



ČVUT

ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

**OVĚŘENÍ ZÁVISLOSTI VELIKOSTI EMISIVITY NA ÚHLU
SNÍMÁNÍ TERMOKAMEROU**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

AUTOR: Bc. Kryštof Urban

VEDOUcí PRÁCE: doc. Ing. Marie Kolaříková, Ph.D.

STUDIJNÍ PROGRAM: N0715A270001 Výrobní inženýrství

STUDIJNÍ OBOR: N071TVIN Bez specializace

Praha 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Urban** Jméno: **Kryštof** Osobní číslo: **483931**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výrobní inženýrství**
Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Ověření možnosti snímání termokamerou pod úhlem

Název diplomové práce anglicky:

Verification of the possibility of thermal imaging camera at an angle

Pokyny pro vypracování:

- problematika snímání termokamerou
- návrh experimentu pro ověření možnosti snímání pod úhlem
- provedení sady kontrolních měření
- vyhodnocení výsledků a jejich diskuze
- závěr

Seznam doporučené literatury:

- EN, Chang-Da a Issam MUDAWAR. Mathematical determination of emissivity and surface temperature of aluminum alloys using multispectral radiation thermometry. International Communications in Heat and Mass Transfer 006, 33(9), 1063-1070, doi:10.1016/j.icheatmasstransfer.2006.05.010
- HERVE, Philippe, Julie CEDELLE a Ionut NEGREANU. Infrared technique for simultaneous determination of temperature and emissivity. Infrared Physics & Technology. 2012, 55(1), 1-10, doi:10.1016/j.infrared.2010.09.001
- databáze WoS a Scopus

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Marie Kolaříková, Ph.D. ústav strojírenské technologie FS

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

Ing. Tomáš Němec ústav strojírenské technologie FS

Datum zadání diplomové práce: **26.04.2023** Termín odevzdání diplomové práce: **11.08.2023**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2023**

doc. Ing. Marie Kolaříková, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Marie Kolaříkové, Ph.D., a to pouze pomocí podkladů uvedených v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne:

.....

Podpis autora

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval paní doc. Ing. Marii Kolaříkové, Ph.D., IWE za poskytnutí odborných rad a cenných připomínek při psaní teoretické části, dále za pomoc při vypracování experimentu a v neposlední řadě za vstřícný přístup a trpělivost projevenou během naší vzájemné spolupráce.

Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Tomášovi Němcovi za pomoc s přípravou měřicího pracoviště.

Anotace

Diplomová práce je zaměřena v teoretické části na rozbor problematiky snímání termokamerou a dalších metod pro měření emisivity. V praktické části bylo navrženo experimentální zařízení pro měření vzorků termokamerou FLIR E95 pod úhlem. Toto měření bylo následně provedeno pro jednotlivé úhly natočení.

Název diplomové práce: Ověření závislosti velikosti emisivity na úhlu snímání termokamerou

Autor práce: Bc. Kryštof Urban

Vedoucí práce: doc. Ing. Marie Kolaříková, Ph.D.

Konzultant: Ing. Tomáš Němec

Akademický rok: 2022/2023

Vysoká škola: ČVUT v Praze, Fakulta strojní

Ústav: 12133 – Ústav strojírenské technologie

Vedoucí ústavu: doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.

Rozsah práce: 63 stránek, 8 tabulek, 24 obrázků

Klíčová slova: Infračervená termografie, zdánlivá odražená teplota, termokamera, úhel měření

Annotation

The theoretical part of the thesis is focused on the analysis of the problem of thermal imaging and other methods for measuring emissivity. In the practical part, an experimental setup for measuring samples with FLIR E95 thermal imager at an angle was designed. This measurement was then performed for each rotation angle.

Title of the final thesis: Verification of the dependence of the emissivity magnitude on the scanning angle of the thermal imaging camera

Author: Bc. Kryštof Urban

Supervisor: doc. Ing. Marie Kolaříková, Ph.D.

Consultant: Ing. Tomáš Němec

Academic year: 2022/2023

University: CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering

Department: 12133 – Department of Manufacturing Technology

Head of department: doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.

Extent: 63 pages, 8 tables, 24 pictures

Keywords: Infrared thermography, apparent reflected temperature, infrared camera, angle of measurement

Obsah

1. Úvod a cíl práce	11
2. Elektromagnetické spektrum	12
2.1 Rádiové vlny.....	12
2.2 Mikrovlny	13
2.3 Infračervené vlny	14
2.3.1 Near-infrared (NIR).....	14
2.3.2 Short-Wave infrared (SWIR).....	14
2.3.3 Long-Wave Infrared (LWIR)	15
2.3.4 Far Infrared (FIR).....	15
2.4 Viditelné světlo	16
2.5 Ultrafialové záření	17
2.6 Rentgenové záření	17
2.7 Gama záření	18
3. Emisivita.....	19
3.1 Způsoby měření emisivity	19
3.1.1 Metoda infračerveného záření.....	19
3.1.2 Metoda průhlednosti.....	20
3.1.3 Metoda měření záření z povrchu kontrolované teploty (CTRS)	21
3.1.4 Metoda elektromagnetického odrazu	22
4. Měření emisivity pomocí infračerveného záření	24
4.1 Odrazivost, pohltivost, propustnost	26
4.2 Rovnice termografie	27
5. Návrh experimentu	29
5.1 Postup měření.....	29
5.2 Návrh experimentálního zařízení	30

5.2.1	Otočný stůl.....	30
5.2.2	Izolační box.....	32
5.2.3	Peltierův článek Hebei TEC1-12730.....	32
5.2.4	Napájecí zdroj.....	34
5.2.5	Průmyslový termostat REX – C100.....	34
5.2.6	Termokamera FLIR E95.....	36
5.2.7	Zařízení pro navařování termočlánků BT 2.....	37
5.2.8	Datalogger AHLBORN ALMEMO 5690-2.....	38
5.3	Schéma elektrického zapojení.....	39
5.4	Příprava vzorků.....	40
5.4.1	Úprava povrchu vzorků.....	40
5.4.2	Navařování termočlánků.....	41
5.5	Kontrolní měření teploty a vlhkosti atmosféry.....	42
5.6	Měření zdánlivé odražené teploty.....	42
5.7	Výsledky a jejich diskuze.....	44
6.	Závěr.....	51
	Použité zdroje.....	52
	Seznam tabulek.....	54
	Seznam obrázků.....	55
	Přílohy.....	56

Seznam zkratek

CTRS	Controlled Temperature Radiant Source neboli Regulovaný zdroj tepelného záření
PSU	power supply unit – napájecí zdroj
SSR – 40 DA	Solid state relay – relé bez mechanických částí do maximální hodnoty střídavého proudu 40 A
PID	proporcionálně integračně derivovací regulátor

Seznam použitých veličin

<u>Označení</u>	<u>Jednotka</u>	<u>Vysvětlení</u>
$\varepsilon_{Obj.}$	[-]	Emisivita objektu
$\tau_{Atm.}$	[-]	Propustnost atmosféry
$\Phi_{Det.}$	W	Celkový zářivý tok
$\Phi_{Obj.}^{BB}$	W	Zářivý tok od měřeného objektu
$\Phi_{Odr.}$	W	Odražený zářivý tok z okolních zdrojů
$\Phi_{Atm.}$	W	Zářivý tok atmosféry
ρ	[-]	Odrazivost
α	[-]	Pohltivost
τ	[-]	Propustnost

1. Úvod a cíl práce

Termografie je významným nástrojem v průmyslovém prostředí pro nedestruktivní měření teplot. Infračervené kamery se běžně využívají ke snímání odraženého tepelného záření a k vyhodnocení tohoto záření ve formě termogramu, který poskytuje informace o tepelném rozložení objektů a procesů.

Tradičně se termokamery používají při úhlu natočení $5^\circ - 10^\circ$ od normály vůči měřenému objektu, kde jsou schopny poskytnout spolehlivá a přesná měření. Motivací této diplomové práce, je ověření možnosti snímání termokamerou pod větším úhlem než 10° od normály mezi termokamerou a měřenou plochou. Snímání pod úhlem může umožnit lepší vizualizaci a analýzu objektů, které mají komplexní geometrii nebo jsou umístěny ve specifických prostorových uspořádáních. Vstupní úhel snímání může ovlivnit přesnost měření. Hlavní oblastí, kde je měření pod úhlem aplikovatelné je v diagnostickém segmentu průmyslu, a to při diagnostice jednotlivých zařízení s ohledem na únavové opotřebení pohyblivých mechanických součástí jako jsou například ložiska.

Hlavní motivací a cílem této diplomové práce je falsifikace hypotézy, že při změně úhlu natočení vůči snímanému povrchu s teplotně homogenním povrchem a emisivitou nedochází ke změně teploty naměřené termokamerou, jak uvádí následující vztah.

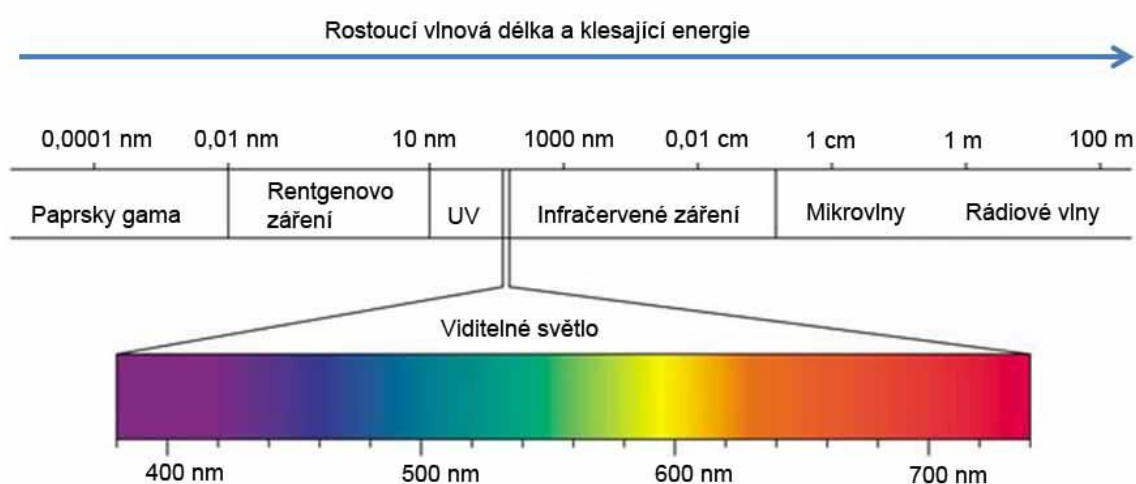
Hlavní body práce:

1. Rozbor problematiky snímání termokamerou
2. Popis jednotlivých metod měření emisivity
3. Návrh a stavba měřícího zařízení
4. Návrh postupu měření
5. Ověření platnosti výše zmíněné hypotézy

2. Elektromagnetické spektrum

Elektromagnetické záření má také vlnovou povahu a může být popsáno jako elektromagnetické vlnění, což znamená, že se skládá z periodických oscilací elektrického a magnetického pole, které se šíří v prostoru jako vlny. Různé typy elektromagnetického záření mají různé vlnové délky a frekvence, což znamená, že se liší v jejich energii a vlastnostech.

Elektromagnetické záření se dělí do různých kategorií podle jeho vlnové délky a frekvence, což vytváří elektromagnetické spektrum. Záření s kratšími vlnovými délkami a vyšší frekvencí má více energie a jedná se o ionizující záření, zatímco záření s delšími vlnovými délkami a nižší frekvencí je záření neionizující [11].



Obrázek 1 - Elektromagnetické spektrum

Elektromagnetické spektrum se obvykle dělí na následující kategorie, s rostoucí vlnovou délkou.

2.1 Rádiové vlny

Rádiové vlny jsou elektromagnetické vlny s nejnižší frekvencí a nejdelší vlnovou délkou v elektromagnetickém spektru. Jejich frekvence se pohybuje v rozmezí několika kHz až několika GHz.

Rádiové vlny se vyskytují přirozeně všude kolem nás a jsou využívány v mnoha oblastech, jako jsou telekomunikace, věda a medicína. Tyto vlny jsou generovány pomocí rádiových vysílačů, které vysílají signál do okolí. Tento signál je poté zachycen pomocí antény, která ho převádí na elektrický signál, který se dá dále zpracovat.

Jednou z nejvýznamnějších aplikací rádiových vln jsou telekomunikace, kde se používají k přenosu hlasu a dat na velké vzdálenosti. Signály vysílané rádiovými vysílači mohou být přenášeny v plynech (tedy i vzduchem), v kapalinách (pro námořní aplikace) a dokonce i ve vakuu (kosmický prostor). Tyto signály jsou používány v rádiu, televizi, mobilních telefonech a dalších zařízeních.

Další významnou aplikací rádiových vln je radar, což je systém pro detekci objektů pomocí odraženého signálu. Tento systém je využíván v mnoha oblastech, jako jsou meteorologie, letectví, námořnictvo a vojenské operace.

V medicíně se rádiové vlny používají pro diagnostiku pomocí MRI (Magnetic Resonance Imaging). Tento postup využívá silné magnetické pole a rádiové vlny k vytvoření obrazů těla a může pomoci detekovat poruchy nebo poškození tkání.

I když mají rádiové vlny několik výhod, jako je schopnost snadno proniknout překážkami, jako jsou budovy a stromy, a mohou přenášet signál na velké vzdálenosti, jejich použití má i některá omezení. Například vysoký signál může způsobit rušení a interference s jinými zařízeními [11,12].

2.2 Mikrovlny

Mikrovlny jsou elektromagnetické vlny s vlnovou délkou v rozmezí od jednoho milimetru po jeden metr a frekvencí v rozmezí od 300 MHz do 300 GHz. Mikrovlny mají kratší vlnovou délku a vyšší frekvenci než rádiové vlny, ale delší vlnovou délku a nižší frekvenci než infračervené záření.

Dále jsou mikrovlny využívány v mnoha oblastech, včetně telekomunikací, radaru, mikrovlnného vaření a medicíny. V telekomunikacích jsou mikrovlny používány pro přenos dat a telefonních hovorů pomocí satelitů a vysílačů na zemi. Radar využívá mikrovlny k detekci vzdálených objektů a měření vzdálenosti.

Mikrovlnné vaření je způsob vaření, kdy se jídlo ohřívá pomocí mikrovlnného záření. Mikrovlny pronikají do jídla a způsobují, že se molekuly vody v něm rozkmitají a díky tomuto kmitání dochází k zahřívání molekul.

V medicíně jsou mikrovlny používány v diatermii, což je metoda pro léčbu bolesti pomocí ohřevu tkání pomocí mikrovlnného záření. Tato metoda se používá k léčbě bolesti v kloubech, při svalových křečích a dalších typech bolesti. Nicméně mají mikrovlny také několik nevýhod, jako například omezený dosah, citlivost na překážky a interference, avšak díky svým vlastnostem jsou mikrovlny stále velmi užitečné v mnoha aplikacích [12,13].

2.3 Infračervené vlny

Infračervené vlnění (zkráceně IR) je elektromagnetické záření, které se nachází v rozmezí mezi viditelným světlem a mikrovlnami v elektromagnetickém spektru. Infračervené záření se šíří v prostředí jako vlny, ale může interagovat s hmotou a vyvolávat v ní teplo.

Vlnová délka infračerveného záření se pohybuje od přibližně 0,7 mikrometru až do 1 milimetru. Infračervené záření je rozděleno na několik oblastí podle vlnové délky [14].

2.3.1 Near-infrared (NIR)

Near-infrared (zkráceně NIR), neboli blízké infračervené záření je oblast infračerveného spektra s vlnovou délkou mezi 0,75 a 2,5 mikrometru. To znamená, že se nachází mezi viditelným světlem a krátkovlnným infračerveným zářením.

