



Bakalářská práce

Návrh termodiagnostických měření ve zkušebně

Studijní program:

B0714A270001 Mechatronika

Autor práce:

Jan Kohout

Vedoucí práce:

Ing. Jiří Jelínek Ph.D.

Ústav mechatroniky a technické informatiky

Liberec 2024



Zadání bakalářské práce

Návrh termodiagnostických měření ve zkušebně

Jméno a příjmení:

Jan Kohout

Osobní číslo:

M21000034

Studijní program:

B0714A270001 Mechatronika

Zadávající katedra:

Ústav mechatroniky a technické informatiky

Akademický rok:

2023/2024

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se základními postupy termodiagnostických měření.
2. Zvolte vhodnou termokameru a proveďte její porovnání s obdobnými přístroji.
3. Navrhněte soubor experimentů ve zkušebně. Posuďte vlivy, které nejvíce ovlivňují měření. Ověřte vhodnost využití termokamer ve zkušebně pro kvantitativní měření.
4. Vyhodnoťte postupy ochrany termokamery polohou, měření teploty odrazem, měření skrze ochranné materiály.

Rozsah grafických prací: Dle potřeby dokumentace
Rozsah pracovní zprávy: 30–40 stran
Forma zpracování práce: Tištěná/elektronická
Jazyk práce: Čeština

Seznam odborné literatury:

- [1] PEŤKOVÁ, Viera a SVOBODA, Jiří. Termodiagnostika. [Košice]: Vydavateľstvo Vienaľa, 2016. ISBN 978-80-8126-132-9.
- [2] VOLLMER, Michael a MÖLLMANN, Klaus-Peter. Infrared thermal imaging: fundamentals, research and applications. Weinheim: Wiley, 2010. ISBN 978-3-527-40717-0.
- [3] RIPKA, Pavel a TIPEK, Alois. Master book on sensors: modular courses on modern sensors – Leonardo da Vinci project CZ/PP-134026. Part A. [Prague]: BEN – technical literature for Skoda Auto, 2003. ISBN 80-7300-129-2.
- [4] ŠIMKO, Milan a CHUPÁČ, Milan. Termovízia a jej využitie v praxi. Vedecké monografie. Žilina: Žilinská univerzita, 2007. ISBN 978-80-8070-654-8.

Vedoucí práce: Ing. Jiří Jelínek Ph.D.
Ústav mechatroniky a technické informatiky

Datum zadání práce: 12. října 2023
Předpokládaný termín odevzdání: 14. května 2024

prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.
děkan

L.S.

doc. Ing. Josef Černohorský, Ph.D.
vedoucí ústavu

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom/a toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom/a povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom/a následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

7. května 2024

Jan Kohout

Návrh termodiagnostických měření ve zkušebně

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zaměřuje na využití termokamer pro termodiagnostické měření ve firemní zkušebně. V teoretické části jsou nejprve představeny základní informace o bezkontaktním měření teploty, následované klíčovými termíny a definicemi v tomto oboru. Dále jsou blíže popsány související fyzikální zákony a vlivy různých faktorů na přesnost měření. Zbytek teoretické části je věnován termokameře Flir T540, která je porovnávána s podobnými zařízeními na trhu. Praktická část práce je zaměřena na provedená měření ve zkušebně, což zahrnuje měření v komoře pro klimatické zkoušky, měření s externím zdrojem tepla a praktickém měření na reálném nářadí. Závěrečná část shrnuje hlavní dosažené výsledky z těchto měření a popisuje metodiku kvantitativního měření.

Klíčová slova

termokamera, termogram, emisivita, infračervené záření, teplota

Design of thermodiagnostic measurements in the test room

Abstract

This bachelor thesis deals with the use of thermal cameras for thermodiagnostic measurements in a company's test room. In the theoretical part, basic information about non-contact temperature measurement is first provided, followed by the most important terms and definitions in this field. Further, related physical laws and the influences of various factors on measurement accuracy are also described in more detail. The rest of the theoretical part is dedicated to the Flir T540 thermal camera, which is compared with similar devices on the market. The practical part of the thesis is focused on the measurements performed in the test room, which include measurements in the climatic test chamber, measurements with an external heat source and practical measurements on real tools. The final part summarizes the main results of these measurements and describes methodology of quantitative measurement.

Keywords

thermal camera, thermogram, emissivity, infrared radiation, temperature

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Jiřímu Jelínkovi, Ph.D. za cenné rady, konstruktivní kritiku a neustálou podporu během celého procesu. Dále bych rád poděkoval Ing. Stanislavu Jakešovi za jeho ochotu spolupracovat, za jeho nápady a návrhy, které mi pomohly zlepšit kvalitu mé práce. Následně bych chtěl poděkovat panu Michalu Steinzovi za poskytnutí příležitosti pracovat na bakalářské práci ve spolupráci se zkušebnou ve firmě Festool. Zároveň bych rád poděkoval Ing. Anně Mikešové Korbářové, Ph.D. za její odbornou pomoc a rady. Nakonec bych chtěl poděkovat všem členům zkušebny ve firmě Festool, kteří mi poskytli přístup k potřebnému vybavení, za jejich spolupráci, ochotu a profesionalitu.

Obsah

Úvod	12
Teoretická část.....	13
1 Úvod do termodiagnostických měření	13
1.1 Bezkontaktní měření běžných teplot	14
1.2 Přínosy termodiagnostického měření	14
1.3 Omezení a nedostatky termodiagnostického měření.....	14
1.4 Využití termodiagnostických měření.....	15
1.5 Časté mýty a omyly o termokamerách.....	15
2 Teorie termokamer	17
2.1 Termíny a definice.....	17
2.1.1 Emisivita (ϵ)	17
2.1.2 Odrazivost (ρ).....	17
2.1.3 Propustnost (τ).....	17
2.1.4 Černé těleso	18
2.1.5 Šedé těleso	18
2.1.6 Kvalitativní měření	18
2.1.7 Kvantitativní měření	18
2.1.8 Teplotní citlivost NETD	19
2.1.9 Zorné pole termokamery	19
2.1.10 IFOV.....	19
2.2 Rovnice a zákony	20
2.2.1 Planckův vyzařovací zákon	20
2.2.2 Stefan-Boltzmannův zákon	20
2.2.3 Záření reálných těles.....	21
2.2.4 Rovnice záření	22
2.3 Princip termokamer	23
2.3.1 Kalibrace.....	23
2.3.2 Stanování emisivity	24
2.3.3 Měření okolní teploty	24
2.4 Přesnost bezkontaktní měření běžných teplot	25
2.4.1 Vliv emisivity	25
2.4.2 Vliv zdánlivé odražené teploty.....	25
2.4.3 Vliv okolního prostředí.....	26

2.4.4	Snížení rušivých vlivů	26
3	Termokamery	27
3.1	Rozdělení termokamer	27
3.2	Flir T540.....	27
3.2.1	Technické parametry	28
3.2.2	Vlastnosti.....	28
3.2.3	Ovládání	28
3.2.4	Přesnost.....	29
3.3	Porovnání kamer	30
3.3.1	Důležité údaje při výběru termokamery	30
3.4	Software a formáty termogramů	31
3.4.1	Flir Thermal Studio	31
	Praktická část.....	32
4	Měření v komoře pro klimatické zkoušky	32
4.1	Popis a předpoklady	32
4.2	Příprava zkušebních vzorků	33
4.3	Přípravek do komory pro klimatické zkoušky	34
4.4	Stojánky.....	35
4.5	Průběh měření	35
4.5.1	Alternativní metoda měření	36
4.6	Zpracování výsledků	36
4.7	Výsledky měření	37
4.7.1	Vliv materiálu a povrchové úpravy	37
4.7.2	Vliv barvy.....	38
4.7.3	Metody zvýšení emisivity.....	39
5	Měření se zdrojem tepla	40
5.1	Popis a předpoklady	40
5.2	Měření propustný materiálů	40
5.2.1	Průběh měření.....	41
5.2.2	Stanování propustnosti	42
5.2.3	Výsledky měření propustnosti.....	42
5.3	Měření vlivu osvětlení a barvy.....	43
5.4	Měření vlivu polohy termokamery.....	43
5.5	Měření odrazem.....	44
5.5.1	Průběh měření.....	44

5.5.2	Měření teploty odrazem.....	44
5.5.3	Měření emisivity odrazem.....	45
6	Praktické měření ve firmě Festool	46
6.1	Měření ve zkušebně pro životnostní zkoušky	46
6.1.1	Průběh měření.....	46
6.1.2	Výsledky měření.....	47
6.2	Měření ručního náradí při zatěžování na dynamometru.....	48
6.2.1	Průběh měření.....	48
6.2.2	Chyba metody.....	48
6.2.3	Extrapolace teploty při vypnutí	49
6.2.4	Ověření přesnosti termokamery	50
7	Vyhodnocení měření	51
7.1	Měření v komoře pro klimatické zkoušky.....	51
7.2	Měření se zdrojem tepla	51
7.3	Praktické měření ve firmě Festool	52
7.4	Pravidla pro termodiagnostické měření ve zkušebně.....	52
	Závěr	53
	Použitá literatura	54
	Přílohy.....	56
A	Měření v komoře pro klimatické zkoušky	56
A.1	Tabulka – Porovnání naměřených emisivit.....	56
A.2	Tabulka – Metody zvýšení emisivity	57
B	Příloha – Měření se zdrojem tepla	57
B.1	Tabulka – Měření propustnosti	57
B.2	Tabulka – Měření teploty odrazem	58
B.3	Tabulka – Měření emisivity odrazem	59
C	Příloha – Praktické měření ve firmě Festool	60
C.1	Tabulka – Měření teploty na krytu.....	60
C.2	Tabulka – Měření teploty vnitřních komponentů.....	60
C.3	Tabulka – Měření na dynamometru	60
C.4	Tabulka – Extrapolace teploty při vypnutí.....	61

Seznam obrázků

Obrázek 1: Elektromagnetické spektrum [1]	13
Obrázek 2: Okamžité zorné pole [10]	19
Obrázek 3: Základní proces měření [1]	22
Obrázek 4: Blokově znázorněné komponenty termokamery [1]	23
Obrázek 5: Měření okolní teploty	24
Obrázek 6: Termokamera Flir T540	27
Obrázek 7: Pohled na termokameru zepředu	28
Obrázek 8: Pohled na termokameru zezadu	29
Obrázek 9: Ukázka termogramu s překrytím	31
Obrázek 10: Komora pro klimatické zkoušky Clime ECO C7-600	32
Obrázek 11: Částečně vyleštěné kovové vzorky	33
Obrázek 12: Zkušební vzorek testující metody zvýšení emisivity	33
Obrázek 13: Finální podoba přípravek	34
Obrázek 14: Stojánek 1	35
Obrázek 15: Stojánek 2	35
Obrázek 16: Přípravek v komoře po otevření	35
Obrázek 17: Zkušební vzorek s různými barevnými páskami	38
Obrázek 18: Metody zvýšení emisivity	39
Obrázek 19: MERCI Inteli MSH-300i	40
Obrázek 20: Propustné materiály	41
Obrázek 21: Průběh měření se zdrojem tepla	41
Obrázek 22: Měření propustnosti bílého obalu PE-HD	42
Obrázek 23: Měření propustnosti obalu PET	42
Obrázek 24: Termogram pořízený s osvětlením	43
Obrázek 25: Termogram pořízený ve tmě	43
Obrázek 26: Průběh měření odrazem	44
Obrázek 27: Průběh měření míchadla MX1600/2	46
Obrázek 28: Porovnání teplot na uhlíkových kartáčích	47
Obrázek 29: Pohled na elektroniku uvnitř ručního náradí	48
Obrázek 30: Absolutní chyba metody	49
Obrázek 31: Absolutní chyba měření termokamerou	50

Seznam tabulek

Tabulka 1: Porovnání termokamer	30
Tabulka 2: Porovnání emisivit při teplotě 60°C	37
Tabulka 3: Emisivity barevných pásek	38
Tabulka 4: Metody zvýšení emisivity	39
Tabulka 5: Extrapolace teplot	49

Seznam zkratek

FIR	Far Infrared, infračervené záření vzdálené
FOV	Field Of View, zorné pole
IČ	Infračervené
IFOV	Instantaneous Field of View, okamžité zorné pole
IFOV _{geo}	nejmenší rozpoznatelný objekt
IR	Infrared, infračervené
JPEG	Joint Photographic Experts Group, metoda ztrátové komprese používané pro ukládání počítačových obrázků
LWIR	Long Wavelength Infrared, infračervené záření dlouhé vlnové délky
MP4	Moving Picture 4, formát, který se používá k ukládání videa a zvuku
MWIR	Medium Wavelength Infrared, infračervené záření střední vlnové délky
NETD	Noise Equivalent Temperature Difference, teplotní citlivost
NIR	Near Infrared, infračervené záření blízké

Seznam veličin

λ	Vlnová délka [μm]
ε	Emisivita [-]
ρ	Odrazivost [-]
τ	Propustnost [-]
α	Absorpce [-]
h	Planckova konstanta = $6,625 \cdot 10^{-34}$ [J.s]
c	Rychlost světla ve vakuu = 299 792 458 [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
k	Boltzmannova konstanta = $1,3805 \cdot 10^{-23}$ [J.K ⁻¹]
c_1	První radiační konstanta = $3,741 \cdot 10^{-16}$ [W.m ²]
c_2	Druhá radiační konstanta = $1,438 \cdot 10^{-2}$ [m.K]
T	Teplota [K]
ϑ	Teplota [°C]
t	Čas [s]
Φ	Zářivý výkon [W]
M	Intenzita vyzařování [W.m ⁻²]
E	Intenzita záření [W.m ⁻²]
$\Delta\vartheta$	Rozdíl teplot [°C]
δ	Relativní chyba [%]

Úvod

V první části bakalářské práce se nachází seznámení s termodiagnostickým měřením. To zahrne obecné porovnání mezi různými metodami bezkontaktního měření teploty, včetně porovnání výhod, nevýhod a využití v praxi.

Druhá část bakalářské práce bude věnována důležitým termínům a definicím spojeným s termografií. Zároveň budou vysvětleny složitější koncepty, jako rovnice záření, Planckův zákon, nebo způsob měření emisivity. Poté bude vysvětlen obecný princip termokamer. Nakonec budou vysvětleny nejvýznamnější rušivé vlivy a metody, jak je minimalizovat.

Třetí část bude konkrétně zaměřena na termokameru Flir T540, včetně popisu vlastností a ovládacích prvků. Tato kamera bude porovnána s konkurenčními kamerami na trhu, jmenovitě s termokamerami od firem Fluke a Testo.

Čtvrtá část bakalářské práce bude zaměřená na několik měření. Každé měření bude obsahovat popis, předpoklady, postup a zhodnocení výsledků. Hlavním cílem těchto experimentů je testování vlivů způsobujících největší nepřesnosti a možnosti jejich snížení. Dalším cílem je testování možnosti ochrany termokamery, konkrétně ochrana polohou, měření teploty odrazem nebo měření skrze propustné materiály. Nakonec bude provedeno několik praktických měření ve firmě Festool.

V poslední části budou shrnuty dosažené výsledky z jednotlivých měření a popsány základní pravidla, která by se měla dodržovat během termodiagnostických měření ve zkušebně.

Motivace

Motivací pro řešení této práce byla praktická výuka už v prvním ročníku oboru Mechatronika v předmětu Měření neelektrických veličin a má možnost s termokamerami dále pracovat ve zkušebně.

Cíle

Cílem práce je testování dostupných termokamer v reálných podmínkách a získání reálných zkušeností, jak termokamery fungují a které vlivy nejvíce ovlivňují přesnost měření. Cílem je vyhodnotit celý měřicí řetězec, od přípravy měření, pořízení snímku a zpracováním termogramu.

Teoretická část

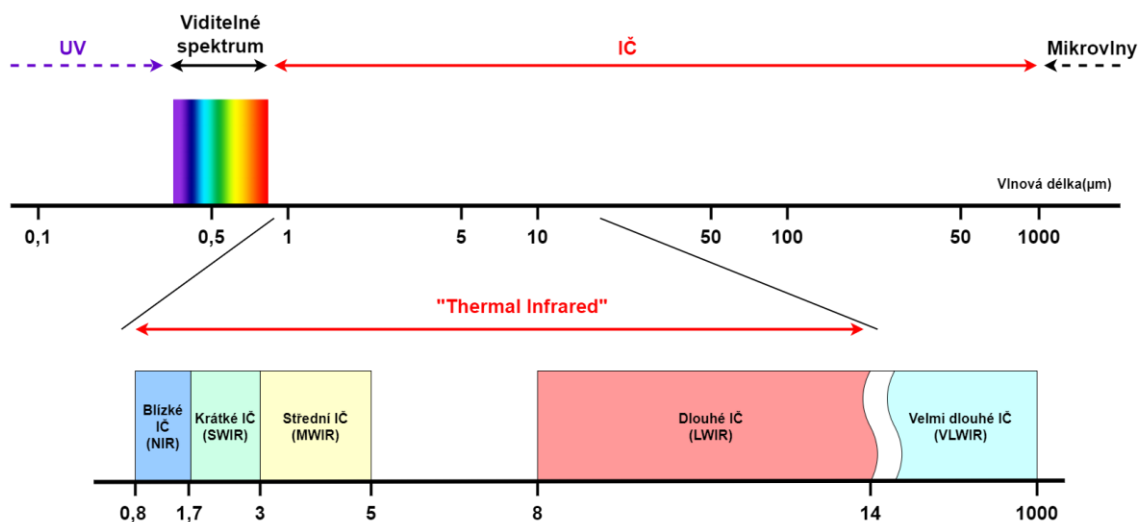
1 Úvod do termodiagnostických měření

Termografie, nebo také infračervená termografie je vědní obor, který se zabývá bezkontaktním způsobem měření a analýzou teploty na povrchu tělesa pomocí infračerveného záření. Běžně se také setkáme s názvy jako termodiagnostické měření, termovizní měření nebo infračervené měření, ale všechny názvy mají stejný význam [1].

Infračervené záření patří mezi elektromagnetická záření, které je emitováno každým tělesem, jehož teplota je vyšší než absolutní nula. S rostoucí teplotou se zvyšuje emitované infračervené záření. Infračervené záření se nachází na vlnové délce 0,7 μm – 1000 μm a nachází se mezi viditelným spektrem a mikrovlnným záření [2]. Na převzatém obrázku 1 je vidět, jak se infračervené záření dále rozděluje na několik pásem. V různých literaturách se hranice jednotlivých pásem lehce liší, ale ta hlavní myšlenka je tam pokaždé stejná. Pro účely termodiagnostických měření jsou nejdůležitější pásma středního a dlouhého IČ záření [3].

