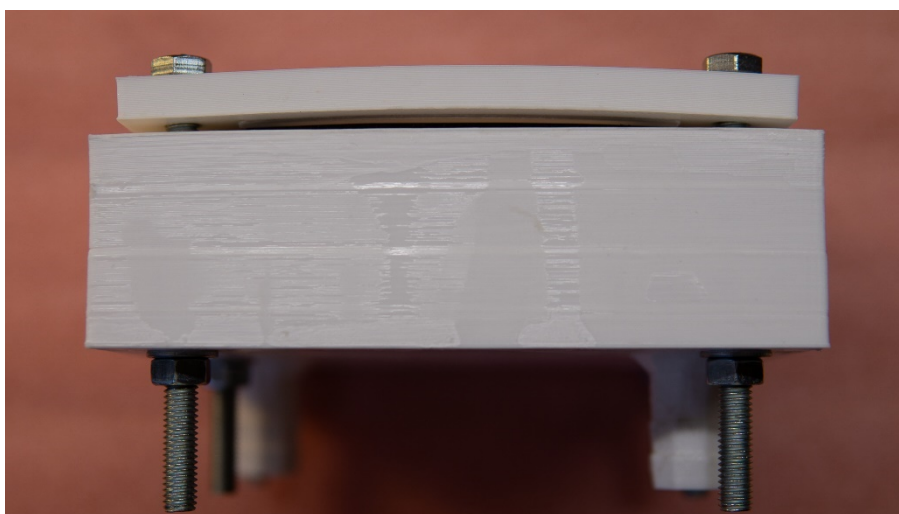
Výtisk byl v parách acetonu uložen a sledován dle obrázku 4.9 po dobu 5, 10, 15 a 30 minut. Po hodině v acetonových parách byl výtisk vyjmut bez znatelných změn povrchu.



*Obr. 4.10: Levá komora po hodině působení acetonových par, pravá komora po přímé aplikaci acetonu na materiál*

Do pravé komory kalibrátoru na obrázku 4.10 byl aceton aplikován přímo na povrch pomocí vatové tyčinky a rozetřen. Nejlepších výsledků utěsnění povrchu tedy bylo dosaženo přímou aplikací acetonu na výtisk nátěrem, nástřikem, nebo rychlým ponořením celé součásti do acetonové lázně.

Po naleptání výtisků acetonem byl model sestaven a podroben zkoušce těsnosti, která opět bohužel neproběhla úspěšně. Rám kalibrátoru nebyl dostatečně tuhý na to, aby vytvořil rovnoměrný tlak na pryžové těsnění pod deskou z plexiskla. Průhybem rámu došlo k netěsnosti.

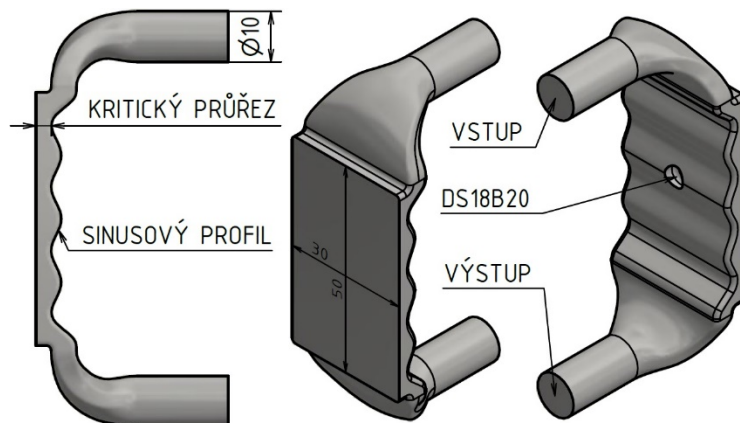


*Obr. 4.11: Průhyb rámu*



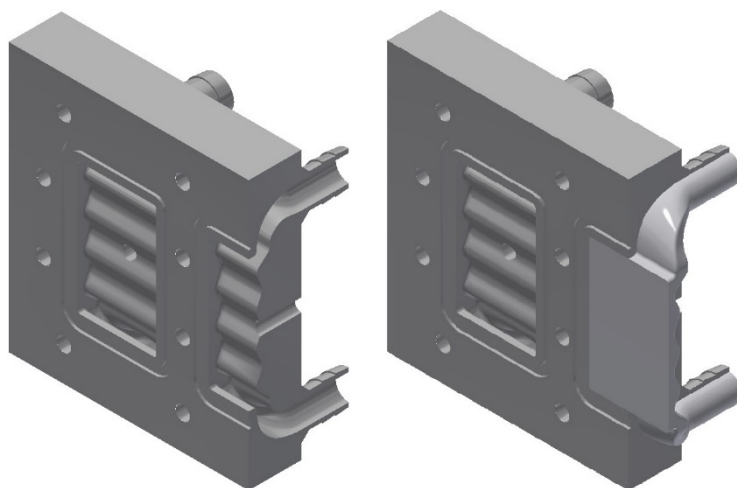
## 4.2 Návrh použitého kalibrátoru

Postup návrhu a výpočtu modelu třetí verze kalibrátoru byl opět analogický s postupem uvedeným u první a druhé realizované verze. Kritický průřez by v tomto případě umístěn do komory, a to na první vrchol zakřivení sinusového profilu.



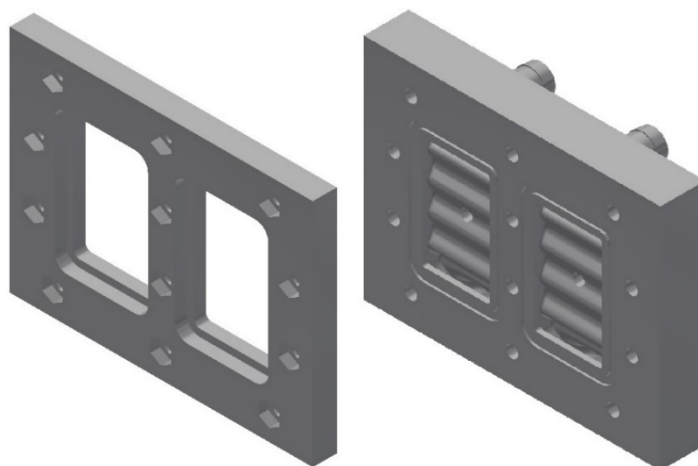
*Obr. 4.12: Schéma vnitřního elementu třetí realizované verze kalibrátoru*

Ve snaze minimalizovat rozdíly v průřezích komorou kalibrátoru a hrdel byl vnitřní průměr vstupního a výstupního hrdla navýšen na 10 mm. Do modelu byla zahrnuta i poloha teplotního čidla DS18B20, které bylo využito pro orientační měření průběhu teploty v kalibrátoru.



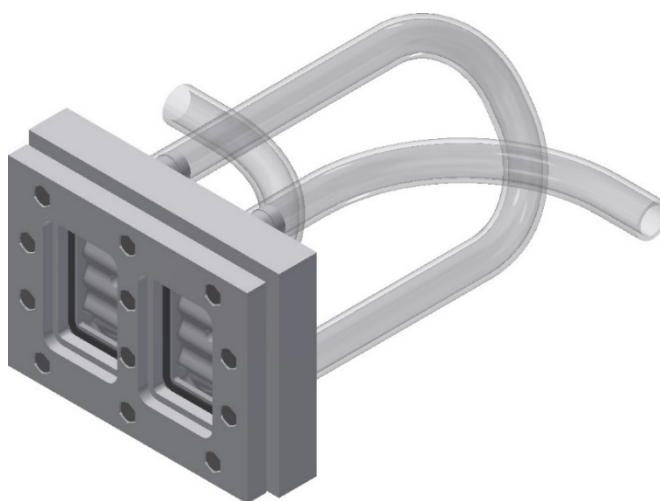
*Obr. 4.13: 3D model třetí verze kalibrátoru*

Kalibrátor byl pro třetí a při experimentu využitou realizaci navržen opět mimo spojovacího materiálu, desky se vzorkem a těsnění jako dvoudílná sestava (výkres v příloze 5). Na základě problému s průhybem rámu a následné netěsnosti kalibrátoru byla konstrukce třetí verze doplněna o více šroubů po obvodu desek s TLC a samotný rám navržen robustnější.



*Obr. 4.14: Rám a tělo třetí verze kalibrátoru*

Model sestavy kalibrátoru včetně zpožďovací smyčky je zobrazen na obrázku 4.15. Smyčka je realizována PVC hadicí délky 350 mm o vnitřním průměru 13 mm. Celková délka smyčky od středu pravé komory do středu komory levé je přibližně 500 mm.



*Obr. 4.15: Sestava třetí verze TLC kalibrátoru*

Návrhový výpočet kalibrátoru proběhl opět v kritickém průřezu pro zvolené Reynoldsovo číslo 5000. Soubor výpočtů provedených v MS Excel je umístěn na příloženém DVD.

<b>HUSTOTA</b>	<b>998.2 kg/m<sup>3</sup></b>
<b>VISKOZITA DYNAMICKÁ</b>	<b>0.001003 Pas</b>
(hodnoty z databáze Fluent (water-liquid) pro teplotu vody 20 °C)	

*Tab. 4.12: Termofyzikální vlastnosti vody pro teplotu 20 °C*

<b>REYNOLDSOVO ČÍSLO KRITICKÉ</b>	<b>2500</b>
<b>REYNOLDSOVO ČÍSLO OPTIMÁLNÍ</b>	<b>5000</b>

*Tab. 4.13: Podmínka pro návrhový výpočet v kritickém průřezu*

MINIMUM PROFILU (VÝŠKA PROFILU VČETNĚ 1mm TĚSNĚNÍ DESKY)		
<b>RYCHLOST V OBDÉLNÍKOVÉ ČÁSTI</b>	<b>0.711739464 m/s</b>	<b>711.7395 mm/s</b>
<b>ROZMĚRY OBDÉLNÍKOVÉ ČÁSTI</b>	<b>0.004 m</b>	<b>4 mm</b>
	<b>0.03 m</b>	<b>30 mm</b>
<b>PRŮŘEZ OBDÉLNÍKOVÉ ČÁSTI</b>	<b>0.00012 m<sup>2</sup></b>	<b>120 mm<sup>2</sup></b>
<b>OBJEMOVÝ PRŮTOK ČÁSTÍ</b>	<b>8.54087E-05</b>	
<b>CHARAKTERISTICKÝ ROZMĚR</b> ( $De = 4 \cdot A / O$ ) $((4 \cdot \text{průřez}) / (\text{omočený\_obvod}))$ $((4 \cdot v \cdot \check{s}) / (2 \cdot (v + \check{s})))$	<b>0.007058824 m</b>	<b>7.058824 mm</b>
<b>REYNOLDSOVO ČÍSLO</b> ( $Re = (u \cdot De \cdot \rho) / \mu$ ) $(Re = ((\text{rychlost}) \cdot (\text{rozměr}) \cdot (\text{hustota}) / (\text{dynamická\_viskozita})))$	<b>5000</b>	

*Tab. 4.14: Stanovení střední rychlosti toku v kritickém průřezu komory kalibrátoru*

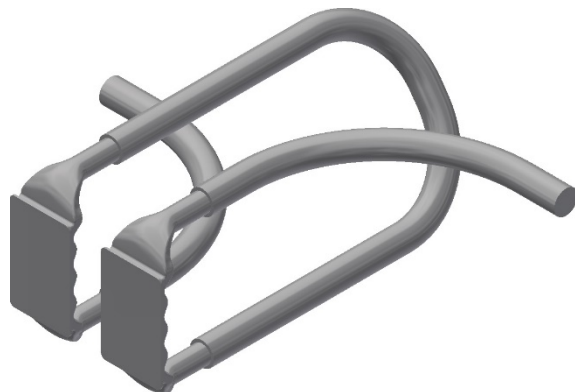
<b>RYCHLOST PRŮTOKU V HRDLE</b>	<b>1.087457798 m/s</b>	<b>1087.458 mm/s</b>
<b>VNITŘNÍ PRŮMĚR HRDLA</b>	<b>0.01 m</b>	<b>10 mm</b>
<b>VNITŘNÍ PRŮŘEZ HRDLA</b>	<b>7.85398E-05 m<sup>2</sup></b>	<b>78.53982 mm<sup>2</sup></b>
<b>OBJEMOVÝ PRŮTOK HRDLEM</b>	<b>8.54087E-05 m<sup>3</sup>/s</b>	<b>85408.74 mm<sup>3</sup>/s</b>
<b>CHARAKTERISTICKÝ ROZMĚR</b> ( $Deo = \text{průměr}$ )	<b>0.01 m</b>	<b>10 mm</b>
<b>REYNOLDSOVO ČÍSLO</b> ( $Re = (u \cdot Deo \cdot \rho) / \mu$ ) $(Re = ((\text{rychlost}) \cdot (\text{rozměr}) \cdot (\text{hustota}) / (\text{dynamická\_viskozita})))$	<b>10822.53613</b>	

*Tab. 4.15: Dopotání vstupní střední rychlosti do hrdla kalibrátoru*

<b>POTŘEBNÝ PRŮTOK ČERPADLEM</b>	<b>8.54087E-05 m<sup>3</sup>/s</b>	<b>307.4714 l/h</b>
----------------------------------	------------------------------------	---------------------

*Tab. 4.16: Stanovení potřebného průtoku čerpadlem k zachování navržených parametrů*

U třetí realizované verze kalibrátoru byl opět vytvořen model proudění v prostředí ANSYS Fluent pro navržené podmínky. Pro tvorbu výpočtové sítě numerického modelu proudění byl vytvořen model vnitřního elementu na základě sestavy na obrázku 4.15.



*Obr. 4.16: Vnitřní element sestavy TLC kalibrátoru (sestavy na obrázku 4.15)*

Model byl pro zkrácení doby výpočtu zjednodušen na následující (obrázek 4.17).



*Obr. 4.17: Zjednodušený model pro návrh výpočtové sítě*

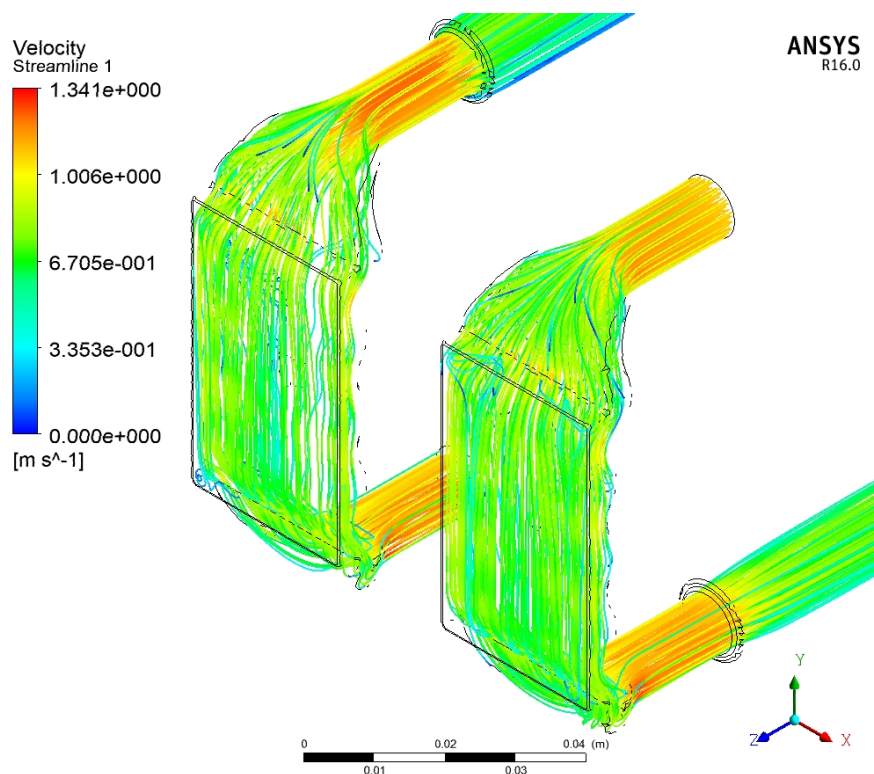
Okrajová podmínka pro výpočet byla stanovena v tabulce 4.15.