NIR záření má mnoho praktických aplikací, zejména v analytické chemii a spektroskopii. Je to využíváno například v potravinářství a zemědělství k určování složení potravin, jako jsou tuky, bílkoviny a cukry. V lékařství se NIR záření používá pro diagnostiku, jako například pro měření hladiny kyslíku v krvi nebo pro detekci nádorových buněk. NIR záření má také aplikace v průmyslu, například pro kontrolu povrchových vad. NIR spektroskopie se používá pro detekci povrchových vad kovových a nekovových materiálů. Dají se takto objevit trhliny a podobné povrchové vady.

NIR záření se šíří v prostředí a může být absorbováno materiály, které jsou vystaveny této energii. Tyto absorpční spektra jsou charakteristická pro různé molekuly, což umožňuje použití NIR spektroskopie k identifikaci a kvantifikaci látek. NIR spektroskopie je rychlá a neinvazivní metoda, což z ní dělá velmi užitečný nástroj v různých oblastech, jako je potravinářský průmysl, lékařství a průmyslová výroba [14].

2.3.2 Short-Wave infrared (SWIR)

Short-Wave Infrared, krátkovlnné infračervené záření je oblast infračerveného spektra s vlnovou délkou mezi 1,4 a 3 mikrometry. Je to oblast, která leží mezi NIR (Near-Infrared) a LWIR (Long-Wave Infrared) zářením.

SWIR záření má mnoho praktických aplikací, zejména v průmyslu a vojenství. Je využíváno například v oblasti řízení kvality a kontrolních procesů, v lékařství pro detekci nádorových buněk a v oblasti bezpečnosti pro detekci chemických látek. Ve vojenství se SWIR záření používá pro noční vidění, sledování pohybu nepřátelských sil a pro identifikaci cílů.

SWIR záření se šíří v prostředí jako vlny, ale může být také absorbováno materiály, které jsou vystaveny této energii. Tyto absorpční spektra jsou charakteristická pro různé materiály, což umožňuje použití SWIR spektroskopie k identifikaci a analýze různých látek. SWIR spektroskopie se používá v oblastech jako jsou potravinářský průmysl, farmacie, chemický průmysl a výzkum materiálů.

SWIR záření může pronikat některými materiály, jako jsou sklo a plast, což umožňuje využití této technologie v oblasti bezpečnosti a průmyslu. Může být také využito pro průzkum a mapování geologických oblastí, jako jsou minerály a horniny, díky své schopnosti detekovat specifické spektrální charakteristiky těchto materiálů [14].

2.3.3 Long-Wave Infrared (LWIR)

Long-Wave Infrared, neboli dlouhovlnné infračervené záření je oblast infračerveného spektra s vlnovou délkou mezi 8 a 15 mikrometry. Tato oblast zahrnuje většinu tepelného záření vyzařovaného objekty s teplotami blízkými okolnímu prostředí.

LWIR záření se využívá v mnoha aplikacích, včetně průmyslového měření teploty, termografie, bezpečnostních kamer, detekce plynů a sledování teplot v geologických oblastech. Může být také použito pro detekci a analýzu látek, jako jsou plyny a organické sloučeniny.

LWIR záření může být absorbováno materiály, jako jsou sklo a plast, což omezuje jeho použití v průmyslu. Na druhou stranu může pronikat některými materiály, jako jsou textilie a papír.

Detekce a analýza LWIR záření se provádí pomocí speciálních kamer a senzorů, které umožňují detekovat tepelné záření a převádět ho na elektrický signál. Tyto senzory se používají v mnoha průmyslových aplikacích, jako jsou měření teploty v pecích a jiných zařízeních a měření emisí.

Celkově lze říci, že LWIR záření má mnoho praktických využití a je důležitým nástrojem pro měření teploty, sledování bezpečnosti a analýzu materiálů [14].

2.3.4 Far Infrared (FIR)

Far Infrared, neboli vzdálené infračervené záření je oblast infračerveného spektra s vlnovou délkou větší než 15 mikrometrů. Toto záření se obvykle využívá v teplotách pod pokojovou teplotou a má nižší frekvenci a delší vlnovou délku než blízká IR nebo SWIR.

FIR záření se vyskytuje v mnoha přírodních procesech, jako jsou výměna tepla mezi tělesy, fotosyntéza a infračervená terapie. V průmyslu se FIR záření používá v mnoha aplikacích, jako jsou sušení, ohřev a měření teploty.

Jednou z nejvýznamnějších aplikací FIR záření je medicína, kde se využívá k terapeutickým účelům. Terapeutické FIR záření může být použito k léčbě bolesti, zánětu, svalového napětí a jiných zdravotních problémů. FIR záření může pronikat hluboko do tkání a může zlepšovat krevní oběh a metabolismus.

Další aplikací FIR záření je průmyslové sušení, kde se FIR záření používá k sušení výrobků jako jsou dřevo, potraviny a textil. FIR záření může být také využíváno k ohřevu objektů, jako jsou budovy, nádrže a potrubí.

Celkově lze říci, že FIR záření má mnoho využití v průmyslu a medicíně. Jeho schopnost pronikat do tkání a podporovat krevní oběh a metabolismus z něj činí cenný nástroj pro léčbu a terapii [14].

2.4 Viditelné světlo

Viditelné světlo je část elektromagnetického spektra, která je viditelná pro lidské oko. Tato část elektromagnetického spektra má vlnovou délku v rozmezí 400 až 700 nanometrů.

Viditelné světlo je tvořeno spektrem barev, které se projevují jako různé vlnové délky. Červená má nejdelší vlnovou délku (až 700 nm), zatímco fialová má nejkratší vlnovou délku (kolem 400 nm). Mezi červenou a fialovou jsou další barvy spektra, jako jsou oranžová, žlutá, zelená a modrá.

Světlo může být rozloženo na jednotlivé barvy pomocí hranolu nebo jiného rozptylového prvku, což se nazývá disperze. Tato vlastnost viditelného světla umožňuje vytvořit duhu, která se skládá ze všech barev spektra.

Viditelné světlo má významné využití v mnoha oblastech. Ve fotografii, filmu a televizi se používá ke snímání a reprodukci obrazů. V medicíně se viditelné světlo používá k diagnostice a terapii, jako například v očním lékařství nebo dermatologii. V optice se používá ke konstrukci optických přístrojů, jako jsou mikroskopy, teleskopy a dalekohledy.

Celkově lze říci, že viditelné světlo je důležitou částí elektromagnetického spektra, která umožňuje lidem vidět svět kolem sebe. Díky své vlastnosti disperze a různým barvám spektra má viditelné světlo mnoho využití v mnoha odvětvích [15,16].

2.5 Ultrafialové záření

Ultrafialové (UV) záření je část elektromagnetického spektra s vlnovými délkami kratšími než viditelné světlo, ale delšími než rentgenové záření. UV záření se dělí na tři kategorie podle vlnové délky: UV-A (400–320 nm), UV-B (320–280 nm) a UV-C (280–100 nm).

UV záření se vyskytuje přirozeně v slunečním světle a může mít pozitivní i negativní účinky na živé organismy. UV-A záření proniká do hlubších vrstev kůže a může přispět k předcházení některých kožních onemocnění, jako je například lupénka. UV-B záření může být zodpovědné za spálení kůže a také je spojeno s větším rizikem vzniku kožního rakoviny. UV-C záření je nejvíce energetické a škodlivé pro živé organismy, ale většina tohoto typu záření je absorbována zemskou atmosférou.

Využití UV záření je rozmanité. V medicíně se používá k dezinfekci a sterilizaci, v kosmetice se využívá pro tvorbu umělého opálení a v zubním lékařství se používá k tvorbě polymerových kompozitů. UV záření se také používá v elektronice, například pro tvorbu fotolitografických vzorů na čipových deskách.

Zároveň však UV záření může mít škodlivé účinky na lidské zdraví, proto je důležité chránit se před nadměrným vystavením UV záření zejména na slunci. Sluneční ochranné prostředky, jako jsou krémy nebo spreje s UV filtrem, pomáhají snižovat riziko škodlivých účinků UV záření [17].

2.6 Rentgenové záření

Rentgenové záření je elektromagnetické záření s velmi krátkou vlnovou délkou a vysokou energií. Rentgenové záření má vlnovou délku v rozmezí od 0,01 do 10 nanometrů, což je mnohem kratší než vlnová délka viditelného světla.

Rentgenové záření se používá v medicíně pro diagnostické a terapeutické účely. Při diagnostice se rentgenové záření používá ke generování obrazů těla pomocí rentgenového zobrazování. Tento proces využívá schopnosti rentgenového záření procházet skrze tkáň těla a vytvářet obrazy vnitřních orgánů, kostí a dalších struktur. Při terapii se rentgenové záření používá ke zničení nádorových buněk.

Rentgenové záření však může mít škodlivé účinky na lidské zdraví. Vysoké dávky rentgenového záření mohou poškodit DNA a vést k mutacím a vzniku rakoviny. Proto jsou při rentgenovém zobrazování pacienti chráněni pomocí olovených příkrývek a případně i jiných

ochranných opatření. Při pracovním vystavení rentgenovému záření musí být dodržovány přísné bezpečnostní opatření, aby se minimalizovalo riziko zdravotního poškození.

Rentgenové záření se využívá i v průmyslu, například pro detekci defektů v materiálech a pro kontrolu kvality výroby. Vědci také využívají rentgenové záření pro studium struktury molekul a krystalů pomocí rentgenové krystalografie.

Rentgenové záření se dnes používá nejen v medicíně a průmyslu, ale také v různých vědeckých oblastech, jako je chemie, fyzika, biologie a archeologie. Díky schopnosti rentgenového záření pronikat skrze různé materiály se dá použít ke studiu vnitřní struktury různých objektů a materiálů.

Rentgenové záření také umožňuje výzkum kosmu, jelikož rentgenové teleskopy jsou schopny zachytit rentgenové záření vysílané z kosmických objektů, jako jsou například černé díry, galaxie a supernovy. Tyto pozorování umožňují vědcům hlouběji porozumět vesmíru a jeho vývoji [18].

2.7 Gama záření

Gama záření je nejvyšší formou elektromagnetického záření v řádu energií. Je to velmi krátkovlnné záření s vysokou frekvencí a energií, které se vyskytuje v přírodě jako produkt jaderných reakcí a rozpadu atomových jader.

Gama záření má vysokou průnikovou schopnost a může projít silnými materiály, jako jsou ocelové pláty nebo beton, a je to důvod, proč se často používá k průzkumu vnitřní struktury různých materiálů a objektů, včetně lidského těla.

Gama záření se využívá v medicíně při léčbě rakoviny, kde se vysoká dávka gama záření používá k zničení rakovinných buněk. Gama záření také nachází uplatnění v průmyslu, například při sterilizaci nástrojů nebo potravin a při detekci defektů v průmyslových materiálech.

Gama záření může být velmi nebezpečné pro lidské zdraví, protože vysoká expozice může způsobit poškození DNA a zvýšit riziko vzniku rakoviny. Z tohoto důvodu je důležité přijímat opatření k minimalizaci expozice na gama záření a používat vhodné ochranné prostředky, jako jsou olověné stínítka a dávkovací přístroje [19].

3. Emisivita

Emisivita je fyzikální veličina vyjadřující schopnost povrchu materiálu vysílat tepelné záření. Konkrétně se jedná o poměr mezi vyzářeným zářením z povrchu materiálu a zářením absolutně černého tělesa při stejné teplotě a vlnové délce. Emisivita je důležitá zejména při návrhu tepelných systémů, kde je nutné přesně znát tepelné vlastnosti materiálů, aby bylo možné dosáhnout optimálního výkonu při minimalizaci energetických nákladů [1].

3.1 Způsoby měření emisivity

Existuje několik metod, pomocí kterých můžeme emisivitu měřit těmi jsou:

1. Metoda infračerveného záření: Tato metoda spočívá v měření záření emitovaného povrchem materiálu v infračerveném spektru. K měření se využívají přístroje nazývané pyrometry, které umožňují přesné měření teploty povrchu a zároveň měření emisivity materiálu.
2. Metoda průhlednosti: Tato metoda měří absorpci a transmisi záření skrze materiál pomocí spektrofotometru. Z tohoto měření lze vypočítat emisivitu materiálu.
3. Metoda záření z povrchu kontrolované teploty: Tato metoda spočívá v kontrolovaném zahřívání povrchu materiálu na přesně definovanou teplotu a měření záření v daném spektru. Emisivitu pak lze vypočítat pomocí Plankova zákona.
4. Metoda elektromagnetického odrazu: Tato metoda využívá změn ve vlnové délce elektromagnetického záření odraženého od povrchu materiálu k určení jeho emisivity.

3.1.1 Metoda infračerveného záření

Metoda infračerveného záření je jednou z nejčastěji používaných metod pro měření emisivity povrchů materiálů. Tato metoda využívá záření emitované povrchem materiálu v infračerveném spektru, které je zachyceno přístrojem nazývaným pyrometr. Pyrometr pracuje na principu detekce elektromagnetického záření ve spektru, které odpovídá teplotě povrchu materiálu.

Princip metody spočívá v tom, že je nejprve měřena teplota povrchu materiálu pomocí pyrometru. Následně je stejným pyrometrem změřeno záření emitované povrchem materiálu v infračerveném spektru. Z těchto měření lze pak vypočítat emisivitu povrchu materiálu pomocí vztahu:

$$\varepsilon = E / \sigma T^4 \text{ [-]} \quad (1)$$

kde ε je emisivita materiálu, E je intenzita emitovaného záření, T je teplota povrchu materiálu a σ je Stefanova-Boltzmannova konstanta.

Pyrometry se dělí na dva základní typy: jednobarevné pyrometry a vícebarevné pyrometry. Jednobarevné pyrometry měří intenzitu záření v jedné vlnové délce, zatímco vícebarevné pyrometry měří intenzitu záření v několika vlnových délkách a umožňují tak přesnější výpočet emisivity povrchu materiálu.

Metoda infračerveného záření se s výhodou používá pro vysokoteplotní aplikace pro měření emisivity, například v průmyslových procesech, kde je důležité měřit tepelné vlastnosti materiálů za účelem optimalizace výkonu a minimalizace energetických nákladů. Této metodě je věnována samostatná kapitola č.4 [1,2].

3.1.2 Metoda průhlednosti

Metoda průhlednosti je jednou z metod měření emisivity, která se používá k určení emisivity tenkých vrstev na různých podkladech. Tato metoda je založena na měření průchodu elektromagnetického záření přes tenkou vrstvu a porovnání jeho intenzity s intenzitou záření pro různé známé hodnoty emisivity.

Postup měření metodou průhlednosti zahrnuje následující kroky:

1. Vrstva s neznámou emisivitou je nanášena na podklad a nechá se vyschnout.
2. Na tenkou vrstvu je umístěn zdroj elektromagnetického záření, například laser nebo halogenová žárovka.
3. Záření, které prochází tenkou vrstvou, je zachyceno detektorem na druhé straně a je zaznamenána jeho intenzita.
4. V měřicí soustavě jsou následně připraveny srovnávací vzorky se známou emisivitou a pro každý z nich je proveden stejný postup jako v kroku 2 a 3.
5. Naměřené hodnoty intenzity záření pro vrstvu s neznámou emisivitou a srovnávací vzorky jsou použity ke stanovení emisivity tenké vrstvy.

Při této metodě je důležité, aby zdroj záření měl přesně definovanou vlnovou délku, aby se minimalizovalo rušení vlivem jiných vlnových délek. Tato metoda je používána například v průmyslu při měření emisivity povlaků, jako jsou povlaky na skle, keramice, kovových nebo polymerových materiálech.

Metoda průhlednosti je velmi užitečná pro měření emisivity tenkých vrstev na různých materiálech. Je to neinvazivní a nekontaktní metoda, která umožňuje měřit emisivitu v reálném čase a bez nutnosti přímého kontaktu s materiálem. Díky tomu se tato metoda používá v mnoha odvětvích, včetně průmyslu, výzkumu a vývoje, diagnostice a monitorování stavu materiálů a stavebních prvků.

