

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
Ústav strojírenské technologie



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**STANOVENÍ ZÁVISLOSTI EMISIVITY NA ÚHLU MĚŘENÍ PRO RŮZNÉ
TEPLOTY POVRCHU MATERIÁLŮ**

Determination dependence of emissivity at the measurement angle for
different surface temperature of materials

AUTOR: **Tomáš Němec**
STUDIJNÍ PROGRAM: Výroba a ekonomika ve strojírenství
STUDIJNÍ OBOR: Technologie, materiály a ekonomika
strojírenství
VEDOUCÍ PRÁCE: doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE

PRAHA 2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Němec** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **476504**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Stanovení závislosti emisivity na úhlu měření pro různé teploty povrchu materiálů

Název bakalářské práce anglicky:

Determination dependence of emissivity at the measurement angle for different surface temperature of materials

Pokyny pro vypracování:

- 1) Popsat problematiku bezdotykového měření teploty pomocí termokamer a pyrometrů, včetně rovnice termografie, parametrů termokamer.
- 2) Rozbor problematiky stanovení emisivity podle ČSN ISO 18434-1.
- 3) Stanovit pro vybrané materiály emisivitu jako funkci úhlu, tj. odklonu měřicího přístroje od normály ke snímanému povrchu, pro různé povrchové teploty materiálu
- 4) Vyhodnocení a diskuze dosažených výsledků. Závěr

Seznam doporučené literatury:

- [1] ČSN ISO 18434-1. Monitorování stavu a diagnostika strojů - Termografie - Část 1: Všeobecné postupy, UNMZ, 2009
- [2] Kadlec K., a kolektiv: Měření a řízení chemických, potravinářských a biotechnologických procesů, díl II., str. 564 až 569, KEY Publishing s.r.o., ISBN 978-80-7418-285-3
- [3] Sova J., Kadlec K.: Termokamery a pyrometry – princip měření, vlastnosti a využití, All For Power č. 01/2014
- [4] Vollmer M., Möllmann K. P.: Infrared Thermal Imaging. Wiley-VCH 2010, ISBN 978-3-527-40717-0

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS


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

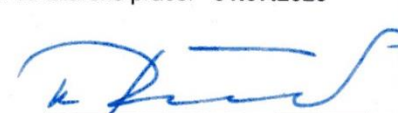
Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2020**

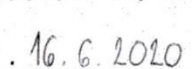

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce



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


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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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


16.6.2020
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci “Stanovení závislosti emisivity na úhlu měření pro různé teploty povrchu materiálů“ vypracoval samostatně pod vedením pana doc. Ing. Ladislava Kolaříka, Ph.D., IWE. Bakalářskou práci jsem vypracoval s použitím pramenů a zdrojů uvedených v seznamu použité literatury.

V Praze dne:

.....

Podpis

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu této bakalářské práce panu doc. Ing. Ladislavu Kolaříkovi, Ph.D., IWE za poskytnutí odborných rad a připomínek během psaní teoretické části, dále za pomoc při vypracování experimentu a v neposlední řadě za trpělivost projevenou během naší spolupráce.

Dále bych chtěl poděkovat společnosti Workswell, s.r.o. za zapůjčení termokamery pro realizaci navrženého experimentu.

Anotační list

- Jméno autora:** Tomáš Němec
- Název BP:** Stanovení závislosti emisivity na úhlu měření pro různé teploty povrchu materiálů
- Anglický název BP:** Determination dependence of emissivity at the measurement angle for different surface temperature of materials
- Akademický rok:** 2019/2020
- Ústav/Odbor:** Ústav strojírenské technologie
- Vedoucí BP:** doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
- Bibliografické údaje:** Počet stran: 89
Počet obrázků: 42
Počet tabulek: 12
Počet příloh: 7
- Klíčová slova:** Infračervená termografie, emisivita, termokamera
- Keywords:** Infrared thermography, emissivity, thermal imaging camera

Anotace: Bakalářská práce se zabývá relacemi mezi emisivitou a úhlem natočení termokamery vzhledem k normále povrchu měřeného objektu. V teoretické části je stručně popsána problematika bezdotykového měření teploty, včetně základních principů infračervené termografie a parametrů termokamer. Dále se práce zabývá metodami stanovení emisivity dle ČSN ISO 18434-1. Praktická část je zaměřena na stanovení emisivity jako funkce úhlu pro různé povrchové teploty materiálů.

Abstract: The bachelor thesis deals with relations between emissivity and the angle of deflection of a thermal imaging camera with respect to the surface normal of the measured object. The theoretical part briefly describes the issue of non-contact temperature measurement, including the basic principles of infrared thermography and parameters of thermal imaging cameras. The thesis also deals with methods of determination of emissivity according to ČSN ISO 18434-1. The practical part is focused on determination of emissivity as a function of angle for different surface temperatures of materials.