Tabulka 4.17 uvádí hodnoty parametrů popisujících kvalitu výpočtové sítě. K zjemnění sítě u stěn kalibrátoru byla využita kombinace funkcí inflation a face sizing. Detaily navržené sítě uvádí příloha 6. Celkový počet elementů sítě je 844311.

vlastnost elementu	minimum	maximum	průměrná hodnota
aspect ratio	1,1654	14,458	3,2085
skewness	0,000020203	0,84952	0,22871
orthogonal quality	0,18225	0,9999	0,88731
element quality	0,11575	0,99988	0,63411

*Tab. 4.17: Přehled parametrů hodnotících kvalitu výpočtové sítě*

Pro výpočet v ANSYS Fluent byl zvolen turbulentní model k-epsilon v režimu Enhanced Wall Treatment v kombinaci s modelem energetickým. Proběhlo 2000 iterací dle schématu Coupled z Pressure-Velocity coupling.



**Obr. 4.18:** Vizualizace proudění třetí realizované verze kalibrátoru (200 bodů)

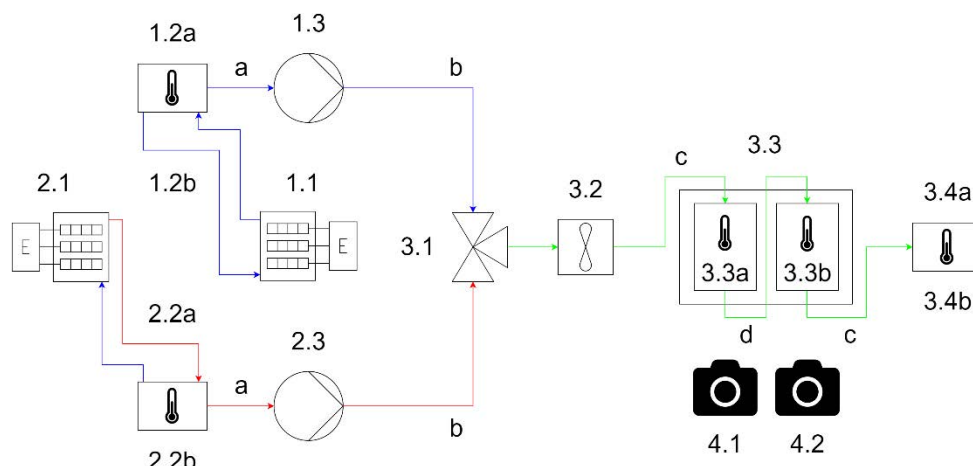
Z vizualizace proudů je patrné, že už nedochází k tak výraznému zpomalení proudů při vstupu do komory, jako tomu bylo prvních dvou verzí kalibrátorů. Tlaková ztráta vypočtena v prostředí ANSYS Fluent je pro zadanou okrajovou podmínku z návrhu rovna 1965,75 Pa včetně zpoždovací smyčky.

<b>průřez hrdel</b>	<b>kritický průřez</b>	<b>minimum v komoře</b>	<b>maximum v komoře</b>
78.54 mm <sup>2</sup>	120 mm <sup>2</sup>	120 mm <sup>2</sup>	180 mm <sup>2</sup>

**Tab. 4.18:** Tabulka průřezů

Průřez kritický, minimální a maximální v tabulce 4.18 je tvaru obdélníku bez započteného zaoblení. Uvedené průřezy tedy budou reálně nižší a rychlost proudění nimi vyšší.

## 4.3 Návrh zapojení aparatury



Obr. 4.19: Schéma experimentu

označení	komponenta
a	(PVC) hadice vnitřního průměru 16 mm a délky 1000 mm
b	(PVC) hadice vnitřního průměru 16 mm a délky 500 mm
c	(6 mm polyethylen) izolovaná (PVC) hadice vnitřního průměru 13 mm a délky 1500 mm
d	(6 mm polyethylen) izolovaná (PVC) hadice vnitřního průměru 13 mm a délky 350 mm
1.1	Chlazení vody Lauda E100
1.2a	Zásobník 30 l – studená voda
1.2b	Teploměr DS18B20 (Arduino) – zásobník studené vody
1.3	Čerpadlo TS45 – studená voda
2.1	Ohřev vody
2.2a	Zásobník 30 l – teplá voda
2.2b	Teploměr DS18B20 (Arduino) – zásobník teplé vody
2.3	Čerpadlo TS45 – teplá voda
3.1	Trojcestný ventil
3.2	Průtokoměr YF-S201 (Arduino)
3.3	Kalibrátor (sestava)
3.3a	Teploměr DS18B20 (Arduino) - pravá komora kalibrátoru
3.3b	Teploměr DS18B20 (Arduino) – levá komora kalibrátoru
3.4a	Zásobník 30 l – výstup z kalibrátoru
3.4b	Teploměr DS18B20 (Arduino) – zásobník výstupní vody
4.1	RGB kamera GoPro HERO5
4.2	IR kamera TIM160

Tab. 4.19: Soupis komponent ke schématu na Obr. 5.4

## Kapitola 5 Realizace aparatury

### 5.1 Příprava kalibrátoru a TLC

K experimentálnímu měření využitá verze kalibrátoru byla 3D tiskem realizována stejně jako verze předchozí na tiskárně Prusa i3 MK3S z materiálu ABS.



*Obr. 5.1: Hrubý výtisk třetí verze kalibrátoru*

Na hrubý výtisk byl nástřikem a rozetřením aplikován aceton ke zjemnění povrchu komor.



*Obr. 5.2: Výtisk po aplikaci acetonu na vnitřní stěny komor*

Barva s termochromními kapalnými krystaly s označením SolarDust 24C, určena k aplikaci nástřikem, byla nanesena ve 4 vrstvách technologií airbrush 24 hodin před experimentem na dvě obdélníkové desky z čírého polypropylenu o rozměrech přibližně 40 x 60 mm a tloušťce 2 mm. Po 12 hodinách schnutí a vytvrzování barev byl povrch překryt vrstvou černé matné barvy RAL 9005M. Barva je voděodolná.



*Obr. 5.3: Mini airbrush TG216*



## 5.2 Parametry použité techniky

### - Termokamera Micro-Epsilon thermoIMAGER TIM 160

- měřicí rozsah  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ , minimální rozlišení  $0,08\text{ K}$
  - vyměnitelná optika, rozlišení snímače  $160 \times 120\text{ px}$
  - snímkovací frekvence až 120 snímků za sekundu při využití USB 2.0
  - hmotnost  $250\text{ g}$ , rozměry  $45 \times 45 \times 62\text{ mm}$
- 
- Kamerou byla před experimentem naměřena hodnota emisivity povrchu desek s nátěrem TLC. Stanovit emisivitu nebylo součástí experimentu, měření proto provedl vedoucí práce komparativní statickou metodou. (emisivita polypropylenové desky s nátěrem TLC,  $\varepsilon = 0,730$ )
  - pro měření byl zvolen rozsah  $-20$  až  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  s rozlišením  $0,1\text{ K}$
  - pro měření byla uvedena teplota prostředí  $24,5\text{ }^{\circ}\text{C}$
  - snímkovací frekvence  $100\text{ Hz}$ , tedy 100 snímků za sekundu



*Obr. 5.4: Micro-Epsilon thermoImager TIM160*

## - Kamera GoPro HERO5 Black

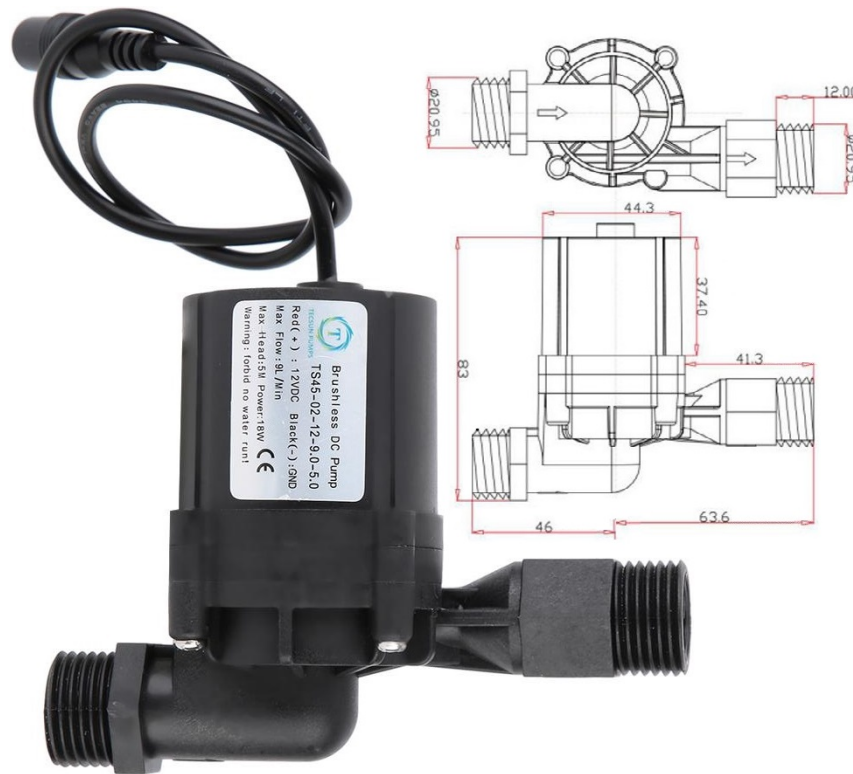
- rozlišení snímače 12 Mpx, velikost snímače 4,55 x 6,17 mm
  - pevná optika s úhlem záběru 90°, 127° a 170°, konstantní clonové číslo f/2,8
  - záznam 1080p v 120 fps, nebo 720p v 240 snímcích za sekundu s maximálním datovým tokem 60 Mb/s v kodeku H.264
  - hmotnost 118 g, rozměry 62 x 45 x 33 mm
- 
- pro měření zvolena snímkovací frekvence 120 snímků za sekundu záznamu 1080p
  - rychlost řádkovací elektronické závěrky 1/120 s, ISO 400
  - zvolen neutrální barevný profil, vyvážení bílé nastavením teploty 4500 K
  - minimalizace odlesků polarizačním filtrem



*Obr. 5.5: GoPro HERO5 Black*

- **Čerpadlo Tecsun TS45-02-12-9.0-5.0**

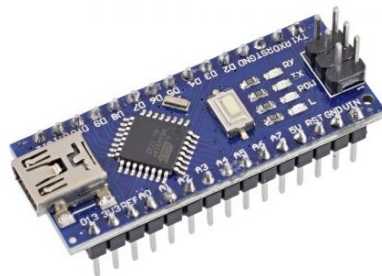
- odstředivé magnetické čerpadlo o výkonu 18 W, napájení 12 V DC
- průtok  $9 \text{ l min}^{-1}$ , maximální výtlak 5 m
- připojení G1/2 na vstupu i výstupu



*Obr. 5.6: Tecsun TS45-02-12-9.0-5.0*

- **Vývojová deska Arduino Nano R3**

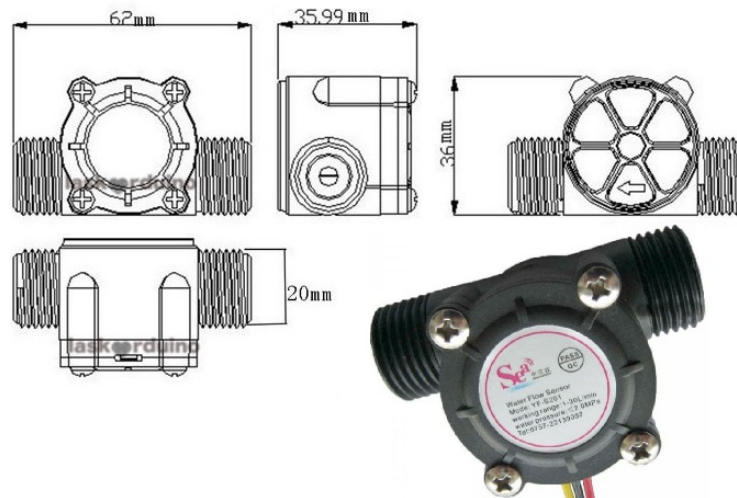
- klon s čipem ATmega328P
- využito ke sledování teplot a rychlosti průtoku vody aparaturou



*Obr. 5.7: Arduino Nano R3*

## - Digitální průtokoměr YF-S201

- měření v rozsahu průtoků 1 l min<sup>-1</sup> až 30 l min<sup>-1</sup>
  - maximální provozní tlak 1,75 MPa, maximální provozní teplota 80 °C
  - napájení v rozsahu 5 V až 18 V, maximální spotřeba 15 mA
  - přesnost měření ± 5 % rozsahu
- 
- průtokoměr byl zapojen do digitálního portu D2 desky Arduino
  - deskou Arduino bylo zajištěno nejen napájení, ale i vyhodnocení dat
  - vyhodnocení dat proběhlo na základě získaných pulzních signálů z Hallovy sondy uložené v těle průtokoměru
  - před experimentálním měřením byl průtokoměr kalibrován
  - naměřený průtok slouží k sestavení matematického modelu experimentu



**Obr. 5.8:** YF-S201

## - Digitální čidlo teploty DS18B20

- teplotní rozsah  $-55\text{ °C}$  až  $125\text{ °C}$ , v rozsahu  $-10\text{ °C}$  až  $85\text{ °C}$  s přesností  $\pm 0,5\text{ °C}$ , v rozsahu  $20\text{ °C}$  až  $40\text{ °C}$  s přesností do  $\pm 0,3\text{ °C}$
  - napájení  $3,0\text{ V}$  až  $5,5\text{ V}$
  - rozměry vodotěsného pouzdra z nerez 6 x 50 mm, délka kabelu 3 m
- v aparatuře bylo zapojeno celkem pět čidel DS18B20 zapojením OneWire (viz obrázek 5.14) do digitálního portu D3 desky Arduino pro sledování teplot v zásobnících studené a teplé vody, orientačnímu sledování průběhu teplot v komorách kalibrátoru a teploty na výstupu z aparatury
  - napájení čidel rovněž jako vyhodnocení dat zajistila deska Arduino Nano



*Obr. 5.9: DS18B20*

- **Termostat Lauda E100**

- tepelný výkon 1500 W
- pro vodní lázeň využitelné v rozsahu teplot 5 °C až 90 °C
- požadovanou teplotu z podporovaného rozsahu lze nastavit v 0,1 °C krocích
  - zařízení bylo před a v průběhu experimentu využito k dochlazování vody