Přesnost této metody závisí na různých faktorech, jako jsou vlnová délka záření, tloušťka tenké vrstvy, typ materiálu, na kterém je vrstva umístěna, a úhel dopadu záření. Pro získání přesných výsledků je tedy důležité mít kvalitní a přesně kalibrovanou měřicí aparaturu a provést správnou analýzu naměřených dat.

Je třeba mít na paměti, že tato metoda je vhodná pouze pro měření emisivity tenkých vrstev, nikoliv pro materiály s vysokou absorpční schopností, jako jsou například tmavé kovy. Pro tyto materiály jsou vhodnější jiné metody měření emisivity, jako například pyrometrie nebo emisní spektroskopie [3,4].

3.1.3 Metoda měření záření z povrchu kontrolované teploty (CTRS)

Metoda měření záření z povrchu kontrolované teploty se používá pro měření emisivity materiálů. Principem této metody je vytvoření zdroje záření s povrchem, který má známou a stabilizovanou teplotu a známou emisivitu, a použití tohoto zdroje k měření emisivity testovaného materiálu.

Zdroj záření CTRS se obvykle skládá z žárovky nebo ohříváče, který je umístěn uvnitř duté koule s vysokou tepelnou odolností. Tato koule má na jedné straně výstupní otvor, skrz který vychází záření, a na druhé straně vstupní otvor, skrz který se reguluje výkon ohříváče tak, aby se udržovala stabilní teplota povrchu. Povrch zdroje záření musí mít konstantní teplotu a emisivitu, což je zajištěno několika kontrolními prvky. A to například volbou materiálu zdroje záření nebo použitím termostatu pro regulaci teploty.

Pro měření emisivity testovaného materiálu se využívá fakt, že záření emitované zdrojem CTRS je známé a stabilní. Testovaný materiál je umístěn před výstupní otvor koule a je změřeno množství záření, které je absorbováno. Pomocí známého záření ze zdroje a naměřeného záření absorbovaného materiálem je pak vypočítána emisivita.

Metoda záření z povrchu kontrolované teploty má výhodu vysoké přesnosti a přesnosti, ale vyžaduje nákladné a sofistikované zařízení a přesné kalibrace zdroje záření.

Samotná metoda záření z povrchu kontrolované teploty (CTRS) je relativně jednoduchá, ale vyžaduje přesně definované podmínky pro vytvoření stabilního zdroje záření a správnou interpretaci výsledků.

Přesná měření záření se provádí pomocí spektrometru, který umožňuje měřit spektrální složení záření.

Měření se provádí pro různé teploty povrchu zdroje, aby bylo možné získat data pro výpočet emisivity v závislosti na teplotě. Vypočítané hodnoty emisivity pak slouží jako vstup pro další výpočty tepelných procesů a např. návrh výměníků tepla. Jednou z nejdůležitějších vlastností zdroje záření CTRS je jeho stabilita. Aby bylo dosaženo přesných výsledků, musí být zdroj záření CTRS stabilní v čase, což vyžaduje přesné kalibrace a kontrolu teploty a emisivity. V praxi se tato metoda často používá pro měření emisivity kovů a keramických materiálů při vysokých teplotách, jako jsou například materiály používané v letectví a kosmonautice [5,6].

3.1.4 Metoda elektromagnetického odrazu

Metoda elektromagnetického odrazu je fyzikální technikou, která se používá k měření fyzikálních vlastností materiálů na základě změn v odrazu elektromagnetického vlnění na hranici mezi dvěma materiály. Tato metoda je založena na změně impedance elektromagnetického pole, které proniká do materiálu.

Při použití metody elektromagnetického odrazu se vysílá elektromagnetická vlna určité frekvence na povrch materiálu. Při dopadu na povrch dochází k částečnému odrazu elektromagnetické vlny zpět ke zdroji a částečně k průchodu vlny do materiálu. Pomocí snímače je měřena intenzita odraženého signálu a vypočítá se poměr mezi odraženým a vyslaným signálem, který se nazývá koeficient odrazu.

Koeficient odrazu se mění v závislosti na fyzikálních vlastnostech materiálu, jako je například emisivita, která je způsobena absorpcí a následným opětovným vyzářením elektromagnetického záření z povrchu materiálu. Výhodou této metody je, že umožňuje měření emisivity v různých vlnových délkách elektromagnetického spektra a při různých teplotách. Metoda elektromagnetického odrazu se používá v různých oblastech, například při měření emisivity povrchů kovů, keramiky, skla a jiných materiálů v různých oblastech elektromagnetického spektra. Tato metoda se také často používá v metalografii pro analýzu povrchových vrstev materiálů a při vývoji nových materiálů v průmyslovém a výzkumném sektoru.

Metoda elektromagnetického odrazu může být použita pro měření emisivity povrchu materiálu, pokud jsou splněny určité podmínky. Při této metodě se měří odraz elektromagnetického vlnění z povrchu materiálu v závislosti na úhlu dopadu a polarizaci vlny. Emisivita povrchu materiálu je určena z poměru odrazu a přenosu vlnění. Pokud je povrch materiálu homogenní a zcela plochý, pak může být emisivita měřena při jediném úhlu dopadu vlnění a polarizace. Pokud je povrch nerovný nebo nehomogenní, musí být použity další úhly a polarizace, aby byla emisivita určena přesněji.

Při této metodě se používají přístroje nazývané spektrometry s vysokým rozlišením, které mohou měřit odraz a přenos elektromagnetického vlnění v širokém spektrálním rozsahu. Měření se provádí při určité vlnové délce, která je závislá na vlastnostech materiálu a na aplikaci, pro kterou se emisivita měří [7,8,9].

4. Měření emisivity pomocí infračerveného záření

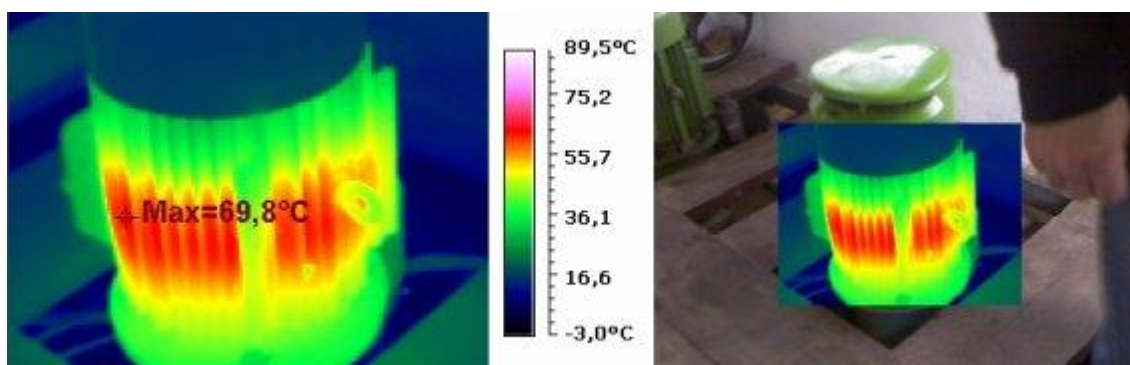
Infračervená termografie se specializuje na identifikaci, analýzu a vizualizaci teplotních polí na površích měřených objektů pomocí detekce infračerveného záření. Tato metoda umožňuje bezkontaktní měření povrchových teplot a je stále více využívána jako nedestruktivní metoda kontroly. Zkráceně se pro ni používá označení IRT a s rozvojem termokamer a jejich komerční dostupnosti se stala velmi populární. Každý předmět emituje tepelné záření, které lze detekovat, pokud jeho teplota je vyšší než absolutní nula. K dnešní detekci infračerveného záření a měření povrchové teploty se používají pyrometry a termokamery. Termokamera snímá celé rozložení teploty na povrchu objektu a umožňuje zpětné zpracování dat a různé metody vyhodnocování výsledků měření. Na rozdíl od pyrometru, který měří pouze teplotu v jednom bodě [23].



Obrázek 2 - Bezkontaktní měření teploty pyrometrem a termokamerou

Termogram zobrazuje infračervené záření, které by jinak nebylo lidským okem viditelné, pomocí barevné škály, kde jednotlivé barvy odpovídají určitým povrchovým teplotám. Díky této vizualizaci můžeme vidět rozložení teplot na povrchu měřeného objektu. Pro bezkontaktní měření teploty se využívá elektromagnetického záření s vlnovými délkami v rozsahu 0,4 až 15 μm , což umožňuje měření povrchových teplot v rozsahu od -60 do $+6000$ $^{\circ}\text{C}$.

Pro vlnové délky větší než 15 μm (FIR1 pásmo) zatím nejsou k dispozici běžné ani komerčně dostupné měřicí přístroje, protože neexistují vhodné detektory.



Obrázek 3 - Příklad termogramu znázorňující rozložení povrchové teploty na plášti elektromotoru

Termokamera vyhodnocuje povrchovou teplotu pomocí procesoru, který počítá na základě naměřené intenzity záření. Ta je definována následujícím vztahem.

$$M = \frac{d\phi}{dA} [W \cdot m^{-2}] \quad (2)$$

Vystupující parametry:

- Φ [W] – zářivý tok
- A [m^2] – plocha povrchu zdroje záření

Intenzita záření se liší v závislosti na teplotě a vlnové délce. Fyzikální zákony infračervené termografie, jako je Planckův vyzařovací zákon, Wiennův zákon posunu, Stefanův Boltzmannův zákon a Kirchhoffův zákon tepelného vyzařování, popisují vztahy mezi intenzitou záření, teplotou, vlnovou délkou a dalšími veličinami. Tyto zákony jsou podrobně popsány v literatuře, jako je práce Michaela Vollmera a Klause-Petera Möllmanna nebo Waldemara Milkiny a Sebastiana Dudzika. V rámci této diplomové práce budou použity pouze vybrané vztahy, které pomohou lépe pochopit princip měření teploty. Fyzikální zákony infračervené termografie jsou definovány na základě černého tělesa, které absorbuje veškeré záření bez ohledu na vlnovou délku a směr, neodráží ani nepropouští záření a chová se jako Lambertův zářič. Navíc při konkrétní teplotě a vlnové délce nemůže žádný reálný objekt vyzařovat více energie než černé těleso [23].

4.1 Odrazivost, pohltivost, propustnost

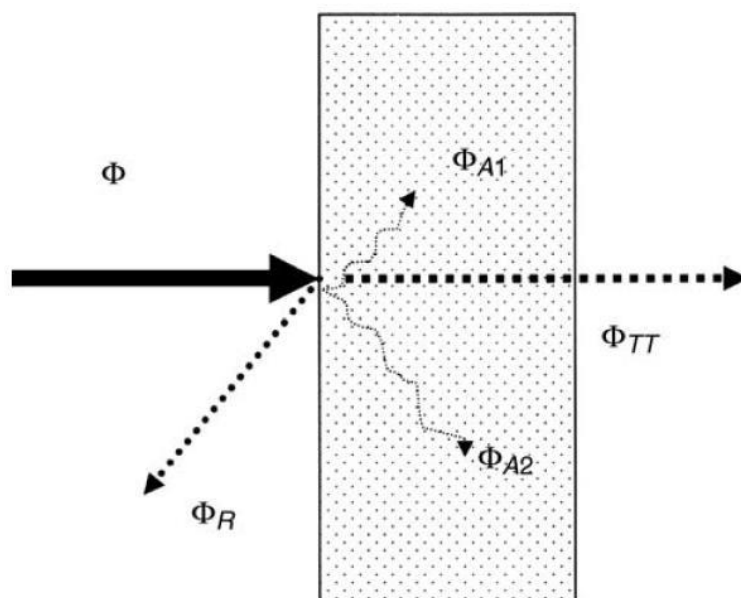
Odrazivost, pohltivost a propustnost jsou vlastnosti materiálů vztahující se k jejich schopnosti interakce se světlem či jinými elektromagnetickými vlnami.

Pokud se tepelné záření setká s povrchem nějakého skutečného objektu, který má určitou tloušťku, dojde k interakci mezi zářením a tímto povrchem. V důsledku této interakce je část tepelného záření pohlcena, část se odrazí a část se propustí skrz povrch objektu. Toto chování popisuje následující rovnice [23]:

$$\phi = \phi_R + \phi_A + \phi_{TT} \quad (3)$$

V této rovnici vystupují následující parametry:

- $\phi [W]$ – Celkový zářivý tok dopadající na povrch reálného tělesa
- $\phi_R [W]$ – Odražený zářivý tok
- $\phi_A [W]$ – Pohlcený zářivý tok tělesem
- $\phi_{TT} [W]$ – Propuštěný zářivý tok



Obrázek 4 - Vzájemné působení tepelného záření s reálným tělesem

Pokud rovnici (3) vydělíme celkovým tepelným zářivým tokem dostaneme upravený tvar rovnice:

$$1 = \frac{\phi_R}{\phi} + \frac{\phi_A}{\phi} + \frac{\phi_{TT}}{\phi} \quad (4)$$

Pravá strana rovnice (4) v tomto upraveném tvaru definuje koeficienty neboli poměrové veličiny:

$$\frac{\Phi_R}{\Phi} = \rho \quad (5)$$

$$\frac{\Phi_A}{\Phi} = \alpha \quad (6)$$

$$\frac{\Phi_{TT}}{\Phi} = \tau \quad (7)$$

Vystupující parametry:

- ρ [-]: odrazivost
- α [-]: pohltivost
- τ [-]: propustnost

Odrazivost určuje, jak velká část dopadajícího světla se od povrchu odrazí. Materiály s vysokou odrazivostí jsou schopny odrážet velkou část světla, zatímco materiály s nízkou odrazivostí spíše pohlcují světlo.

Pohltivost udává, jak velká část dopadajícího světla se v materiálu absorbuje. Materiály s vysokou pohltivostí jsou schopny pohltit větší množství světla, zatímco materiály s nízkou pohltivostí jsou spíše propustné.

Propustnost určuje, jak velká část světla prochází materiálem. Materiály s vysokou propustností jsou schopny propouštět větší množství světla, zatímco materiály s nízkou propustností jsou spíše neprůhledné [23].

Tyto tři parametry mají vzájemnou závislost dle Kirchhofova zákona tepelného vyzařování. Tuto závislost popisuje následující rovnice:

$$\varepsilon + \tau + \rho = 1 \quad (8)$$

Z této rovnice vyplývá, že materiál, který má vysokou odrazivost, pak zároveň bude mít nízkou pohltivost a propustnost. Naopak materiál s vysokou pohltivostí bude mít nízkou odrazivost a propustnost [23].

4.2 Rovnice termografie

Proces bezdotykového měření teploty spočívá v detekci směsi záření pomocí měřícího přístroje. Vyhodnocení teploty je založeno na energetické bilanci a využívá se rovnice termografie [23]:

$$\Phi_{Det.} = \tau_{Atm.} \cdot \varepsilon_{Obj.} \cdot \Phi_{Obj.}^{BB} \cdot \tau_{Atm.} \cdot (1 - \varepsilon_{Obj.}) \cdot \Phi_{Odr.} + (1 - \tau_{Atm.}) \cdot \Phi_{Atm.} \quad (9)$$

V této rovnici nám vystupují jednotlivé parametry:

- $\varepsilon_{Obj.}$ Emisivita objektu [-]
- $\tau_{Atm.}$ Propustnost atmosféry [-]
- $\Phi_{Det.}$ Zářivý tok dopadající na detektor termokamery [W]
- $\Phi_{Obj.}^{BB}$ Zářivý tok od měřeného objektu [W]
- $\Phi_{Odr.}$ Zářivý tok od měřeného objektu [W]
- $\Phi_{Atm.}$ Odražený zářivý tok z okolních zdrojů [W]

5. Návrh experimentu

Měření byla provedena na vzorcích z konstrukční oceli S235 se specifickou úpravou, která bude popsána dále.