V části pásma **IČ střední vlnové délky (MWIR)** měří pouze malé množství termokamer, konkrétně termokamery s kvantovým detektorem, které se využívají především ve vědeckém výzkumu a vojenských aplikacích [1].

Na pásmu **IČ dlouhé vlnové délky (LWIR)** měří většina termokamer, se kterými se může běžný člověk setkat [1].



Obrázek 1: Elektromagnetické spektrum [1]

1.1 Bezkontaktní měření běžných teplot

Infračervená kamera, známější jako **termokamera** je zařízení, které dokáže detekovat a zobrazovat infračervené záření, které je emitováno všemi objekty. Termokamery měří intenzitu infračerveného záření na různých místech povrchu, přiřazuje jim hodnoty teplot, které převede na formu barevného obrazu. Výstupem z termokamery je termogram, na kterém jsou tyto barevné obrazy zobrazeny a díky tomu lze sledovat tepelné změny a anomálie, které by lidské oko nebylo schopné rozpoznat [1].

Bezkontaktní teploměry využívají stejný princip jako termokamery, tedy že měří infračervené záření. Hlavní rozdíl je takový, že snímají pouze jednu oblast a měří její průměrnou teplotu. Velikost oblasti závisí na vzdálenosti a typu daného měřicího přístroje [3].

1.2 Přínosy termodiagnostického měření

Termokamery mají několik výhod oproti teplotním sensorům:

- **Měření v obtížně dostupných místech:** Termokamery umožňují měřit teplotu i v místech, kam se teplotní senzor snadno nedostane.
- **Bezkontaktní měření:** Termokamery umožňují měřit teplotu bez fyzického kontaktu, což je jednodušší, rychlejší a bezpečnější. Zároveň umožňuje termokamera měřit teplotu pohybujících se objektů.
- **Měření více bodů najednou:** Hlavní výhodou termokamer je schopnost měřit teplotu mnoha bodů najednou, což umožňuje detekovat teplotní rozdíly nebo teplotní ztráty.
- **Grafické zobrazení teplotních dat:** Termokamery poskytují grafické zobrazení teplotních dat, což umožňuje jednoduchou analýzu měřených objektů.
- **Viditelnost ve speciálních podmínkách:** Termokamery umožňují vidět ve tmě nebo skrz kouř, který neobsahuje velké množství pevných částic.

1.3 Omezení a nedostatky termodiagnostického měření

Důležité je také zmínit nevýhody termokamer oproti teplotním sensorům:

- **Vysoká cena:** Termokamery jsou obvykle mnohem dražší než běžné teplotní senzory, což je pro většinu uživatelů důležitý faktor.
- **Neschopnost měřit vnitřní teplotu:** Termokamery měří pouze povrchové teploty, takže neumožňují měření teploty uvnitř objektu.
- **Přímá viditelnost:** Měřený objekt musí být pro termokameru přímo viditelný a přístupný. V případech, kdy je potřeba měřit teplotu za překážkou, je třeba využít speciální IČ propustné materiály.
- **Náchylný na rušivé vlivy:** Termokamery jsou velmi náchylné na různé rušivé vlivy, které mohou úplně změnit naměřené teploty.
- **Složitější zpracování:** Většina měření termokamerou nekončí pouze pořízením snímku, protože např. při kvalitativním měření je nutné znát vlastnosti měřeného materiálu a okolní podmínky během měření.

1.4 Využití termodiagnostických měření

Následující informace vychází z publikace *Termovízia a jej využitie v praxi* [3]. Termokamery se obecně využívají pro měření teploty a hledání vad nebo anomálií pomocí teplotních rozdílů. Termokamery mají široké uplatnění v mnoha oborech a odvětvích. V následujících bodech jsou zkrácené popsány některé z nich.

Průmysl: V průmyslu se termokamery používají jako kontrola kvality výroby, inspekce elektrických zařízení, detekce úniků plynu nebo pro kontrolu teploty konkrétních součástí při výrobovém procesu.

Stavebnictví: Termokamery se používají ke zjištění tepelných ztrát, k detekci vlhkosti nebo jako kontrola budov a infrastruktury.

Lékařství: V lékařství se termokamery používají k měření teploty těla a detekci horečky. Mohou také pomoci při diagnostice konkrétních zdravotních onemocnění jako je zjištění zánětů, nebo sledování prokrvení tkání.

Energetika: V energetice se termokamery používají na detekci tepelných úniků v potrubí, nebo hledání vad na solárních panelech. Dále se používají pro posouzení kvality izolace, hledání přechodových odporů nebo sledování chlazení.

Záchranářství: Termokamery se používají k hledání osob v troskách nebo požárech a k identifikaci ohnisek požárů. Zároveň slouží k pátrání po pohřešovaných nebo hledaných osobách.

Armáda: Termokamery se používají ke sledování pohybu jednotek a identifikaci skrytých cílů. Dále mohou pomoci při hledání přeživších po haváriích.

1.5 Časté mýty a omyly o termokamerách

Při zpracování této práce jsem zjistil, že má mnoho lidí mylné představy o termokamerách. Z toho důvodu je tato část věnována několika častým mýtům a omylům, které jsem se dozvěděl od lidí z mého okolí.

„Termokamery vidí skrze všechny materiály, ať už se jedná o širokou zeď z cihel, nebo ocelové dveře.“ V mnoha filmech jsou termokamery zobrazovány jako jakési „magické zařízení“, které umožní hlavním hrdinům vidět skrze všechny možné povrchy, nezáleží na jejich materiálu nebo tloušťce. To je už z praktického hlediska hloupost, protože bychom v tom případě viděli skrze každý objekt, který chceme měřit, což není pravda [4].

„Termokamery jsou extrémně drahé a jsou jen pro profesionály.“ Na tomto tvrzení je sice trocha pravdy, ale ne všechny termokamery stojí stovky tisíc. Termokamery jsou stejné, jako ostatní měřicí přístroje v tom, že existuje v mnoho různých variantách. Je pravda, že existují profesionální varianty za desítky nebo i stovky tisíc, ale zároveň existují i levnější alternativy jako například termokamery k telefonu.

„Termokamery se dají jednoduše ošálit blátem.“ Tento mýtus je velmi rozšířený hlavně kvůli známému filmu Predátor, ve které se hlavní postava skryla před termovizí pomocí bláta. Tato metoda by na pár momentů skutečně fungovala, dokud by lidské tělo nezačalo zahřívat bláto [4].

„Termokamery mohou snadno odhalit nemocné lidi.“ Během pandemie Covid-19 na některých místech měřili teplotu osob pomocí termokamer nebo bezkontaktních teploměrů. Pomocí toho zjišťovali, jestli tyto osoby nemají zvýšenou teplotu a nejsou potenciálně nemocní. Jelikož se nejedná o definitivní detekci nemoci, tak musela osoba se zvýšenou teplotou podstoupit další test, aby se potvrdila pravděpodobnost nákazy [4].

„Termokamery jsou přesné na desetiny stupně.“ To navazuje na předešlý mýtus, protože většina termokamer má velké tolerance přesností (např. $\pm 2^\circ\text{C}$). To znamená, že při měření teploty musíme brát v potaz tuto toleranci. Naměřená teplota $37,0^\circ\text{C}$ může ve skutečnosti být $38,3^\circ\text{C}$, což stále spadá do tolerance $\pm 2^\circ\text{C}$. Přesností termokamer se blíže zabývá kapitola 3.2.4.

„Termokamery jsou nebezpečné pro zdraví.“ Termokamery měří pouze intenzitu infračerveného záření, které je vyzařované každý objektem, jehož teplota je větší než absolutní nula. Samotné termokamery nefungují na principu, že by vysílaly záření a potom měřily, kolik se ho vrátí.

„Termokamery fungují stejně jako noční vidění.“ Noktovizor, také známý jako noční vidění může vypadat podobně, ale ve skutečnosti funguje úplně na jiném principu. Noktovizory nemají nic společného s IR záření, protože pouze zesilují zbytkové světlo [3].

2 Teorie termokamer

Tato kapitola se zabývá důležitou teorií týkající se termokamer. Začátek je zaměřen především na důležité termíny spojené s termografickým měřením a termokamerami. Další část je zaměřená na fyzikální zákony a rovnice. Následně je obecně vysvětlen princip termokamer, a nakonec jsou rozebrány rušivé vlivy ovlivňující měření.

2.1 Termíny a definice

Následující termíny jsou nejdůležitější částí teorie, kterou by měl znát každý člověk, co pracuje s termokamerami.

2.1.1 Emisivita (ϵ)

Emisivita je vlastnost materiálu, která určuje schopnost absorbovat a emitovat tepelné záření. Hodnoty emisivity se pohybují mezi 0 a 1. Materiál s emisivitou 0 odráží veškeré tepelné záření a dali by se označit za emisivní zrcadlo [4]. Jedná se pouze o teoretický termín, protože žádný takový materiál v reálném světě neexistuje. Materiál s emisivitou 1 absorbuje a emituje veškeré tepelné záření a označuje se jako černé těleso, které je detailněji popsáno v kapitole 2.1.4.

Emisivita je jedním z nejdůležitějších údajů v termografii. Při bezdotykovém měření teploty je nutné znát emisivitu materiálů, protože špatné nastavení může vést k nepřesnému měření [3].

Emisivita materiálů je ovlivněna třemi hlavními faktory: typem materiálu, typem povrchu a teplotou [1]. Kovy mají obvykle nižší emisivitu než nekovy. Hrubost povrchu, oxidace nebo nanesená barva mohou zvýšit emisivitu. S rostoucí teplotou se může měnit emisivita, ale výrazné změny nastávají až u stovek °C.

2.1.2 Odrazivost (ρ)

Odrazivost je míra, jakou je materiál schopný odrážet tepelné záření přicházející od jiného objektu v okolí na místo toho, aby ho absorboval [2].

Tento údaj se většinou nikde neuvádí z toho důvodu, že nemá příliš velký význam a je možné ho odvodit z emisivity, jak je vysvětlené v kapitole 2.2.3.

2.1.3 Propustnost (τ)

Propustnost je schopnost materiálu propouštět skrze sebe infračervené záření. Většina plynů je IČ propustná a hodnota propustnosti je blízká hodnotě 1. Na druhou stranu většina pevných látek je pro infračervené záření téměř nepropustná a existuje pouze velmi malé množství materiálů, které se dají považovat za IČ propustné [3]. Hodnota propustnosti velmi záleží na typu a tloušťce materiálů, protože některé velmi tenké materiály jsou IČ propustné.

2.1.4 Černé těleso

Absolutní černé těleso dokonale pohlcuje veškeré dopadající tepelné záření, nezávisle na úhlu dopadu a vlnové délce. Toto těleso dokáže vyzářit maximální množství energie [5]. Jeho emisivita je stále rovna 1, bez ohledu na jakékoliv parametru.

Reálné černé těleso se snaží vlastnostmi přiblížit absolutnímu černému tělesu. Jeho emisivita se přibližuje hodnotě 1, ale nikdy ji nedosáhne. Obvykle se pohybuje v rozmezí 0,95 až 0,99 v závislosti na teplotě dutiny. K dosažení takto vysoké emisivity využívá tzv. dutinový efekt [5].

Dutinový efekt nastává, když se záření musí mnohokrát odrazit, než dosáhne požadovaného místa. Tím se zvyšuje hodnota emisivity. Lze tedy říci, že emisivita reálného černého tělesa je z velké části určena jeho geometrií, nikoli povrchem [1].

2.1.5 Šedé těleso

Šedé těleso se velmi podobá černému tělesu s tím rozdílem, že si udržuje konstantní emisivitu, která je menší než 1 v celém spektru infračerveného záření. V termografii se za šedá tělesa považuje mnoho materiálů, protože se jejich emisivita téměř nemění ve spektrální rozsahu. [6]

2.1.6 Kvalitativní měření

Kvalitativní měření se zaměřuje na porovnávání barev v závislosti na teplotě. Je důležité si uvědomit, že nejde o přesné teploty, ale spíše o relativní změny. To znamená, že se pouze hledají místa, která mají rozdílné teploty od jejího okolí. Kvalitativní měření se nezabývá konkrétními čísly, ale spíše vizuálním porovnáním. Během tohoto měření je důležité brát v potaz i emisivitu, jelikož materiály s extrémně rozdílnou emisivitou a teplotou mohou mít na termokameře stejnou barvu [4].

Tato metoda se často používá při hledání poruch na elektrických zařízeních, kde můžeme identifikovat zahřáté komponenty, které mohou značit nějaké potíže [7]. Je to rychlý a efektivní způsob, jak identifikovat potenciální problémy.

2.1.7 Kvantitativní měření

Kvantitativní měření se zaměřuje na měření konkrétních teplot. Při tomto typu měření je klíčové znát faktory, které ovlivňují měření, jako emisivita a okolní podmínky. Tato metoda se využívá při monitorování teploty strojů a elektrických zařízení [8]. Na rozdíl od kvalitativního měření je mnohem složitější, protože vyžaduje znalost podmínek při měření a schopnost správně zpracovat naměřené termogramy.

2.1.8 Teplotní citlivost NETD

Teplotní citlivost termokamery se v anglické literatuře vyjadřuje pomocí NETD (noise equivalent temperature difference), což určuje nejmenší rozdíl teplot, který je detekovatelný a je větší než vlastní šum termokamery. V praxi se tento údaj uvádí v mK (10^{-3} Kelvin) a chceme tuto hodnotu co nejmenší. Je zde přímá úměrnost mezi teplotní citlivostí a množstvím šumu v termogramu. Běžné termokamery mají teplotní citlivost mezi 100–50 mK a lepší mají citlivost mezi 50–15 mK [9].

2.1.9 Zorné pole termokamery

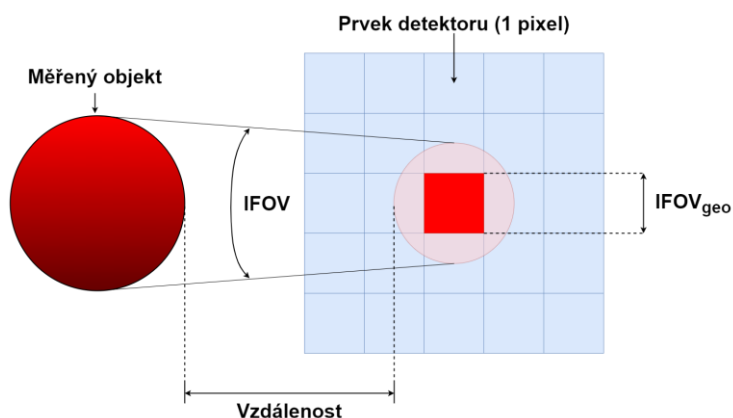
Zorné pole termokamery nebo také FOV (field of view) udává hodnotou úhlu a popisuje plochu, kterou je schopna termokamera obsáhnout. Velké zorné pole má při stejném detektoru širokoúhlý objektiv. Výběr zorného pole zaleží na účelu aplikace. Pokud je třeba měřit teplotu na větší vzdálenosti, bude vhodnější termokamera s menším zorným polem. Pokud je však potřeba měřit teploty na kratší vzdálenosti, bude vhodnější termokamery s větším zorným polem a širokoúhlým objektivem [1].

2.1.10 IFOV

IFOV (Instantaneous Field of View) by se dalo přeložit jako okamžité zorné pole a popisuje úhel, kterým se termokamera dívá na objekt. Závisí na vzdálenosti mezi kamerou a objektem. IFOV udává úhel, který odpovídá jednomu pixelu na obrazovce termokamery a většinou se uvádí v jednotkách mrad/pixel (10^{-3} radiánů na pixel).

Zároveň je důležitý pojem nejmenší rozpoznatelný objekt $IFOV_{geo}$, který popisuje velikost nejmenší oblasti, která odpovídá jednomu pixelu v závislosti na vzdálenosti [6]. Jak je vidět na převzatém obrázku 2, tak by měl být měřený objekt 2x až 3x krát větší než $IFOV_{geo}$.

Čím kratší je vzdálenost mezi kamerou a objektem, tím menší je $IFOV_{geo}$ a tím detailnější je oblast, kterou jeden pixel kamery měří [1]. Tento údaj je důležitý především při pořizování detailních snímků malých objektů v blízkosti nebo měření malých objektů z velké vzdálenosti.



Obrázek 2: Okamžité zorné pole [10]

2.2 Rovnice a zákony

2.2.1 Planckův vyzařovací zákon

Planckův vyzařovací zákon popisuje závislost intenzity vyzařování absolutně černého tělesa na vlnových délkách. Jeho základní podstata spočívá v tom, že energie vyzařovaného tělesa není spojitá, jak popisuje vzorec (1). Planckův vyzařovací zákon je klíčovým členem pro převod infračerveného záření na teplotní data, které termokamery poskytují.

$$M_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1\right)} \quad (1)$$

Pro usnadnění výpočtu se využívá následující zjednodušený tvar vzorce (2).

$$M_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1\right)} \quad (2)$$

2.2.2 Stefan-Boltzmannův zákon

Stefan-Boltzmannův zákon popisuje vztah mezi teplotou objektu a množstvím záření, které vysílá. Jak je ve vzorci (3) vidět, tak je odvozen z Planckova zákona pomocí integrace.

$$E(T) = \int_0^{\infty} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1\right)} d\lambda = \left(\frac{2\pi^5 k^4}{15h^3 c^2}\right) T^4 = \sigma \cdot T^4 \quad (3)$$

Pro zjednodušení výpočtu se do zlomku před teplotou dosadí konstanty, ze kterých vznikne Stefan-Boltzmannova konstanta σ , která má hodnotu $\sigma = 5,670\,374 \cdot 10^{-8} \text{ [W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}]$.