*Obr. 5.10: Lauda E100*

- **LED osvětlení Yongnuo YN1410**

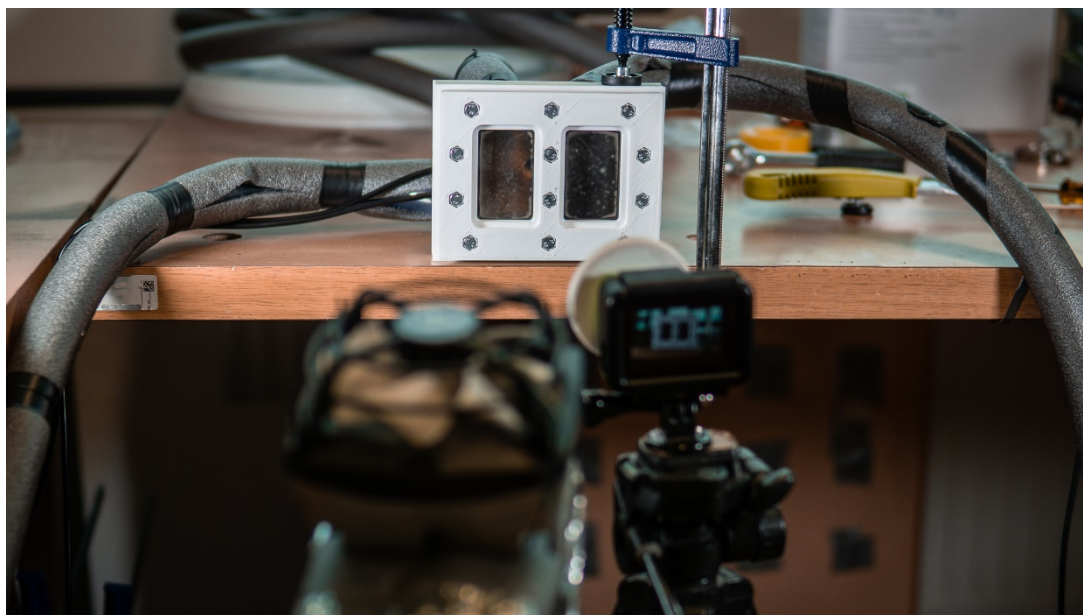
- 140 ks vysoce svítivých LED diod s barevnou teplotou 5500 K, napájeno 9 V / 2 A
  - kalibrátor osvětlován dvěma světly s difuzními filtry z obou stran v přibližně stejném úhlu 45° a vzdálenosti 1 m



*Obr. 5.11: Yongnuo YN1410*

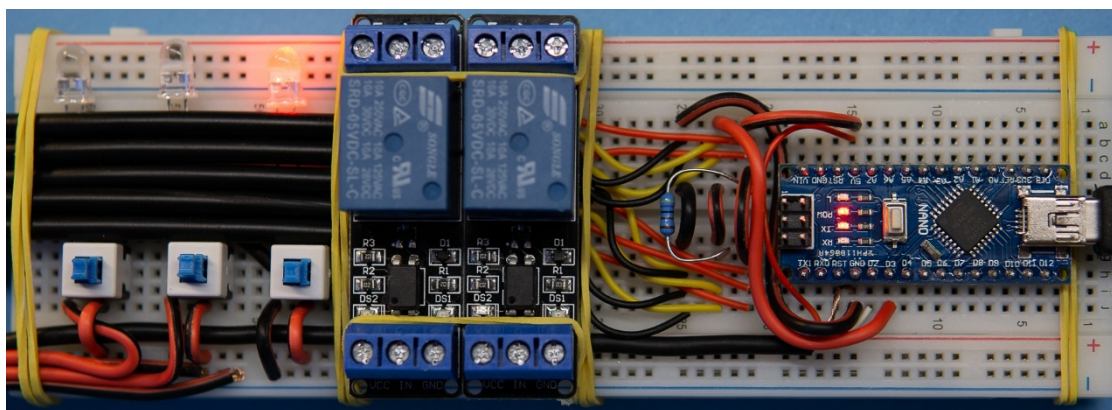
## 5.3 Zapojení aparatury

Experimentální aparatura byla zapojena bez výrazných rozdílů od navrženého schématu (obrázek 4.19). Kamery byly umístěny ve vzdálenosti přibližně 0,5 m od kalibrátoru. Osvětlení bylo umístěno na levé i pravé straně ve vzdálenosti přibližně 1 m tak, aby světlo dopadlo na kalibrátor pod úhlem přibližně 45 °. Přívodní a výstupní hadice vody i zpoždovací smyčka byly izolovány polyethylenovou izolací tloušťky 6 mm. Prostor za kamerami byl odstíněn černou textilí (není v záběru obrázku 5.12) pro minimalizaci tepelných odrazů od desek se vzorky TLC.

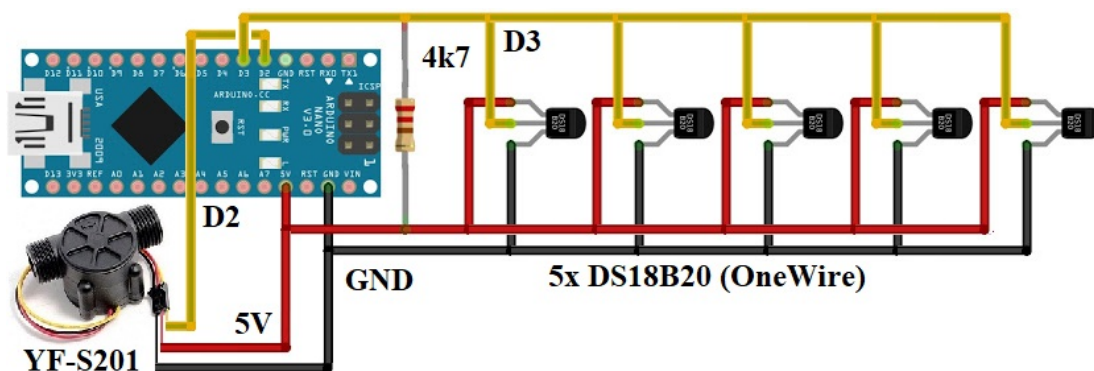


*Obr. 5.12: Umístění kamer před sestavou kalibrátoru*

Pro sledování teploty vstupní vody v zásobnících a rychlosti jejího průtoku aparaturou byla využita vývojová deska Arduino s digitálními snímači teploty DS18B20 a průtokoměrem YF-S201.



*Obr. 5.13: Umístění a reálné zapojení desky Arduino v nepájivém poli*



*Obr. 5.14: Zapojení vývojové desky Arduino Nano*

Vývojové desky Arduino umožňují zapojit paralelně v režimu OneWire až 50 kusů digitálních teplotních čidel DS18B20 do jednoho digitálního portu. Každé čidlo má svojí unikátní adresu, podle které je deskou rozpoznáno a vyhodnoceno.

Při experimentálním měření bylo využito takto zapojených teplotních čidel 5 kusů do portu D3 (schéma na obrázku 5.14) v kombinaci s digitálním průtokoměrem YF-S201 v portu D2.

Pro vyhodnocení digitálních signálů z čidel teploty a průtokoměru vývojovou deskou byl napsán program uvedený v příloze 7. Navržený program umožňuje v kombinaci s volně dostupnou aplikací PLX-DAQ pro MS Excel vypisovat získané hodnoty v intervalu 1 až 2 s do listu tabulek. Získaná data lze pak zpracovat v Matlabu.



# Kapitola 6 Experimentální měření

## 6.1 Metodika měření

Vzorky TLC na tenkých polypropylenových deskách v kalibrátoru byly pravidelně vystavovány skokovým změnám teploty vstupní vody. Změna teploty vody byla prováděna každých 5 s manuálním přepínáním trojcestného ventilu mezi zdrojem studené a teplé vody v 30 litrových zásobnících.

Měření spočívalo v současném sledování vzorků TLC termokamerou i barevnou kamerou. Zároveň byla průtokoměrem a deskou Arudino Nano sledována hodnota průtoku aparaturou a teploty vody v zásobnících.

Měření proběhla celkem dvě, každé trvalo přibližně dvě minuty a v každém proběhlo mezi 20 až 30 teplotními přechody v kalibrátoru. Pro následné vyhodnocení bylo vybráno druhé měření.

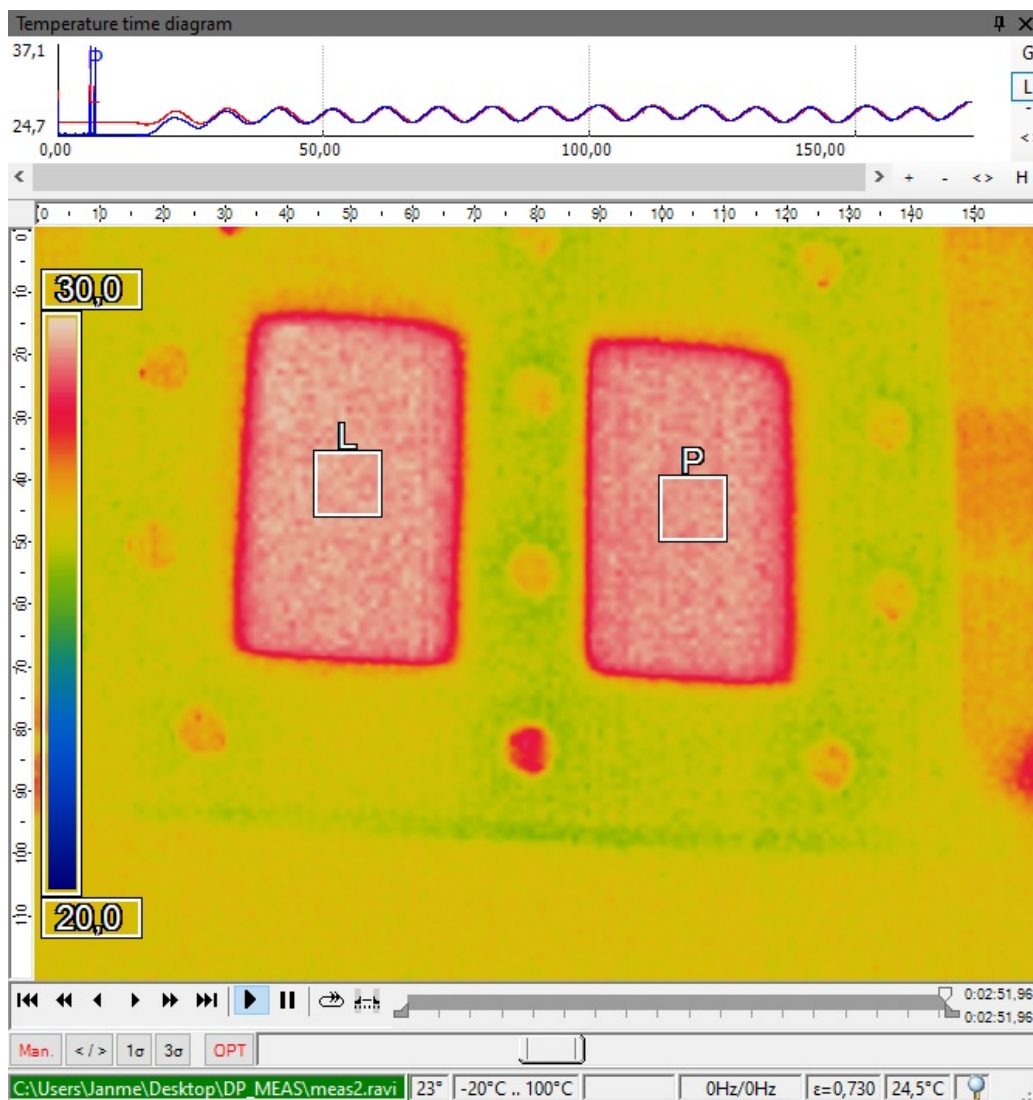
K vyhodnocení měření byla zvolena metoda hledání inflexních bodů vybraných teplotních přechodů, zjištění polohy inflexních bodů na časové ose a výpočet časové vzdálenosti mezi nalezenými inflexními body. Pevně daná izolovaná zpožďovací smyčka kalibrátoru a matematický model měření umožňují stanovit spolu s časovou vzdáleností inflexních bodů přechodových křivek časovou odezvu barev na teplotní skok.

Za předpokladu, že je naměřená časová vzdálenost mezi inflexními body přechodových křivek větší než hodnota zpoždění ve smyčce z matematického modelu měření, je možné stanovit čas reakce barev na teplotní skok.

## 6.2 Vyhodnocení

Pro měření termokamerou TIM160 byl stanoven předpoklad, že lze zanedbat vliv tloušťky polypropylenových desek na následně vyjadřované zpoždění. V deskách ze stejného materiálu o stejné tloušťce bude zpoždění stejné a v hledaném časovém rozdílu se tedy neprojeví.

Před měřením byla vedoucím práce stanovena emisivita polypropylenových desek komparativní statickou metodou s využitím teploměru PT1000. Emisivita desek  $\varepsilon = 0,730$ .



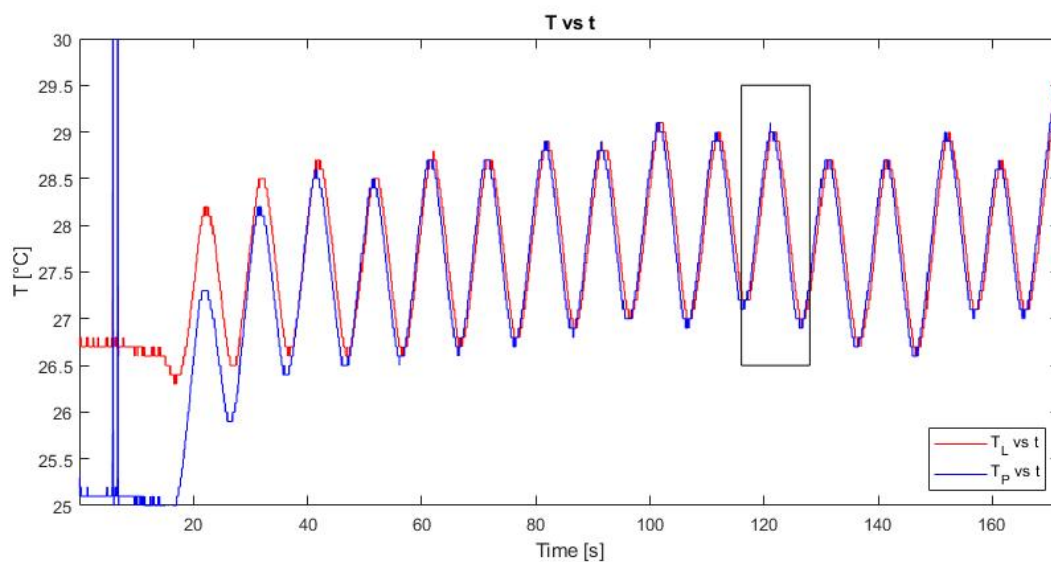
*Obr. 6.1: Vyhodnocení záznamu termografických dat*

Data zaznamenaná termokamerou byla v aplikaci TIM connect převedena do časového diagramu pro zvolené oblasti v termogramu. Do diagramu v horní části obrázku 6.1 je vykreslena závislost průměrné teploty v zobrazených oblastech levé a pravé komory na čase.