Podstatou experimentu je měření zdánlivé odražené teploty povrchu dvou vedle sebe umístěných vzorků, z nichž jeden má pokojovou teplotu (23 °C) a druhý je ohříván na teplotu nastavenou na termostatu zařízení pro ohřev, a to 85 °C. Toto měření je prováděno bezkontaktní metodou termokamerou se spektrálním rozsahem 7,5-14 μm a zároveň je měřená teplota ověřována přivařenými termočládky.

Abychom dosáhli co možná nejpřesnějších výsledků, tak jsou oba vzorky umístěny v izolačním boxu, který odrušuje vlivy okolí. Zároveň je izolační box umístěn na otočném stole se stupnicí. Otočný stůl umožňuje otáčení po 5°. Vyhodnocuje se zdánlivá odražená teplota při přechodu měřené oblasti z teplého vzorku na studený vzorek. Tím jsme schopni určit kritický úhel přestupu měřené oblasti jak pro malé (0-25°), tak velké úhly (0-55°). Tento jev bude popsán ve vyhodnocení.

Vzorky jsou ohřívány pomocí Peltierova článku. Tato metoda ohřevu má určité výhody oproti využití například pece. Těmi jsou průběžné dohřívání vzorku bez nutnosti manipulace se vzorky, ohřev vzorku v celé jeho kontaktní ploše s topným tělesem a možnost řízení ohřevu pomocí termostatu.

5.1 Postup měření

- Návrh a výroba měřicí sestavy.
- Příprava vzorků viz. kapitola 5.4.
- Zapojení elektrického obvodu měřícího zařízení.
- Sestavení měřícího zařízení a propojení s PC určeným pro zaznamenávání dat.
- Provedení alespoň 3 cyklů ohřevu z důvodu stabilizace teploty „teplého“ vzorku.
- Připravit termokameru s nastavením teplotního rozsahu -20 °C až 120 °C.
- Synchronizace času na termokameře a měřící stanici ALMEMO.
- Provést první kontrolní měření s infračerveným odražečem pro stanovení zdánlivé odražené teploty pro celý rozsah proměřovaných úhlů.

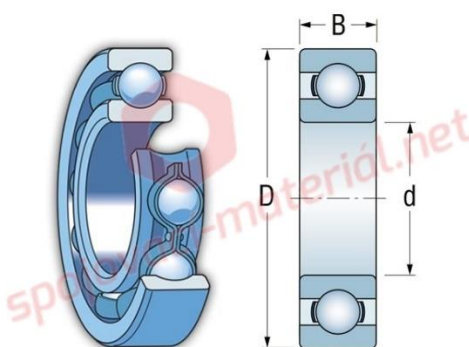
- Tato získaná data nastavit do vyhodnocovacího softwaru termokamery spolu s dalšími nutnými parametry pro měření. Například teplota okolí, vzdušná vlhkost a vzdálenost měření (vzdálenost termokamery od měřených ploch vzorků).
- Pokračovat v měření na vzorcích za použití zdánlivé odražené teploty IČ odražeče.
- Vyhodnotit 5 snímků pro každý úhel během každého měření, tj. pro každý úhel natočení je využito 20 hodnot měření, které jsou v rámci daného měření zprůměrovány na jednu hodnotu pro jeden úhel v rámci jednoho měření.

5.2 Návrh experimentálního zařízení

Pro experiment byla využita termokamera značky FLIR, vyhodnocovací software ResearchIR a další zařízení vlastní výroby. Tím je otočný stůl (obr. č. 6) se stupnicí pro polohování vzorků, izolační box, na kterém je aplikován nástřík s danou emisivitou, Peltierův článek Hebei TEC1-12730 pro ohřev a upravený počítačový zdroj pro jeho napájení.

5.2.1 Otočný stůl

Jako polohovadlo byl využit otočný stůl vlastní výroby se stupnicí, který umožňuje nastavení vzorků vůči termokameře po pěti stupních. Obě desky otočného stolu byly tepelně děleny pomocí laseru, čímž bych chtěl poděkovat firmě, která si ovšem nepřeje být jmenována, za tuto pomoc při psaní mé diplomové práce. Na spodní desce byla vygravírována stupnice pro nastavení úhlu desky horní. Na spodní desku byla přivařena přesná bezešvá trubka 35/5 mm, do které bylo z každé strany vysoustruženo uložení pro ložisko (ČSN EN 024 630 ZKL – ZKL 6000A).

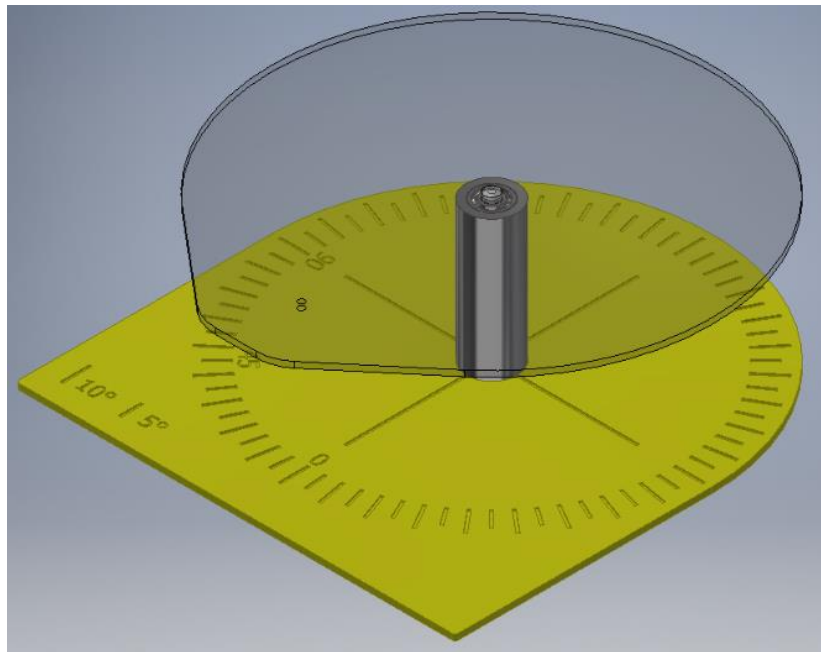


Obrázek 5 - Ložiska použitá pro otočný stůl

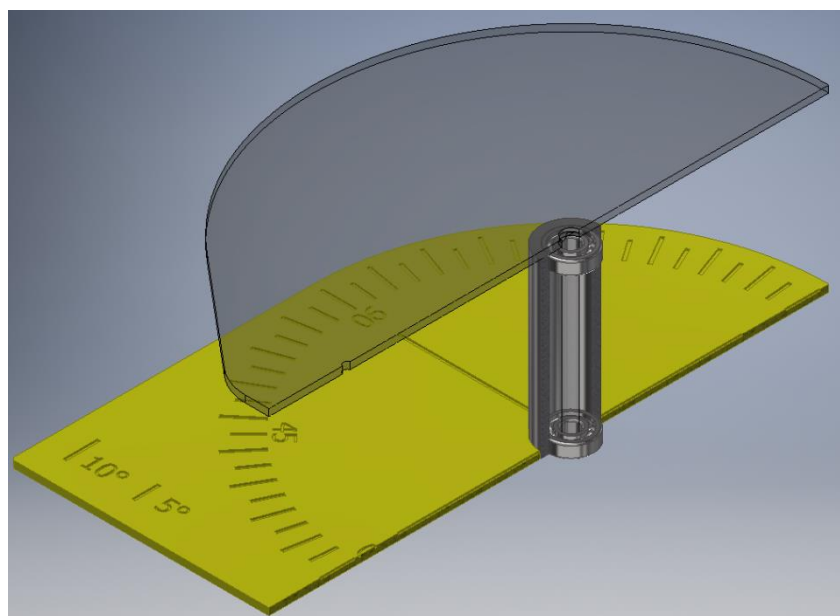
Tabulka 1 - Velikost ložisek

d [mm]	D [mm]	B [mm]
10	26	8

K horní desce byla přivařena tyč kruhového průřezu o průměru 10 mm, která slouží k propojení obou částí stolu.



Obrázek 6 – Schématické znázornění otočného stolu



Obrázek 7 - Mechanismus otáčení

5.2.2 Izolační box

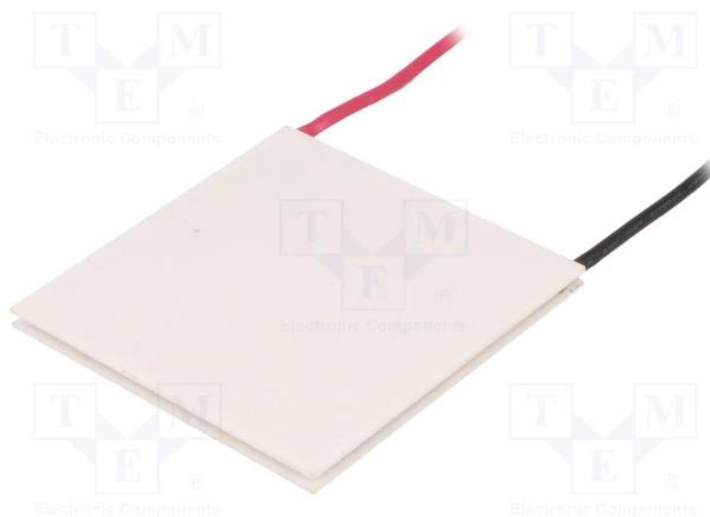
Jedná se o jednoduše slepený box z extrudovaného polystyrenu. Pro zpevnění byl box ještě oblepený hliníkovou lepicí páskou. Rozměry použitého boxu jsou 250 x 250 x 350 mm (h x v x š). Na vnitřní stěny byl použitý bílý nástřik termografické barvy o dané emisivitě 0,97 při vlnové délce 7,5-14 μm . Ačkoliv je emisivita funkcí vlnové délky, v již zmíněném rozsahu vychází téměř konstantní.



Obrázek 8 - Izolační box

5.2.3 Peltierův článek Hebei TEC1-12730

Peltierův článek je elektrický prvek, který dokáže přeměňovat teplo na elektřinu a naopak. Tento prvek se skládá ze dvou různých kovových desek, které jsou spojeny vodivým materiálem a jsou umístěny mezi dvěma keramickými deskami. Když je přivedena elektrická energie, jedna plocha článku se ochladí a druhá se zahřívá.



Obrázek 9 - Peltierův článek

Účinnost Peltierova článku se obvykle pohybuje mezi 5 a 10 procenty, což znamená, že při přeměně tepla na elektřinu dochází k významné ztrátě energie ve formě vyzářeného odpadního tepla. Toto je důvod, proč se Peltierovy články nepoužívají pro energeticky náročné aplikace, ale spíše pro menší zařízení, jako jsou například termoelektrické chladničky nebo generátory pro menší elektronické aplikace. Přestože je účinnost Peltierova článku relativně nízká, má několik výhod. Peltierovy články jsou spolehlivé, nevyžadují pohyblivé části a mají nízké nároky na údržbu. Kromě toho mohou být velmi malé a lehké, což umožňuje jejich použití v mobilních zařízeních nebo v aplikacích, kde je omezený prostor.

Peltierův článek byl připevněn přímo na vzorek, čímž bylo docíleno ohřevu pouze sledovaného vzorku a nedochází k ohřevu celého boxu, jako by tomu bylo například při ohřevu pomocí velkého kusu oceli ohřátého v peci a následně umístěného do izolačního boxu. Tím bychom dosáhli velkého tepelného rušení v důsledku přestupu tepla a sálání.

Tabulka 2 - Technické parametry Peltierova článku TEC1-12730

Rozměry (šířka x délka x tloušťka):	62 x 62 x 3,9 mm
I_{\max} :	30,7 A
U_{\max} :	15,4 V
ΔT_{\max} :	68 °C
T_{\max} :	138 °C
Materiál:	Al_2O_3

5.2.4 Napájecí zdroj

Pro napájení Peltierova článku byl použit modifikovaný napájecí počítačový zdroj (PSU).



Obrázek 10 - Zapojení článku k PSU

Při prvním zapojení článku ke zdroji bylo zjištěno několik následujících poznatků. Prvním byl velmi rychlý ohřev, jelikož článek byl schopen rovnoměrně ohřát vzorek z oceli S235 (70 x 65 x 20 mm), na teplotu 120 °C za dobu kratší než 10 minut. Dalším poznatkem bylo poddimenzování napájecích kabelů, což bylo následně vyřešeno výměnou za kabely s průřezem 1,5mm². Zdroj jako takový je po otestování dostatečný pro napájení článku.

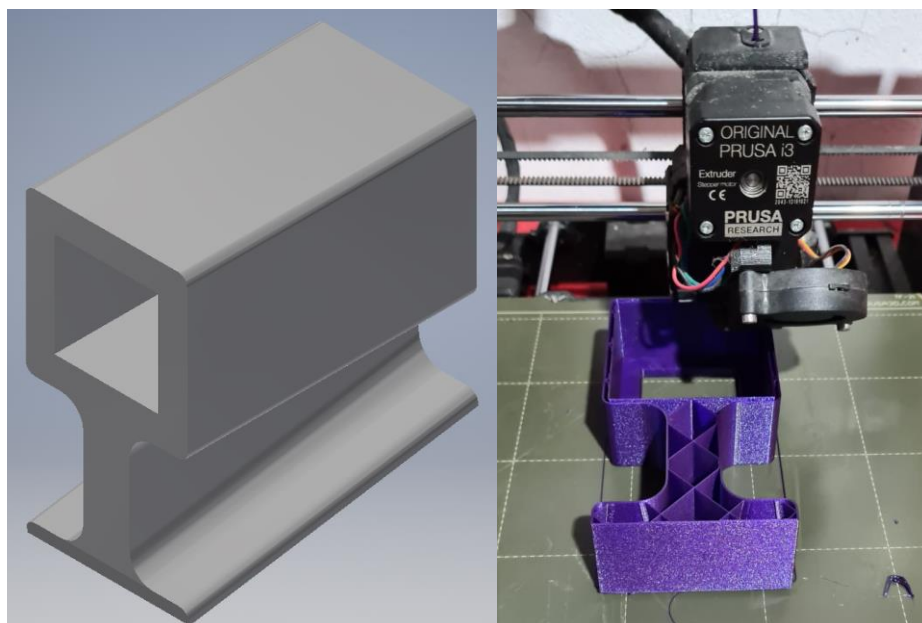
5.2.5 Průmyslový termostat REX – C100

Další modifikací měřicí sestavy bylo přidání termostatu REX-C100, díky němuž bylo možné zajistit udržování teploty vzorku v požadovaném rozsahu. Spínání PSU je zajištěno pomocí SSR-40 DA. Pro přenos teplotních dat ze vzorku do termostatu byly použity navařovací termočlánky typu K, které jsme používali pro všechna měření.



Obrázek 11 - Termostat REX-C100

V ohledu na kompaktnost a zakrytí kontaktů elektrických vodičů celého měřícího zařízení byl vytištěn stojan pro termostat z PLA. Tisk byl realizován na 3D tiskárně Průša MK3S+. Vzhledem k nevýznamnému zatížení stojánku a zkrácení tiskové doby byla použita pouze 10 % výplň. Design stojanu byl optimalizován pro ergonomické ovládání termostatu.