Pro ověření správnosti výpočtu byla provedena kontrola pomocí rozměrové analýzy:

$$\frac{(\text{J}\cdot\text{K}^{-1})^4}{(\text{J}\cdot\text{s})^3(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})^2} = \frac{\text{J}^4\cdot\text{K}^{-4}}{\text{J}^3\cdot\text{s}^3\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}} = \frac{\text{J}\cdot\text{K}^{-4}}{\text{s}\cdot\text{m}^2} = \text{J}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4} = \text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4} \quad (4)$$

Ze vzorce (5) vychází, že intenzita vyzařování absolutně černého tělesa závisí pouze na jeho teplotě.

$$E_0 = \sigma_0 \cdot T^4 \quad (5)$$

Pro šedá tělesa existuje velmi zjednodušená varianta Stefan-Boltzmannova zákona.

$$E_0 = \sigma_0 \cdot \varepsilon \cdot T^4 \quad (6)$$

2.2.3 Záření reálných těles

Ze zákona zachování energie vychází, že veškeré záření, co vstoupí do tělesa se buď absorbuje, odrazí nebo propustí skrze těleso, jak je uvedeno ve vzorci (7) [1].

$$\Phi = \Phi_{\alpha} + \Phi_{\rho} + \Phi_{\tau} \quad (7)$$

Těmto parametrům odpovídají následující součinitelé:

Součinitel pohltivosti:

$$\alpha = \frac{\Phi_{\alpha}}{\Phi} \quad (8)$$

Součinitel odrazivosti:

$$\rho = \frac{\Phi_{\rho}}{\Phi} \quad (9)$$

Součinitel propustnosti:

$$\tau = \frac{\Phi_{\tau}}{\Phi} \quad (10)$$

Po dosazení do dosazení součinitelů vzniká vztah:

$$\Phi = \alpha \cdot \Phi + \rho \cdot \Phi + \tau \cdot \Phi \quad (11)$$

Pokud se obě strany rovnice vydělí Φ , tak vznikne vztah mezi absorpcí (α), odrazivostí (ρ) a propustností (τ):

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (12)$$

V rovnovážném stavu je dle Kirchhoffova zákona množství emitované energie stejné jako množstvím absorbované energie [2].

$$\varepsilon = \alpha \quad (13)$$

Z toho vznikne vztah mezi emisivitou (ε), odrazivostí (ρ) a propustností (τ).

$$\varepsilon + \rho + \tau = 1 \quad (14)$$

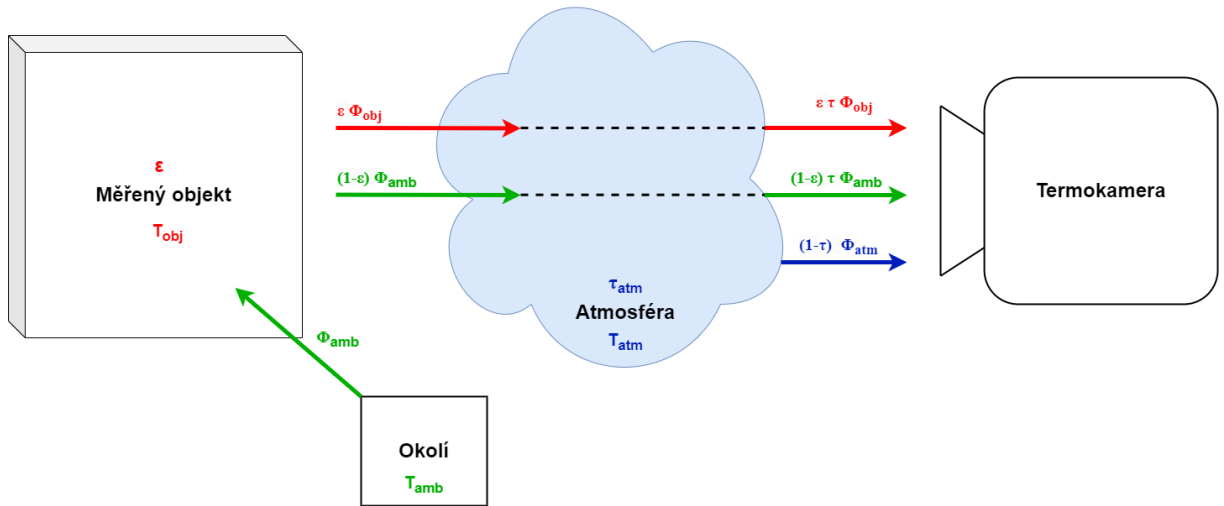
Pro většinu běžných materiálů se můžu propustnost (τ) zanedbat. Díky tomu se vztah zjednoduší na:

$$\varepsilon + \rho = 1 \quad (15)$$

Tento vzorec určí jednoduchý vztah mezi emisivitou a propustností. Díky tomu je možné na tyto parametry nahlédnout z trochu praktičtějšího pohledu. Materiál s emisivitou 0,95 lze chápat tak, že 95% měřeného záření přichází přímo od materiálu a zbylých 5% záření přichází odražené z okolí.

2.2.4 Rovnice záření

Následující informace jsou parafrázovány z publikace *Infrared thermal imaging: fundamentals, research and applications* [1]. Základní proces měření v termografii je popsán pomocí rovnice termografie, která zahrnuje všechny jevy ovlivňující detekci záření emitované měřeným objektem při určité teplotě, jak je zobrazeno na převzatém obrázku 3 [1].



Obrázek 3: Základní proces měření [1]

Úplný popis základního procesu měření by zahrnoval FOV detektoru, propustnost optiky a mnoho dalších parametrů. Pro zjednodušení vztahu tyto parametry nebudeme zohledňovat. Dále budeme předpokládat, že měřený objekt je neprůhledné šedé těleso.

Rovnice záření začíná měřeným objektem o teplotě T_{obj} a síla záření měřeného objektu je $\Phi_{obj}(T_{obj})$. Objekt přijímá tepelné záření ze svého okolí o teplotě T_{amb} a bude odražen zářivý výkon $(1-\varepsilon)\Phi_{amb}(T_{amb})$. Okolní teplota se často označuje jako zdánlivá odražená teplota. Než se zářivý výkon z objektu a okolí dostane ke kameře musí projít skrze atmosféru. V důsledku absorbování a rozptylování v atmosféře je zářivý výkon zeslaben. To lze popsat vynásobením zářivého výkonu z objektu a okolí atmosférickou propustností τ_{atm} . Pokud předpokládáme, že v propustnosti atmosféry dominují pouze ztráty absorpcí (zanedbáme rozptýlení), bude atmosféra při teplotě T_{atm} také emitovat zářivý výkon $(1 - \tau_{atm})\Phi_{atm}(T_{atm})$.

Tudíž kamera detekuje směs zářivého výkonu z objektu, okolí a atmosféry. Celkový zářivý výkon na detektoru Φ_{det} lze popsat jako:

$$\Phi_{det} = \tau_{atm} \varepsilon \Phi_{obj}(T_{obj}) + \tau_{atm}(1 - \varepsilon) \Phi_{amb}(T_{amb}) + (1 - \tau_{atm}) \Phi_{atm}(T_{atm}) \quad (16)$$

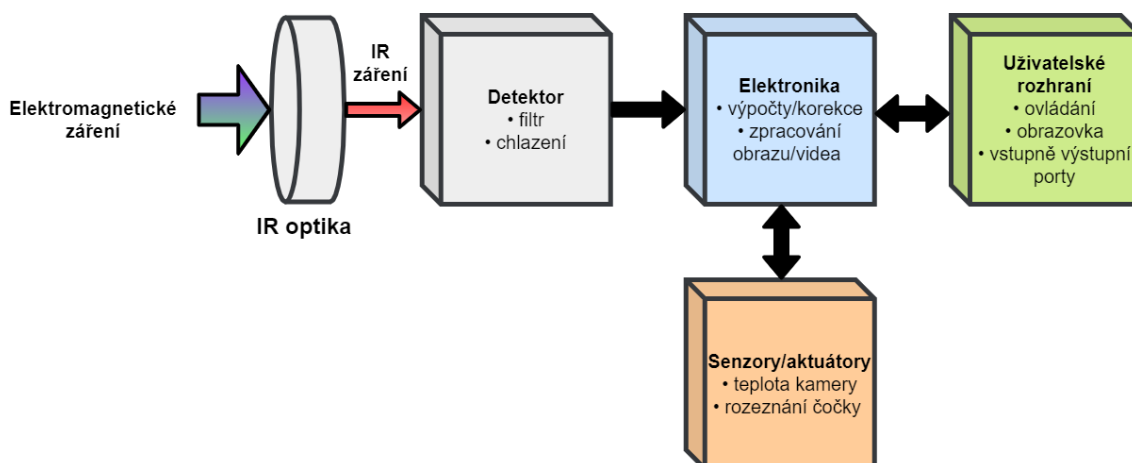
Záření vycházející z měřeného objektu se potom počítá pomocí následujícího vztahu:

$$\Phi_{obj}(T_{obj}) = \frac{\Phi_{det}}{\tau_{atm} \varepsilon} - \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon} \Phi_{amb}(T_{amb}) - \frac{(1 - \tau_{atm})}{\tau_{atm} \varepsilon} \Phi_{atm}(T_{atm}) \quad (17)$$

2.3 Princip termokamer

V předešlých kapitolách bylo zmíněno, že termokamery detekují intenzitu infračervené záření, ze které se počítá teplota. V této kapitole bude zjednodušeně vysvětlen princip termokamer a z jakých komponentů se skládá (viz obrázek 4).

První částí termokamery je optika, do které vstupuje celé spektrum elektromagnetického záření a má za úkol propouštět pouze určitou část spektra, která odpovídá IR záření. Většina optik se vyrábí z germania nebo křemíku, protože na rozdíl od většiny ostatních materiálů propouští infračervené záření. V detektoru se propuštěné záření převede na elektrický signál, který se následně pošle do elektroniky, ve které se zpracuje. Elektronika provede veškeré přepočty na teploty pomocí všech poskytnutých údajů jako je typ objektivu, emisivita, vlhkost, teplota okolí, vzdálenost měřeného objektu a mnoho dalších. K rozpoznání objektivu a měření teploty některých komponentů využívá kamera mnoho různých senzorů. Posledním komponentem je uživatelské rozhraní, ve kterém se mohou termokamery lišit. Nejčastěji se setkáme k displejem a několika ovládacími tlačítky. Existují však termokamery, které se musí připojit např. k počítači nebo k mobilnímu telefonu [1].



Obrázek 4: Blokově znázorněné komponenty termokamery [1]

2.3.1 Kalibrace

Termokamery jsou opravdu zajímavými zařízeními, protože provádějí automatickou kalibraci i několikrát za minutu. Kalibrace probíhá tím způsobem, že se v kameře optika otočí směrem na vnitřní černé těleso, které má přesně danou emisivitu, a automaticky se zkalibruje [4]. Kompenzuje se tím variace detektorů, sebe-emise kamery a fluktuace vnitřní teploty, aby udržovala přesnost a uniformita měření teploty [1].

Vzdálenost mezi detektorem a černým tělesem je dostatečně malá, aby se mohla zanedbat atmosféra, ale stále se zachovala přesnost. Jelikož se emisivita černého tělesa blíží k 1, tak je možné zanedbat také teplotu okolí. Díky tomu je detekované záření Φ_{det} rovno měřenému záření Φ_{obj} . Z toho důvodu stačí znát teplotu černého tělesa, aby se termokamera zkalibrovala na tuto teplotu [1].

2.3.2 Stanování emisivity

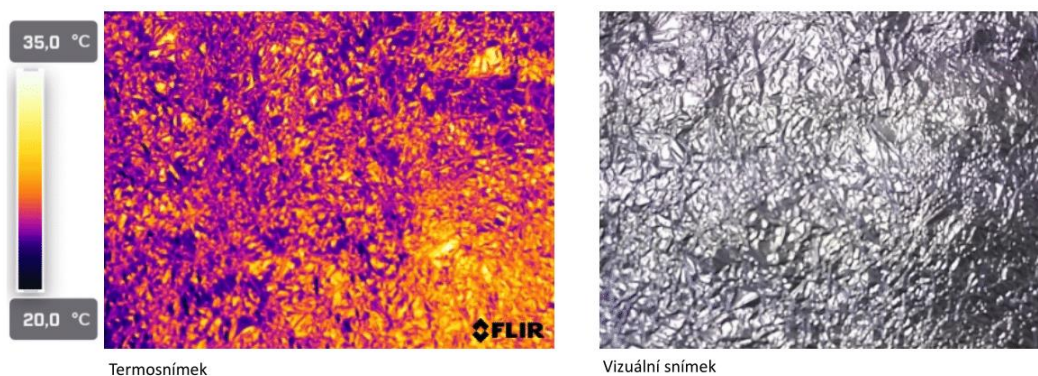
Pro termodiagnostické měření je nutné znát emisivitu měřeného povrchu. Jednou z metod je použití tabulky emisivit [11], která obsahuje emisivity různých materiálů při různých teplotách a vlnových délkách. Nicméně to není přesná metoda, protože se emisivita může lišit v závislosti na jeho povrchových úpravách, oxidaci, úhlu měření, teplotě a mnoha dalších. Navíc některé tabulky nemusí daný materiál vůbec obsahovat, nebo se hodnota emisivity nemusí shodovat se skutečností.

Další metodou je použití kalibračního zdroje s pevně stanovenou emisivitou. Pomocí změřených teplot a emisivity kalibračního zdroje lze vypočítat emisivitu měřeného materiálu. Tato metoda je přesnější než použití tabulky emisivit, ale vyžaduje kalibrační zdroj záření s pevně stanovenou emisivitou [1].

2.3.3 Měření okolní teploty

Existuje několik způsobů, jak změřit teplotu v okolí. Prvním je měření střední radiační teploty pomocí kulového teploměru, jako je např. Ahlborn FPA805GTS [12]. Měření střední radiační teploty poskytuje podrobnější údaje o teplotních podmínkách prostředí. Na rozdíl od běžného pokojového teploměru, který měří teplotou pouze v jednom místě, měření střední radiační teploty nabízí ucelený pohled na tepelnou výměnu záření mezi různými zdroji tepla a okolím. Problém s tímto řešením je takový, že cena profesionálních kulových teploměrů může být poměrně vysoká, často přesahující několik desítek tisíc korun.

Druhou možností je použít kus zmačkaného alobalu a termokameru. Alobal má velmi nízkou emisivitu a vysokou odrazivost, takže dobře odráží teplotu z okolí. Zmačknutím alobalu se zajistí, že se bude tepelné záření odrážet ze všech různých směrů. Takto zmačkaný alobal se umístí co nejbližší k měřenému objektu. Po pořízení snímku se nastaví emisivita na $\epsilon = 1$ a změří se průměrná teplota na celém povrchu alobalu, což odpovídá průměrné teplotě v okolí [4]. Na obrázku 5 je vidět, jak vypadá termální a vizuální snímek alobalu při tomto měření. Při zpracování tohoto snímku byla vyčtena okolní teplota 25,1 °C.



Obrázek 5: Měření okolní teploty

2.4 Přesnost bezkontaktní měření běžných teplot

Při měření teploty pomocí termokamery se často setkáváme s různými faktory, které mohou ovlivnit přesnost a spolehlivost výsledků. Pro dosažení nejpřesnějších výsledků je nutné tyto faktory znát a minimalizovat jejich dopad. Pokud se naměřená teplota liší od skutečné, je to zpravidla způsobeno nesprávným nastavením parametrů, které mohou vnikat nevhodným postupem měření, chybnou interpretací, nebo nesprávnou volbou měřicí techniky pro danou aplikaci. Mezi nejzásadnější zdroje nepřesností patří emisivita, zdánlivá odražená teplota a vliv okolního prostředí.

2.4.1 Vliv emisivity

Vyšší emisivita znamená přesnější měření teploty termokamerou. Ideální emisivita má hodnotu 1, avšak to je v běžné praxi nedosažitelné. Problém emisivity spočívá v tom, že každý materiál má odlišnou hodnotu. Dokonce se mohou v emisivitě lišit i stejné materiály z různých důvodů, což bylo podrobněji vysvětleno v kapitole 2.1.1.

Podle emisivity můžeme rozlišovat materiály na:

Materiály s vysokou emisivitou mají hodnotu $\varepsilon \geq 0,8$. Tyto materiály lze snadno měřit termokamerou bez dodatečných úprav, protože dobře vyzařují tepelné záření. Stačí pouze nastavit správnou hodnotu emisivity. Mezi tyto materiály patří například textilie, polymery, nebo materiály s matnými povrchy [6].

Materiály se střední emisivitou mají hodnotu $0,6 > \varepsilon > 0,8$. Tyto materiály se většinou neměří kvantitativně, ale pro přesné měření je většinou potřeba zvýšit jejich emisivitu. Mezi tyto materiály patří například cihly, sklo nebo silně zoxidované kovy [6].

Materiály s nízkou emisivitou mají hodnotu $\varepsilon \leq 0,6$. Tyto materiály jsou nevhodné pro měření teploty termokamerou, protože špatně vyzařují tepelné záření. Termokamera může ukázat pouze orientační teplotu, která se může lišit od té skutečné i o desítky stupňů. Z toho důvodu je nutné emisivitu těchto materiálů nějakým způsobem zvýšit. Mezi tyto materiály patří většina kovů jako například hliník, ocel, měď [6].

2.4.2 Vliv zdánlivé odražené teploty

Zdánlivá odražená teplota je teplota, kterou termokamera vidí jako odraz okolních objektů na povrchu měřeného tělesa. Čím nižší je emisivita, tím více se od materiálu odráží okolní teplota. To může vést k tomu, že termokamera naměří teplotu, která je ovlivněna nejen zářením měřeného tělesa, ale i zářením ze zdroje tepla v okolí. Tím může být slunce, klimatizace, radiátor, oheň, člověk. Aby se tento vliv minimalizoval, je třeba odstínit nebo odstranit veškeré zdroje tepla v okolí.

2.4.3 Vliv okolního prostředí

Pro přesné měření termokamerou je důležité přizpůsobit okolní prostředí. Toho se dá dosáhnout při dodržení následujících několika kroků.

Minimalizace proudícího vzduchu: Vítr nebo průvan může chladit materiál a tím znehodnotit měření. V ideálním případě se zavrou všechny dveře, okna a minimalizují se ostatní zdroje nechtěného průvanu.

Udržení konstantní pozice: Při měření je nejlepší dodržovat stejnou pozici. Tím se zajistí, že se nezmění úhel měření ani velikost měřené plochy.

Stabilizace termokamery: Náhlé změny teploty mohou snížit přesnost měření, takže je dobré ji nechat na jednom místě. Po uložení na toto místo by se mělo počkat několik minut od zapnutí, než se začne měřit (Flir T540 má doporučený čas alespoň 5 minut) [13]. Termokamera by měla být také upevněna na stativu nebo jiném stabilním podstavci, aby se zabránilo rozmazání obrazu.

Měření ve vhodném čase: Pro přesné měření je potřeba, aby okolí bylo klidné a neměnné. Teplota okolí se rychle nemění, slunce nesvítí přímo na měřenou plochu, nefouká vítr a neprší (nedochází ke změně vlhkosti).

Atmosférické nečistoty: Prach nebo mlha mohou ovlivnit průchod infračerveného záření což zhoršuje přesnost při kvantitativním měření. Aby se tomu předešlo, je třeba nastavit v termokameře správnou hodnotu propustnosti, která zohlední útlum záření v atmosféře.

2.4.4 Snížení rušivých vlivů

Pro přesné měření je nutné znát podmínky měření a vlastnosti měřených materiálů, aby se tomu mohl přizpůsobit postup měření. Pokud se měří materiál s nízkou emisivitou, je nutné tuto emisivitu nějakým způsobem zvýšit. Toho je možné dosáhnout například pomocí profesionálních produktů: speciální samolepící štítky ThermaSpot [14] nebo speciální barva ThermaSpray [15]. Tyto produkty mají výrobcem přesně stanovené vlastnosti a jsou vhodné pro profesionálnější měření.