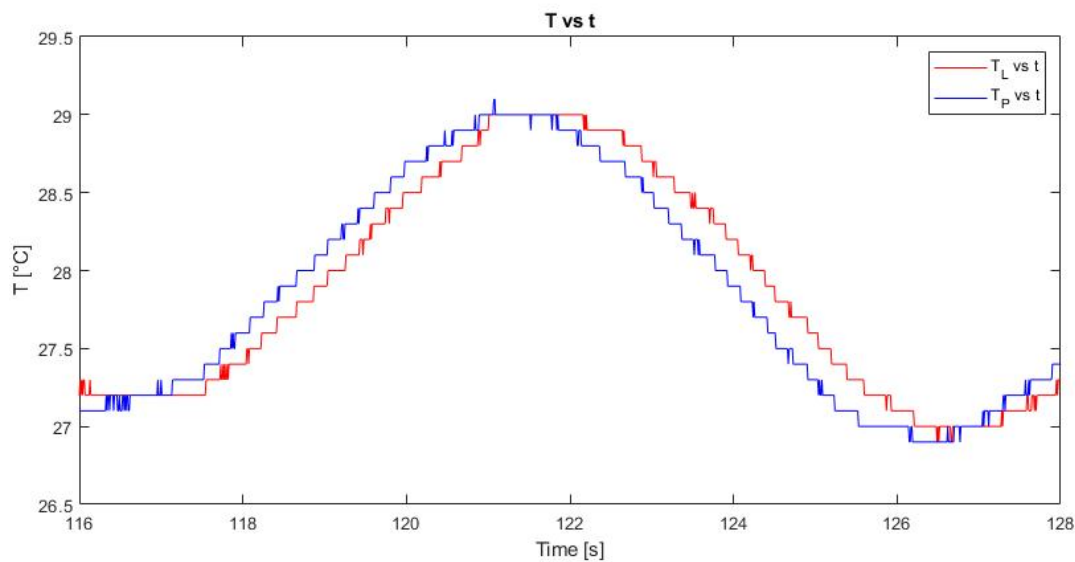
Spodní řádek obrázku 6.1 zobrazuje zvolený teplotní rozsah měření, informaci o emisivitě a teplotě v prostředí.

Data závislosti teplot na čase byla z aplikace TIM connect exportována do MS Excel a následně převedena na textový soubor ke zpracování v prostředí Matlab.

V Matlab byl vytvořen skript, který exportovaná data z TIM connect načte a zobrazí vybrané dva po sobě následující přechodové stavy. Pro zobrazení postupu vyhodnocení bylo vybráno v pořadí jedenácté zahřívání a chlazení. (obrázek 6.3).

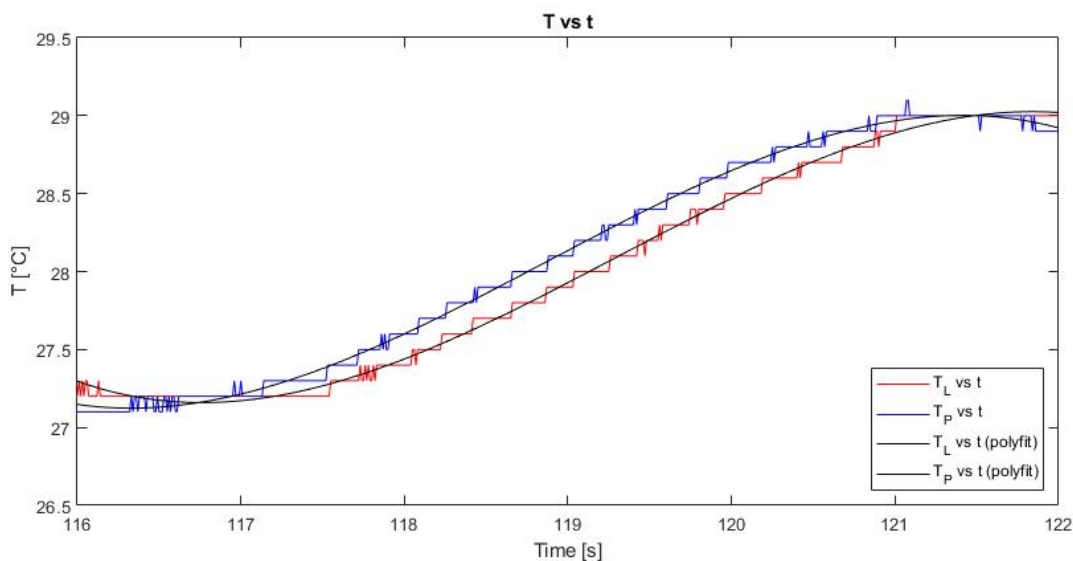


*Obr. 6.2: Průběh druhého měření, závislost teplot levé a pravé oblasti na čase*



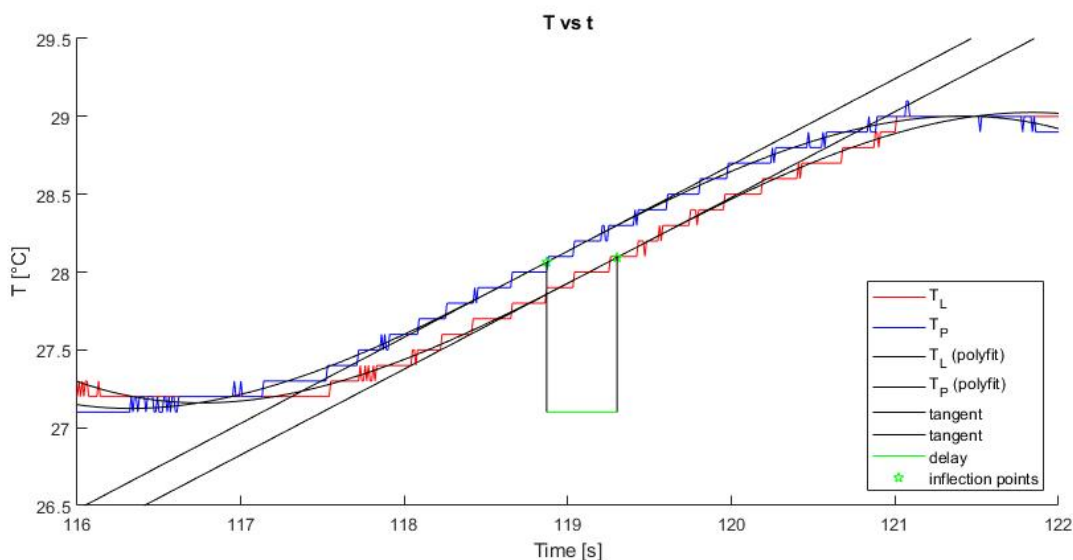
*Obr. 6.3: Detail vybraných přechodových křivek*

Data teplotních přechodů obsahují šum, který se lze eliminovat filtrem, nebo nahrazením polynomickeou funkcí pro přesnější hledání inflexního bodu přechodové křivky. Pro hledání inflexních bodů dat z termokamery bylo využito nahrazení polynomickeou funkcí třetího řádu.

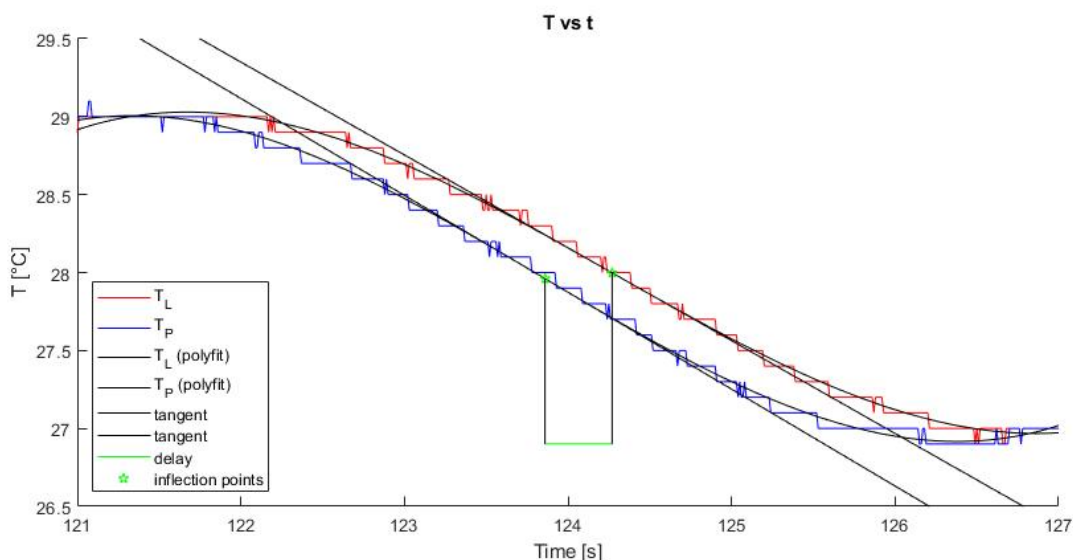


**Obr. 6.4:** Nahrazení teplotního přechodu zahřívání funkcí polyfit

Nalezením inflexních bodů přechodových křivek po náhradě dat polynomickeou funkcí je možné stanovit časovou vzdálenost mezi body, která je v tomto případě při zahřívání rovna 430 ms.



**Obr. 6.5:** Vyznačení inflexních bodů přechodových křivek při zahřívání



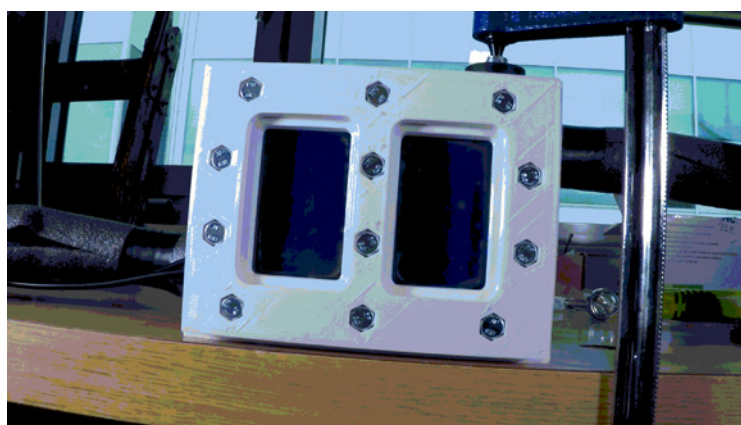
**Obr. 6.6:** Vyznačení inflexních bodů přechodových křivek při chlazení

Při aplikaci stejného postupu z vyhodnocení průběhu zahřívání na průběh chlazení, je zjištěná časová vzdálenost mezi inflexními body rovna 410 ms.

Použitá snímkovací frekvence termokamery byla 100 Hz, tedy 100 snímků za sekundu, tím je dáno teoretické rozlišení měření 10 ms.

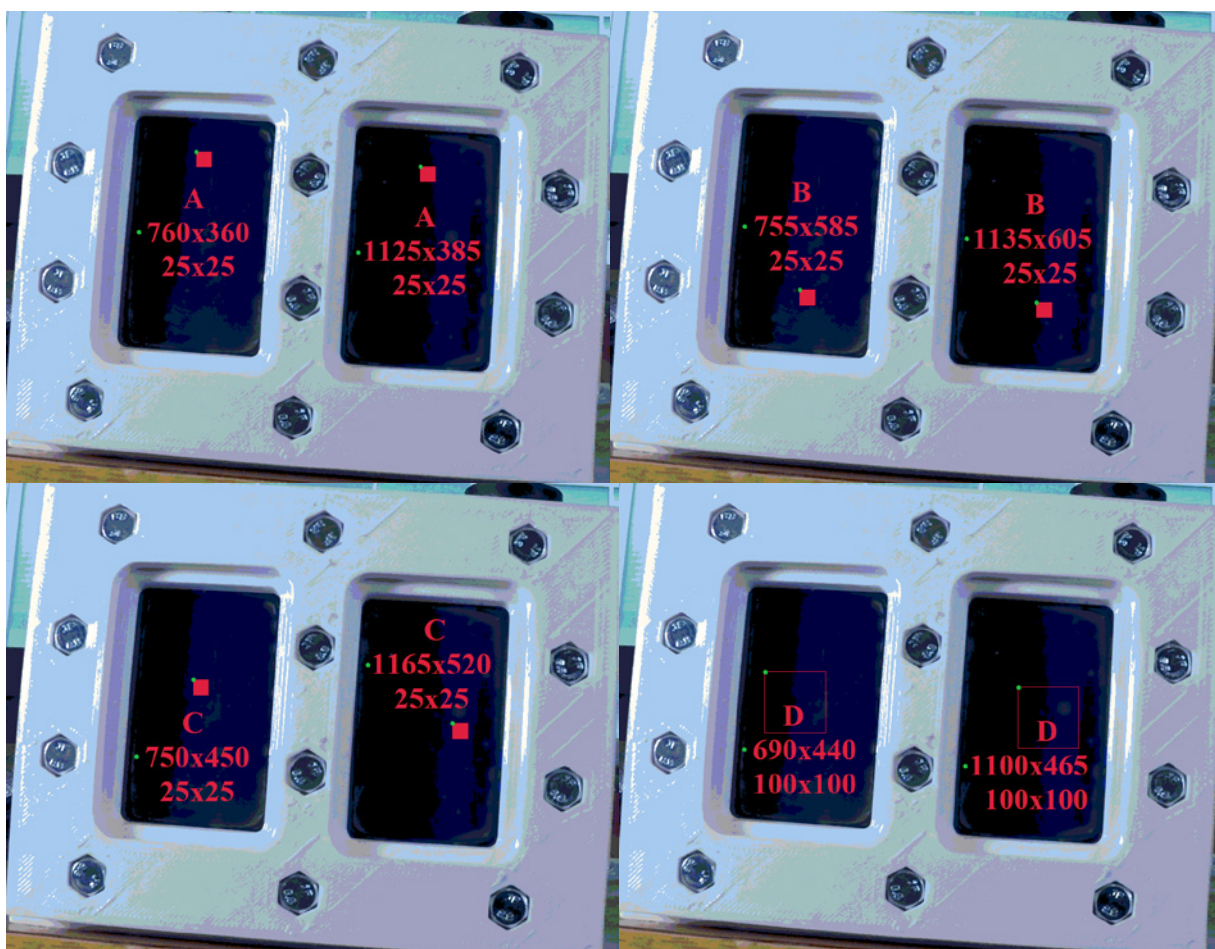
Vyhodnocení obrazových dat zachycených barevnou kamerou GoPro probíhalo, podobně jako u termokamery, z podstatné části v prostředí Matlab. Základní úpravou dat byl převod z trojrozměrného barevného prostoru RGB do modelu HSV, pro který existují převodové vztahy. Tento převod umožní v prostředí Matlab definovaná funkce `rgb2hsv`, která byla při tomto vyhodnocení využita (navržený skript na straně 71).

Pro převod obrazových dat na barevný odstín HUE byla vybírána vhodná oblast obrazových bodů. Pro přehlednější výběr byl pro náhodný přechodový stav vyjmut z videosekvence snímek, na který byl aplikován filtr omezení na 256 barev.



**Obr. 6.7:** Snímek z měření po aplikaci filtru omezení na 256 barev

Výběr probíhal ze čtyř čtvercových oblastí, které leží v přibližně stejné poloze a mají přibližně stejný odstín barvy. Zelený bod označuje polohu levého horního rohu a tedy i souřadnici, od které se čtvercový rozsah počítá.



*Obr. 6.8: Výběr obrazových bodů pro vyhodnocení*

Vyhodnocení proběhlo s nejlepšími výsledky pro největší z uvedených rozsahů, rozsah D, který se svým rozměrem zároveň nejvíce podobá zvolenému rozsahu při vyhodnocení dat z termokamery.

Výstupem navrženého skriptu v prostředí Matlab je textový soubor se čtyřmi sloupci. První sloupec uvádí číslo snímku sekvence, druhý odpovídající čas, třetí a čtvrtý sloupec uvádí hodnoty HUE pro levou a pravou oblast v závislosti na daném snímku a čase.

```

... 14760 123.000 162 147
    14761 123.008 165 149
    14762 123.017 164 148
    14763 123.025 164 148
    14764 123.033 164 148 ...