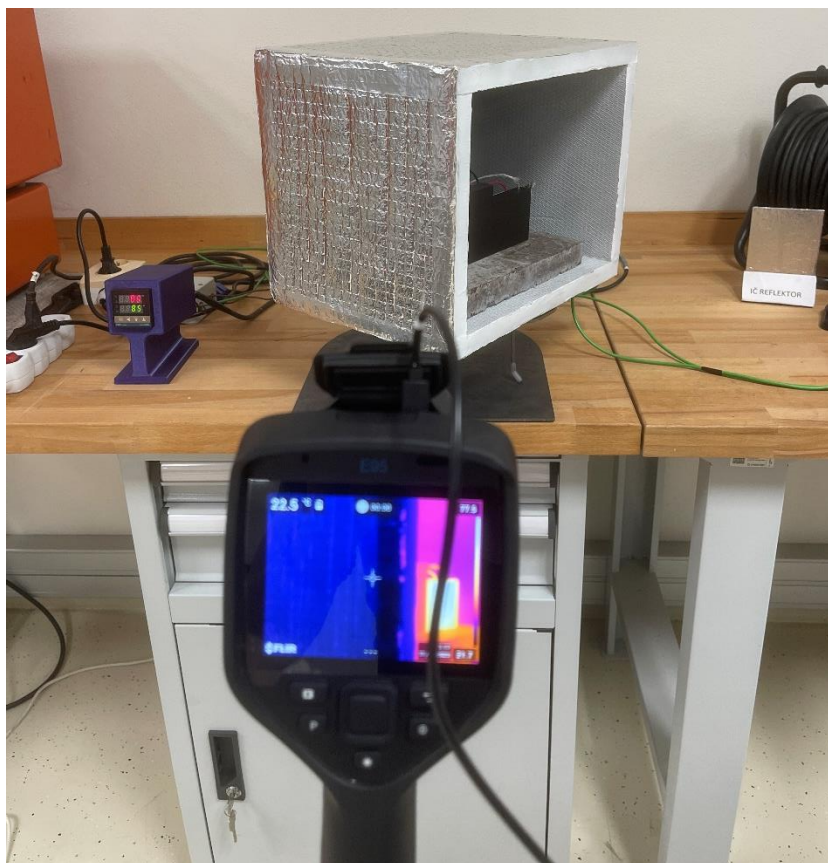
Obrázek 12 - Stojánek PID

5.2.6 Termokamera FLIR E95

Model termokamery použitý během měření je FLIR E95, který patří do přístrojového vybavení Ústavu strojírenské technologie. Pro její ustavení byl použit standardní tří bodový stativ [20].

Tabulka 3 - Parametry termokamery FLIR E95 [20]

Rozlišení IR senzoru	464 x 348	Digitální zoom	1-4x kontinuální
Teplotní rozsahy	-20°C až 120°C	Display	LCD 4", 640 x 480
	0°C až 650°C	Digitální kamera	5 MP, 53° x 41° FOV
	300°C až 1500°C	Barevné palety	Iron, Gray, Rainbow, Arctic, Lava, Rainbow HC
Time-lapse (Infrared)	10 s až 24 hodin	Obrazové módy	Termo, vizuální, MSX®, obraz v obraze
Typ detektoru a rozměry pixelu	Nechlazený mikrobolometr, 17 μm	Obraz v obraze	Nastavitelná velikost i poloha
Teplotní citlivost/NETD	< 0.03°C @ 30°C	MSX®	Zvýraznění obrysů v termogramu za použití reálného snímku
Spektrální rozsah	7.5 – 14.0 μm	UltraMax™	Ano (zvýšení rozlišení termogramu)
Obrazová frekvence	30 Hz	Přesnost	±2°C nebo ±2%
Zorné pole (včetně volitelných objektivů)	42° x 32° 24° x 18° 14° x 10°	Ostření	Manuální a automatické
Minimální ostřicí vzdálenost	0.5 m	Izotermy	Nad/pod/interval/vlhkost/izolace
F-No	f/1.3	Měření vzdálenosti	Ano (vizualizováno na obrazovce)
Skladovací teploty	-40°C až 70°C	Provozní teploty	-15°C až 50°C



Obrázek 13 - Termokamera FLIR E95 při měření

5.2.7 Zařízení pro navařování termočlánků BT 2

Zařízení BT-2 umožňuje navařit (tedy tavným spojem připojit) termočlánky kondenzátorovým výbojem pro měření teploty. BT-2 má zabudovaný akumulátor, což umožňuje navařování i v místech, kde není možnost využít síťový proud. Pomocí tohoto zařízení lze navařovat dráty a termočlánky do průměru 1,4 mm [21].



Obrázek 14 - Navařovací zařízení BT-2

Tabulka 4 - Parametry zařízení BT-2

Maximální průměr drátu	1,4 mm
Přibližný počet výbojů při plném nabití akumulátoru	800
Nabíjecí proud	150 mA
Napájecí napětí	230 V (AC)
Nabíjecí doba akumulátoru	cca 5 hodin
Rozměry	130 x 140 x 75 mm
Váha	2,5 kg
Krytí	IP 23
Pracovní poloha	libovolná

5.2.8 Datalogger AHLBORN ALMEMO 5690-2

Datalogger ALMEMO 5690-2 je modulární zařízení, které umožňuje individuální nastavení dle požadavků uživatele případně podle potřeb daného měření. Disponuje podsvíceným displejem. Jednou z hlavních výhod tohoto zařízení je možnost různých forem interpretace naměřených hodnot, a to ve formě jednotlivých hodnot, seskupeně nebo formou sloupcových případně liniových diagramů. Rychlost měření splňuje i náročné požadavky, jelikož

dosahuje hodnot 2,5 až 100 měření za sekundu. Ukládání dat je možné buď přímo do paměti zařízení nebo na SD kartu, kterou je možné následně data přenést do PC.

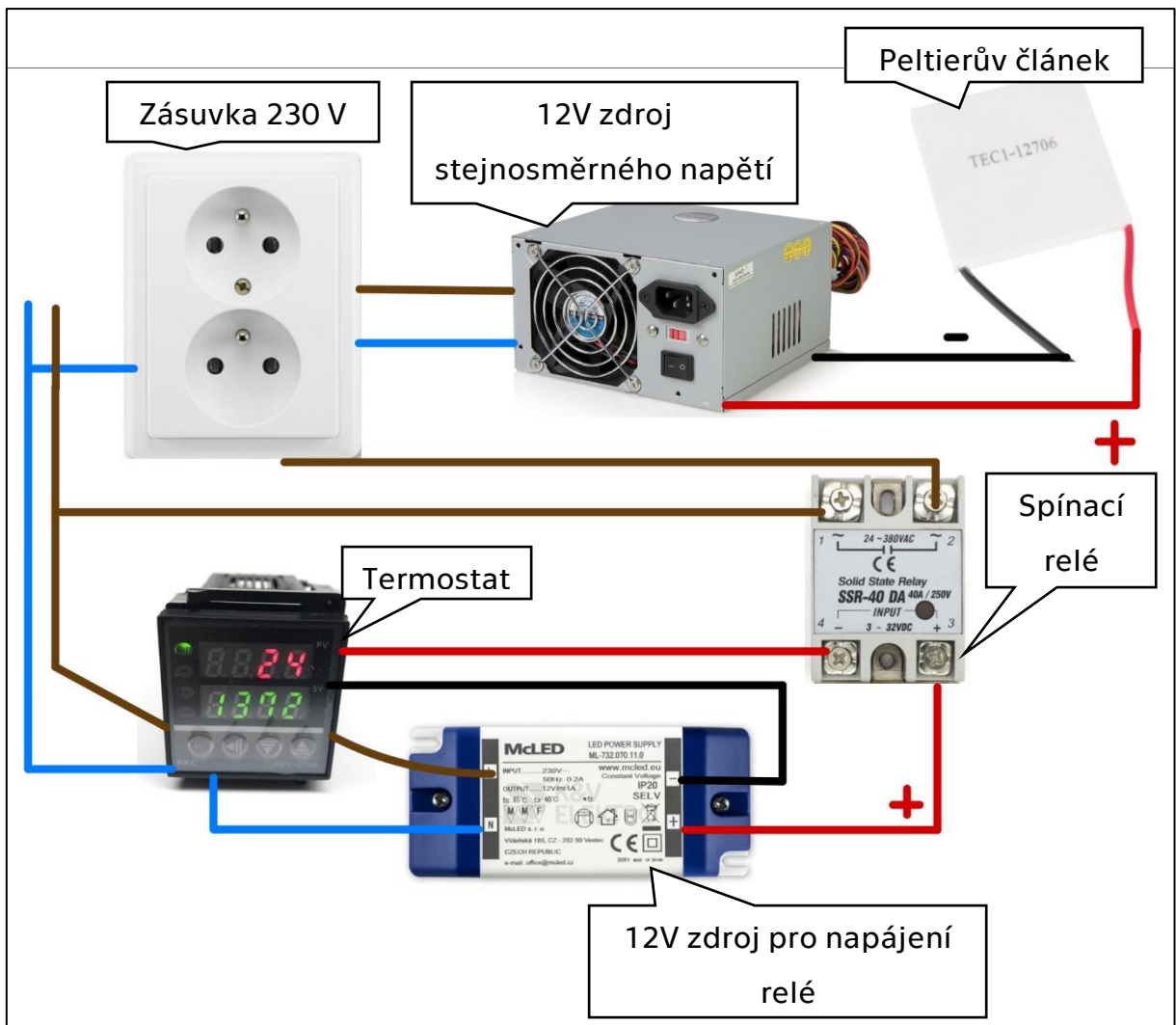
V našem případě bylo využito snímačů pro měření teploty (termočlánků) typu K, jimiž je možné měřit teplotu v rozsahu $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ [22].



Obrázek 15 - Datalogger AHLBORN ALMEMO 5690-2

5.3 Schéma elektrického zapojení

Na obrázku (16) je zobrazeno zjednodušené schéma elektrického zapojení měřícího zařízení. Jak můžeme vidět, použitím relé spínajícího střídavý proud, bylo rozpojení fáze realizováno přímo v zásuvce, do které byl zapojen napájecí zdroj Peltierova článku.



Obrázek 16 - Schéma elektrického zapojení

5.4 Příprava vzorků

Pro měření byly připraveny vzorky z konstrukční oceli S235 o rozměrech 70x65x20 mm. Tyto rozměry jsou poplatné velikosti Peltierova článku určeného pro ohřev. Tloušťka materiálu byla zvolena primárně s ohledem na možnost delší akumulace tepla po odpojení topného tělesa termostatem, který má konstrukčně daný časový a teplotní interval spínání. Vzorky byly děleny pásovou pilou a následně byla měřená plocha vzorku dále upravována.

5.4.1 Úprava povrchu vzorků

Aby bylo možno vzorky porovnat, bylo potřeba u obou vzorků homogenizovat drsnost povrchu. Nebylo třeba zajistit konkrétní drsnost povrchu, ale jeho homogenitu. Toho bylo docíleno tryskáním obou vzorků v tryskacím zařízení, které je v laboratořích Ústavu

strojírenské technologie. Takto otryskaný povrch byl následně ručně přebroušen brusným plátnem o zrnitosti 120.



Obrázek 17 – Tryskací zařízení

Dalším úkonem při přípravě vzorků byla homogenizace povrchu vzorků v ohledu na emisivitu. Ta byla provedena nástřikem termografické barvy na oba vzorky. Tím se podařilo eliminovat hlavní faktory, které by mohly zkreslit naměřené hodnoty.

5.4.2 Navařování termočlánků

Na připravené vzorky, jak bylo uvedeno v předchozím bodě, bylo třeba ještě před samotným měřením přivařit několik termočlánků, pro ověření skutečné teploty. Dva termočlánky byly přivařeny na vzorek ohřátý na teplotu 85 °C a jeden termočlánek na vzorek při pokojové teplotě 23 °C. V případě teplého vzorku je druhý termočlánek připojen na termostat, pro zajištění co možná nejhomogennějšího a nejkontinuálnějšího ohřevu. Abychom mohli využít vyhodnocení pomocí videa a funkce „oblast“, byly termočlánky ve všech případech přivařeny na horní stranu vzorků. Díky tomu bylo možné dostat celou měřenou

plochu vzorku do zorného pole termokamery, aniž by prívodní vodiče termočlánků zakrývaly měřenou oblast.

5.5 Kontrolní měření teploty a vlhkosti atmosféry

Toto měření bylo provedeno malým kombinovaným zařízením, které poskytuje měřené údaje teploty, taku a vlhkosti.



Obrázek 18 - Kombinovaný senzor měřící teplotu a vlhkost (ilustrativní obrázek)

Během pěti opakovaných měření, které proběhly během hodiny, byla stanovena konstantní teplota okolí 23 °C a vlhkost vzduchu 33 %. Všechny pět hodnot teploty i vlhkosti bylo totožných. Lze tvrdit, že naměřené takto konzistentních hodnot bylo možné díky termostatické regulaci atmosféry v laboratoři, a to při použití klimatizačních jednotek a vzduchotechniky. Díky tomu byla teplota v laboratoři během celého měření konstantní, konkrétně 23 °C.

5.6 Měření zdánlivé odražené teploty

Měření zdánlivé odražené teploty T_{odr} . Bylo provedeno pomocí odrazové metody dle ČSN ISO 18434-1. Pro toto měření byl použit infračervený odražeč, který již byl ve vybavení laboratoře. Jedná se o obdélník z kartonu polepený hliníkovou fólií. Měření zdánlivé odražené teploty bylo provedeno pro celý rozsah proměřovaných úhlů tj. 0° - 60°. Při následném měření na vzorcích nebylo možné dosáhnout úhlu měření 60°, ale jenom úhlu natočení 55°. To bylo způsobeno menším rozměrem měřených vzorků proti IČ odražeči, který vyplňoval větší plochu v zorném poli termokamery. Otáčení bylo prováděno pouze v jednom směru, a to z důvodu ustavení vzorků v boxu. Při úhlu měření 0° byla měřená plocha vzorku kolmo k termokameře.

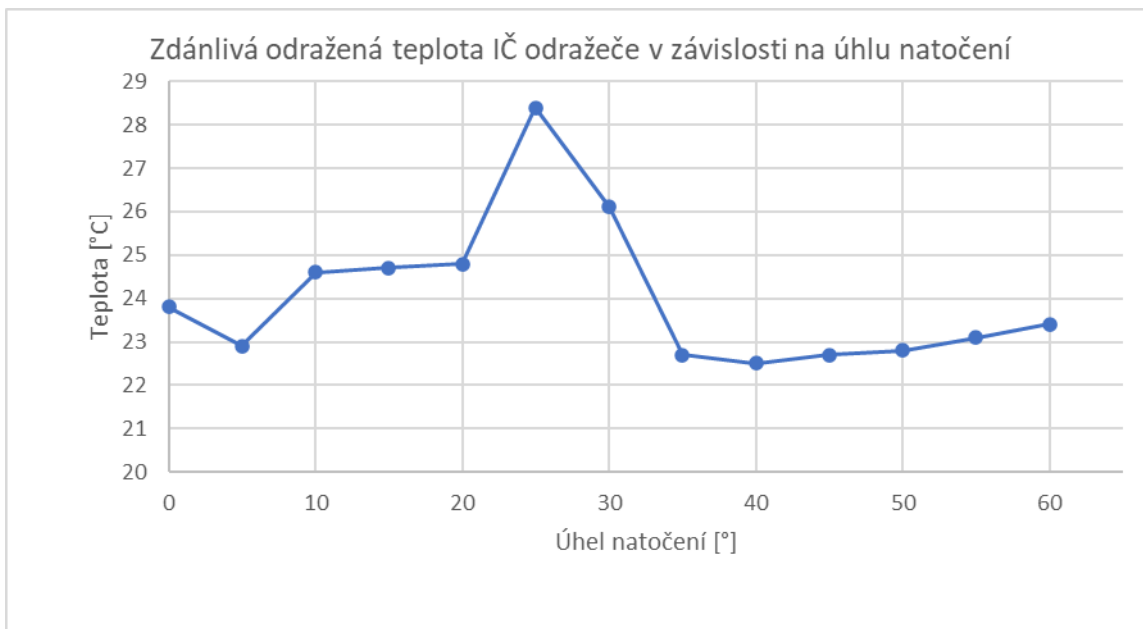
Tabulka 5 - Naměřené hodnoty zdánlivé odražené teploty pro jednotlivé úhly natočení

Úhel natočení [°]	Zdánlivá odražená teplota IČ odražeče [°C]
0	23,8
5	22,9
10	24,6
15	24,7
20	24,8
25	28,4
30	26,1
35	22,7
40	22,5
45	22,7
50	22,8
55	23,1
60	23,4

Tabulka 6 - Parametry vyhodnocení zdánlivé odražené teploty

Parametry vyhodnocení	
$\epsilon_{Obj.}$	1
Vzdálenost	0 m
Teplota okolí	23 °C
Vlhkost vzduchu	33 %

Jak můžeme vidět v příloze č.1, vzhledem k stísněným prostorám při měření dochází při měření zdánlivé odražené teploty při úhlu natočení 25° k nárůstu teploty. Tato zvýšená hodnota byla způsobena přítomností osoby, která ovládala otočný stůl. Osoba ovládající otočný stůl byla přítomna i při měření vzorků ve stejném místě, tudíž byla využita zvýšená hodnot naměřená na IČ odražeči, pro měření vzorků při natočení 25°, díky čemuž byla chyba měření kompenzována.