Existují však levnější alternativy na zvýšení emisivity, které fungují velmi podobně. Několik konkrétních metod bude otestováno v kapitole 4.7.3. Bohužel tyto metody nemají přesně zaručené vlastnosti pro vysoké teploty, takže se spíše hodí pro měření běžných teplot do 200°C.

Další možností zvýšení emisivity je vytvoření díry v měřeném objektu. Tímto způsobem lze zvýšit emisivitu, pomocí dutinového efektu. Problém je v tom, že vytvoření díry v materiálu může narušit jeho strukturu nebo funkčnost.

Zdánlivá odražená teplota může být řešena několika metodami. Jednou z nejlepších metod změna úhlu měření, aby v odrazu nebyl vidět nějaký zdroj tepla. Další metodou je odstranění nebo odstínění zdroje tepla, který se nachází v okolí. Pro odstínění stačí využít například kus textilie, nebo desku vytvořenou z materiálu s vysokou emisivitou.

3 Termokamery

Tato část práce bude více zaměřena na termokamery. Nejprve bude popsáno rozdělení termokamer a poté bude představena termokamera Flir T540, včetně ovládacích prvků, vlastností a funkcí. Následně bude porovnána s dalšími kamerami od konkurenčních výrobců.

3.1 Rozdělení termokamer

Termokamery se dělí podle spektrálního rozsahu na dvě hlavní kategorie: termokamery s tepelným detektorem a termokamery s kvantovým detektorem.

Termokamery s tepelným detektorem mají menší teplotní citlivost, hranice je okolo 30 mK. Vlnové pásmo je ve většině případů v rozmezí 7–14 μm . Tyto termokamery jsou vhodné pro běžné použití, například pro kontrolu elektrických rozvodů, kontrolu funkčnosti chladících zařízení nebo pro odhalení úniku tepla [16].

Termokamery s kvantovým detektorem jsou vždy chlazené a používají se zejména pro měření běžných teplot. Využívají se pro vojenské a vědecké účely a mohou být dokonce širokopásmové. Tyto termokamery mají teplotní citlivost až 13 mK a dokáží měřit na různých pásmech v rozsahu 0,75–14 μm [16].

3.2 Flir T540

Flir T540 se řadí mezi profesionální termokamery, které se využívají k diagnostice potenciálních závad v průmyslových, elektrických a mechanických systémech nebo k odhalení teplotních anomálií během výzkumu a vývoje [17].

Mezi klíčové přednosti patří otočný objektiv s rozsahem 180 stupňů, který umožňuje snadno zaměřit měřený objekt a zároveň pohodlně orientovat displej směrem k uživateli.

Tato termokamera umožňuje nejen fotit, ale i natáčet videa s maximální snímkovací frekvencí 30 snímků za sekundu, což je výhodné pro měření dynamických jevů.



Obrázek 6: Termokamera Flir T540

3.2.1 Technické parametry

Flir T540 má rozlišení 464 x 348 pixelů a dokáže měřit teploty v rozmezí od -20 °C do 1500 °C. Kamera má teplotní citlivost menší než 30 mK a nabízí několik různých objektivů se zornými úhly 14°, 24° nebo 42°. Dokáže měřit na spektrálním rozsahu 7,5–14,0 μm [17].

3.2.2 Vlastnosti

Kamera je vybavena funkcí MSX, která umožňuje kombinovat obraz termokamery s obrazem z běžné kamery, což vede ke zlepšení interpretace snímků. Tato funkce je vhodná pro hledání vad a poruch, kde může být obtížné určit polohu problému.

Jednou z důležitých vlastností je možnost automatického ostření, která umožňuje postupné ostření v průběhu měření. Samozřejmě nechybí možnost ručního ostření dle potřeby uživatele.

Termokamera Flir T540 je vybavena dotykovým displejem, který umožňuje uživatelům intuitivně ovládat různé funkce a nastavení kamery [17]. Dotykové rozhraní umožňuje rychlý výběr možností bez zdlouhavého proklikávání.

3.2.3 Ovládání

Obrázek 7 vychází z mých zkušeností při práci s touto kamerou a jsou na něm popsány základní ovládací prvky, které se dají rozdělit na mechanické a dotykové. Mechanické prvky jsou pro důležité funkce a jsou snadno přístupné, zatímco dotykové slouží spíše pro detailnější ovládání.



Obrázek 7: Pohled na termokameru zepředu

Většina prvků jsou samo vysvětlující, takže nepotřebují dalších komentář, ale některé z nich jsou trochu složitější. Například na programovatelná tlačítka lze nastavit různé funkce, ke kterým chce uživatel rychlý přístup, jako přepínání mezi natáčením snímků a videa. Programování tohoto tlačítka spočívá v podržení tlačítka po dobu 3 sekund a následného výběru požadované funkce.

Dalším složitějším prvkem je automatické kontinuální ostření, které potřebuje mít v nastavení zapnutý laser. Během kontinuálního ostření svítí laser na místo, ke kterému se průběžně zaostřuje. Velkou nevýhodou je to, že intervaly mezi ostřeními mohou být různé a uživatel musí čekat, než může pořídit nový snímek. Z toho důvodu bych doporučil využít tlačítka automatického zaostření a případné ruční doostření pomocí zaostřovacího kroužku.

Na obrázku 8 jsou popsány ovládací prvky na druhé straně kamery. Zde se nachází pouze 4 mechanická tlačítka z důvodu, že na ně uživatel při používání nevidí. Tím nejdůležitějším je určitě spoušť, která slouží k pořizování fotek a nahrávání videí. Tlačítko laseru slouží především k měření vzdálenosti od měřeného objektu, ale může být taky výhodné, aby uživatel viděl, které místo měří.



Obrázek 8: Pohled na termokameru zezadu

V menu lze nalézt: režim záznamu, parametry měření, režim snímků, měření, barva, nastavení. Více tyto nabídky nebudou popsány, protože mají v kameře krátký popis pro každou z nich. Detailnější popis jednotlivých funkcí a nabídek lze nalézt v uživatelské příručce [13].

3.2.4 Přesnost

Specifikace přesnosti (nebo přesněji řečeno nepřesnosti) udává absolutní hodnotu chyby měření při měření teploty černého tělesa. Flir T540 má stejně jako většina termokamer stanoveno absolutní přesnost teploty na ± 2 °C nebo ± 2 % naměřené teploty a platí vždy ta vyšší hodnota [9]. To znamená, že do 100 °C je pevně stanovená hranice přesnosti a od této teploty se začne přesnost procentuálně odvíjet od měřené hodnoty. Jelikož je přesnost měření pevně stanovená na ± 2 °C, tak se relativní chyba měření stále zvětšuje čím více se blížíme k 0 °C.

Důležité je uvědomit si, že se do této přesnosti ± 2 °C nevztahuje vliv emisivity nebo nějaký podobný vliv. Jakmile jsou parametry jako emisivita nastavené špatně, může být celková nepřesnost mnohem větší.

3.3 Porovnání kamer

V tabulce 1 je vidět porovnání podobných termokamer od konkurenčních firem, konkrétně: Flir T540 [17], Fluke TiX501 [18] a Testo 890 [19]. Při porovnání jednotlivých termokamer je patrné, že se v některých parametrech liší, ale obecně jsou si velmi podobné.

Tabulka 1: Porovnání termokamer

	Flir 540	Fluke TiX501	Testo 890
IR rozlišení	464 x 384	640 x 480	640 x 480
Super rozlišení	645 888 pixelů	Ne	1 228 800 pixelů
NETD	< 30 mK	< 75 mK	< 40 mK
Teplotní rozsah	-20°C až 1500°C	-20°C až +650°C	-30°C až +1200°C
Teplotní přesnost	$\pm 2^\circ\text{C}$ nebo $\pm 2\%$	$\pm 2^\circ\text{C}$ nebo $\pm 2\%$	$\pm 2^\circ\text{C}$ nebo $\pm 2\%$
Min. ostřicí vzdál.	15 cm	15 cm	10cm
Obrazová frekvence	30 Hz	30 Hz	33 Hz
Spektrální rozsah	7,5 μm – 14 μm	7,5 μm – 14 μm	7,5 μm – 14 μm
IFOV	1,66 mrad/pixel	0,93 mrad/pixel	0,71 mrad/pixel
Hmotnost	1,3 kg	1,54 kg	1,63 kg
Otočný objektiv	180°	240°	Ne
Technologie blend.	Ano (FLIR MSX®)	Ano (Fluke IR-Fusion®)	Ne
Software pro analýzu	FLIR Thermal Studio	Fluke SmartView®	IRSoft
Cena	> 450 000 Kč	> 475 000 Kč	> 400 000 Kč

3.3.1 Důležité údaje při výběru termokamery

Při výběru termokamery je důležité zvážit následující údaje:

- **Účel:** Existují různé typy termokamer, jako přenosné pro rychlé použití nebo stacionární pro průmyslové monitorování.
- **Objektiv a měřicí vzdálenost:** Volba objektivu závisí na vzdálenosti kamery k měřenému objektu.
- **Cena:** Závisí na vlastnostech a profesionální úrovni termokamery.
- **Zpracování dat:** Nutné je zvážit, které údaje je potřeba z termálních snímků vyčíst a jak s nimi pracovat dále.
- **Teplotní citlivost:** Udává schopnost rozlišit malé teplotní rozdíly.
- **Teplotní rozsah:** Označuje minimální a maximální měřitelné teploty.
- **Rozlišení snímače:** Vyšší rozlišení znamená detailnější obrazy.
- **Doplňkové funkce:** Některé termokamery nabízejí speciální aplikace, jako je nahrávání videa a spojování snímků.

3.4 Software a formáty termogramů

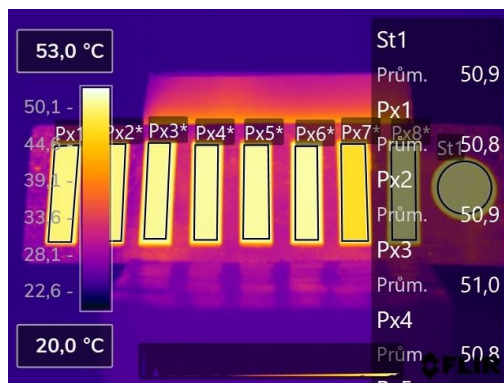
Z předešlé kapitoly 3.3 vychází, že největší rozdíl mezi jednotlivými kamerami je software, ve kterém se zpracovávají termogramy. Všechny programy umožňují podobnou úpravu termogramů, jako je například výběr barevné palety, teplotní stupnice, nebo úprava parametrů jako emisivita a teplota okolí.

V rámci této práce jsem měl možnost vyzkoušet 3 různé softwary na zpracování termogramů od firem Flir, Testo a Fluke. Jsou velmi podobné, ale hlavní rozdíl je v uživatelském rozhraní a formát termogramů, se kterými pracují. Bohužel mezi sebou dané formáty nejsou kompatibilní.

3.4.1 Flir Thermal Studio

Tento program slouží pro zpracování termogramů pořízených termokamerami od společnosti FLIR. Běžné snímky se ukládají ve formátu JPEG a videa ve formátu MP4 nebo CSQ, což je speciální formát, který ukládá sekvenci termogramů ve formě videozáznamu. Hlavní výhodou prvních dvou formátů je taková, že je možné otevřít tyto formáty bez potřeby speciálního softwaru, což může stačit při kvalitativním měření.

Pokud se začnou snímky upravovat, tak se z původního čitelného obrázku stane termogram, který je překrytý stupnicí, histogramem a měřenými teplotami. Kvůli tomu je téměř nečitelný, jak je vidět na obrázku 9. Z toho důvodu je vhodné termogram exportovat, ale Flir Thermal Studio neumožňuje snadné exportování termogramů. Jedinou možností je vytvořit tzv. zprávu a termogram si získat z ní. Při změně lokální emisivity se nezmění barva dané oblasti, ale pouze se k dané oblasti připiše hvězdička, které signalizuje úpravu lokálních parametrů.



Obrázek 9: Ukázka termogramu s překrytím

Flir Thermal Studio umožňuje zpracování videí a vyjmutí snímků z daného času. Dávkové zpracování dokáže rychle zpracovat a upravit 100 termogramů najednou. Zajímavou funkcí je tvorba vlastní šablony, do které je možné nahrát termogramy a v nich automaticky vytvářet teplotní grafy, histogramy a vkládat popisky a anotace.

V této práci nebude popsáno ovládání tohoto programu, jelikož se v průběhu posledního roku několikrát úplně změnilo uživatelské rozhraní. I přes to je důležité zmínit, že je ovládání velmi přehledné a intuitivní.

Praktická část

Tato část práce se bude zabývat několika mnou navrženými měřeními s termokamerou. Každé měření bude mít na začátku uvedený popis a předpoklady. Následovat bude popis příprav a průběh měření. Nakonec budou shrnuty dosažené výsledky.

4 Měření v komoře pro klimatické zkoušky

4.1 Popis a předpoklady

V prvním měření bude ukázáno, jak je měření ovlivněno typem materiálu a jeho povrchovou úpravou. Zároveň bude představen způsob měření emisivity a bude provedeno porovnání s internetovými emisivitami, kterým se nedá úplně věřit. Během tohoto měření bude zároveň otestováno několik různých metod zvýšení emisivity.

Měřit se bude několik různých materiálů, které byly vybrány z důvodu jejich využití v průmyslu, nebo jejich barvě, která by údajně neměla ovlivňovat výsledky měření. Materiály s nízkou emisivitou by měli být složitější na měření a měly by mít větší chybu při korekci emisivity než materiály s vysokou emisivitou.

Toto měření bude prováděno v komoře pro klimatické zkoušky Clime ECO C7-600, která je zobrazena na obrázku 10. Hlavní výhodou je kontrolovatelný prostor, ve které je možné udržet stejné teplotní podmínky pro konzistentní měření.



Obrázek 10: Komoře pro klimatické zkoušky Clime ECO C7-600

Na komoře budou postupně nastavovány tři různé teploty (20 °C, 60 °C, 100 °C) a teplota zkušebních vzorků se bude měřit několika metodami. Z těchto naměřených výsledků se bude dát určit chyba termokamery v závislosti na teplotě. Jako referenční měření teploty se použijí termočlánky typu K, které se ve firmě Festool používají pro přesné měření teploty. Termočlánky mají výhodu v tom, že na ně v ustáleném stavu nepůsobí žádné vnější vlivy, což je velký rozdíl v porovnání s termokamerami.

Během měření bude mít termokamera nastavenou emisivitu $\varepsilon = 0,96$. Tato hodnota odpovídá speciálním štítkům, které budou nalepené na jednotlivých zkušebních vzorcích, což zjednoduší zpracování naměřených snímků. Při měření tolik nezáleží na nastavené emisivitě, protože ta se dá v softwaru upravit během zpracování termogramů. Nejdůležitější bude správně vyfotit jednotlivé vzorky.

4.2 Příprava zkušebních vzorků

Prvním krokem bylo vybrat jednotlivé materiály, které se budou měřit. Jednou skupinou těchto materiálů jsou kovy, mezi které patří např. měď, bronz, ocel. Doufám, že mezi těmito kovy najdu materiály s velmi nízkou emisivitou a vysokou odrazivostí. Tyto materiály budu chtít později využít při dalších měřeních pro měření teploty odrazem. Jedním z nejzajímavějších kovů je hliník, který by měl mít sám o sobě velmi vysokou odrazivost, ale zároveň má eloxovaný povrch, který by měl mít vysokou emisivitu.

Na obrázku 11 je vidět několik kovových vzorků, které mají vyleštěnou levou půlku povrchu, což slouží pro odstranění oxidace a zvýšení odrazivosti. Díky tomu by měl být vidět vliv měření na povrchové úpravě.



Obrázek 11: Částečně vyleštěné kovové vzorky

Dalším krokem bylo vybrat jeden vzorek, na kterém budou testovány možnosti zvýšení emisivity. Cílem je najít levnější alternativy ke speciálním štítkům ThermaSpot. Na zkušebním vzorku bude umístěn nejen štítek ThermaSpot, ale také speciálních sprej ThermaSpray. Oba mají přesně stanovené emisivity výrobcem. Mezi testované metody patří textilní náplast, elektrikářská páska, běžná modrá barva ve spreji, polyesterový a papírový nalepovací štítek.



Obrázek 12: Zkušební vzorek testující metody zvýšení emisivity

Nakonec na všechny zkušební vzorky nalepily speciální štítky ThermaSpot společně s termočlánkem, které budou sloužit jakožto referenční měření teploty. Termočlánky se ke zkušebním vzorkům připevnilly pomocí dvousložkového tmelu, který měl za úkol pevně připojit termočlánek na požadované místo. Z důvodu velkého množství vzorků a nízkého počtu termočlánků byly všechny vzorky rozděleny do dvou skupin.

4.3 Přípravek do komory pro klimatické zkoušky

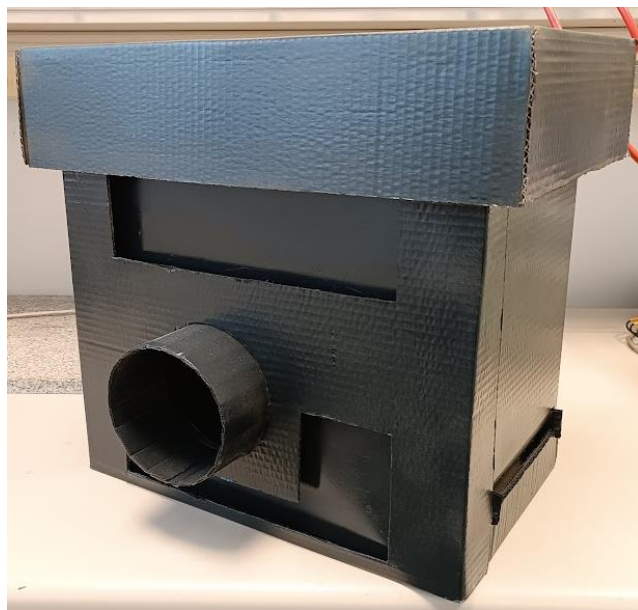
Komora pro klimatické zkoušky splňuje všechny funkční požadavky, ale má jeden velký problém. Všechny vnitřní stěny mají lesklé povrchy, což by mohlo znehodnotit měření termokamerou. Byla tedy potřeba vytvořit přípravek, který dokáže odstínit všechny lesklé povrchy.