```

## Matlab skript pro převod obrazových dat z oblasti D na průměrný odstín HUE

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% IMPORT DATA %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

RGB_VIDEO = VideoReader('meas2.mp4'); %source
    fps = 120; %frames per second

    HUE = 360; %=1 values 0-1, =360 values 0-360 (degrees)

    fromHL = 440; %LEFT FIELD (upper left point) horizontal coordinate
        toHL = 540; % horizontal coordinate
    fromVL = 690; % vertical coordinate
        toVL = 790; % (lower right point) vertical coordinate

    fromHP = 465; %RIGHT FIELD
        toHP = 565;
    fromVP = 1100;
        toVP = 1200;

    DATA = fopen('TLC_HUE_MEAS_2_dataD360.txt','w'); %write .txt

    %data format [ k t HUE_FLD_L_val_MEAN HUE_FLD_P_val_MEAN ]
    %data format [frame time HUE(mean value left) HUE(mean value right)]

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

    k = 1; %first frame
    rangeHL = toHL - fromHL + 1;
    rangeVL = toVL - fromVL + 1;
    rangeHP = toHP - fromHP + 1;
    rangeVP = toVP - fromVP + 1;

while hasFrame(RGB_VIDEO)

    RGB_FRAMES = readFrame(RGB_VIDEO);
        HSV = rgb2hsv(RGB_FRAMES);

        HUE_FLD_L_0_1 = HSV(fromHL:toHL,fromVL:toVL,1); %values 0-1
        HUE_FLD_L_val = HUE_FLD_L_0_1*HUE; %degrees
        HUE_FLD_L_val_RES = reshape(HUE_FLD_L_val,rangeHL*rangeVL,1);
        HUE_FLD_L_val_MEAN = mean(HUE_FLD_L_val_RES); %average

        HUE_FLD_P_0_1 = HSV(fromHP:toHP,fromVP:toVP,1); %values 0-1
        HUE_FLD_P_val = HUE_FLD_P_0_1*HUE; %degrees
        HUE_FLD_P_val_RES = reshape(HUE_FLD_P_val,rangeHP*rangeVP,1);
        HUE_FLD_P_val_MEAN = mean(HUE_FLD_P_val_RES); %average

        t = k/fps; %seconds

    HUE_FLD_LP_val_MEAN_t_k = [k t HUE_FLD_L_val_MEAN HUE_FLD_P_val_MEAN];

        fprintf(DATA,'%3.0f %3.3f %8.0f %8.0f\n',HUE_FLD_LP_val_MEAN_t_k);

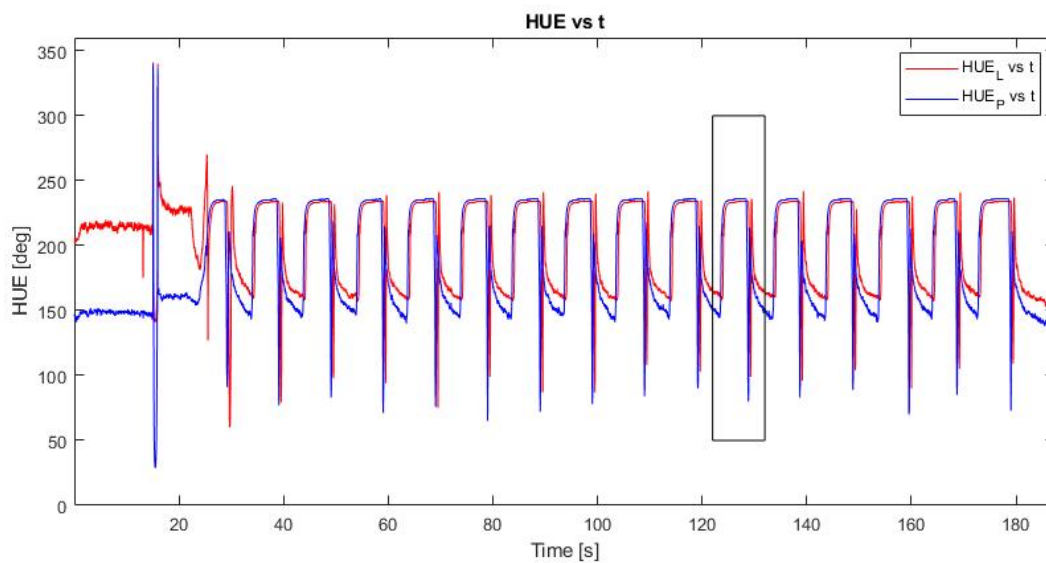
        k = k + 1; %next frame

end

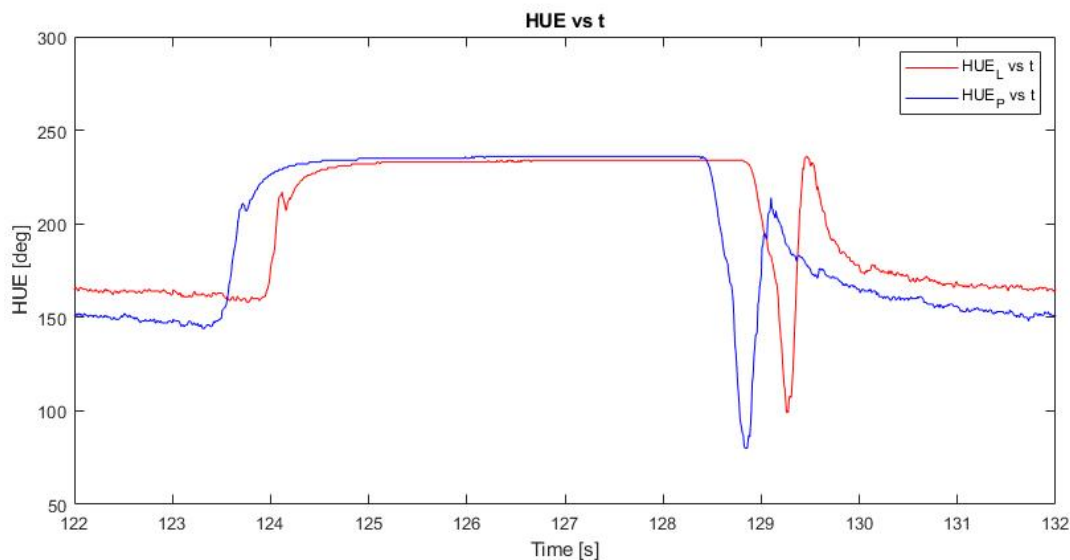
        fclose(DATA);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% END %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

Vyhodnocení časové vzdálenosti inflexních bodů přechodových křivek z převedených dat proběhlo podobně jako u vyhodnocení dat z termokamery.



*Obr. 6.9: Průběh druhého měření, závislost HUE levé a pravé oblasti na čase*

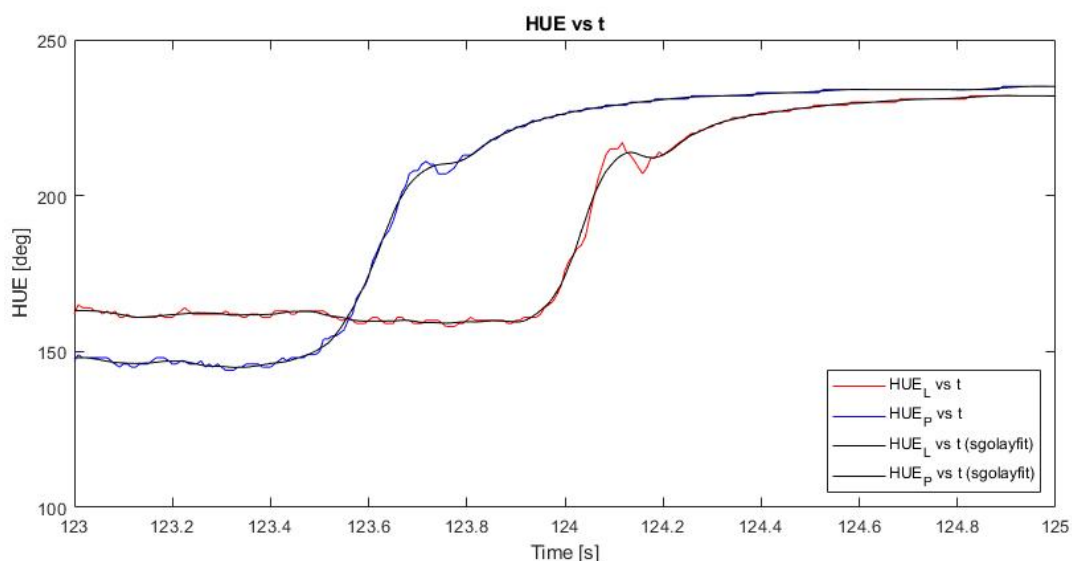


*Obr. 6.10: Detail vybraných přechodových křivek odstínů HUE*

Z detailu vybraných přechodů je patrné, že data odstínů HUE obsahují šum a v jejich průběhu dochází k výrazným skokům, zejména v přechodu chlazení.

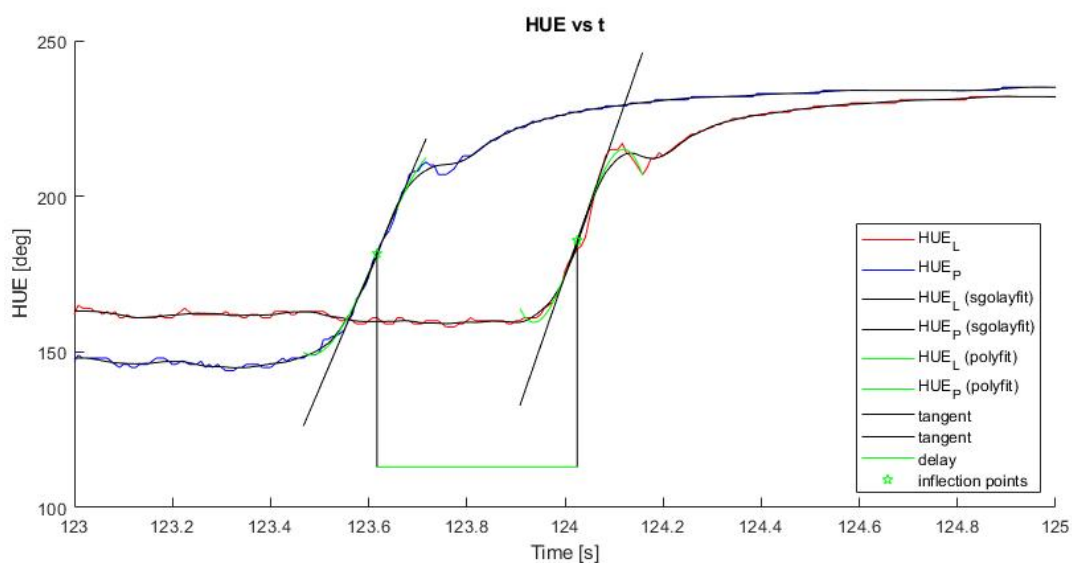


Skoky a šum komplikují hledání inflexních bodů, proto byl na data aplikován Savitzky-Golay filtr, který zjemní šum, vyhladí data a zachová statistickou informaci o výrazných skocích.



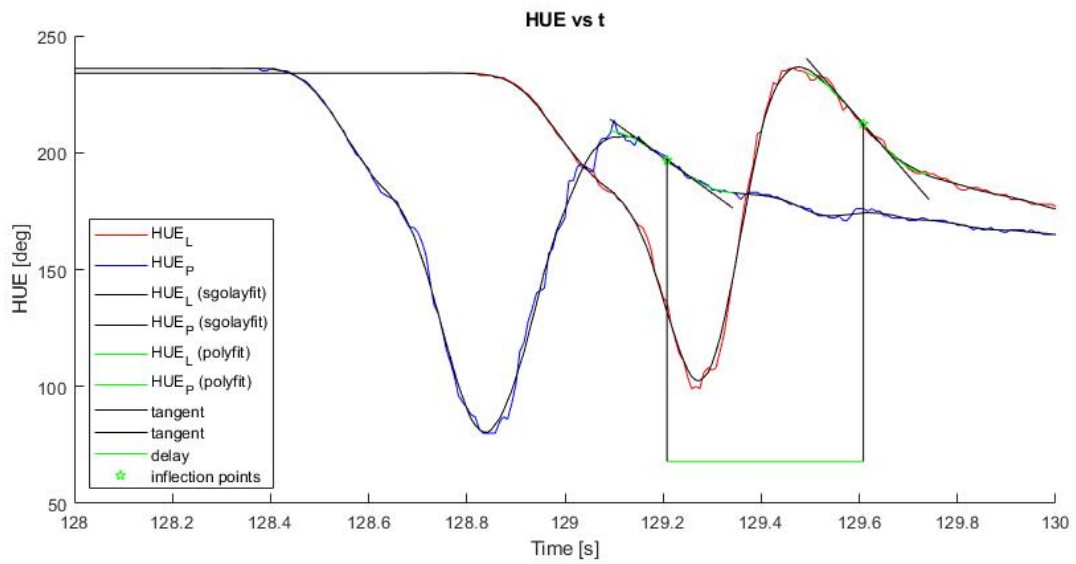
**Obr. 6.11:** Aplikace Savitzky-Golay filtru

Následně byla data v místě přechodu nahrazena polynomickou funkcí třetího řádu.



**Obr. 6.12:** Vyznačení inflexních bodů přechodové křivky HUE při zahřívání

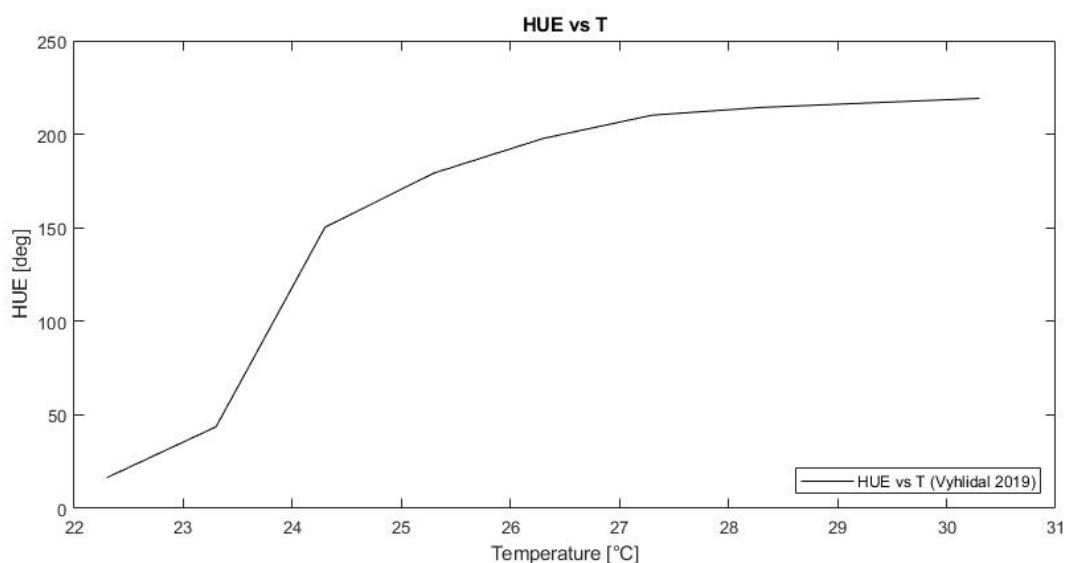
Nalezené inflexní body pro přechodovou křivku HUE při zvyšování teploty jsou od sebe na časové ose vzdáleny 408 ms.