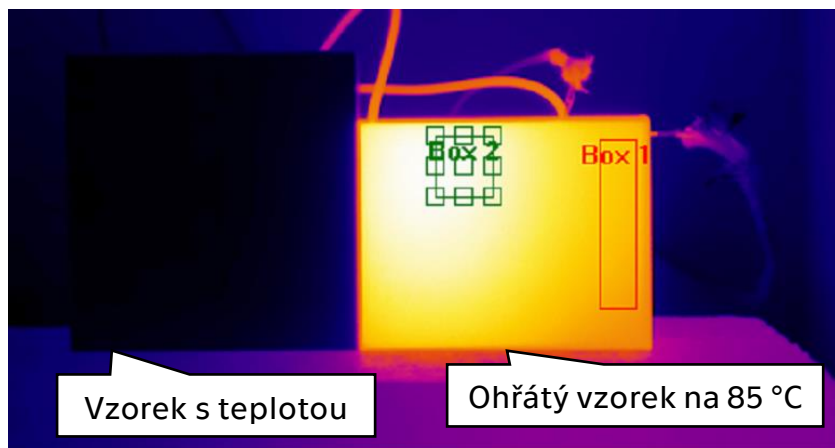
Obrázek 19 -Závislost zdánlivé odražené teploty IČ odražeče na úhlu natočení

5.7 Výsledky a jejich diskuze

Naměřená data byla zpracována a jsou uvedena v příloze 1-4. Prvotně je nutné definovat kritický úhel přestupu. Jedná se o úhel natočení vzorku vůči termokameře, kdy vyhodnocovaná oblast přehází přes rozhraní „teplého“ a „studeného“ vzorku a dochází k výraznému poklesu zdánlivé odražené teploty. Z naměřených hodnot vyplývá (viz. tabulka 7 a 8), že vyhodnocované byly dvě skupiny možných kritických úhlů přestupu. První skupinou jsou tzv. úhly malé, kdy je kritický úhel přestupu 15°, jak můžeme vidět na obrázku (24). Druhou skupinou jsou tzv. velké úhly, kdy je kritický úhel přestupu až 50°. Tuto skutečnost můžeme opět vidět na obrázku (23). Vyhodnocovat dvě skupiny kritických úhlů přestupů bylo nutné z důvodu teplotní nehomogenity celé plochy ohřátého vzorku. Proto byly na ohřátém vzorku vyhodnocovány dvě teplotní oblasti, ve kterých byla tepelná homogenita největší, jak je možné vidět na obrázku (20).

Z prvotně naměřených hodnot zdánlivé odražené teploty byl stanoven průměr pro každý úhel v každém měření. Kritický úhel přestupu byl vyhodnocen vizuálně radiometrického videa, kdy vyhodnocovaná oblast začala vlivem pootočení přesahovat z pouze teplého vzorku na rozhraní dvou různě ohřátých ploch, následkem čehož začala obsahovat skokovou změnu zdánlivé odražené teploty. Rozdělení naměřených hodnot na box1 a box2 vychází ze značení vyhodnocovaných oblastí přímo ze softwaru viz obrázek (20), zároveň jak již bylo uvedeno, oblast 1 (Box1) řeší kritický úhel přestupu pro malé úhly (0-25°) a oblast 2 (Box2) řeší kritický

úhel přestupu pro velké úhly (0-55°). Tyto dvě oblasti byly vždy vyhodnocovány na stejném termogramu. Je nutné zmínit, že během všech měření byla zachována velikost i umístění plochy obou vyhodnocovaných oblastí a se vzorky nebylo mezi měřeními manipulováno vyjma rotace celého boxu.



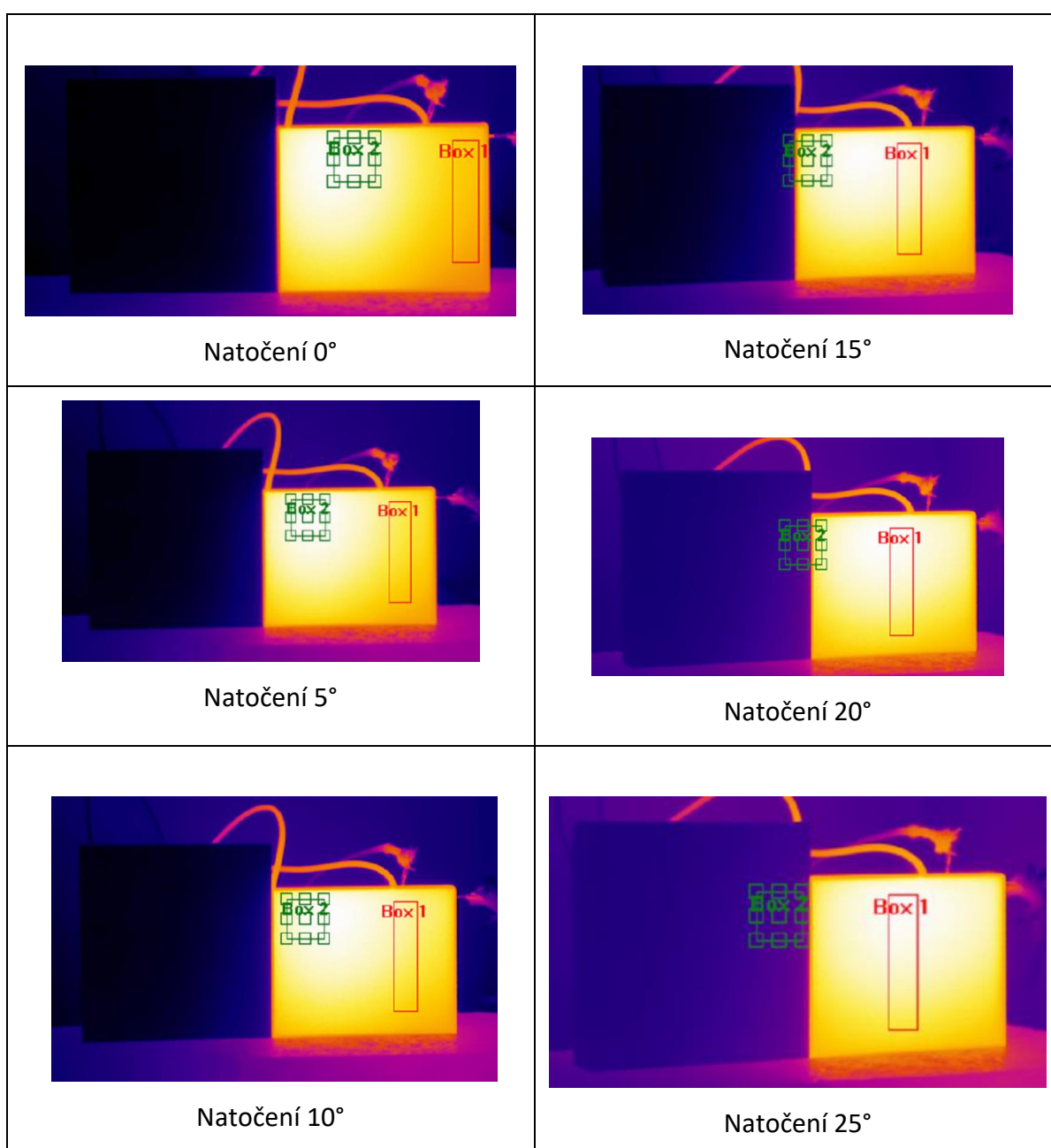
Obrázek 20 - Vyhodnocované oblasti na ploše vzorků při úhlu natočení 0°

Tabulka 7 - Zprůměrované naměřené hodnoty zdánlivé odražené teploty pro "velké" úhly

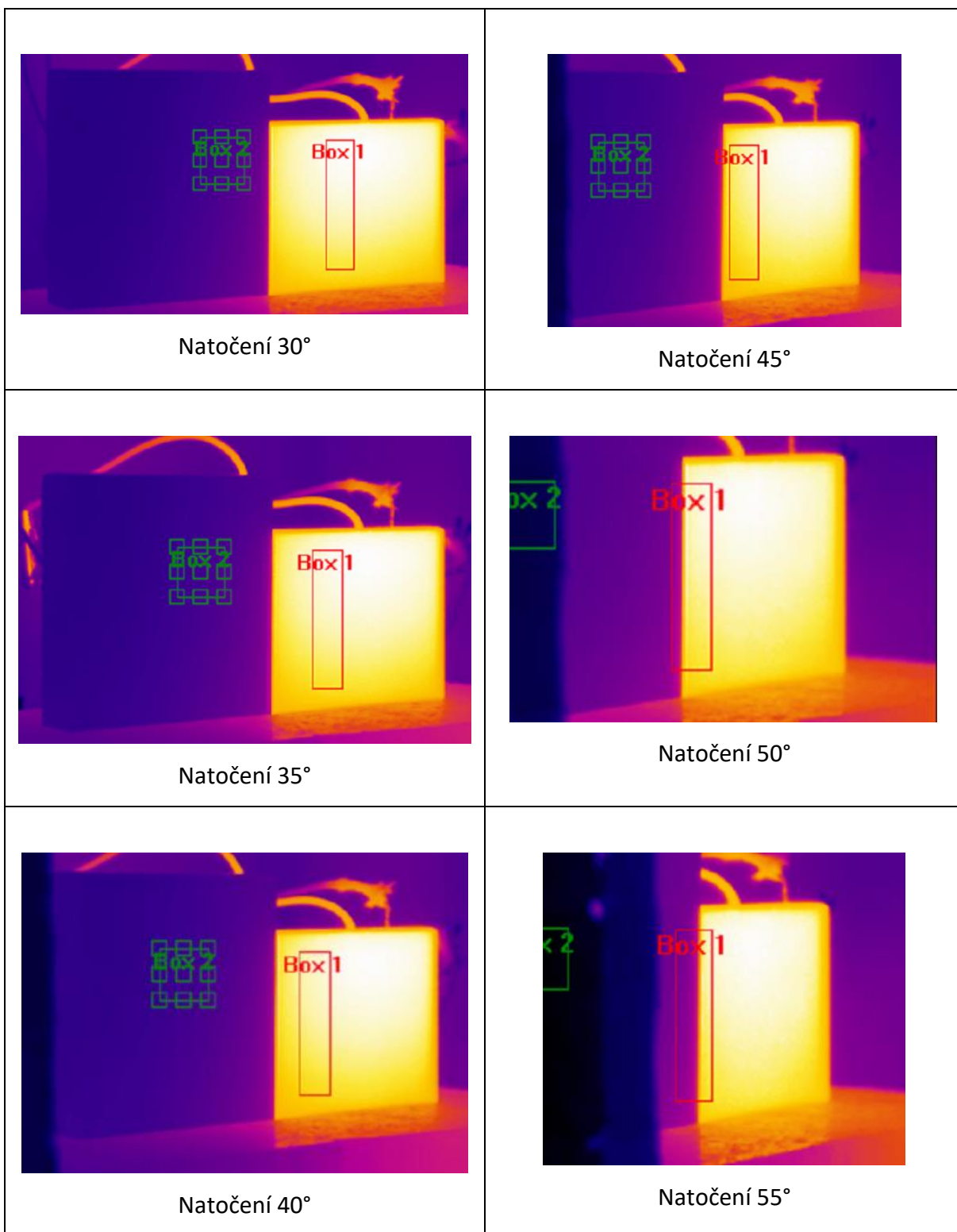
Box1 Velké úhly	Úhel natočení	Měření č.1	Měření č.2	Měření č.3	Měření č.4
	0°	84,24	84,22	83,74	83,38
	5°	84,92	84,86	84,66	84,7
	10°	85	85,14	84,76	85,24
	15°	84,94	85,14	84,9	85,32
	20°	84,46	84,94	84,54	84,98
	25°	83,72	84,5	83,94	84,46
	30°	82,82	83,84	83,1	83,58
	35°	81,8	83	81,9	82,44
	40°	80,5	82,06	80,54	80,98
	45°	78,92	80,97	78,86	79,28
Kritický úhel přestupu	50°	66,44	67,02	66,08	61,5
	55°	42,28	45,9	45,02	42,12

Tabulka 8 - Zprůměrované naměřené zdánlivé odražené teploty hodnoty pro "malé" úhly

Box2 Malé úhly	Úhel natočení	Měření č.1	Měření č.2	Měření č.3	Měření č.4
	0°	89,64	89,22	89,22	89,98
	5°	88,1	88,6	88,18	88,78
	10°	86,82	87,86	86,54	87,26
Kritický úhel přestupu	15°	75,05	78,46	78,14	74,64
	20°	42,94	46,2	48,02	43,94
	25°	27,46	28,18	30,42	31,82