Rozměrově byl přípravek navržený tak, aby se do něj vešly všechny zkušební vzorky a snadno se s nimi manipulovalo při výměně. Pro snadný přístup do přípravku bylo z horní strany vytvořeno víko.

Pro zajištění přímě viditelnosti byla na přední straně přípravku vytvořena díra, které odpovídá otvoru ze strany komory pro klimatické zkoušky. Při konečných kontrolách se ukázalo, že přípravek není možné umístit přímo ke stěně komory. Aby se eliminovaly možné odrazy ze vniklé mezery, tak se mezi otvor komory a díru přípravku umístila trubka.

Během měření jsem narazil na problém s pomalým ohříváním zkušebních vzorků uvnitř přípravku, což vedlo k vytvoření větracích děr na stranách přípravků. To zajistilo proudění vzduchu uvnitř přípravku, což velmi zrychlilo jejich ohřev.

Při otevírání komory docházelo k rychlému ochlazování přípravku, což bylo vyřešeno nalepením pertinaxové desky na vnitřní přední stranu přípravku.

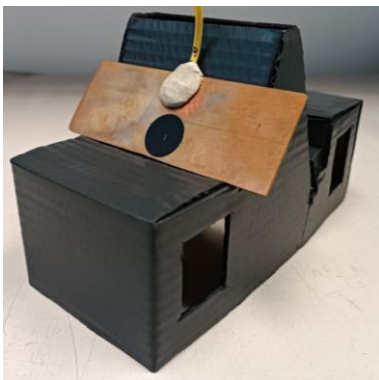


Obrázek 13: Finální podoba přípravek

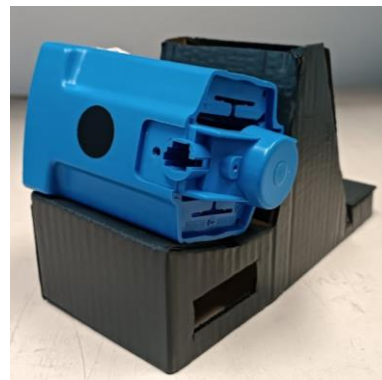
4.4 Stojánky

Posledním krokem příprav bylo vymyslet, jak zkušební vzorky umístit do přípravku, aby byly dobře viditelné termokamerou. Jedním z prvních nápadů bylo zavěsit jednotlivé vzorky na kovový rošt. Problém této metody je složitá výměna vzorků a špatná udržitelnost stejného úhlu. Dalším problémem je kývání vzorků při proudění horkého vzduchu kolem něj.

Nakonec jsem však využil nápadu vytvoření několika stojánků, které umožňují rychlou a snadnou výměnu jednotlivých zkušebních vzorků. Jak bylo v kapitole 4.2 zmíněno, tak byly zkušební vzorky rozděleny do 2 skupin. To nebylo náhodou, protože tyto skupiny byly vytvořeny podle velikosti jednotlivých vzorků, aby stačil co nejmenší počet stojánků.



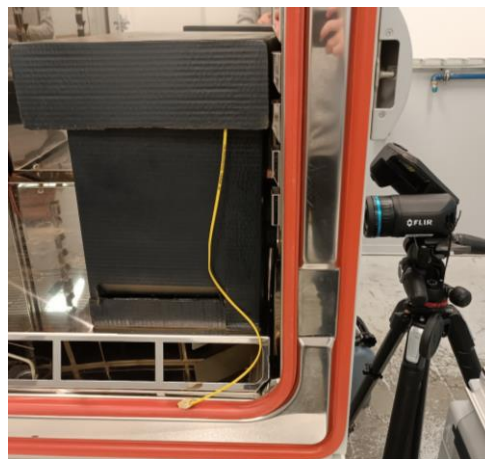
Obrázek 14: Stojánek 1



Obrázek 15: Stojánek 2

4.5 Průběh měření

Měření probíhalo tím způsobem, že se na komoře pro klimatické zkoušky nastavila teplota a vlhkost. Do komory se na rošt naskládaly všechny zkušební vzorky a přípravek se umístil na správné místo. Do přípravku se umístil stojánek s prvním vzorkem, který se připojil k teploměru. Po dokončení všech příprav se komora uzavřela a zapnul se ohřev na požadovanou teplotu.



Obrázek 16: Přípravek v komoře po otevření

V průběhu zahřívání docházelo k periodickým měřením teploty, dokud nebyl vzorek ohřátý a ustálený na žádanou teplotu. Poté se ze strany komory otevřel otvor a kamerou se pořídilo několik snímků. Během toho se zaznamenala teplota změřená termočlánkem. Poté došlo k otevření komory a výměně zkušební vzorku. Tento postup se opakoval pro všechny vzorky a pro každou požadovanou teplotu.

4.5.1 Alternativní metoda měření

Během zpracování naměřených dat jsem zjistil, že nejsem schopný určit emisivitu, protože software nedokáže kompenzovat to, že měřený vzorek má stejnou teplotu jako je teplota okolí. Tento poznatek je více rozveden v následující kapitole 4.7.

Z těchto poznatků jsem došel k závěru, že pokud chci měřit emisivitu potřebuji mít významný rozdíl mezi teplotou zkušební vzorku a okolním prostředím. Proto jsem se rozhodl využít komoru pro klimatické zkoušky jako místo pro zahřátí všech zkušebních vzorků. Stejně jako v průvodní metodě se zkušební vzorky ohřály a následně vyndaly mimo komoru při pokojové teplotě. Toto alternativní měření tentokrát probíhalo pouze při dvou teplotách 60°C a 100°C.

4.6 Zpracování výsledků

Při zpracování pořízených termogramů byly vyčteny všechny naměřené teploty, které se následně zanesly do tabulky (v příloze A1). Jak bylo zmíněno v přechodí kapitole 4.5.1, tak jsem musel použít alternativní metodu měření, která mi znemožnila využít termočlánky jako referenční body, protože při vytažení z komory chladl tmel kolem termočlánku pomaleji než zkušební vzorek. To způsobovalo, že naměřená teplota byla větší než skutečná teplota. Z toho důvodu jsem se rozhodl využít samolepící štítek jako referenční bod.

Pro určení emisivity jednotlivých materiálů jsem si nejprve musel zjistit naměřenou teplotu na speciálním štítku o známé emisivitě. Poté jsem měnil lokální emisivitu na povrchu zkušební vzorku, dokud jsem nezískal stejnou teplotu, jako byla na štítku. Problém nastal v tom, že v době zpracování termogramů neumožňoval software zadat přesnou hodnotu emisivity. Software dovoľoval zadat hodnoty emisivit pouze na 2 desetinná místa, což bylo nedostačující pro některé vzorky. Z toho důvodu jsem musel vypočítat přesnou hodnotu emisivity pomocí lineární interpolace, což bude vysvětlené na následujícím odstavci. Od té doby však vyšla aktualizace a s ní přišla možnost zadání emisivity s libovolným počtem desetinných míst.

Na hliníkovém vzorku byla na speciálním štítku naměřena teplota $\vartheta = 59,9^{\circ}\text{C}$ při $\varepsilon = 0,96$. Na eloxované ploše byla naměřena teplota $\vartheta = 59,8^{\circ}\text{C}$ při $\varepsilon = 0,95$ a $\vartheta = 60,2^{\circ}\text{C}$ při $\varepsilon = 0,94$. Pomocí lineární interpolace jsem se z těchto hodnot dostal k hodnotě emisivity $\varepsilon = 0,9475$, která odpovídá teplotě na štítku. Takto naměřené hodnoty byly zprůměrované s emisivitami naměřenými s dalšími teplotami, z čehož byla získána emisivita $\varepsilon = 0,952$ pro eloxovanou plochu hliníkového vzorku.

4.7 Výsledky měření

V této části bych se chtěl zaměřit na zhodnocení naměřených výsledků. Toto měření nedopadlo úplně dle očekávání. Jak bylo řečené v kapitole 4.6.1, tak původní nápad s měřením v komoře pro klimatické zkoušky nebyl nejvhodnější, protože při určení emisivity není schopný software správně kompenzovat odraženou teplotu a teplotu okolí. To znamená, že všechny naměřené snímky jsou chybné a nelze je porovnat s teplotami naměřenými termočlánkem. Zároveň alternativní metoda měření není vhodná pro měření teploty termočlánkem, protože při rychlých změnách teploty je termočlánek ovlivněný tmelem. Z toho důvodu jsem dále pokračoval s emisivitami naměřenými alternativní metodou (viz kapitola 4.5.1).

Změřené emisivity jsem porovnal s emisivitami vyčtenými z internetových stránek a zjistil jsem, že se značně liší. Osobně si myslím, že je to hlavně způsobené tím, že na internetových stránkách není přesně určeno, jaký povrch daný materiál má. Lze se dočíst že například lehce zoxidovaná ocel má emisivitu 0,25. Problém vzniká ve slově „lehce“, protože se jedná o relativní pojem, který si může každý vložit jinak. Ve stejném duchu je problém s vyleštěným hliníkem, který má mít emisivitu 0,04. Zase není nikde určeno, co přesně znamená slovo vyleštěný. To je jeden z hlavních důvodů, proč se vyplatí využít některou z metod pro zvýšení emisivity.

4.7.1 Vliv materiálu a povrchové úpravy

V tabulce 2 je porovnání emisivit naměřených a vyčtených z internetových stránek [11]. Jedná se o část tabulky, která vychází z přílohy A1.

Tabulka 2: Porovnání emisivit při teplotě 60°C

Materiál	Povrch	$\epsilon_{\text{tabulk.}}$	$\epsilon_{\text{měř}}$	$\Delta\theta$ [°C]	δ [%]
Hliník	eloxovaný	0,77	0,95	-7,5	12,54
	leštěný	0,07	0,09	-6,5	10,78
Měď	oxidovaný	0,07	0,11	-13,2	25,19
	leštěný	0,03	0,08	-25,3	47,47
Mosaz	oxidovaný	0,07	0,07	0,0	0,00
	leštěný	0,03	0,07	-24,2	56,67
Bronz	oxidovaný	0,15	0,12	4,0	9,69
	leštěný	0,1	0,11	-2,0	4,72
Ocel	očistěný	0,12	0,12	0,0	0,00
	leštěný	0,1	0,09	3,0	5,38
Pozink	leštěný	0,28	0,18	14,3	27,03
Nerez	leštěný	0,075	0,08	-2,3	4,66

Pokud se podíváme například na leštěnou mosaz, tak je rozdíl mezi teplotami 24,2°C což odpovídá chybě 56,67 %. Jak je vidět, tak u materiálů s nízkou emisivitou může mít i hodnota 0,04 velký dopad na správnost výsledku. Z toho důvodu se u těchto materiálů využívají metody zvýšení emisivity.

4.7.2 Vliv barvy

V této části jsem chtěl otestovat, jestli je pravda, že barva nemá vliv na měření termokamerou. Nejprve došlo k porovnání emisivit tří různobarevných krytů z polyethylenu a polyamidu, které byly vyrobené vstřikováním plastů do stejné formy, takže měli stejnou strukturu povrchu. Většina naměřených emisivit vyšla buď totožně nebo se lišily pouze v jednotkách tisícin, což se v teplotách promítlo pouze jako rozdíl 0,1 °C.

To vyšlo přesně podle očekávání, ale pro úplnost a snadnou viditelnost jsem se rozhodl provést ještě jedno měření, jehož výstupem bude termogram, na kterém bude viditelný několik stejných materiálů pouze s různými barvami. Z toho důvodu jsem vytvořil nový vzorek z mosazi, na který jsem nalepil různobarevné elektrikářské pásky z PVC (polyvinylchlorid), jak je vidět v pravé části obrázku 17.



Obrázek 17: Zkušební vzorek s různými barevnými páskami

Když se podíváme na termogram v levé části obrázku 17 tak je vidět, že mají skoro všechny pásky stejnou teplotu. Jednou výjimkou je šedá páska, která měla být vždy rozdílná při každé teplotě. Naměřené emisivity byly stanoveny obvodně jako v kapitole 4.5.1 a jejich hodnoty jsou zapsány v tabulce 3.

Tabulka 3: Emisivity barevných pásek

Barva pásky	Bílá	Žlutá	Červená	Zelená	Modrá	Fialová	Šedá	Černá
ε _{měř}	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,955	0,82	0,955

Z tabulky 3 vychází, že až na šedou pásku mají všechny materiály téměř stejnou emisivitu. Stejně emisivity se dají vysvětlit tím, že termokamera snímá intenzitu záření a všechny pásky ji vyzařují stejné množství. Z těchto výsledků bych vyvedl závěr, že ve většině případů by barva neměla mít téměř žádný vliv na měření. Co se týče šedé barvy, tak se nejspíše jedná o nějakou anomálii, které možná mohla vzniknout nějakými kontaminacemi při výrobním procesu, ale to nejsem schopný takto jednoduše určit. To by tedy vedlo k dalšímu detailnějšímu zkoumání tohoto problému.

4.7.3 Metody zvýšení emisivity

Co se týče metod zvýšení emisivity, tak si můžeme v tabulce 4 a na obrázku 18 všimnout, tak skoro všechny metody fungují. Jedinou výjimkou je modrý sprej, který má mnohem nižší emisivitu, než bych očekával. Obdobně dopadl i ThermaSprej, který má mít emisivitu $\epsilon = 0,96$, ale místo se změřila $\epsilon = 0,94$.

Tabulka 4: Metody zvýšení emisivity

Název materiálu	Označení	$\epsilon_{\text{měř}}$
Textilní náplast	AV1	0,96
Elektrikářská páska	AV2	0,97
Modrý sprej	AV3	0,68
Polyesterový štítek	AV4	0,97
Papírový štítek	AV5	0,94
ThermaSprej – bílý	AV6	0,94
ThermaSpot	AV7	0,96



Obrázek 18: Metody zvýšení emisivity

Existují 2 možné důvody. Buď za to může nanesení nedostatečné vrstvy barvy, nebo drsnost původního povrchu. Z toho důvodu bych pro budoucí měření raději využil jiných metod než barvu spreji, nebo si dal pozor na dostatečné nanesení materiálu. U ostatních uvedených metod je jediný potenciální problém v podobě vzduchové bubliny, která je však dobře viditelná a dá se opravit.

Dalším problémem s těmito metodami je dlouhodobé vystavení vyšších teplot. Například elektrikářská páska se na konci měření začala lehce odlepovat při teplotě 100°C. Jelikož to nastalo až po několika hodinách opakovaného ohřívání, tak si myslím, že by to neměl být problém při měření běžných teplot do 200°C.

5 Měření se zdrojem tepla

5.1 Popis a předpoklady

Během tohoto měření hodlám otestovat několik různých vlastností a postupů, které by měli pomoci při měření termokamerou ve zkušebně. Tentokrát bude měření provedeno se zdrojem tepla, který měřící vzorky zahřeje a udrží na požadované teplotě. Jako zdroj tepla lze využít mnoho zařízení, ale nelepší mi přišla žehlička nebo laboratorní vařič. Od těchto zařízení požadujeme, aby dokázali udržet stejnou teplotu bez hystereze. Problém je v tom, že obě tyto zařízení mají hysterezi, kterou bylo třeba odstranit. Během měření jsem nakonec využil obě varianty, jak žehličku, tak i laboratorní přístroj MERCI Inteli MSH-300i viditelný na obrázku 19, který byl vypůjčený z Laboratoře senzorů a měření neelektrických veličin Technické univerzity v Liberci. U žehličky se vyskytoval problém s hysterezí, který byl vyřešen regulací vstupního výkonu autotransfornátorem skrze snížení hodnoty napájecího napětí



Obrázek 19: MERCI Inteli MSH-300i

5.2 Měření propustný materiálů

První část tohoto měření bude zaměřená na testování lehce dostupných materiálů, které mají vysoký potenciál propouštět infračervené záření a být pro termokameru průhledné. Této unikátní vlastnosti by se dalo velmi dobře využít buď pro ochranu termokamery, nebo pro měření teplot uvnitř stroje.

Jak bylo již dříve zmíněno, tak většina materiálů skrze sebe nepropouští infračervené záření. Výjimkou jsou vzácné materiály jako je germanium, nebo materiály s krystalovou strukturou jako chlorid sodný (kuchyňská sůl). Tyto materiály jsou většinou velmi drahé, nebo nesplňují požadované mechanické vlastnosti.

Po dlouhém průzkumu se mi nepodařilo najít konkrétní důkazy, že by existovali některé lehce dostupné materiály, které by byly propustné na LWIR pásmu. Na několika místech jsem narazil na zmínky o tom, že by některé plasty mohly být propustné. Proto jsem vybral několik slibných plastů, které mají potenciál splňovat všechny požadavky.

Ve zkušebně byl zároveň vznesen zajímavý dotaz, jestli by se nedalo měřit skrze ochranné sklíčko k telefonu nebo skrze díry kovové mřížky. Všechny měřené materiály jsou zobrazeny na obrázku 20 a patří mezi ně polykarbonát, akrylát, PE-HD (Polyethylen s vysokou hustotou) a PET (Polyethylentereftalát).



Obrázek 20: Propustné materiály

5.2.1 Průběh měření

Zkušební vzorek byl umístěn na zdroj tepla a regulován na tři různé teploty: 80 °C, 130 °C a 150 °C. Tyto teploty odpovídají hraničním teplotám, které se ve zkušebně sledují. Pro sledování teploty byly použity termočlánky typu K a teplotní sonda Voltcraft TP-207.

Po dosažení požadované teploty byl pořízen referenční snímek, který sloužil jako základ pro výpočet propustnosti všech následujících snímků pro danou teplotu. Postupně byly před kameru vkládány různé testované materiály do vzdálenosti 5 cm a 20 cm od termokamery. Tento postup byl opakován ještě s dalším zkušebním vzorkem. Celkově bylo důležité zajistit konzistentní podmínky měření a pečlivě dokumentovat všechny kroky.