*Obr. 6.13: Vyznačení inflexních bodů přechodové křivky HUE při chlazení*

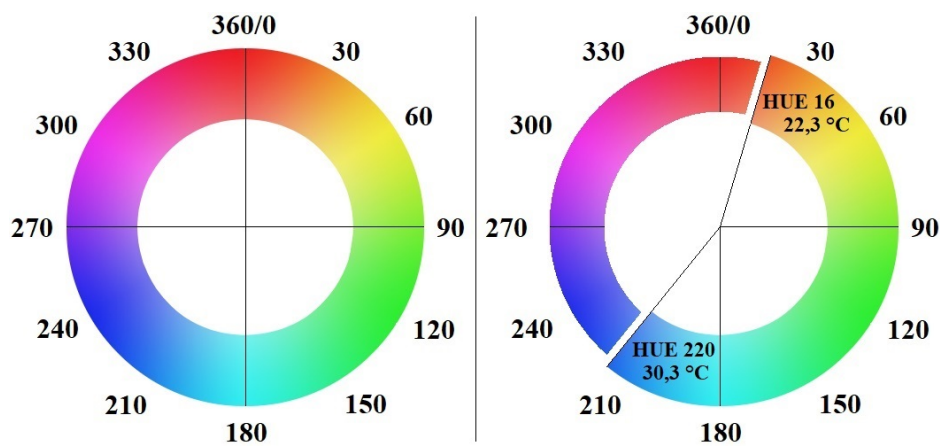
Časová vzdálenost inflexních bodů při chlazení byla 400 ms.

Statickou kalibraci stejného nátěru s termochromními kapalnými krystaly s označením SolarDust 24C provedl v roce 2019 v rámci své bakalářské práce Bc. Patrik Vyhlídal.



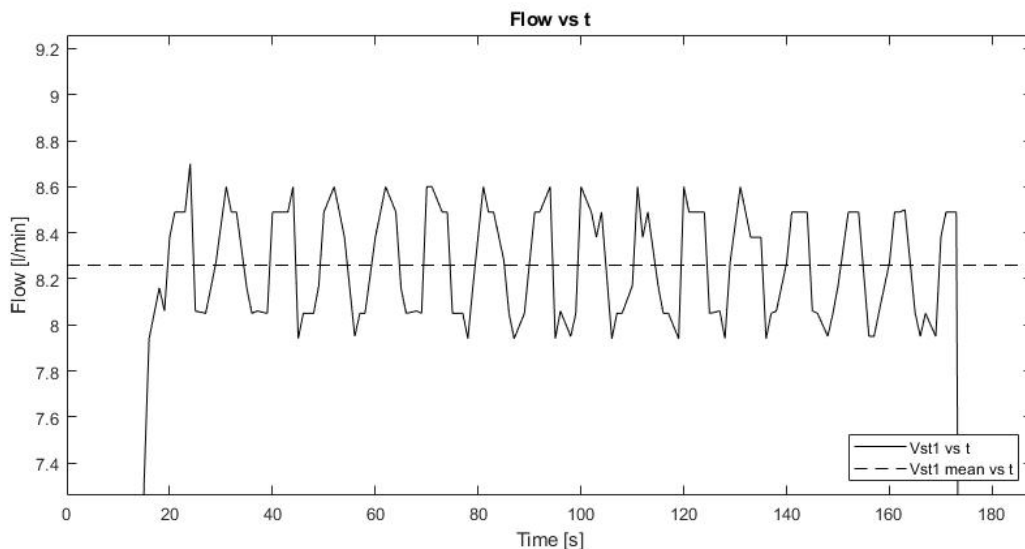
**Obr. 6.14:** Kalibrační křivka – závislost HUE na teplotě (Vyhlídal 2019)

Kalibrační křivka je definovaná pouze od hodnoty HUE 16 do hodnoty HUE 220. Převést pomocí kalibrační křivky naměřené časové průběhy z barevných odstínů na hodnoty teploty by bylo komplikované a bylo by nutné hodnoty odhadovat. Při měření dynamické odezvy byly dosahované hodnoty HUE vyšší. Pro vyhodnocení je dostačující zjistit časové vzdálenosti inflexních bodů časových průběhů barevného odstínu HUE.



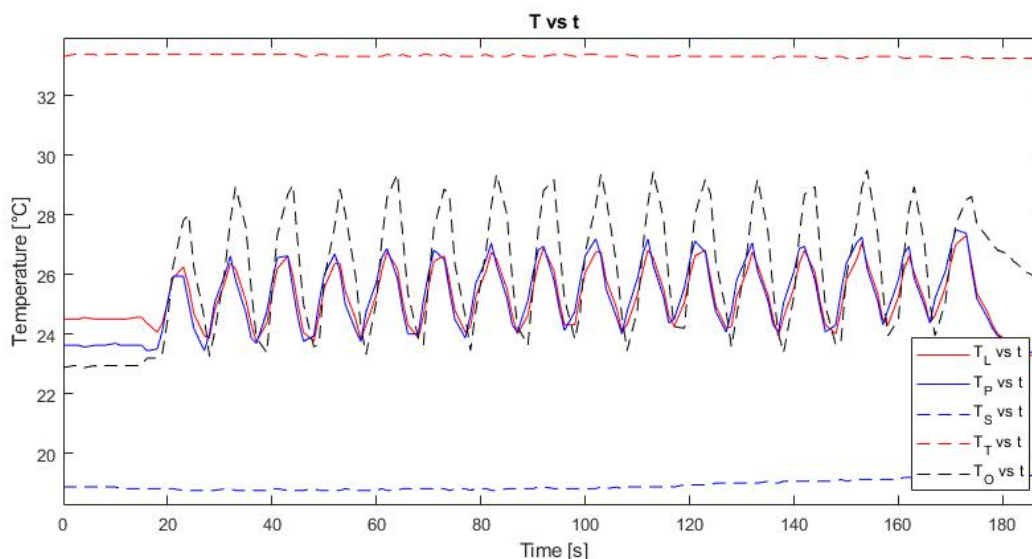
**Obr. 6.15:** Vyznačení kalibrační křivkou popsaného rozsahu TLC (vpravo) v rozsahu HUE (vlevo)

Pro sestavení matematického modelu byly při měření průtokoměrem YF-S201 a vývojovou deskou Arduino Nano sledovány hodnoty průtoku vody experimentální aparaturou. Aplikace PLX-DAQ umožnila zapsat hodnoty získané vývojovou deskou z digitálních čidel do listu MS Excel a následně zpracovat v prostředí Matlab.



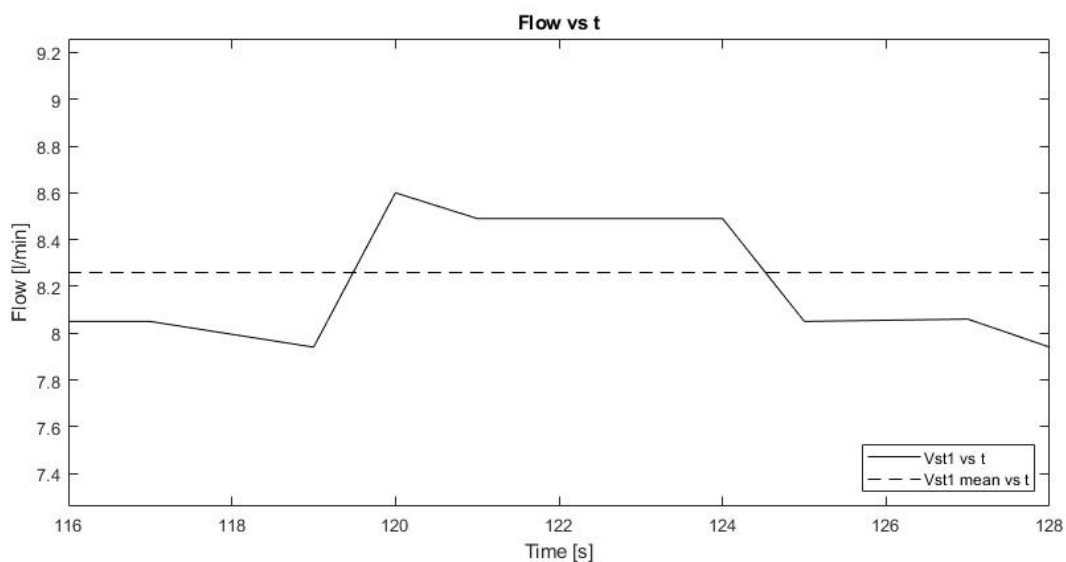
**Obr. 6.16:** Časový průběh objemového průtoku při měření

Na obrázku 6.16 je vidět kolísání průtoku způsobené manuálním přepínáním ventilu mezi zdrojem teplé a studené vody. Z průběhu byla vypočtena průměrná hodnota průtoku  $8,252 \text{ l min}^{-1}$ .

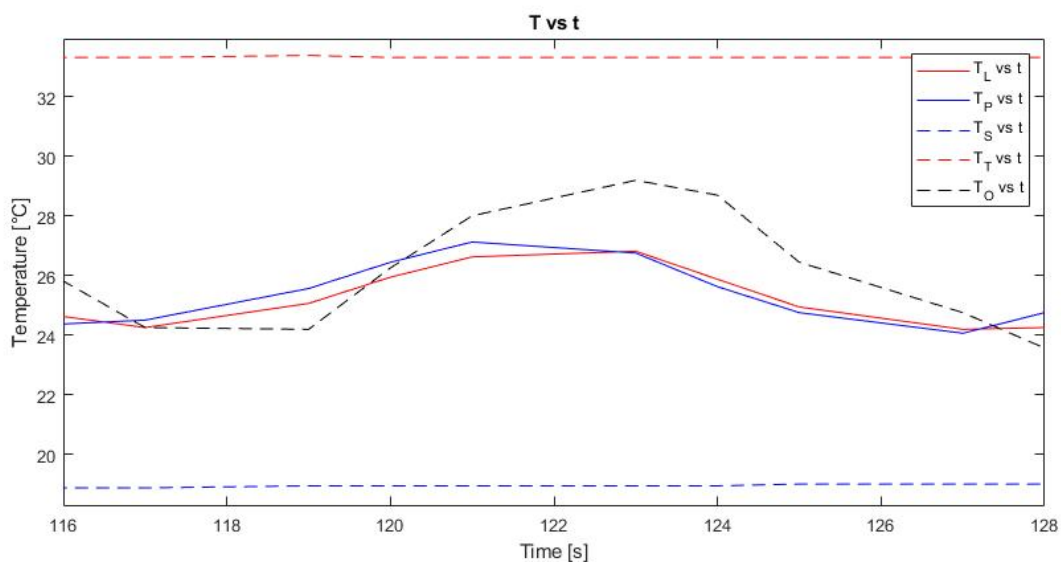


**Obr. 6.17:** Průběhy teplot na čidlech DS18B20

( $T_O$  – teplota ve výstupní hadici,  $T_S$  – teplota v zásobníku studené vody,  $T_T$  – teplota v zásobníku teplé vody,  $T_L$  – teplota v levé komoře kalibrátoru,  $T_P$  – teplota v pravé komoře)



**Obr. 6.18:** Detail časového průběhu průtoku ve vybraném intervalu měření



**Obr. 6.19:** Detail průběhů teplot na čidlech DS18B20 ve vybraném intervalu měření

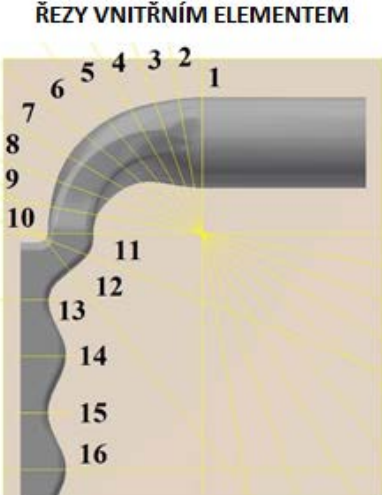
( $T_O$  – teplota ve výstupní hadici,  $T_S$  – teplota v zásobníku studené vody,  $T_T$  – teplota v zásobníku teplé vody,

$T_L$  – teplota v levé komoře kalibrátoru,  $T_P$  – teplota v pravé komoře)

Naměřené teploty v zásobnících vody přibližně určují teplotní hranice pro tvorbu numerického modelu. Naměřené hodnoty digitálními čidly v komorách jsou pouze orientační.

## 6.3 Matematický model

Matematický model je založen na zjištěném průměrném průtoku experimentální aparaturou při měření (obrázek 6.16). Z průtoku byly vypočteny rychlosti v jednotlivých průřezech komory (tabulka 6.1). Ze stanovené průměrné rychlosti v průřezech byla dále vypočtena doba, kterou urazí voda od vstupu do středu komory.

MATEMATICKÝ MODEL ZPOŽDENÍ VE SMYČCE	ROVINA (-)	PRŮŘEZ V ROVINĚ (mm <sup>2</sup> )	VZDÁLENOST STŘEDU PRŮŘEZU				RYCHLOST V PRŮŘEZU m/s
			MEZI ROVINAMI		OD VSTUPU		
			MIN (mm)	PŘIBLIŽNÁ (mm)	MIN (mm)	PŘIBLIŽNÁ (mm)	
	1	78.539816	18	18	18	18	1.7510828
	2	84.117977	1.767077	2.5	19.767077	20.5	1.6349623
	3	98.107988	1.877587	2.5	21.644664	23	1.4018198
	4	114.78392	2.079617	2.5	23.724281	25.5	1.1981619
	5	124.69541	2.229068	2.5	25.953349	28	1.1029253
	6	130.2574	2.325074	3	28.278423	31	1.0558304
	7	135.20516	2.404208	3	30.682631	34	1.0171928
	8	138.73492	2.45504	3	33.137671	37	0.991313
	9	142.46009	2.493165	3	35.630836	40	0.9653912
	10	149.13127	2.519013	3	38.149849	43	0.9222058
	11	146.80822	1.574183	2	39.724032	45	0.9367985
	12	131.15762	1.337076	2	41.061108	47	1.0485835
	13	92.188438	5.702316	7	46.763424	54	1.4918327
	14	149.5311	6.322952	7	53.086376	61	0.9197399
	15	89.564246	6.329395	7	59.415771	68	1.5355427
	16	135.00172	6.249868	7	65.665639	75	1.0187257

Tab. 6.1: Matematický model

Průřezy rovin a vzdálenosti jejich středů byly odečteny v prostředí Autodesk Inventor.

Vypočtené zpoždění (tabulka 6.2) je uvedeno pro nejkratší odečtenou vzdálenost středu komory od vstupu a dále pro přibližnou vzdálenost, která přesněji opisuje geometrii komory.

OBJEMOVÝ PRŮTOK NA VSTUPU = 0.0001375 m <sup>3</sup> /s	
PRŮMĚRNÁ RYCHLOST PRO MINIMÁLNÍ VZDÁLENOSTI = 1.3300712 m/s	
PRŮMĚRNÁ RYCHLOST PRO PŘIBLIŽNÉ VZDÁLENOSTI = 1.3126882 m/s	
DÉLKA HADICE SMYČKY =	350 mm
VNITŘNÍ PRŮMĚR HADICE SMYČKY =	13 mm
VNITŘNÍ PRŮŘEZ HADICE SMYČKY =	132.73229 mm <sup>2</sup>
RYCHLOST PRŮTOKU SMYČKOU =	1.0361437 m/s
ZPOŽDĚNÍ V HADICI SMYČKY = 337.79099 ms	
MINIMÁLNÍ ZPOŽDĚNÍ V TĚLE KALIBRÁTORU = 98.740038 ms	
PŘIBLIŽNÉ ZPOŽDĚNÍ V TĚLE KALIBRÁTORU = 114.26933 ms	
CELKOVÉ MINIMÁLNÍ ZPOŽDĚNÍ VE SMYČCE = 436.53103 ms	
CELKOVÉ PŘIBLIŽNÉ ZPOŽDĚNÍ VE SMYČCE = 452.06032 ms	

*Tab. 6.2: Matematický model*

Chyba měření použitého průtokoměru YF-S201 je dle datového listu  $\pm 5\%$  rozsahu.