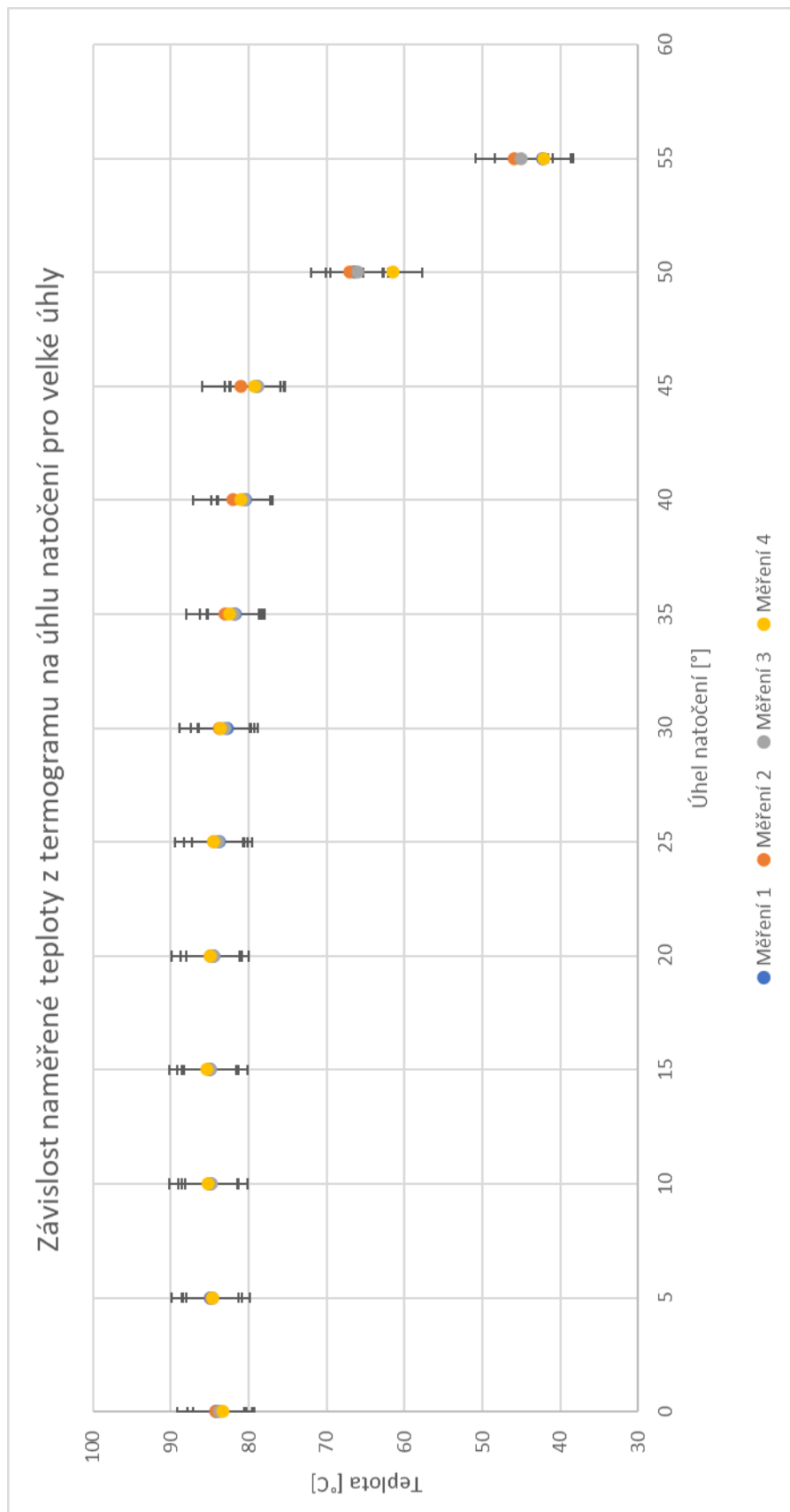


Obrázek 21 - Jednotlivé termogramy pro úhly natočení 0° -25°

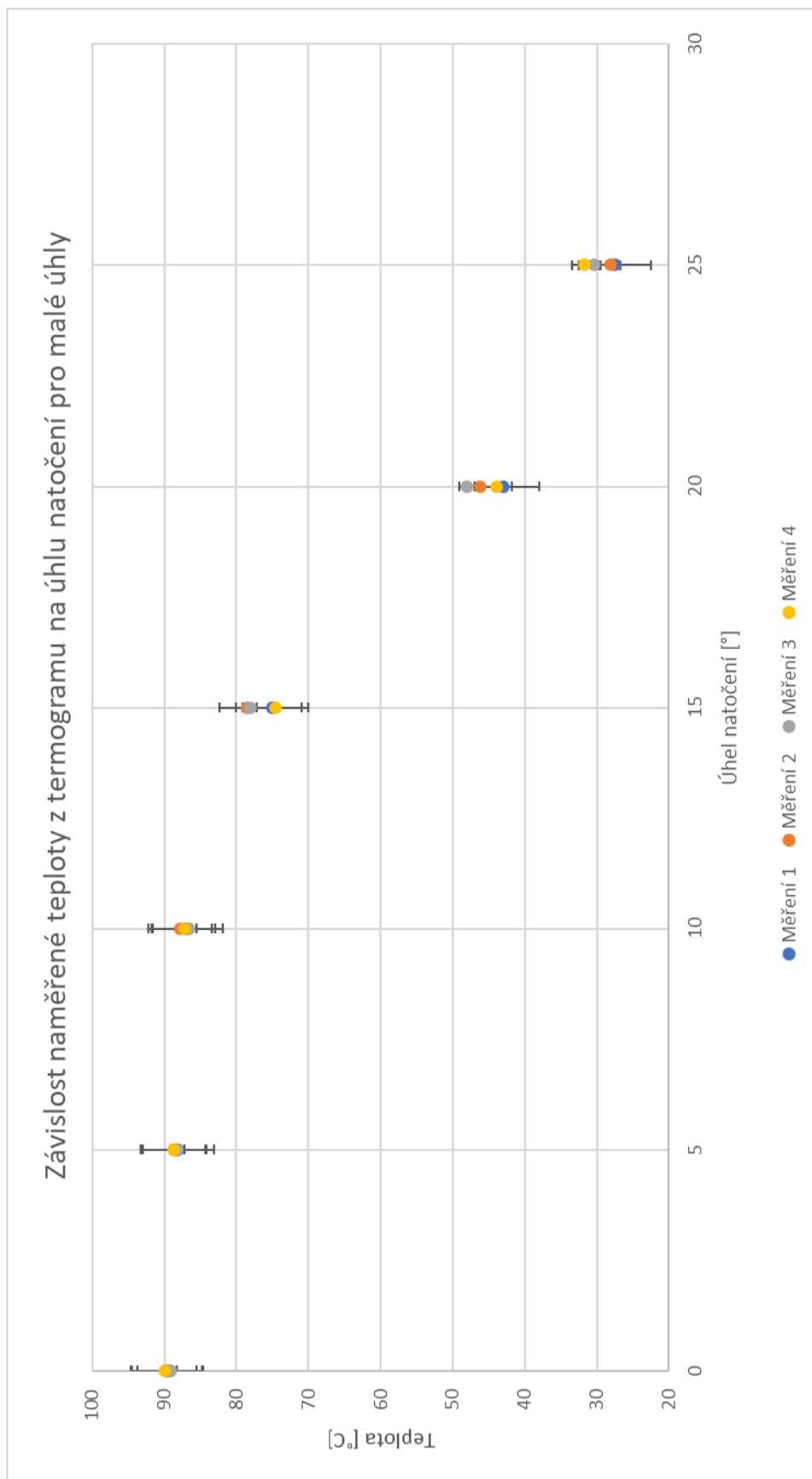


Obrázek 22 - Jednotlivé termogramy pro úhly natočení 30° -55°

Díky vynesení těchto průměrných hodnot byla získána následující závislost, a to opět jak pro velké, tak pro malé úhly.



Obrázek 23 - Závislost naměřené teploty z termogramu na úhlu natočení pro velké úhly



Obrázek 24 - Závislost naměřené teploty z termogramu na úhlu natočení pro malé úhly

Jak můžeme vidět na obrázcích (23,24) dochází při dosažení kritických úhlů přestupu k znatelnému poklesu zdánlivé odražené teploty, a to jak u malých (0° - 25°), tak u velkých (0° - 55°) úhlů natočení vzorku. Zároveň můžeme pozorovat, že po dosažení kritického úhlu přestupu, a to v případě obou skupin vyhodnocovaných úhlů, dochází k rozptylu hodnot zdánlivé odražené teploty mezi jednotlivými měřeními pro konkrétní úhel natočení vzorku. K tomuto rozptylu naměřených hodnot nedochází u úhlů natočení vzorku, které jsou menší než kritický úhel přestupu.

6. Závěr

V rámci diplomové práce, byla provedena rešerše týkající se metod měření emisivity a problematiky snímání termokamerou. Tato rešerše může sloužit pro další výzkum emisivity. V rámci praktické části diplomové práce bylo navrženo a sestaveno měřící zařízení umožňující kontinuální proces ohřevu vzorků a zároveň jejich snímání termokamerou. Toto zařízení taktéž umožňuje ověřování snímaných hodnot pomocí termočlánků.

Díky provedeným měřením bylo možné falsifikovat hypotézu uvedenou v úvodu, že při změně úhlu natočení vzorku, s teplotně homogenním povrchem a emisivitou, vůči termokameře nedochází ke změně teploty naměřené termokamerou. Ke skokové změně teploty dochází, a to při přestupu vyhodnocované oblasti přes rozhraní teplého a studeného vzorku. Hypotézu se nepodařilo falsifikovat pro úhly menší než 25° v případě skupiny malých úhlů přestupu a pro úhly menší než 50° v případě skupiny velkých úhlů přestupu. Nicméně hypotézu se podařilo falsifikovat pro úhly větší než 25° v případě skupiny malých úhlů přestupu a pro úhly větší než 50° v případě skupiny velkých úhlů přestup. Zde pravděpodobně již není platný matematický model. Tyto dvě hodnoty (25° a 50°) se liší v ohledu na umístění vyhodnocované oblasti na povrchu vzorku.

Na základě naměřených výsledků by bylo vhodné realizovat další experimenty zaměřené na snímání termokamerou pod úhlem, a to především s různými typy objektů, materiálů a různými úhly snímání. To by mělo docílit získání komplexnějšího souboru výsledků. Tato další měření by se měla primárně zaměřit na geometrickou náročnost měřených objektů, ale i na jejich materiálové charakteristiky.

Co se týče samotného měřícího zařízení, bylo by vhodné pro další měření zdokonalit celý měřící přípravek, aby bylo dosaženo větší úhlové přesnosti. Zároveň je třeba dbát na adekvátní přípravu povrchu vzorků, hlavně na homogenní drsnost povrchu, a homogenní teplotu na celé ploše vzorku.

Dalším faktorem, který by mohl v budoucnosti zpřesnit měření je odizolování vzorků od dna izolačního boxu. Zde docházelo během měření k drobnému přestupu tepla do podstavce, na kterém byly vzorky umístěny. Přestup tepla nebyl nijak velký, ale po dobu všech měření byl podstavec schopen naakumulovat už nezanedbatelné množství tepla.

Použité zdroje

- [1] Bodnar, J.L., Nicolas, J.L., Mouhoubi, K. et al. Characterization of an Inclusion of Plastazote Located in an Academic Fresco by Photothermal Thermography. *Int J Thermophys* 34, 1633–1637 (2013). <https://doi.org/10.1007/s10765-012-1335-5>
- [2] LI, Ming-Hsien; WANG, Tsu-Chih. The Measurement of Emittance Spectra by Fourier Transform Infrared Spectroscopy. *Journal of Heat Transfer*, 1991, roč. 113, č. 3, s. 648-655.
- [3] Viswanatha, R., Ayyub, P., Ramanathan, S. Optical characterization of thin films by transmission measurement. *Journal of Applied Physics*. 1998, vol. 83, no. 3, pp. 1488-1495. ISSN: 0021-8979.
- [4] Sheikh, G.A. Non-destructive testing techniques for measuring emissivity of materials: A review. *Measurement*. 2018, vol. 124, pp. 464-477. ISSN: 0263-2241.
- [5] KAYA, Imdat; YILDIZ, Alper. Determination of emissivity values of different materials by using radiation thermometry. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2015, roč. 29, č. 1, s. 191-197.
- [6] PFAHLER, S.; SCHREIBER, E. Measurement of the emissivity of thin films using emissivity-corrected infrared thermography. *Surface and Coatings Technology*, 2008, roč. 202, č. 8, s. 1376-1381.
- [7] J. M. Singer, G. W. Kattawar, and J. E. Harder, "Measurement of the Complex Refractive Index and Complex Emissivity of Materials in the Infrared," *Applied Optics*, vol. 34, no. 34, pp. 8144-8152, 1995. (DOI: 10.1364/AO.34.008144)
- [8] R. E. Bedford, "Measurement of the optical constants and thickness of thin films by single-wavelength reflectometry," *Applied Optics*, vol. 11, no. 3, pp. 545-548, 1972. (DOI: 10.1364/AO.11.000545)
- [9] J. L. Johnson, T. A. Germer, and R. E. Vest, "Determination of the complex index of refraction and thickness of thin films from transmission measurements," *Applied Optics*, vol. 33, no. 22, pp. 5113-5119, 1994. (DOI: 10.1364/AO.33.005113)

- [10] Z. Zhang, S. A. Boppana, and S. S. Angadi, "Infrared Thermography: Recent Advances and Future Trends," Springer, 2017.
- [11] Samuel, D. R., & Elliott, R. S. (2000). Electromagnetic fields and waves. Prentice Hall.
- [12] POZAR, David M. Microwave engineering. John Wiley & Sons, 2011. ISBN 978-0-470-63155-3.
- [13] GUPTA, Kuldip C. Microwaves. New Age International, 2013. ISBN 978-81-224-3518-3.
- [14] MISHRA, Subhash K. Infrared Radiation: A Handbook for Applications. Boca Raton: CRC Press, 2019. ISBN 978-1-138-58262-4.
- [15] HECHT, Eugene. Optics. 5th ed. Pearson Education, 2017. ISBN 978-0133977226.
- [16] STROEBELE, Stefan, ed. Handbook of Lighting Design. 2nd ed. De Gruyter, 2019. ISBN 978-3-11-031189-5.
- [17] DIFFEY, B. L. Sources and measurement of ultraviolet radiation. Progress in Biophysics and Molecular Biology, 1992, 58.2: 93-107.
- [18] Bushberg, J. T., Seibert, J. A., Leidholdt, E. M., & Boone, J. M. (2011). The essential physics of medical imaging. Lippincott Williams & Wilkins.
- [19] KNOLL, G. F. Radiation detection and measurement. 4th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2010. ISBN 9780470131480.
- [20] Termokamery FLIR. Termovizní kamery FLIR E75, E85, E95 [online]. [citováno 23. května 2023]. Dostupné z: <https://www.termokamery-flir.cz/termovizni-kamery-flir-e75-e85-e95/>
- [21] Zařízení pro navařování termočlánků BT 2. Svarservis [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.svarservis.cz/produkty/prislusenstvi/>
- [22] UNIVERZÁLNÍ MĚŘICÍ ÚSTŘEDNA – DATALOGGER – AHLBORN ALMEMO 5690-2M - VÍCEKANÁLOVÁ. Ahlborn.cz [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.ahlborn.cz/univerzalni-merici-ustredna-datalogger-ahlborn-almemo-5690-2m-vicekanalova.html>
- [23] VOLLMER, Michael a Klaus-Peter MÖLLMANN. *Infrared thermal imaging: fundamentals, research and applications*. Weinheim: Wiley-VCH, 2010. ISBN 978-3-527-40717-0

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Velikost ložisek	31
Tabulka 2 - Technické parametry Peltierova článku TEC1-12730.....	33
Tabulka 3 - Parametry termokamery FLIR E95 [20]	36
Tabulka 4 - Parametry zařízení BT-2	38
Tabulka 5 - Naměřené hodnoty zdánlivé odražené teploty pro jednotlivé úhly natočení.....	43
Tabulka 6 - Parametry vyhodnocení zdánlivé odražené teploty.....	43
Tabulka 7 - Zprůměrované naměřené hodnoty zdánlivé odražené teploty pro "velké" úhly.....	45
Tabulka 8 - Zprůměrované naměřené zdánlivé odražené teploty hodnoty pro "malé" úhly.....	46

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Elektromagnetické spektrum	12
Obrázek 2 - Bezkontaktní měření teploty pyrometrem a termokamerou	24
Obrázek 3 - Příklad termogramu znázorňující rozložení povrchové teploty na plášti elektromotoru	25
Obrázek 4 - Vzájemné působení tepelného záření s reálným tělesem	26
Obrázek 5 - Ložiska použitá pro otočný stůl	30
Obrázek 6 – Schématické znázornění otočného stolu	31
Obrázek 7 - Mechanismus otáčení	31
Obrázek 8 - Izolační box	32
Obrázek 9 - Peltierův článek	33
Obrázek 10 - Zapojení článku k PSU	34
Obrázek 11 - Termostat REX-C100	35
Obrázek 12 - Stojánek PID	35
Obrázek 13 - Termokamera FLIR E95 při měření	37
Obrázek 14 - Navařovací zařízení BT-2	38
Obrázek 15 - Datalogger AHLBORN ALMENO 5690-2	39
Obrázek 16 - Schéma elektrického zapojení	40
Obrázek 17 – Tryskací zařízení	41
Obrázek 18 - Kombinovaný senzor měřící teplotu a vlhkost (ilustrativní obrázek)	42
Obrázek 19 - Závislost zdánlivé odražené teploty IČ odražeče na úhlu natočení	44
Obrázek 20 - Vyhodnocované oblasti na ploše vzorků při úhlu natočení 0°	45
Obrázek 21 - Jednotlivé termogramy pro úhly natočení 0° -25°	46
Obrázek 22 - Jednotlivé termogramy pro úhly natočení 30° -55°	47
Obrázek 23 - Závislost naměřené teploty z termogramu na úhlu natočení pro velké úhly	48
Obrázek 24 - Závislost naměřené teploty z termogramu na úhlu natočení pro malé úhly	49