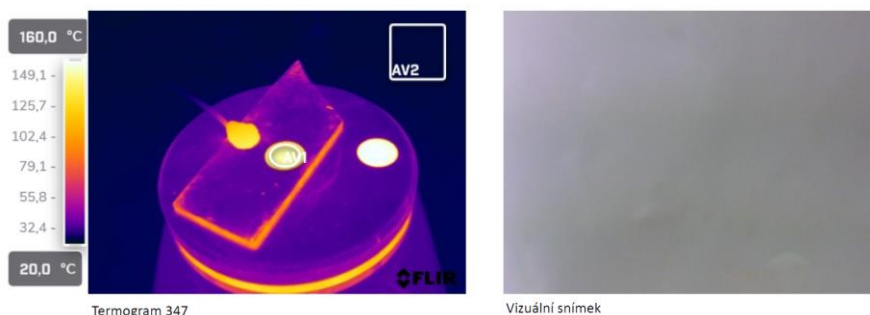


Obrázek 21: Průběh měření se zdrojem tepla

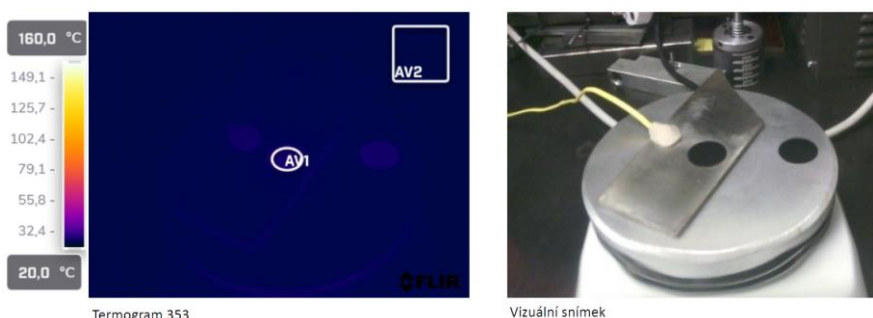
5.2.2 Stanování propustnosti

Pro zjištění propustnosti se na snímcích pro danou teplotu a materiál stanovily 2 body, které byly na všech snímcích stejné. Z referenčního snímku se vyčetly teploty těchto bodů a poté se upravovala hodnota propustnosti pro ostatní snímky, dokud nebyla na obou bodech stejná teplota.

Na obrázcích 22 a 23 je vidět rozdíl mezi tím, co vidí termokamera a co vidí lidské oko. Zatímco u obrázku 22 vidíme na termogramu zkušební vzorek bez větších problémů, tak na vizuálním snímku vidíme pouze bílý obal. Naopak u obrázku 23 je vidět, že skrze PET je na vizuálním snímku průhledný, ale na termogramu jsou vidět pouze některé obrysy, což znamená, že má velmi nízkou propustnost, ačkoliv není 0.



Obrázek 22: Měření propustnosti bílého obalu PE-HD



Obrázek 23: Měření propustnosti obalu PET

5.2.3 Výsledky měření propustnosti

Od tohoto měření byly očekávány lepší výsledky, protože se nepodařilo potvrdit IR propustnost u dostupných materiálů. Z naměřených snímků bylo vidět, že se propustnost v závislosti na teplotě téměř nemění. Jediné, u čeho byla malá změna propustnosti byl PET, skrze který bylo možné vidět obrysy objektů od teplot 130 °C. Jediný materiál, který byl IČ propustný byl obal z PE-HD, který má propustnost 0,77 pro matně bílý obal a čirý obal má propustnost 0,83, přičemž oba měli tloušťku 0,05 mm.

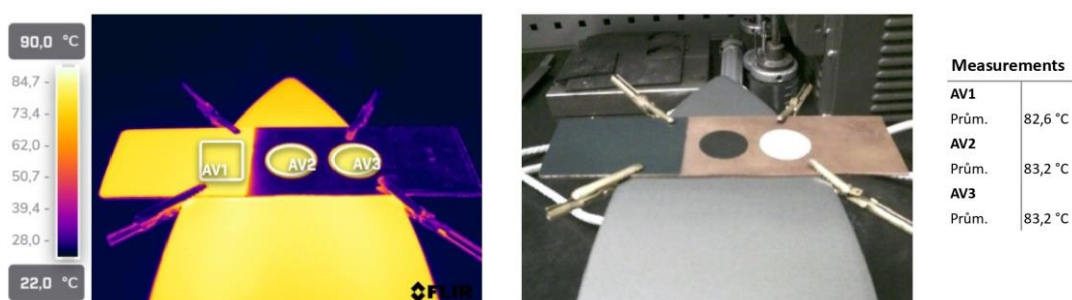
Mřížka měla poměrně zajímavé výsledky, protože když byla ve vzdálenosti 5 cm, tak byla na kameře rozostřená, což způsobilo, že skrze ni nebylo možné změřit žádnou teplotu. Zatímco ve vzdálenosti 20 cm už bylo skrze díru dobře vidět na měřený vzorek. Problém spočíval v tom, že měření teploty bylo možné pouze na omezené oblasti uprostřed díry, jelikož na jejím okraji docházelo ke změnám naměřené teploty.

5.3 Měření vlivu osvětlení a barvy

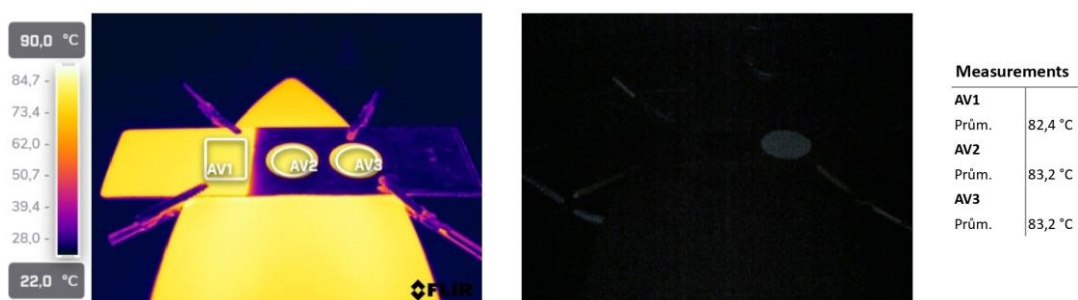
Toto měření se zaměřuje na vliv osvětlení při měření termokamerou. Ve zkušebně si někteří kolegové mysleli, že musí při měření zhasnout všechna světla, aby nedocházelo k nepřesnostem. Běžné osvětlení by však na měření nemělo mít téměř žádný vliv.

To jsem ověřil tím způsobem, že jsem na zdroje tepla připevnil zkušební vzorek a změřil ho se zapnutým osvětlením a potom bez něj. Když porovnáme obrázky 24 a 25, tak je vidět, že opravdu nezáleží na osvětlení, protože jsme naměřili stejné teploty. To jsem zopakoval i s dalšími teplotami a došel jsem ke stejnému závěru.

Když se podíváme na teploty naměřené na černém a bílém štítku, tak nezávisle na jejich barvě a osvětlení mají stejné teploty.



Obrázek 24: Termogram pořízený s osvětlením



Obrázek 25: Termogram pořízený ve tmě

5.4 Měření vlivu polohy termokamery

Jedním v prvotních nápadu na začátku této práce bylo otestovat, jak se mění měření teploty v závislosti na poloze termokamery. Tím je myšlena především vzdálenost termokamery od měřeného objektu. Během měření se zdrojem tepla bylo vyzkoušeno změřit teplotu na nálepce Thermaspot při různých vzdálenostech, čímž bylo vždy dosaženo úplně stejných teplot.

Termokamera má od bezkontaktního teploměru výhodu v tom, že při zpracování termogramu mohou vybrat přesně velikost a tvar oblasti, kterou chci změřit. Dokud měřím dostatečně velkou oblast $IFOV_{geo}$ (viz kapitola 2.1.10) a při zpracování termogramů znám všechny parametry, tak by s tím neměl být žádný problém. Obecně je však lepší měřit z co nejmenší vzdálenosti, aby se předešlo vlivu nějakého dalšího zdroje tepla v okolí.

5.5 Měření odrazem

Jak bylo v kapitole 2.2.3 řečeno, tak mezi emisivitou a odrazivostí existuje jednoduchý vztah popsáný ve vzorci (15). V běžné situaci je odrazivost materiálu nechtěný jev, kterého se chceme ideálně zbavit a z toho důvodu se používají metody pro zvýšení emisivity.

V tomto měření bude otestováno, jestli je možné měřit teplotu odraženou od materiálu s nízkou emisivitou a jestli existuje další metoda měření emisivity.

5.5.1 Průběh měření

Zkušební vzorek se umístil do přesné polohy, aby bylo možné v jeho odrazu vidět zdroj tepla v podobě žehličky, jak je vidět na obrázku 26. Vzorek měl pokojovou teplotu a žehlička se zahřála na dvě teploty: 80°C a 130°C. Po ustálení teploty se pomocí teplotní sondy Voltcraft TP-207 změřila teplota vzorku a žehličky. Tento proces se takto opakoval pro několik vybraných zkušebních vzorků, včetně běžného zrcátka.



Obrázek 26: Průběh měření odrazem

5.5.2 Měření teploty odrazem

Hlavní problém s tímto měřením je ten, že měřené vzorky měly ručně leštěné povrchy, které neměli jednotnou strukturu. To znamená, že některé části povrchu odrážely teplotu lépe než jiné. Pro dosažení lepších výsledků by byla potřeba nejen vyleštit materiály, ale také zařídit homogenní povrch, který bude mít na celém povrchu stejné vlastnosti.

Z naměřených hodnot vyšlo (viz příloha B2), že nejlépe odráží vyleštěný hliník, který měl v kapitole 4.7.1 jednu z nejnižších emisivit. Překvapivě dopadlo zrcadlo, od kterého se velmi špatně odrážela teplota. Z toho plyne důležitý poznatek, že materiál, který dobře odráží viditelné světlo, nemusí dobře odrážet i IČ záření.

5.5.3 Měření emisivity odrazem

V kapitole 4.5.1 bylo zjištěno, že pro měření emisivity je nutné mít rozdíl mezi teplotou materiálu a okolí. V oné kapitole se zahřály měřené zkušební vzorky a okolí zůstalo při pokojových podmínkách. Během měření se tyto podmínky prohodily a zahřálo se okolí a materiál zůstal studený. Při zpracování naměřených termogramů se jako okolní teplota považovala teplota zdroje tepla a upravovala se emisivita tím způsobem, aby byla se na zkušebním vzorku naměřila skutečná tepla. Dalo by tedy říct, že se měřilo, jak špatně zkušební vzorek odráží IČ záření.

Tabulky s naměřenými hodnotami se nachází v příloze B3. Při porovnání těchto emisivit s emisivitami změřenými v kapitole 4.7.1, tak je vidět, že emisivity naměřené touto metodou neodpovídají emisivitám z předešlé metody. To znamená, že pokud chci měřit emisivitu materiálu, tak nepotřebuji pouze rozdíl mezi teplotou materiálu a okolím, ale specificky musí být teplota materiálu vyšší.

6 Praktické měření ve firmě Festool

Všechna dosavadní měření probíhala pouze na zkoušených vzorcích, ale následující měření byla provedena v praktickém prostředí na reálném ručním nářadí.

6.1 Měření ve zkušebně pro životnostní zkoušky

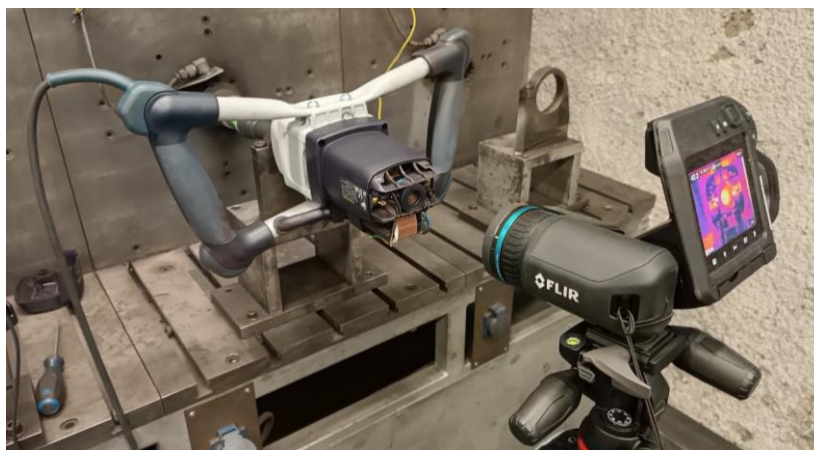
V tomto měření hodlám porovnat kontaktní a bezkontaktní metody měření teploty ručního nářadí, které je testováno ve zkušebně pro životnostní zkoušky. Toto testování probíhá tím způsobem, že se např. po dobu 200 hodin opakuje cyklus velké a nízké zátěže. Jeden cyklus probíhá 120 sekund, během kterých se tyto 2 stavy střídají. Prvních 100 sekund je nářadí zatíženo na nižší zátěž a poté je 20 sekund zatíženo velkou zátěží. Zátěž je simulována pomocí brzdy, na kterou je nářadí připojeno.

Cílem tohoto měření je zjistit, jestli je možné kontrolovat teploty některých komponentů v průběhu měření bez zásahu do nářadí. K tomuto účelu je termokamera ideální, protože dokáže měřit teploty bezkontaktně.

Naměřené teploty termokamerou budou porovnány s naměřenými teplotami pomocí sondy Voltcraft TP-207 a teploměru Testo 925. Měřené součástky budou kartáče, vinutí a kryt převodovky. Zároveň bude testováno, jestli je možné měřit teploty na krytu, a jestli mají nějakou přímou úměru s teplotami uvnitř nářadí při stejné zátěži.

6.1.1 Průběh měření

Nejprve se připojilo míchadlo na zátěž a poté se nechalo rozběhnout, dokud nedošlo k ustálení proudu na zátěži. Následně se umístila kamera na správnou pozici, aby bylo možné změřit sledované místo, ke kterému bylo přiložena teplotní sonda. V moment, kdy se nářadí začalo zatěžovat na vysokou zátěž spustilo se nahrávání záznamu a zapsala se teplota na sondě. V periodických intervalech se následně zapisovaly naměřené teploty, dokud nezačal další zatěžovací cyklus. Tento postup se opakoval nejprve při měření teploty na povrchu nářadí a poté se odstranil zadní kryt a změřili se komponenty uvnitř, jak je vidět na obrázku 27.



Obrázek 27: Průběh měření míchadla MX1600/2

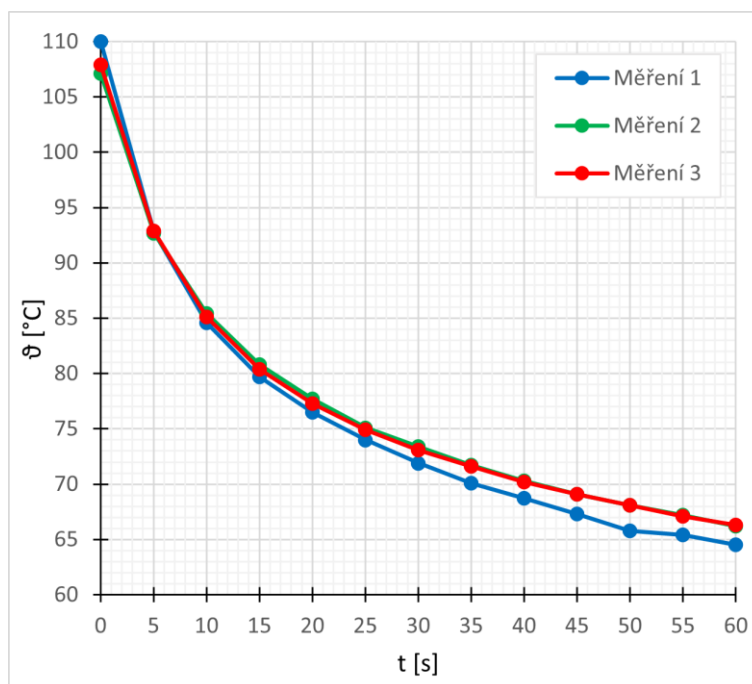
6.1.2 Výsledky měření

Teploty změřené na krytu neodpovídají teplotám vnitřních součástí což znamená, že nemají žádný důležitý význam při kontrole. Neexistuje lineární závislost mezi zátěží, teplotou vnitřních součástí a teplotou na krytu míchadla. Při porovnání teplot naměřených sondou a termokamerou bylo vidět, že teplota spadá do přesnosti měření (viz příloha C1).

Při měření vnitřních komponentů bylo možné přesně změřit teplotu uhlíkových kartáčů, jelikož mají velmi vysokou emisivitu. Ostatní komponenty jako vinutí, mosazné kontakty nebo rotor není možné přesně změřit, jelikož mají nízkou emisivitu. Pro přesné měření by bylo nutné zvýšit jejich emisivitu například barvou ve spreji, což by znehodnotilo cíl tohoto měření, což bylo měření termokamerou bez zásahu do náradí.

Pokud se zařídí stejné podmínky během opakovaného měření, tak je možné sledovat uhlíkové kartáče při dlouhodobém měření. Ostatní komponenty je možná sledovat pouze informativně, ale nesmí se jejich teploty považovat za přesné.

Na obrázku 28 je vidět měření teploty na uhlíkových kartáčích po vypnutí míchadla po dokončení vyšší zátěže. Z průběhu je vidět, že při opakovaném měření se teplota pohybovala v podobných hodnotách, což by vedlo k závěru, že se míchadlo v průběhu měření zahřívalo stejně, a tudíž zkouška probíhá v pořádku.



Obrázek 28: Porovnání teplot na uhlíkových kartáčích

6.2 Měření ručního náradí při zatěžování na dynamometru

V této části bude prováděno měření teploty elektrických komponentů ručního náradí zatěžovaného na dynamometru. Během měření budou sledovány teploty na chladiči a na kondenzátorech. Po zapnutí se bude postupně zvyšovat zatížení náradí na dynamometru. Na těchto komponentech jsou přilepeny termočlánky, které budou sloužit pro porovnání přesnosti termokamery.



Obrázek 29: Pohled na elektroniku uvnitř ručního náradí

6.2.1 Průběh měření

Měření bylo rozdělené na 4 samostatné části, které se lišily v tom, jakým způsobem bude použita termokamera. Nejprve se pořídilo několik snímků přes kryt, aby bylo vidět, že naměřená teplota přes kryt neodpovídá teplotě na součástkách. Poté se otevřel kryt a pořídilo se několik snímků elektroniky bez dalších úprav. Následně se na měřené komponenty nanesl speciální sprej ThermaSpray, který zvýší emisivitu a umožní přesnější měření.

Nakonec se náradí znova uzavřelo a začalo se zatěžovat do té doby, než ho elektronika vypnula. V ten moment se odstranil kryt a co nejrychleji se začali měřit teploty na součástkách. Z těchto hodnot je možné extrapolovat teplotu při vypnutí.

V tomto měření byl velký problém v tom, že nebylo možné termokameru upevnit do stativu tím způsobem, aby měla přímou viditelnost na všechny komponenty. Z toho důvodu bylo nutné termokameru držet v ruce, což později zpomalilo zpracování naměřeného záznamu, protože byla potřeba měnit pozici měřené oblasti.