CHYBA MĚŘENÍ PRŮTOKOMĚRU		(+ 5 % ROZSAHU)
		(+ 0.000025 m <sup>3</sup> /s)
HORNÍ HRANICE	DOLNÍ HRANICE	ROZSAH
0.0001625 m <sup>3</sup> /s	0.0001125 m <sup>3</sup> /s	0.0005 m <sup>3</sup> /s

*Tab. 6.3: Chyba měření průtokoměru YF-S201*

ZPOŽDĚNÍ PRO HORNÍ HRANICI ODCHYLKY PRŮTOKU	
CELKOVÉ MINIMÁLNÍ ZPOŽDĚNÍ VE SMYČCE = 369.38469 ms	
CELKOVÉ PŘIBLIŽNÉ ZPOŽDĚNÍ VE SMYČCE = 382.5253 ms	
ZPOŽDĚNÍ PRO DOLNÍ HRANICI ODCHYLKY PRŮTOKU	
CELKOVÉ MINIMÁLNÍ ZPOŽDĚNÍ VE SMYČCE = 533.5123 ms	
CELKOVÉ PŘIBLIŽNÉ ZPOŽDĚNÍ VE SMYČCE = 552.49164 ms	

*Tab. 6.4: Vyjádření zpoždění smyčkou pro horní a dolní hranici odchyly*

Zpoždění smyčkou kalibrátoru tedy dle matematického modelu se započtením odchyly průtokoměru pravděpodobně leží v intervalu 370 ms až 553 ms.

## Kapitola 7 Numerická simulace

Vstupem pro numerickou simulaci v prostředí ANSYS Fluent je textový soubor s informací o teplotě vody na vstupu do hrdla kalibrátoru v čase. Soubor tedy předepisuje, v jakém čase a jak se teplota na vstupu do hrdla změní.

Vstupní soubor tvoří celkem 1149 časových kroků po 0,01 s. Včetně počáteční informace obsahuje soubor celkem 1150 informací o teplotě. Délka simulovaného měření je celkem 11,49 s. V čase 1,50 se skokem zvýší teplota z 18 °C na 33 °C. V čase 6,50 se skokem teplota z 33 °C na 18 °C sníží. Časový interval mezi skoky délky 5 s je z provedeného měření zachován.

time	temp
0.00	291.15
0.01	291.15
...	
1.49	291.15
1.50	306.15
1.51	306.15
...	
6.49	306.15
6.50	291.15
6.51	291.15
...	
11.49	291.15

Pro simulaci použita okrajová podmínka vstupní rychlosti do hrdla byla  $1,751 \text{ m s}^{-1}$ . Při měření bylo využito čerpadlo s výraznou výkonovou rezervou. To se projevilo zvýšením rychlosti průtoku vody kalibrátorem na hodnotu vyšší, než je hodnota původním návrhem stanovená.

ZMĚŘENÝ (PRŮMĚRNÝ) PRŮTOK	0.00013753 m <sup>3</sup> /s	495.107 l/h
---------------------------	------------------------------	-------------

*Tab. 7.1: Průměrný objemový průtok aparaturou při měření*

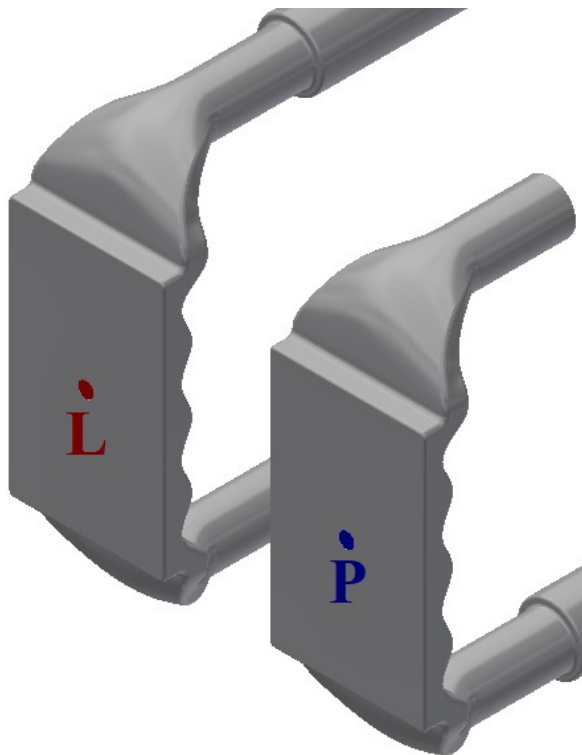


Okrajová podmínka byla stanovena přepočtem průměrného průtoku (tabulka 7.1) na střední rychlost na vstupu do průřezu hrdla kalibrátoru.

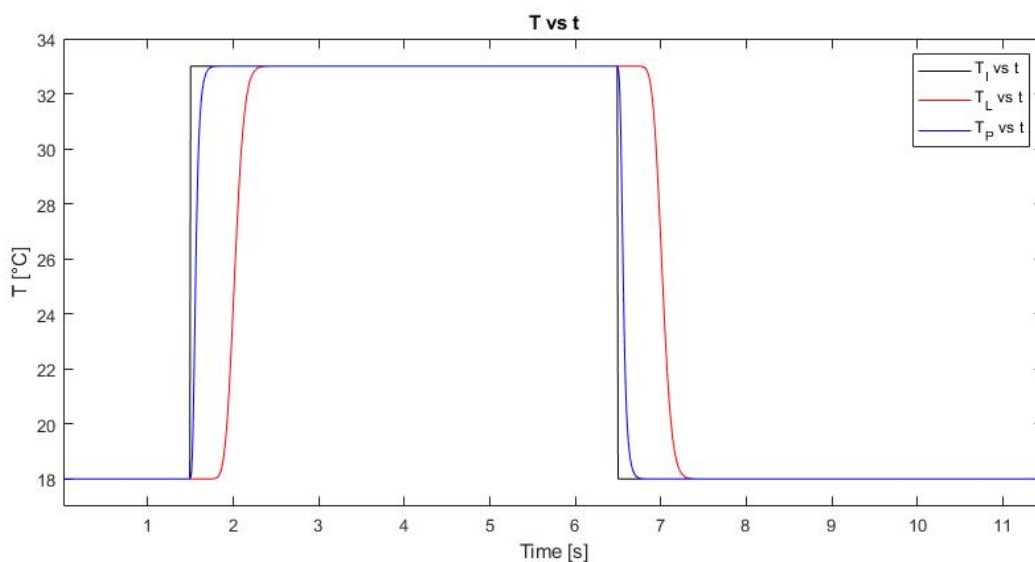
RYCHLOST PRŮTOKU V HRDLE	1.751082809 m/s	1751.083 mm/s
VNITŘNÍ PRŮMĚR HRDLA	0.01 m	10 mm
VNITŘNÍ PRŮŘEZ HRDLA	7.85398E-05 m <sup>2</sup>	78.53982 mm <sup>2</sup>
OBJEMOVÝ PRŮTOK HRDLEM	0.00013753 m <sup>3</sup> /s	137529.7 mm <sup>3</sup> /s
CHARAKTERISTICKÝ ROZMĚR (Deo = průměr)	0.01 m	10 mm
REYNOLDSOVO ČÍSLO ( $Re = (u \cdot Deo \cdot \rho) / \mu$ ) ( $Re = ((\text{rychlost}) \cdot (\text{rozměr}) \cdot (\text{hustota})) / (\text{dynamická\_viskozita}))$ )	17427.02752	

*Tab. 7.2: Objemový průtok hrdlem kalibrátoru*

Výstupem simulace jsou časové závislosti průměrných teplot ve středu plochy umístění desky se vzorkem TLC. Výstupní textové soubory lze načíst do prostředí Matlab a zpracovat podobně jako TLC a termokamery, tedy najít inflexní body přechodových křivek a zjistit jejich vzdálenost na časové ose.

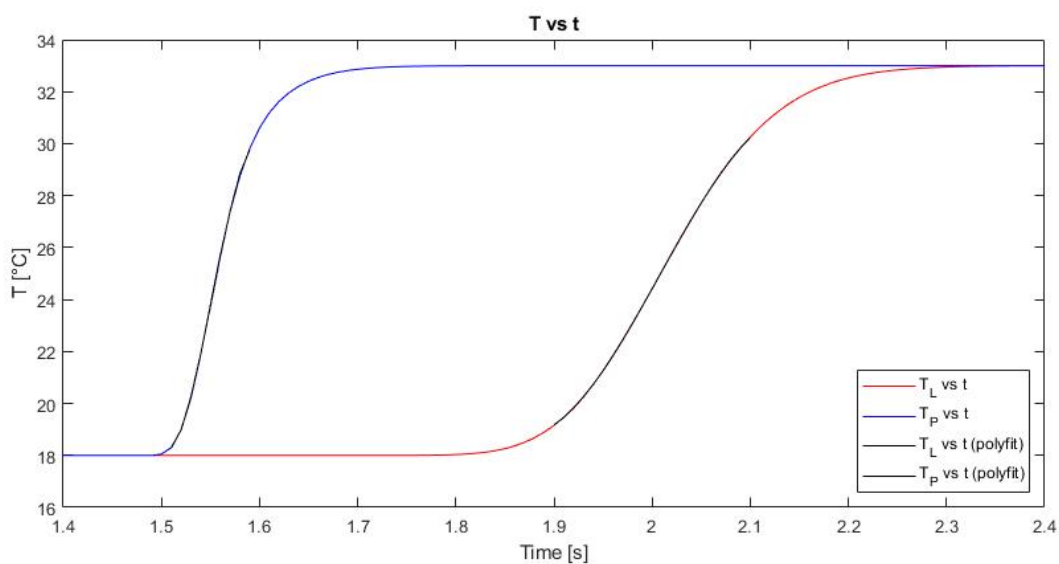


*Obr. 7.1: Vyznačení míst odečtu teplot v numerické simulaci ANSYS Fluent*

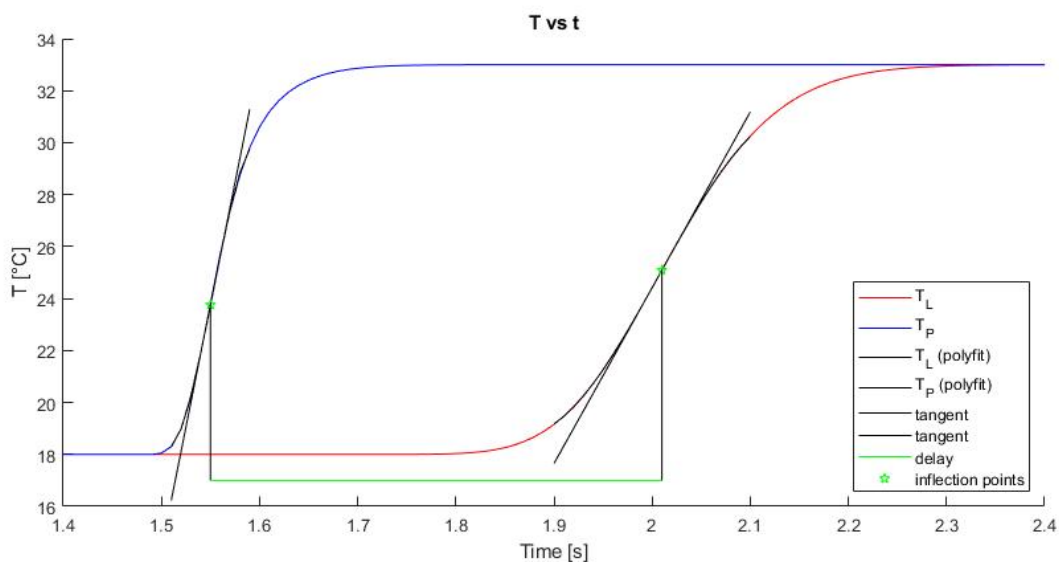


**Obr. 7.2:** Časový průběh teplot ve středu komor kalibrátoru v závislosti na čase

Výstup numerické simulace je zcela bez šumu. Bylo zvoleno podobné vyhodnocení jako pro termokameru, tedy nahrazení vybrané oblasti přechodu polynomickou funkcí třetího řádu a následné hledání inflexního bodu přechodové křivky.

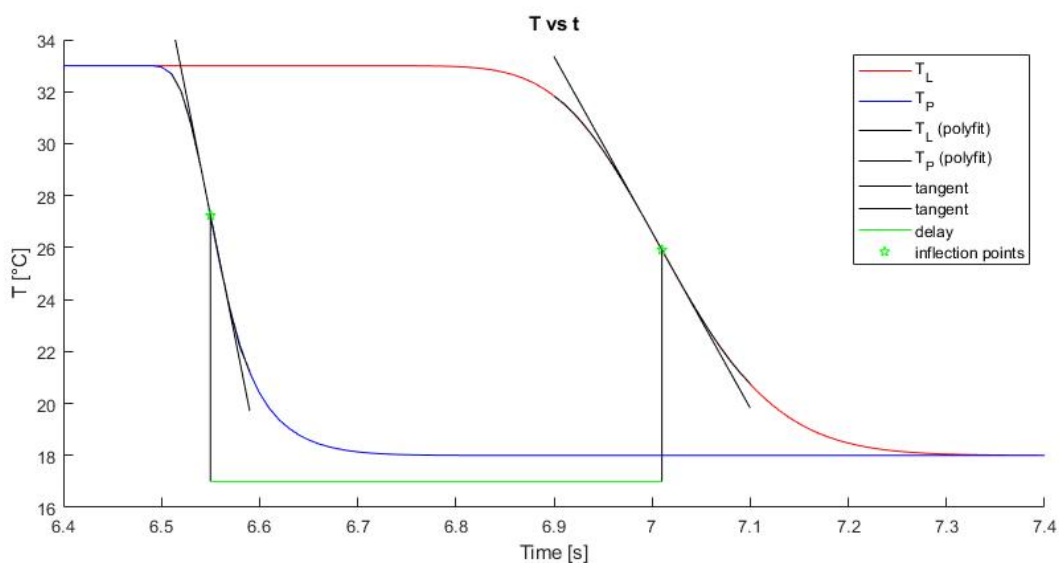


**Obr. 7.3:** Nahrazení přechodu při zahřívání funkcí polyfit



**Obr. 7.4:** Vyznačení inflexních bodů simulace zahřívání

Zjištěná časová vzdálenost inflexních bodů při numerické simulaci přechodu zahřívání pro reálné parametry měření je 460 ms.



**Obr. 7.5:** Vyznačení inflexních bodů simulace chlazení

Při aplikaci stejného postupu vyhodnocení pro simulaci chlazení vychází časová vzdálenost mezi inflexními body 460 ms.