Přílohy

Příloha č.1 – Referenční hodnoty teplot měření č.1

Natočení	Čas měření			Box1 [°C]	Box2 [°C]	Průměr box1	Průměr box2
0°	9:46:51	25,6	89,6	84,2	90,2		
	9:46:53	25,7	89,5	84,2	89,9		
	9:46:55	25,8	89,5	84,2	89,6	84,24	89,64
	9:46:57	25,9	89,4	84,3	89,4		
	9:47:00	26	89,4	84,3	89,1		
5°	9:47:08	26,3	89,1	85,1	88,5		
	9:47:10	26,4	89	84,9	88,3		
	9:47:12	26,5	89	84,9	88,1	84,92	88,1
	9:47:14	26,5	88,9	84,9	87,9		
	9:47:16	26,6	88,7	84,8	87,7		
10°	9:47:18	26,7	88,6	85,2	87,2		
	9:47:20	26,7	88,6	85,1	87		
	9:47:22	26,8	88,5	85	86,8	85	86,82
	9:47:24	26,9	88,3	84,9	86,6		
	9:47:25	27	88,3	84,8	86,5		
15°	9:47:28	27	88,2	85,1	73,7		
	9:47:30	27	88,1	85	74,5		
	9:47:31	27	88,1	84,9	75,4	84,94	75,06
	9:47:32	27,1	88	84,9	76		
	9:47:34	27,2	87,9	84,8	75,7		
20°	9:47:38	27,2	87,7	84,8	43,3		
	9:47:40	27,3	87,6	84,6	42,9		
	9:47:42	27,3	87,5	84,5	43	84,46	42,94
	9:47:44	27,4	87,4	84,3	43,1		
	9:47:46	27,4	87,3	84,1	42,4		
25°	9:47:49	27,5	87,2	83,9	27,4		
	9:47:51	27,5	87	83,8	27,5		
	9:47:52	27,6	87	83,7	27,4	83,72	27,46
	9:47:53	27,6	86,9	83,7	27,5		
	9:47:55	27,6	86,8	83,5	27,5		
30°	9:47:59	27,7	86,5	83			
	9:48:01	27,7	86,4	82,9			
	9:48:02	27,8	86,3	82,9		82,82	
	9:48:03	27,8	86,3	82,7			
	9:48:05	27,8	86,2	82,6			
35°	9:48:08	27,8	86	82			

	9:48:10	27,8	85,9	81,9		
	9:48:11	27,8	85,8	81,8	81,8	
	9:48:12	27,9	85,8	81,7		
	9:48:14	27,9	85,6	81,6		
40°	9:48:17	28	85,5	80,7		
	9:48:18	28	85,4	80,6		
	9:48:20	28	85,4	80,6	80,5	
	9:48:22	28	85,2	80,4		
	9:48:25	28	85	80,2		
45°	9:48:27	28,1	84,9	79,2		
	9:48:29	28,1	84,8	79,2		
	9:48:31	28,1	84,6	79	78,98	
	9:48:33	28,1	84,6	78,8		
	9:48:35	28,2	84,5	78,7		
50°	9:48:38	28,2	84,2	66,6		
	9:48:40	28,2	84,1	67,2		
	9:48:42	28,3	83,9	66,6	66,44	
	9:48:44	28,3	83,8	66,3		
	9:48:46	28,3	83,8	65,5		
55°	9:48:49	28,3	83,5	42		
	9:48:51	28,4	83,4	42,1		
	9:48:53	28,4	83,3	42,4	42,28	
	9:48:55	28,4	83,2	42,4		
	9:48:57	28,5	83	42,5		

	Teplota měřená termočlánkem na studeném vzorku [°C]
	Teplota měřená termočlánkem na teplém vzorku [°C]
	Kritický úhel přestupu pro „malé“ úhly
	Kritický úhel přestupu pro „velké“ úhly
Box1	Vyhodnocovaná oblast 1 pro „velké“ úhly
Box2	Vyhodnocovaná oblast 2 pro „malé“ úhly

Příloha č.2 - Referenční hodnoty teplot měření č.2

Natočení	Čas měření			Box1 [°C]	Box2 [°C]	Průměr box1	Průměr box2
0°	10:04:27	27,8	89,6	84,1	89,6		
	10:04:29	27,8	89,7	84,2	89,4		
	10:04:31	27,8	89,5	84,2	89,2	84,22	89,22
	10:04:33	27,9	89,4	84,3	89		
	10:04:35	27,9	89,4	84,3	88,9		
5°	10:04:37	28	89,3	84,9	89		
	10:04:39	28	89,1	84,9	88,8		
	10:04:41	28	89	84,9	88,6	84,86	88,6
	10:04:43	28	88,8	84,8	88,4		
	10:04:45	28,1	88,8	84,8	88,2		
10°	10:04:47	28,1	88,7	85,3	88,1		
	10:04:49	28,1	88,7	85,2	88		
	10:04:51	28,1	88,6	85,1	87,9	85,14	87,86
	10:04:53	28,2	88,6	85,1	87,7		
	10:04:55	28,2	88,5	85	87,6		
15°	10:04:59	28,3	88,4	85,3	78,4		
	10:05:01	28,3	88,3	85,2	78,4		
	10:05:03	28,3	88,2	85,1	78,3	85,14	78,46
	10:05:04	28,3	88,1	85,1	78,5		
	10:05:05	28,4	88,1	85	78,7		
20°	10:05:08	28,3	88,1	85,2	46,6		
	10:05:10	28,4	88	85	46,5		
	10:05:12	28,4	87,8	84,9	46,5	84,94	46,2
	10:05:14	28,3	87,7	84,9	45,9		
	10:05:15	28,4	87,7	84,7	45,5		
25°	10:05:18	28,4	87,5	84,7	28,2		
	10:05:20	28,4	87,5	84,6	28,1		
	10:05:22	28,4	87,3	84,5	28,2	84,5	28,18
	10:05:24	28,5	87,3	84,4	28,2		
	10:05:26	28,5	87,1	84,3	28,2		
30°	10:05:28	28,5	87,1	84,1			
	10:05:30	28,5	87	84			
	10:05:32	28,5	86,9	83,8		83,84	
	10:05:34	28,5	86,8	83,7			
	10:05:36	28,5	86,7	83,6			

35°	10:05:38	28,5	86,6	83,3			
	10:05:40	28,6	86,5	83,1			
	10:05:42	28,6	86,4	83		83	
	10:05:44	28,6	86,3	82,8			
	10:05:45	28,6	86,2	82,8			
40°	10:05:48	28,6	86	82,3			
	10:05:50	28,6	85,9	82,2			
	10:05:52	28,6	85,9	82,1		82,06	
	10:05:54	28,6	85,8	81,9			
	10:05:56	28,6	85,7	81,8			
45°	10:05:58	28,7	85,5	81			
	10:06:00	28,7	85,4	80,9			
	10:06:02	28,7	85,3	80,8		80,8	
	10:06:03	28,7	85,2	80,7			
	10:06:04	28,7	85,2	80,6			
50°	10:06:08	28,7	85	67,5			
	10:06:10	28,7	84,9	67			
	10:06:12	28,7	84,8	67			
	10:06:14	28,8	84,6	67			
	10:06:15	28,7	84,6	66,6			
55°	10:06:18	28,8	84,5	46,2			
	10:06:20	28,8	84,3	46,1			
	10:06:22	28,8	84,2	45,8			
	10:06:24	28,8	84	45,7			
	10:06:26	28,9	81,4	45,7			

	Teplota měřená termočlánkem na studeném vzorku [°C]
	Teplota měřená termočlánkem na teplém vzorku [°C]
	Kritický úhel přestupu pro „malé“ úhly
	Kritický úhel přestupu pro „velké“ úhly
Box1	Vyhodnocovaná oblast 1 pro „velké“ úhly
Box2	Vyhodnocovaná oblast 2 pro „malé“ úhly

Příloha č.3 - Referenční hodnoty teplot měření č.3

Natočení	Čas měření			Box1	Box2	Průměr box1	Průměr box2
0°	10:11:26	28,8	89,3	83,6	89,5		
	10:11:27	28,9	89,4	83,7	89,4		
	10:11:29	28,9	89,4	83,8	89,3	83,74	89,22
	10:11:31	29,1	89,2	83,8	89,1		
	10:11:33	29,2	89,1	83,8	88,8		
5°	10:11:37	29,3	89	84,6	88,6		
	10:11:39	29,4	89	84,7	88,4		
	10:11:41	29,5	88,9	84,7	88,1	84,66	88,18
	10:11:43	29,6	88,9	84,7	88		
	10:11:45	29,7	88,8	84,6	87,8		
10°	10:11:48	29,7	88,7	85,1	87		
	10:11:50	29,8	88,7	85	86,8		
	10:11:52	29,8	88,6	84	86,5	84,76	86,54
	10:11:54	29,9	88,6	84,9	86,3		
	10:11:55	30	88,5	84,8	86,1		
15°	10:11:58	30,1	88,4	85,1	78,6		
	10:12:00	30,1	88,3	84,9	78,6		
	10:12:02	30,2	88,2	84,9	78,9	84,9	78,14
	10:12:04	30,3	88,1	84,8	77,5		
	10:12:05	30,3	88,1	84,8	77,1		
20°	10:12:08	30,4	87,9	84,8	48		
	10:12:10	30,4	87,8	84,6	48,4		
	10:12:12	30,4	87,7	84,6	48,5	84,54	48,02
	10:12:14	30,5	87,6	84,4	47,7		
	10:12:15	30,5	87,5	84,3	47,5		
25°	10:12:18	30,6	87,4	84,2	30,3		
	10:12:20	30,6	87,3	84,1	30,4		
	10:12:22	30,7	87,3	83,9	30,4	83,94	30,42
	10:12:24	30,7	87,1	83,8	30,5		
	10:12:25	30,7	87,1	83,7	30,5		
30°	10:12:27	30,8	87	83,3			
	10:12:29	30,8	86,9	83,3			
	10:12:31	30,8	86,7	83,1		83,1	
	10:12:33	30,9	86,6	83			
	10:12:35	30,9	86,5	82,8			
35°	10:12:38	31	86,3	82,2			
	10:12:40	31	86,2	82			
	10:12:42	31	86,1	81,9		81,9	

	10:12:44	31	86	81,8		
	10:12:46	31,1	85,9	81,6		
40°	10:12:48	31,1	85,8	80,8		
	10:12:50	31,1	85,7	80,7		
	10:12:52	31,2	85,6	80,5	80,54	
	10:12:54	31,2	85,5	80,4		
	10:12:55	31,2	85,4	80,3		
45°	10:12:58	31,3	85,3	79,1		
	10:13:00	31,3	85,1	79		
	10:13:02	31,4	84,9	78,8	78,86	
	10:13:04	31,4	84,8	78,7		
	10:13:05	31,4	84,8	78,7		
50°	10:13:08	31,4	84,6	65,7		
	10:13:10	31,5	84,5	66		
	10:13:12	31,5	84,3	66,2	66,08	
	10:13:14	31,4	84,2	66,3		
	10:13:15	31,5	84,2	66,2		
55°	10:13:18	31,5	84,1	44,9		
	10:13:20	31,6	83,9	44,6		
	10:13:22	31,7	83,8	44,9	45,02	
	10:13:24	31,6	83,7	45,3		
	10:13:26	31,5	83,7	45,4		

	Teplota měřená termočlánkem na studeném vzorku [°C]
	Teplota měřená termočlánkem na teplém vzorku [°C]
	Kritický úhel přestupu pro „malé“ úhly
	Kritický úhel přestupu pro „velké“ úhly
Box1	Vyhodnocovaná oblast 1 pro „velké“ úhly
Box2	Vyhodnocovaná oblast 2 pro „malé“ úhly

Příloha č.4 - Referenční hodnoty teplot měření č.4

Natočení	Čas měření			Box1 [°C]	Box2 [°C]	Průměr box1	Průměr box2
0°	10:14:55	30,8	89,3	83	90,2		
	10:14:57	30,9	89,3	83,3	90,2		
	10:14:59	31	89,3	83,4	90	83,38	89,98
	10:15:01	31	89,3	83,5	89,8		
	10:15:03	31,2	89,2	83,7	89,7		
5°	10:15:07	31,3	89,1	84,7	89,2		
	10:15:09	31,4	89	84,7	89		
	10:15:11	31,5	89	84,7	88,8	84,7	88,78
	10:15:13	31,5	89	84,7	88,6		
	10:15:15	31,6	88,9	84,7	88,3		
10°	10:15:17	31,6	88,9	85,4	87,7		
	10:15:19	31,7	88,8	85,3	87,5		
	10:15:21	31,8	88,8	85,3	87,3	85,24	87,26
	10:15:23	31,8	88,7	85,1	87		
	10:15:25	31,9	88,7	85,1	86,8		
15°	10:15:27	32	88,6	85,5	75,7		
	10:15:29	32	88,5	85,4	75,5		
	10:15:31	32	88,4	85,3	75,3	85,32	74,64
	10:15:33	32,1	88,3	85,3	74		
	10:15:35	32,2	88,2	85,1	72,7		
20°	10:15:38	32,2	88,1	85,2	45,2		
	10:15:40	32,2	88	85,1	44,9		
	10:15:42	32,2	87,9	84,9	43,7	84,98	43,94
	10:15:44	32,3	87,8	84,9	43,1		
	10:15:45	32,3	87,8	84,8	42,8		
25°	10:15:47	32,3	87,6	84,8	31,8		
	10:15:49	32,4	87,5	84,6	31,8		
	10:15:51	32,5	87,5	84,4	31,8	84,46	31,82
	10:15:53	32,5	87,4	84,3	31,8		
	10:15:55	32,6	87,2	84,2	31,9		
30°	10:15:57	32,6	87,2	83,9			
	10:15:59	32,6	87,1	83,7			
	10:16:01	32,7	87	83,6		83,58	
	10:16:03	32,7	86,8	83,4			
	10:16:05	32,7	86,8	83,3			
35°	10:16:07	32,7	86,7	82,7			
	10:16:09	32,8	86,6	82,6			
	10:16:11	32,8	86,5	82,4		82,44	

	10:16:13	32,7	86,4	82,3		
	10:16:15	32,8	86,2	82,2		
40°	10:16:18	32,8	86,1	81,2		
	10:16:20	32,8	86,1	81,2		
	10:16:22	32,9	85,9	81	80,98	
	10:16:24	32,9	85,8	80,8		
	10:16:25	32,9	85,7	80,7		
45°	10:16:27	32,9	85,6	79,6		
	10:16:29	33	85,5	79,4		
	10:16:31	33	85,4	79,3	79,28	
	10:16:33	33	85,2	79,2		
	10:16:35	33	85,1	78,9		
50°	10:16:37	33	85	61,4		
	10:16:39	33,1	84,9	61,6		
	10:16:41	33	84,8	61,7	61,5	
	10:16:43	33,1	84,6	61,8		
	10:16:45	33,1	84,5	61		
55°	10:16:48	33,2	84,3	41,8		
	10:16:50	33,2	84,3	42,1		
	10:16:52	33,2	84,1	42,1	42,12	
	10:16:54	33,2	84	42,3		
	10:16:55	33,2	84,1	42,3		

	Teplota měřená termočlánkem na studeném vzorku [°C]
	Teplota měřená termočlánkem na teplém vzorku [°C]
	Kritický úhel přestupu pro „malé“ úhly
	Kritický úhel přestupu pro „velké“ úhly
Box1	Vyhodnocovaná oblast 1 pro „velké“ úhly
Box2	Vyhodnocovaná oblast 2 pro „malé“ úhly