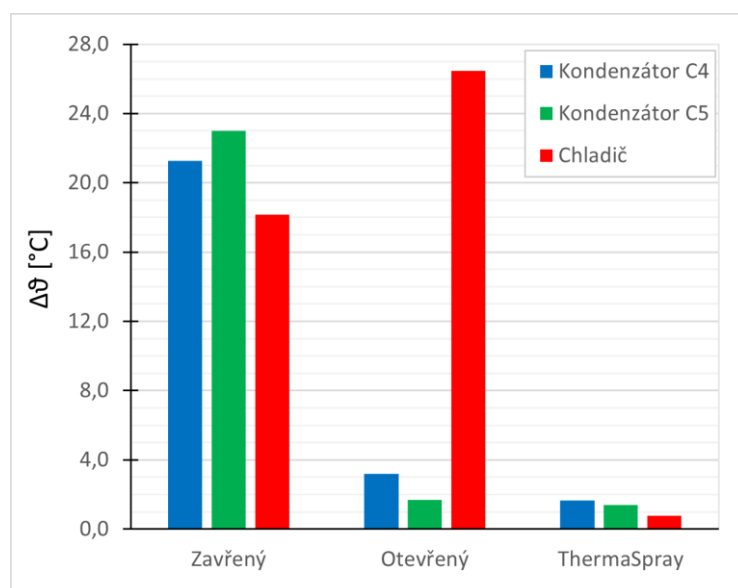
6.2.2 Chyba metody

Pro začátek je důležité říct, že první 3 části tohoto měření byly provedeny pouze pro účely této bakalářské práce, protože v praxi po otevření krytu dojde ke zhoršení proudění vzduchu uvnitř náradí, což může způsobit jiný průběh chlazení než se zavřeným krytem.

Nejprve mezi sebou byly porovnány teploty změřené termočláňky a termokamerou. Na obrázku 30 je vidět, že při zavřeném stavu jsme naměřili teploty na krytu, ale ty neodpovídají teplotám na součástkách.

Po otevření krytu se blížíme k reálným teplotám, ale stále tam jsou poměrně velké rozdíly. Na první pohled je vidět, že při měření teploty na chladiči byla úplně největší chyba celého měření. To je způsobené tím, že má chladič velmi nízkou emisivitu a termokamerou měřili z velké části odraženou teplotu z místnosti, a nikoliv teplotu na součástce.

Z toho důvodu jsme na všechny součástky nanесли speciální barvu ThermaSpray, abychom jim zvýšili emisivitu a znali její hodnotu. Pokud se podíváme na obrázek 30, tak je vidět, že jsme tím dosáhli nejpřesnějších výsledků.



Obrázek 30: Absolutní chyba metody

6.2.3 Extrapolace teploty při vypnutí

Z naměřených teplot na součástkách byly vytvořeny grafy průběhů teplot po vypnutí náradí. Z vytvořených grafů se vytvořila rovnice průběhu pomocí kterého, se vypočítala teplota v čase vypnutí.

V tabulce 5 je vidět, že je extrapolovaná teplota rozdílná od teploty na termočláňku, ale rozdíl mezi nimi je stále menší, než je přesnost termokamery. To znamená, že je možné takto měřit hraniční teploty elektrických součástek při vypnutí náradí, ale musíme brát v potaz přesnost termokamery.

Tabulka 5: Extrapolace teplot

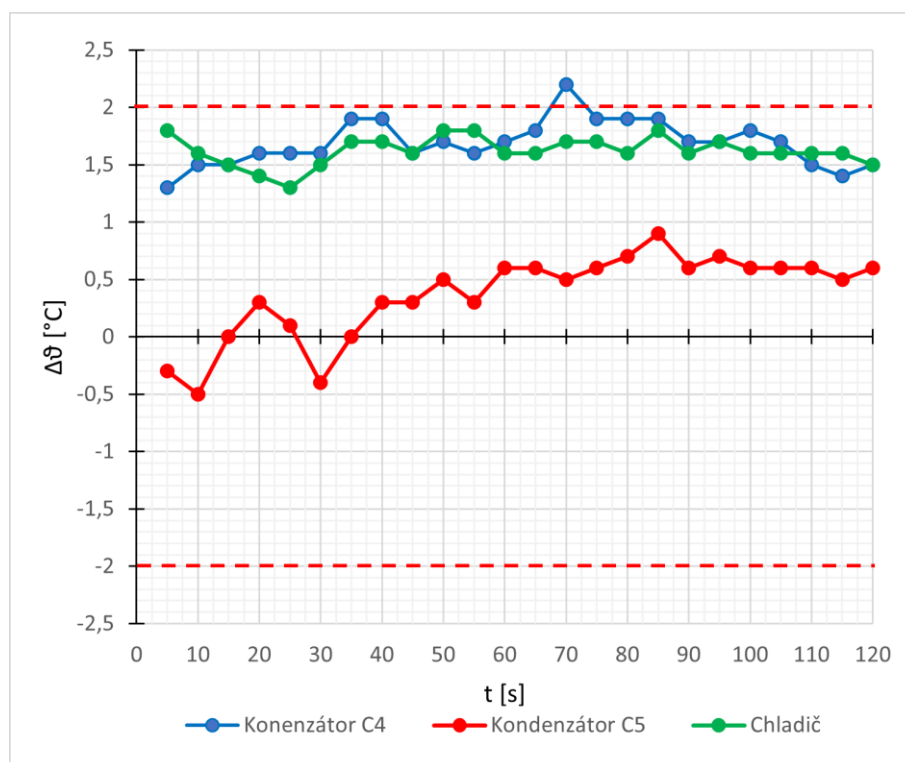
	ϑ_{C4} [°C]	ϑ_{C5} [°C]	ϑ_{COOLER} [°C]
Extrapolace	75,51	76,772	67,561
Termočláňek	74,369	76,031	66,268
$\Delta\vartheta$ [°C]	1,141	0,741	1,293

6.2.4 Ověření přesnosti termokamery

Pokud budeme termočlánky považovat za metodu přesného měření teploty, tak je možné porovnat tyto teploty s teplotami naměřenými termokamerou. Z toho by mělo být vidět, jestli termokamera opravdu splňuje přesnost měření $\pm 2^\circ\text{C}$.

Na obrázku 31 je vidět, že nejpřesněji byla měřena teplota na kondenzátoru C5. Na chladiči byla absolutní chyba již větší, ale stále to splňovalo přesnost měření. Podobně na tom byl i kondenzátor C4, ale v čase 70 sekund byla překročena hranice chyby 2°C . Jelikož se jedná pouze o 1 hodnotu, tak je možné, že to způsobilo držení kamery v ruce. V kapitole 2.4.4 bylo řečeno, že je přesné měření je by se měla termokameru stabilizovat a ideálně ji umístit na stativ, což zde nebylo možné splnit.

Shrnutím tohoto měření lze konstatovat, že i po minimalizaci vlivů způsobujících nepřesnosti je stále důležité brát v potaz přesnost termokamery. Tato informace je klíčová pro další analýzu a interpretaci výsledků.



Obrázek 31: Absolutní chyba měření termokamerou

7 Vyhodnocení měření

V této kapitole budou zkráceně popsány jednotlivé dosažené výsledky ze všech měření.

7.1 Měření v komoře pro klimatické zkoušky

Emisivita uvedená na internetu často neodpovídá emisivitám skutečných materiálů. Pro měření emisivity je možné využít metody detailněji popsané v kapitolách 4.5.1 a 4.6. Tato metoda spočívá v nalepení speciálního štítku ThermaSpot se známou emisivitou na měřený materiál a následný ohřev tohoto materiálu na určitou teplotu, aby vznikl znatelný rozdíl mezi teplotou materiálu a teplotou okolí. Tento materiál se následně změní při pokojové teplotě a v softwaru se vyplní všechny důležité parametry, jako je teplota okolí a vzdálenost. Na štítku se odečte teplota při správné emisivitě a poté se upravuje emisivita měřeného materiálu, dokud neodpovídá teplotě na štítku.

Zvýšení emisivity lze dosáhnout několika levnějšími metodami, jako například použití elektrikářské pásky a není tedy nutné využívat speciální štítky ThermaSpot nebo speciální sprej ThermaSprey.

Při měření kovových materiálů je obtížné dosáhnout přesných výsledků, a proto je nutné zvýšit jejich emisivitu. Naopak u plastů a obecně nekovových materiálů lze měření provádět bez větších problémů, ale je důležité znát jejich emisivitu. Povrchová úprava materiálu (drsnot, oxidace) má výrazný vliv na emisivitu. Zatímco barva by ji neměla téměř vůbec ovlivňovat.

7.2 Měření se zdrojem tepla

Během tohoto měření se nepodařilo najít lehce dostupný materiál, který by byl propustný pro IR záření a splňoval všechny požadavky. Existují velmi tenké obaly, které propouští IR záření, ale pokud se použije tlustější materiály jako byl například PET, tak se již nedá považovat za propustný.

Běžné osvětlení by obecně nemělo ovlivňovat měření, pokud se nejedná o zdroj světla s tepelným zářením. Mezi tyto zdroje patří například běžné žárovky, halogenové žárovky nebo sluneční záření, které mohou výrazně ovlivnit měření.

Metoda měření emisivity pomocí odrazů není vhodná. Jak je popsáno v kapitolách 4.5.1 a 4.6, tak pro měření emisivity je nutné zařídit rozdíl mezi teplotou materiálu a teplotou okolí. V tomto měření bylo zjištěno, že se musí nejen zajistit rozdíl mezi teplotami, ale zároveň musí být měřený materiál teplejší než okolí.

Měření teploty odrazem je možné, ale je potřeba zajistit homogenitu leštěného povrchu, což je velmi obtížné. Například zrcadlo má homogenní povrch a mohlo by se zdát jako logická volba, jenže neodráží IR záření stejně, jako viditelné světlo. Příčinou je nejspíše tenká vrstva skla na povrchu zrcadla.

7.3 Praktické měření ve firmě Festool

Některé elektrické součástky mohou ohřívat vnější kryt náradí, ale to neznamená, že jsem tímto způsobem schopný měřit nebo odvodit reálnou teplotu na daných součástkách. Takto naměřené teploty mohou sloužit informativně například při kvalitativním měření při identifikaci a lokalizaci těchto součástek.

Ve zkušebně pro životnostní zkoušky je možné měřit některé komponenty pomocí termokamery, ale pouze materiály s vysokou emisivitou, jako například kartáče motorů z uhlíku. Pokud emisivitu neznám nebo ji nejsem schopný zvýšit, tak mohu některé komponenty informativně sledovat, jestli se nějak výrazně nemění v průběhu dlouhodobé zkoušky.

Při testování náradí na dynamometru je nutné zařídit přímou viditelnost mezi měřenými součástkami a termokamerou pomocí otevření krytu. Pokud bude potřeba měřit součástky z lesklého kovu, jako například chladič, je nutné zvýšit jejich emisivitu.

I když budou splněny všechny požadavky pro kvantitativní měření, je třeba vzít v úvahu možnou odchylku $\pm 2^{\circ}\text{C}$. To znamená, že skutečná teplota se může pohybovat v určitém rozmezí kolem hodnoty, kterou přístroj ukazuje.

7.4 Pravidla pro termodiagnostické měření ve zkušebně

Pro kvantitativní měření termokamerou je důležité dodržet následující pravidla:

Emisivita: Před měření je nutné znát emisivitu měřeného objektu. Emisivity získané z internetových stránek mohou sloužit pouze jako orientační hodnoty. Pokud je emisivita materiálu nižší než 0,6, je nutné postupovat s opatrností. Emisivitu materiálu je vhodné změřit nebo zvýšit pomocí metod uvedených v kapitole 4.7.3.

Odstranění ostatních zdrojů teplota: Pokud se v okolí nachází některé další zdroje tepla, které by se mohly odrážet od měřeného materiálu, je potřeba tyto zdroje buď odstranit nebo odstínit. Mezi ně patří i člověk, takže by kamera neměla mířit kolmo k měřenému objektu, ale měla by být pod malým úhlem (10° – 20°), aby se minimalizoval vliv uživatele. Běžné zdroje studeného světla by neměly ovlivňovat měření, ale problém by mohl nastat např. s halogenovými žárovkami.

Nastavení kamery: Nejprve by se měl zvolit správný teplotní rozsah pro měření. Poté by se měl vybrat požadovaný mód pro záznam, ať už snímky nebo video. U videa je nutné zkontrolovat formát, protože MP4 nahrává pouze záznam z obrazovky a neukládá si teplotní hodnoty jednotlivých pixelů. Pro nahrávání video by se měl použít formát CSQ.

Zaostření a vzdálenost: Je nezbytné, aby byla kamera správně zaostřena a umístěna ve vhodné vzdálenosti od měřeného objektu. Nejmenší vzdálenost pro Flir T540 je 0,5 m. Pokud je to možné, tak je lepší termokameru umístit do stativu a nechat ji stabilizovat alespoň 5 minut.

Zaznamenání údajů: Nakonec je nutné zaznamenat všechny údaje potřebné pro zpracování termogramů. Mezi ně patří emisivita materiálu, okolních podmínek (teplota okolí a atmosférická teplota) a měřené vzdálenosti.

Závěr

Tato bakalářská práce zkoumala využití termokamer pro termodiagnostické měření ve zkušebně. V teoretické části byly popsány základní informace o bezkontaktním měření teploty, včetně porovnání výhod, nevýhod a využití v praxi. Následně byly vysvětleny související fyzikální zákony a vlivy na přesnost měření. Poté byla popsána termokamera Flir T540 a při porovnání s dalšími kamerami na trhu se ukázalo, že se termokamery příliš neliší a hlavní rozdíl je v programech pro zpracování termogramů. Při výběru termokamery je klíčové zohlednit požadavky uživatele, neboť některé programy jsou schopny analyzovat údaje z termogramů snadněji a využít je k různým účelům.

V praktické části byla realizována série měření zaměřených na zkoumání faktorů, které ovlivňují měření. Měření je nejvíce ovlivněno emisivitou a zdrojem tepla v okolí. Emisivitu nejvíce ovlivňuje typ materiálu a povrchová úprava. Na druhou stranu měření neovlivňuje barva nebo zdroj studeného světla v okolí. Komplexnější popis jednotlivých dosažených výsledků se nachází v kapitole 7.

Měření v komoře pro klimatické zkouška poskytlo metodiku měření emisivity. Dalším přínosem bylo nalezení alternativních metod pro zvýšení emisivity bez potřeby použití speciálních metod. Měření se zdrojem tepla nevedlo k nalezení lehce dostupných materiálů, které by byly IR propustné. Zároveň bylo otestováno měření teploty odrazem, které také nevedlo k úspěšným výsledkům. Při posuzování vlivu polohy termokamery se došlo k závěru, že je vhodné měřit z nejmenší vzdálenosti, ale při měření ze vzdálenosti do jednotek metrů stačí zajistit, že je měřená oblast 2x až 3x větší oblast než $IFOV_{geo}$. Během praktického měření na reálném ručním náradí bylo zjištěno, že je nutné zařídit přímou viditelnost mezi měřenými součástkami a termokamerou. Naměřené teploty na krytu náradí nemají žádnou spojitost s reálnými teplotami vnitřních součástek.

Na základě všech zjištěných výsledků byl vyhodnocen celý proces měření a v poslední kapitole 7.4 byla vytvořena pravidla, která vedou ke správnému provedení kvantitativního měření.

Na závěr této bakalářské práce bude několik doporučení pro budoucí výzkum a možné směry pokračování v tomto tématu. Především je možné pokračovat ve zkoumání různých faktorů, jako jsou vlivy úhlů kamera a drsnosti povrchů na emisivitu materiálu, což by mohlo vést k přesnějšímu měření. Dále se nabízí zkoumání vlivu barvy na vlastnosti materiálů, což by navazovalo na překvapivé výsledky se šedou páskou z kapitoly 4.7.2. Mohlo by se rozšířit množství a variace zkušebních materiálů o dalších barvy a výrobní postupy pro komplexnější analýzu.

Následně by bylo možné provést důkladný průzkum propustností materiálů v různých spektrálních pásmech, což by mohlo vést k nalezení běžně dostupného materiálu schopného propouštět IR záření. Nakonec by mohl být vytvořen univerzální program pro analýzu termogramů pořízených různými termokamerami.

Použitá literatura

- [1] VOLLMER, Michael a MÖLLMANN, Klaus-Peter. *Infrared thermal imaging: fundamentals, research and applications*. 2nd reprint 2013. Weinheim: Wiley, 2010. ISBN 978-3-527-40717-0.
- [2] PEŤKOVÁ, Viera a SVOBODA, Jiří. *Termodiagnostika*. [Košice]: Vydavateľstvo Viena, 2016. ISBN 978-80-8126-132-9.
- [3] ŠIMKO, Milan a CHUPÁČ, Milan. *Termovízia a jej využitie v praxi*. Vedecké monografie. Žilina: Žilinská univerzita, 2007. ISBN 978-80-8070-654-8.
- [4] KORBÁŘOVÁ MIKOŠOVÁ, Anna. *Školení Flir540*. Odborné školení. Česká Lípa: Festool s.r.o. 2023. 2023-08-24.
- [5] WIKIPEDIE. *Absolutně černé těleso*. online. In: Wikipedie. 2023. Dostupné z: cs.wikipedia.org/wiki/Absolutně_černé_těleso. [cit. 2024-04-12].
- [6] TESTO. *Příručka termografie*. online. In: Termokamery Testo. 2015. Dostupné z: <https://www.termokamery-testo.cz/prirucka-termografie/>. [cit. 2024-04-12].
- [7] INSPEKTRA. *Měření termokamerou*. online. 2024. Dostupné z: <https://inspektra.cz/mereni-termokamerou/>. [cit. 2024-04-12].
- [8] W-TECHNIKA.CZ. *Kvalitativní x kvantitativní termografie*. online. In: SlideShare. 2020. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/wtechnika/kvalitativn-x-quantitativn-termografie>. [cit. 2024-04-12].
- [9] TERMOKAMERA.CZ. *Parametry termokamery*. online. In: Termokamera.cz. 2013. Dostupné z: <https://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/parametry-termokamery/>. [cit. 2024-04-12].
- [10] FLIR. *Temperature Guns Versus Thermal Imaging Technology*. online. In: Teledyne FLIR. 2015. Dostupné z: <https://www.flir.com/discover/rd-science/temperature-guns-versus-thermal-imaging-technology/>. [cit. 2024-04-12].
- [11] SOS ELECTRONIC. *Tabulky emisvit*. PDF. 1. vyd. SOS electronic s.r.o., © 1991-2024. Dostupné z: https://www.sos.sk/pdf/emissivity_tables_sk_2148.pdf. [cit. 2024-04-12].
- [12] AHLBORN. *Kulový teploměr AHLBORN ALMEMO FPA805GTS*. online. In: Ahlborn.cz. 2024. Dostupné z: <https://www.ahlborn.cz/cidla-a-snimace/kulovy-teplomer-ahlborn-almemo-fpa805gts.html>. [cit. 2024-04-12].
- [13] FLIR. *Online documentation for FLIR T5xx series*. online. In: FLIR Technical Support Center. 2023. Dostupné z: <https://support.flir.com/resources/y43u/>. [cit. 2024-04-12].