## Kapitola 8 Závěr

Z vyhodnocení měření vychází:

- časová vzdálenost inflexních bodů přechodových křivek odstínu HUE barev s TLC
  - o pro zahřívání: 408 ms
  - o pro chlazení: 400 ms
- časová vzdálenost inflexních bodů teplotních přechodů ze záznamu termokamery
  - o pro zahřívání: 430 ms
  - o pro chlazení: 410 ms
- časová vzdálenost inflexních bodů teplotních přechodů numerické simulace
  - o pro zahřívání: 460 ms
  - o pro chlazení: 460 ms
- výpočet zpoždění matematickým modelem měření
  - o dolní hranice vypočteného rozsahu pravděpodobných zpoždění, daná chybou průtokoměru: 370 ms
  - o přibližné zpoždění 452 ms
  - o horní hranice vypočteného rozsahu pravděpodobných zpoždění, daná chybou průtokoměru: 553 ms

Z výsledků vyhodnocení měření je patrné, že vzdálenosti inflexních bodů přechodových křivek jsou nejmenší právě pro TLC a leží těsně nad dolní hranicí pravděpodobného zpoždění vypočteného matematickým modelem. Matematický model je zatížen velkou chybou průtokoměru YF-S201. S uvážením dolní hranice zpoždění vypočtené matematickým modelem se započtením chyby průtokoměru lze očekávat, že zpoždění TLC v reakci na teplotní skok může být v rozsahu 30 až 40 ms.

Dále lze na základě výsledků očekávat, že doba reakce TLC na skokovou změnu teploty může být pravděpodobně i kratší, než minimální možné časové rozlišení 1/120 sekundy dané maximální snímkovací frekvencí barevné kamery GoPro.

Negativní vliv na vyhodnocení TLC, tedy na polohu inflexních bodů na přechodové křivce, mohou mít i výrazné skoky hodnoty HUE v průběhu přechodů, zejména u chlazení.

Navržený kalibrátor je funkční a pro měření dynamického chování TLC je možné ho použít. Při využití barevné kamery s vyšší snímkovací frekvencí, alespoň 1/1000 sekundy, a se zapojením přesného indukčního průtokoměru by mělo být možné s navrženým kalibrátorem bližší hodnotu doby reakce TLC na teplotní skok stanovit.

# Literatura

ABDULLAH, N., A. R. ABU TALIB, H. R. MOHD SAIHAH, A. A. JAAFAR a M. A. MOHD SALLEH. Film thickness effects on calibrations of a narrowband thermochromic liquid crystal. *Experimental Thermal and Fluid Science* [online]. 2009, 33(4), 561-578 [cit. 2020-03-27]. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2008.12.002. ISSN 08941777. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0894177708001738>

ABDULLAH, N., A. R. ABU TALIB, A. A. JAAFAR, M. A. MOHD SALLEH a Wen Tong CHONG. The basics and issues of Thermochromic Liquid Crystal Calibrations. *Experimental Thermal and Fluid Science* [online]. 2010, 34(8), 1089-1121 [cit. 2020-02-15]. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2010.03.011. ISSN 08941777. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0894177710000683>

AEROVISION GROUP. Inspekce pásových dopravníků – Severočeské Doly a.s. [online]. Aerovision group: Aerovision group, 2020 [cit. 2020-02-25]. Dostupné z: <https://www.aerovisiongroup.com/sluzby/termograficke-inspekce>

ANDERS, S., D. NOTO, Y. TASAKA a S. ECKERT. Simultaneous optical measurement of temperature and velocity fields in solidifying liquids. *Experiments in Fluids* [online]. 2020, 61(4) [cit. 2020-04-10]. DOI: 10.1007/s00348-020-2939-3. ISSN 0723-4864. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00348-020-2939-3>

BIRD, J. O., P. J. CHIVERS. The kinetic theory of matter. *Newnes Engineering and Physical Science Pocket Book* [online]. Elsevier, 1993, 1993, s. 442-448 [cit. 2020-02-20]. DOI: 10.1016/B978-0-7506-1683-6.50061-8. ISBN 9780750616836. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780750616836500618>

BOHÁČ, J. Dynamické chování otopných ploch ve vazbě k řízení jejich tepelného výkonu. Disertační práce. *Technika prostředí. Fakulta strojní ČVUT v Praze.* [online] Praha, 2019 [cit. 2020-03-20]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/85550>

BONNETT, P., T. V. JONES a D. G. MCDONNELL. Shear-stress measurement in aerodynamic testing using cholesteric liquid crystals. *Liquid Crystals* [online]. 1989, 6(3), 271-280 [cit. 2020-03-31]. DOI: 10.1080/02678298908029078. ISSN 0267-8292. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02678298908029078>

FISCH, M., R. Liquid crystals, laptops and life. 1. River Edge, NJ: World Scientific, c2004. ISBN 98-123-8901-6

GAJ, A. Studium fázových přechodů v kapalných krystalech. Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská. České vysoké učení technické v Praze. 2017 [online]. Praha 2017 [cit. 2020-02-29]. Dostupné z: <http://fyzsem.fjfi.cvut.cz/2017-2018/Zima17/doprovod/kapkryst.pdf>

GODI, S. C., S. ABRAHAM, A. PATTAMATTA a C. BALAJI. Evaluation of candidate strategies for the estimation of local heat transfer coefficient from wall jets. *Experimental Heat Transfer* [online]. 2020, 33(1), 40-63 [cit. 2020-04-05] DOI: 10.1080/08916152.2019.1570983. ISSN 0891-6152. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/08916152.2019.1570983>

HORÁKOVÁ, K. Manuál pro výuku numerických metod. Technická univerzita v Liberci. Fakulta strojní. Katedra energetických zařízení. [online]. Liberec, 2010 [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <http://www.kez.tul.cz/files/manual-pro-vyuku-numerickech-metod-web.pdf>

IRELAND, P. T., T. V. JONES. Liquid crystal measurements of heat transfer and surface shear stress. *Measurement Science and Technology* [online]. 2000, 11(7), 969-986 [cit. 2020-03-27]. DOI: 10.1088/0957-0233/11/7/313. ISSN 0957-0233. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0957-0233/11/7/313>

KLIMEŠ, J., 2017. Využití termochromních systémů pro testování distribuce tepla. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektrotechnologie. [online]. Brno 2017 [cit. 2020-02-29]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=145285](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=145285)

MOJR, V. Barva, energie a světlo: Pohled na svět očima fotochemika. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. [Online] Praha, 2016 [cit. 2020-02-10] Dostupné z: <https://www.vscht.cz/popularizace/doktorandi-pisou/mojr>.

RAMBOUSEK, V. Barevné prostory a barevné modely. Počítačová grafika. Základní informační technologie. Pedagogická fakulta Univerzity Karlovy. [online]. 2017 [cit. 2020-02-05]. Dostupné z: [http://wikipedie.pdf.cuni.cz/it/lib/exe/fetch.php?media=dvouoborbc:pocitacova\\_grafika:04\\_barvy\\_a\\_barevne\\_modely.pdf](http://wikipedie.pdf.cuni.cz/it/lib/exe/fetch.php?media=dvouoborbc:pocitacova_grafika:04_barvy_a_barevne_modely.pdf)

RAO, Y., S. ZANG. Calibrations and the measurement uncertainty of wide-band liquid crystal thermography. *Measurement Science and Technology*. 2010, 21(1). [cit. 2020-03-25]. DOI: 10.1088/0957-0233/21/1/015105. ISSN 0957-0233. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0957-0233/21/1/015105>

REDA, D., M. WILDER a J. CROWDER. Simultaneous, full-surface visualizations of transition and separation using liquid crystal coatings. In: Advanced Measurement and Ground Testing Conference [online]. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996, 1996-06-17, s. - [cit. 2020-03-30]. DOI: 10.2514/6.1996-2182. Dostupné z: <http://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.1996-2182>

STASIEK, J., A. STASIEK, M. JEWARTOWSKI a M.W. COLLINS. Liquid crystal thermography and true-colour digital image processing. Optics & Laser Technology [online]. 2006, 38(4-6), 243-256 [cit. 2020-04-15]. DOI: 10.1016/j.optlastec.2005.06.028. ISSN 00303992. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0030399205001106>

SVOBODA, J., M. GLOGAROVÁ. Kapaln  krystaly [online]. Vysok  škola chemicko-technologick , Technick  5, 166 28, Praha 6, 2005 [cit. 2020-02-29]. Dostupné z: [http://kubusz.net/Reserse/new/1/9\\_axial\\_chirality/9\\_9\\_Svoboda.pdf](http://kubusz.net/Reserse/new/1/9_axial_chirality/9_9_Svoboda.pdf)

ŠAJNRT, P.  vod do práce s termokamerou Flir i7 [online]. Technick  p ru ka pro žáky středních průmyslových škol stavebních oborů. Opava 2014. [cit. 2020-02-22] Dostupné z: [http://dk.spsopava.cz:8080/docs/pdf/stavebni\\_laborator/termokamera/Prace\\_s\\_termokamerou](http://dk.spsopava.cz:8080/docs/pdf/stavebni_laborator/termokamera/Prace_s_termokamerou)

TESAŘ, J., VOCHOZKA, V. Termokamery ve výuce fyziky. Katedra aplikovan  fyziky a technick  výchovy. Jiho esk  univerzita v  esk ch Budějovicích [Online]  esk  Budějovice, 2013 [cit. 2020-02-22] Dostupné z: [http://fyzweb.cz/materialy/vlachovice/2013/materialy/tesar/c-tesar-termokamera\\_ve\\_fyzice.pdf](http://fyzweb.cz/materialy/vlachovice/2013/materialy/tesar/c-tesar-termokamera_ve_fyzice.pdf)

TERMOGRAFIE. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-02-25]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Termografie>

TLC PRODUCTS FOR USE IN RESEARCH AND TESTING APPLICATIONS. TLC Hallcrest [online]. Glenview, IL: TLC Hallcrest, 2015 [cit. 2020-03-13]. Dostupné z: [http://www.hallcrest.com/DesktopModules/Bring2mind/DMX/Download.aspx?Command=Core\\_Download&EntryId=159&language=en-US&PortalId=0&TabId=163](http://www.hallcrest.com/DesktopModules/Bring2mind/DMX/Download.aspx?Command=Core_Download&EntryId=159&language=en-US&PortalId=0&TabId=163)

UNRAVEL. Understanding color spaces. Unravel mastering services. [Online] 2016 [cit. 2020-02-15] Dostupné z: <https://www.unravel.com.au/understanding-color-spaces>

VEJRAŽKA, M. Optické metody používané v biochemii. Ústav lékařské biochemie a laboratorní diagnostiky 1. lékařské fakulty Univerzity Karlovy [online]. Praha, 2008 [cit. 2020-01-10]. Dostupné z: <https://portal.lf1.cuni.cz/clanek-820-opticke-metody-pouzivane-v-biochemii>

VEJRAZKA, J., Ph. MARTY. An Alternative Technique for the Interpretation of Temperature Measurements Using Thermochromic Liquid Crystals. Heat Transfer Engineering [online]. 2007, 28(2), 154-162 [cit. 2020-03-25]. DOI: 10.1080/01457630601023641. ISSN 0145-7632. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01457630601023641>

VIKOVÁ, M. Textilní fyzika: Chromismus a jeho aplikace. Technická univerzita Liberec [online]. Technická univerzita Liberec: 2016 [cit. 2020-02-02]. Dostupné z: <https://www.yumpu.com/xx/document/view/34986081/chromismus-a-jeho-aplikace>

VOGELBACHER, S., AUER, D., Function And Added Value Of Preventive Thermographic Measurements In Industrial Maintenance [online]. Testo: Testo, 2010 [cit. 2020-02-25]. Dostupné z: <https://www.ien.eu/article/function-and-added-value-of-preventive-thermographic-measurements-in-industrial-maintenance/>

VOLF, J. a J. JENČÍK. Technická měření. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-01-02138-6.

VRÁNA, T. Bezkontaktní metody měření teploty v ekologickém inženýrství. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav procesního a ekologického inženýrství. [Online] Brno, 2010 [cit. 2020-02-22] Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=33544](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=33544)

VYHLÍDAL, P. Problematika měření povrchové teploty pomocí tepelných krystalů. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta strojní. Ústav procesní a zpracovatelské techniky. [Online] Praha, 2019 [cit. 2020-03-31] Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/85063>



## Zdroje obrázků

- Obr. 5.3** Dostupné z: <https://www.airbrushcentrum.cz/tagore-mini-sada-airbrush-tg-216>
- Obr. 5.4** Dostupné z: <https://www.micro-epsilon.cz/temperature-sensors/thermoIMAGER/universal-thermal-imagers/>
- Obr. 5.5** Dostupné z: <https://www.fotoskoda.cz/gopro-hero5-black/>
- Obr. 5.6** Dostupné z: <https://shopee.com.my/12V-Automatic-Water-Dispenser-Filling-Pump-Brushless-DC-Water-Pump-i.93754778.2309537318>
- Obr. 5.7** Dostupné z: <https://www.gme.cz/klon-arduino-nano-v3-0-r3-ch340g>
- Obr. 5.8** Dostupné z: <https://www.laskarduino.cz/arduino-yf-s201-prutokomer-vody>
- Obr. 5.9** Dostupné z: <https://www.laskarduino.cz/dallas-digitalni-vodotesne-cidlo-teploty-ds18b20-3m/>
- Obr. 5.10** Dostupné z: <https://www.manualslib.com/products/Lauda-E-100-10588134.html>
- Obr. 5.11** Dostupné z: <https://www.4studio.cz/led-video-svetlo-yongnuo-yn1410>

# Seznam příloh

- Příloha 1** Výkres sestavy kalibrátoru 1
- Příloha 2** Návrh výpočtové sítě kalibrátoru 1
- Příloha 3** Výkres sestavy kalibrátoru 2
- Příloha 4** Návrh výpočtové sítě kalibrátoru 2
- Příloha 5** Výkres sestavy kalibrátoru 3
- Příloha 6** Návrh výpočtové sítě kalibrátoru 3
- Příloha 7** Skript pro vývojovou desku Arudino
- Příloha 8** Matlab skript pro vyhodnocení dat z termokamery
- Příloha 9** Matlab skript pro vyhodnocení odstínů HUE
- Příloha 10** Matlab skript pro vyhodnocení dat z vývojové desky Arudino
- Příloha 11** Matlab skript pro vyhodnocení dat z numerické simulace

# Umístění netištěných příloh na přiloženém DVD

- Příloha 12** Návrhový výpočet kalibrátoru 1  
MEDEK\_2020\EXCEL\NAVRHOVE\_VYPOCTY\_1.xlsx
- Příloha 13** 3D model sestavy kalibrátoru 1  
MEDEK\_2020\INVENTOR\1.stp
- Příloha 14** Simulace proudění kalibrátorem 1  
MEDEK\_2020\ANSYS\WBPZ\1s.wbpz
- Příloha 15** Návrhový výpočet kalibrátoru 2  
MEDEK\_2020\EXCEL\NAVRHOVE\_VYPOCTY\_2.xlsx
- Příloha 16** 3D model sestavy kalibrátoru 2  
MEDEK\_2020\INVENTOR\2.stp
- Příloha 17** Simulace proudění kalibrátorem 2  
MEDEK\_2020\ANSYS\WBPZ\2t.wbpz
- Příloha 18** Návrhový výpočet kalibrátoru 3  
MEDEK\_2020\EXCEL\NAVRHOVE\_VYPOCTY\_3\_1.xlsx
- Příloha 19** 3D model sestavy kalibrátoru 3  
MEDEK\_2020\INVENTOR\3.stp
- Příloha 20** Simulace proudění kalibrátorem 3  
MEDEK\_2020\ANSYS\WBPZ\3s.wbpz
- Příloha 21** Matematický model zpoždění v kalibrátoru  
MEDEK\_2020\EXCEL\MATEMATICKY\_MODEL\_ZPOZDENI.xlsx
- Příloha 22** Vizualizace teplotního skoku v kalibrátoru 2 a 3  
MEDEK\_2020\ANSYS\VIZUALIZACE