- [14] NETSERVIS. *ThermaSpot*. online. In: TMV SS. 2015. Dostupné z: <https://www.tmvss.cz/vyrobci/tmv-ss/thermaspot>. [cit. 2024-05-01].
- [15] NETSERVIS. *ThermaSpray*. online. In: TMV SS. 2015. Dostupné z: <https://www.tmvss.cz/vyrobci/tmv-ss/thermaspray>. [cit. 2024-05-01].
- [16] TERMOKAMERA.CZ. *Příklady termokamer*. online. In: Termokamera.cz. 2013. Dostupné z: <https://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/priklady-termokamer/>. [cit. 2024-04-12].
- [17] W-TECHNIKA.CZ. *Termokamera FLIR T540 pro stavebnictví a průmysl*. online. In: W-Technika. 2022. Dostupné z: <https://www.w-technika.cz/termokamera-flir-t540-termovize-pro-stavebnictvi-a-prumysl.html>. [cit. 2024-04-12].
- [18] FLUKE. *Fluke TiX501 Thermal Camera*. online. In: Fluke. 2024. Dostupné z: <https://www.fluke.com/en-us/product/thermal-cameras/tix501>. [cit. 2024-05-01].
- [19] TESTO. *Produktový Datasheet testo 890*. PDF. Testo s.r.o, 2019. Dostupné z: <https://static.testo.com/image/upload/v1692872062/CZ/prospekt-testo-890x.pdf>. [cit. 2024-05-01].

Přílohy

A Měření v komoře pro klimatické zkoušky

V této příloze se nachází tabulky spojené s kapitolou 4.

A.1 Tabulka – Porovnání naměřených emisivit

60°C												
Material	Typ materiálu	t_T [°C]	t_{IR} [°C]	$t_{střed}$ [°C]	$t_{e=0,96}$ [°C]	$\epsilon_{inh.}$	$\epsilon_{měř.}$	δ_e [%]	$t_{e=tab.}$ [°C]	$t_{e=odtoz}$ [°C]	$\Delta\theta$ [°C]	δ_θ [%]
Hliník	eloxovaný	58,1	57,2	59,9	59,3	0,77	0,95	23,05	67,3	59,8	-7,5	12,54
	leštěný		26,3			26,0	0,07	0,09	30,71	66,8	60,3	-6,5
Měď	neleštěný	52,3	23,9	53,0	24,7	0,07	0,11	53,71	65,6	52,4	-13,2	25,19
	leštěný		24,3			24,0	0,03	0,08	177,00	78,6	53,3	-25,3
Mosaz	neleštěný	46,2	23,4	43,7	21,8	0,07	0,07	1,57	42,7	42,7	0,0	0,00
	leštěný		22,8			21,7	0,03	0,07	123,67	66,9	42,7	-24,2
Bronz	neleštěný	47,4	22,7	41,7	22,8	0,15	0,12	21,93	37,3	41,3	4,0	9,69
	leštěný		22,6			22,7	0,1	0,11	13,50	44,4	42,4	-2,0
Ocel	očistěný	54,3	25,8	55,1	25,0	0,12	0,12	0,83	54,9	54,9	0,0	0,00
	leštěný		25,5			24,7	0,1	0,09	7,70	52,8	55,8	3,0
Pozink	leštěný	52,2	27,0	53,7	25,2	0,28	0,18	36,75	38,6	52,9	14,3	27,03
Nerez	leštěný	54,2	24,4	49,1	23,7	0,075	0,08	7,33	51,7	49,4	-2,3	4,66

100°C												
Material	Typ materiálu	t_T [°C]	t_{IR} [°C]	$t_{střed}$ [°C]	$t_{e=0,96}$ [°C]	$\epsilon_{inh.}$	$\epsilon_{měř.}$	δ_e [%]	$t_{e=tab.}$ [°C]	$t_{e=odtoz}$ [°C]	$\Delta\theta$ [°C]	δ_θ [%]
Hliník	eloxovaný	88,1	87,5	95,7	95,2	0,77	0,96	24,18	108,2	95,7	-12,5	13,06
	leštěný		26,3			25,7	0,07	0,08	20,71	107,3	97,3	-10,0
Měď	neleštěný	81,3	25,7	86,9	25,5	0,07	0,10	46,29	105,6	85,8	-19,8	23,08
	leštěný		23,5			23,9	0,03	0,08	166,00	127,4	87,3	-40,1
Mosaz	neleštěný	58,8	23,2	52,7	22,7	0,07	0,07	3,29	53,0	53,0	0,0	0,00
	leštěný		22,7			22,6	0,03	0,06	115,00	71,0	53,7	-17,3
Bronz	neleštěný	46,9	23,8	48,9	23,4	0,15	0,13	11,53	43,7	47,8	4,1	8,58
	leštěný		23,6			23,1	0,1	0,11	12,90	53,7	50,5	-3,2
Ocel	očistěný	93,2	31,4	95,2	29,9	0,12	0,12	3,75	96,4	96,4	0,0	0,00
	leštěný		30,2			28,7	0,1	0,10	3,50	96,3	96,3	0,0
Pozink	leštěný	80,6	33,4	84,2	27,8	0,28	0,17	39,36	89,8	83,9	-5,9	7,03
Nerez	leštěný	82,3	33,4	76,7	26,4	0,075	0,08	8,80	80,3	75,1	-5,2	6,92

A.2 Tabulka – Metody zvýšení emisivity

Název materiálu	Označení	60°C		100°C	
		$\vartheta_{\varepsilon=0,96}$ [°C]	$\varepsilon_{\text{měř}}$	$\vartheta_{\varepsilon=0,96}$ [°C]	$\varepsilon_{\text{měř}}$
Textilní náplast	AV1	51,9	0,96	77,9	0,954
Elektrikářská páska	AV2	52,1	0,97	78,5	0,968
Modrý sprej	AV3	43,7	0,685	63,9	0,668
Polyesterový štítek	AV4	52,2	0,97	78,7	0,97
Papírový štítek	AV5	51,3	0,935	77,2	0,938
ThermaSprey – bílý	AV6	51,8	0,94	77,1	0,945
ThermaSpot	AV7	51,9	0,96	78,2	0,96

B Příloha – Měření se zdrojem tepla

V této příloze se nachází tabulky spojené s kapitolou 5.

B.1 Tabulka – Měření propustnosti

Tabulka se nachází v příloze *kohout-jan-bakalarska-prace-priloha-b1.pdf* v přiloženém ZIP souboru *kohout-jan-bakalarska-prace-priloha.zip*.

B.2 Tabulka – Měření teploty odrazem

Materiál	Typ materiálu	80°C					130°C				
		$\vartheta_{T \text{ žehlička}} [^{\circ}\text{C}]$	$\vartheta_{T \text{ materiál}} [^{\circ}\text{C}]$	Snímek	$\vartheta_{\varepsilon = 0,96} [^{\circ}\text{C}]$	$\varepsilon_{\text{měř odraz}}$	$\vartheta_{T \text{ žehlička}} [^{\circ}\text{C}]$	$\vartheta_{T \text{ materiál}} [^{\circ}\text{C}]$	Snímek	$\vartheta_{\varepsilon = 0,96} [^{\circ}\text{C}]$	$\varepsilon_{\text{měř odraz}}$
Hliník	neleštěný	86,6	24,2	707	28,7	0,050	129,6	24,3	787	30,6	0,040
	leštěný			705	80,8	0,853			785	120,3	0,849
Měď	neleštěný	85,2	24,5	709	71,6	0,688	129,5	23,8	789	115,2	0,700
	leštěný			711	76,1	0,790			791	116,9	0,811
Mosaz	neleštěný	84,5	24,5	713	73,4	0,750	129,9	23,9	793	117	0,808
	leštěný			715	74,2	0,765			795	114,5	0,780
Bronz	neleštěný	83,2	24,1	717	76,4	0,827	129,4	23,5	797	115,9	0,801
	leštěný			719	78,7	0,855			799	117,2	0,816
Ocel	očistěný	84,2	24,4	721	74,9	0,783	129,2	23,8	801	111	0,747
	leštěný			723	72	0,730			803	107,2	0,705
Pozink	-	84,2	24,3	725	69,1	0,677	128,5	23,7	805	106,2	0,701
Nerez	-	83,5	24,1	727	75,1	0,800	130,0	23,9	807	112,5	0,756
Měď	Barva	87,2	24,6	729	28,7	0,056	129,2	23,8	809	32,3	0,051
Mosaz	Pásky - zelená	87,1	24,4	731	28,4	0,051	129,7	24,3	811	30,7	0,041
	Pásky - šedá			733	29,4	0,067			813	33,1	0,056
Mosaz	Náplast	82,5	24,4	783	25,3	0,019	129,5	23,9	815	26,7	0,016
	Páska			779	28,3	0,055			815	31,5	0,047
	Polyester			779	26,2	0,029			817	28,9	0,030
Zrcátko	Papír	84,6	24,5	779	26,3	0,029	130	23,7	817	29,9	0,036
	-			735	35,5	0,148			819	43,8	0,129
Teflon	-	84,7	24,5	737	29,2	0,065	129,4	23,8	821	32,1	0,050
	modrá			739	27,3	0,037			823	29,9	0,035
MS PA6	Festool modrá	90,2	24,6	741	26,9	0,032	130,7	23,7	825	29,1	0,030
	černá	90,2	24,5	743	26,9	0,032	130,4	23,6	827	29	0,030

B.3 Tabulka – Měření emisivity odrazem

Materiál	Typ materiálu	$\vartheta_{T, \text{žehlička}} [^{\circ}\text{C}]$	$\vartheta_{T, \text{materiál}} [^{\circ}\text{C}]$	80°C				130°C					
				Snimek	$\epsilon_{\text{měř odraz}}$	$\epsilon_{\text{měř komor}}$	$\Delta\epsilon$	$\delta [^{\circ}]$	Snimek	$\epsilon_{\text{měř odraz}}$	$\epsilon_{\text{měř komor}}$	$\Delta\epsilon$	$\delta [^{\circ}]$
Hliník	eloxovaný	86,6	24,2	707	0,95	0,95	0,00	0,26	787	0,955	0,95	0,01	0,79
	leštěný			705	0,153	0,09	0,06	40,2	785	0,138	0,09	0,05	33,7
Měď	neleštěný	85,2	24,5	709	0,195	0,11	0,09	44,8	789	0,255	0,11	0,15	57,8
	leštěný			711	0,208	0,08	0,12	60,0	791	0,187	0,08	0,10	55,6
Mosaz	neleštěný	84,5	24,5	713	0,222	0,07	0,15	68,0	793	0,242	0,07	0,17	70,6
	leštěný			715	0,22	0,07	0,15	69,5	795	0,194	0,07	0,13	65,4
Bronz	neleštěný	83,2	24,1	717	0,136	0,12	0,02	13,9	797	0,175	0,12	0,06	33,1
	leštěný			719	0,127	0,11	0,01	10,6	799	0,183	0,11	0,07	38,0
Ocel	očistěný	84,2	24,4	721	0,25	0,12	0,13	51,6	801	0,251	0,12	0,13	51,8
	leštěný			723	0,31	0,09	0,22	70,2	803	0,303	0,09	0,21	69,5
Pozink	-	84,2	24,3	725	0,37	0,18	0,19	52,1	805	0,42	0,18	0,24	57,8
Nerez	-	83,5	24,1	727	0,201	0,08	0,12	60,0	807	0,26	0,08	0,18	69,0
Měď	Barva	87,2	24,6	729	0,948	0,95	0,00	-0,21	809	0,953	0,95	0,00	0,31
Mosaz	Pásky - zelená	87,1	24,4	731	0,952	0,95	0,00	0,21	811	0,959	0,95	0,01	0,94
	Pásky - šedá			733	0,937	0,82	0,12	12,5	813	0,947	0,82	0,13	13,4
Mosaz	Náplast			783	0,985	0,96	0,03	2,54	815	0,983	0,96	0,02	2,34
	Páska	82,5	24,4		0,951	0,97	-0,02	-2,00		0,951	0,97	-0,02	-2,00
	Polyester			779	0,975	0,97	0,01	0,51	817	0,97	0,97	0,00	0,00
	Papír				0,975	0,94	0,04	3,6		0,965	0,94	0,03	2,6
Teflon	-	84,7	24,5	737	0,939	0,93	0,01	0,96	821	0,952	0,93	0,02	2,31
MS PA6	modrá	90,2	24,7	739	0,972	0,965	0,01	0,72	823	0,963	0,965	0,00	-0,21
	Festool modrá	90,2	24,6	741	0,975	0,965	0,01	1,03	825	0,97	0,965	0,01	0,52
	černá	90,2	24,5	743	0,98	0,964	0,02	1,63	827	0,969	0,964	0,01	0,52

C Příloha – Praktické měření ve firmě Festool

V této příloze se nachází tabulky spojené s kapitolou 6.

C.1 Tabulka – Měření teploty na krytu

Měření:	Převodovka		Snímek:		596
t [s]	T _{kryt} [°C]	T _{převod.} [°C]	T _{sonda} [°C]	Δθ [°C]	
0	35,2	39,2	33,3	-1,9	
15	35	39,2	33,4	-1,6	
30	35,1	39,1	33,5	-1,6	
45	35,3	39,2	33,8	-1,5	
60	35,5	39,3	34,2	-1,3	

Měření:	Převodovka		Snímek:		600
t [s]	T _{kryt} [°C]	T _{převod.} [°C]	T _{sonda} [°C]	Δθ [°C]	
0	35,7	40	35,5	-0,2	
15	35,4	40	35,2	-0,2	
30	35,8	40,1	35,4	-0,4	
45	36,4	40,3	36,1	-0,3	
60	36,4	40,3	35,5	-0,9	

Měření:	Kryt		Snímek:		597
t [s]	T _{kryt} [°C]	T _{převod.} [°C]	T _{sonda} [°C]	Δθ [°C]	
0	28,4	39,4	38,6	-0,8	
15	28	39,2	38,4	-0,8	
30	28,8	39,3	38,4	-0,9	
45	29,1	39,6	38,6	-1	
60	29,2	39,9	38,7	-1,2	

Měření:	Kryt		Snímek:		604
t [s]	T _{kryt} [°C]	T _{převod.} [°C]	T _{sonda} [°C]	Δθ [°C]	
0	28	39,7	38,2	-1,5	
15	28,6	39,7	38,4	-1,3	
30	29	39,9	38,7	-1,2	
45	29,2	40	38,6	-1,4	
60	29,3	40,1	38,5	-1,6	

C.2 Tabulka – Měření teploty vnitřních komponentů

Měření	1	2	3
t [s]	θ _{kartáč} [°C]	θ _{kartáč} [°C]	θ _{kartáč} [°C]
0	107,9	107,1	110
5	92,9	92,7	92,8
10	85,1	85,4	84,6
15	80,4	80,8	79,7
20	77,3	77,7	76,5
25	74,9	75,1	74
30	73,1	73,4	71,9
35	71,6	71,7	70,1
40	70,2	70,3	68,7
45	69,1	69,1	67,3
50	68,1	68,1	65,8
55	67,1	67,2	65,4
60	66,3	66,2	64,5

Měření	1	2	3
t [s]	θ _{vinutí} [°C]	θ _{vinutí} [°C]	θ _{vinutí} [°C]
0	48,1	53,5	51,1
5	51,4	53,3	51,8
10	51,4	53,3	51,6
15	51,2	52,7	51,2
20	50,9	52,7	50,8
25	50,7	52,5	50,4
30	50,4	52,2	50
35	50,2	51,8	49,5
40	49,9	51,5	49,3
45	49,6	51,1	48,9
50	49,4	50,8	48,9
55	49,2	50,5	48,4
60	48,9	50,2	48,3

C.3 Tabulka – Měření na dynamometru

Typ měření	Čas _{Dyn} [s]	Snímky	Termočlánky			Termokamera		
			θ _{C4} [°C]	θ _{C5} [°C]	θ _{COOLER} [°C]	θ _{C4} [°C]	θ _{C5} [°C]	θ _{COOLER} [°C]
Zavřený	261	614	47,3	47,5	40,7	26,1	24,5	22,7
	265	616	47,5	47,6	41,1	26,2	24,6	22,8
Otevřený	642	618	76,1	75,1	61,0	72,8	74,2	35,1
	648	620	76,4	75,4	61,6	72,7	74,2	35,9
	682	622	77,9	76,7	62,2	74,5	74,9	35,7
	689	624	78,3	77,3	62,8	75,9	74,5	35
ThermaSpray	867	626	63,4	62,1	53,4	64,5	62,7	53,9
	874	628	65,6	64,3	54,3	66,9	65,3	54,4
	999	630	79,9	78	62,2	81,9	80	63,5
	1004	632	80,1	78,2	62,5	82,3	80,2	63,7

C.4 Tabulka – Extrapolace teploty při vypnutí

Čas [s]	Termočlánky			Termokamera		
	ϑ_{C4} [°C]	ϑ_{C5} [°C]	ϑ_{COOLER} [°C]	ϑ_{C4} [°C]	ϑ_{C5} [°C]	ϑ_{COOLER} [°C]
5	75,6	77,3	65,8	76,9	77	67,6
10	75,2	76,7	66,1	76,7	76,2	67,7
15	74,1	75,5	66,1	75,6	75,5	67,6
20	73	74,2	66,1	74,6	74,5	67,5
25	71,6	72,8	66	73,2	72,9	67,3
30	70,3	71,4	65,7	71,9	71	67,2
35	68,8	70,1	65,2	70,7	70,1	66,9
40	67,6	68,9	64,9	69,5	69,2	66,6
45	66,6	67,8	64,6	68,2	68,1	66,2
50	65,7	66,9	64,2	67,4	67,4	66
55	64,5	65,7	63,8	66,1	66	65,6
60	63,8	64,9	63,5	65,5	65,5	65,1
65	63	64,1	63,1	64,8	64,7	64,7
70	62,1	63,2	62,5	64,3	63,7	64,2
75	61,4	62,3	62	63,3	62,9	63,7
80	60,7	61,7	61,6	62,6	62,4	63,2
85	60,2	61,2	61,1	62,1	62,1	62,9
90	59,6	60,6	60,8	61,3	61,2	62,4
95	59,1	60	60,4	60,8	60,7	62,1
100	58,7	59,5	60,1	60,5	60,1	61,7
105	58,2	59	59,7	59,9	59,6	61,3
110	57,8	58,6	59,3	59,3	59,2	60,9
115	57,4	58,1	58,9	58,8	58,6	60,5
120	57	57,7	58,5	58,5	58,3	60