Obsah

Seznam použitých veličin.....	9
Seznam použitých zkratek.....	10
1. Úvod	11
2. Infračervená termografie.....	12
2.1. Úvod do infračervené termografie	12
2.2. Měřicí přístroje	12
2.3. Historie.....	13
2.4. Teplota a teplotní stupnice v termografii	14
2.4.1. Termodynamická teplota	14
2.4.2. Celsiova teplota.....	14
2.4.3. Fahrenheitova teplota.....	14
2.4.4. Relace mezi jednotlivými stupnicemi	15
2.5. Elektromagnetické záření.....	15
2.5.1. Pásma infračerveného záření.....	16
2.6. Energie přenášená elektromagnetickým zářením	17
2.6.1. Zářivý tok.....	17
2.6.2. Intenzita záření.....	18
2.7. Planckův vyzařovací zákon.....	18
2.8. Wiennův zákon posunu.....	19
2.9. Stefanův-Boltzmannův zákon	20
2.10. Kirchhoffův zákon tepelného vyzařování	21
2.11. Interakce IR záření s tělesem	21
2.12. Intenzita záření a Lambertův kosinový zákon	23
2.13. Emisivita	23
2.13.1. Klasifikace objektů podle emisivity	23
2.13.2. Faktory ovlivňující hodnotu emisivity	25
2.13.3. Emisivita a odrazivost.....	26
2.14. Rovnice termografie.....	27
3. Termokamery a pyrometry.....	28
3.1. Uspořádání termokamery a pyrometru.....	28
3.2. Optická soustava.....	28
3.3. Detektory termokamer a pyrometrů.....	28
3.3.1. Tepelný detektor.....	29

3.3.2.	Fotonový (kvantový) detektor	29
3.4.	Peltierův článek.....	30
3.5.	Výpočet povrchové teploty objektu.....	31
3.6.	Kvalifikace obslužného personálu	31
3.7.	Důležité parametry termokamer	31
3.7.1.	Teplotní rozsah.....	31
3.7.2.	Spektrální rozsah.....	32
3.7.3.	Teplotní citlivost.....	33
3.7.4.	Přesnost stanovení teploty	33
3.7.5.	Rozlišení detektoru a zorné pole	33
3.7.6.	Způsoby zaostření	38
3.7.7.	Frekvence snímkování	38
3.8.	Měřicí funkce termokamer	38
3.8.1.	Funkce bod.....	39
3.8.2.	Funkce oblast	39
3.8.3.	Funkce delta	40
3.8.4.	Funkce teplotní profil	40
3.8.5.	Funkce izoterma	40
3.8.6.	Speciální měřicí funkce	41
3.9.	Kalibrace	43
3.10.	Komunikační rozhraní termokamery	44
3.11.	Stupeň krytí (IP) termokamer a pyrometrů.....	44
3.12.	Nejistota měření v infračervené termografii	44
3.13.	Výrobci termokamer a pyrometrů.....	45
3.13.1.	FLIR SYSTEMS a WORKSWELL	45
3.13.2.	MICRO – EPSILON	47
3.13.3.	OPTRIS	48
3.13.4.	INFRATEC a TMVSS	49
3.13.5.	FLUKE	49
3.14.	Software pro termokamery.....	50
3.15.	Termografie v diagnostice svařovacího procesu.....	51
4.	Rozbor problematiky stanovení odražené zdánlivé teploty a emisivity dle normy ČSN ISO 18434-1	53
4.1.	Odražená zdánlivá teplota a její měření.....	53
4.1.1.	Metoda odrazu.....	53

4.1.2. Přímá metoda	54
4.2. Emisivita a její měření	55
4.2.1. Kontaktní metoda	56
4.2.2. Metoda využívající materiálu s referenční emisivitou	56
5. Praktická část	58
5.1. Úvod.....	58
5.2. Návrh experimentu.....	59
5.2.1. Princip a uspořádání měření	59
5.2.2. Návrh postupu měření	60
5.3. Měřicí přístroje, přípravky a další přístrojové vybavení	61
5.4. Příprava vzorků.....	66
5.4.1. Drsnost měřeného povrchu	67
5.4.2. Čistění vzorku mezi ohřevy	67
5.5. Návrh velikosti měřené plochy a vzdálenosti měření	67
5.6. Vlastní měření	69
5.7. Vyhodnocení měření	70
5.8. Závěr.....	72
6. Použité literární zdroje	73
7. Seznam obrázků	77
8. Seznam tabulek	79
9. Přílohy	80

Seznam použitých veličin

C	rychlost elektromagnetického vlnění ve vakuu	$m \cdot s^{-1}$
Φ_e	zářivý tok	W
M_e	intenzita záření	$W \cdot m^{-2}$
ε_r	relativní permitivita	—
μ_r	relativní permeabilita	—
M_λ	spektrální intenzita záření	$W \cdot m^{-3}$
λ	vlnová délka	m
T	termodynamická teplota	K
T_C	Celsiova teplota	$^\circ C$
T_F	Fahrenheitova teplota	$^\circ F$
h	Planckova konstanta	$J \cdot s$
k	Boltzmannova konstanta	$J \cdot K^{-1}$
C_1	první vyzařovací konstanta	$W \cdot m^2$
C_2	druhá vyzařovací konstanta	$K \cdot m$
b	Wienova konstanta	$\mu m \cdot K$
σ	Stafan-Boltzmannova konstanta	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$
ρ	odrazivost	—
α	Pohlivost	—
τ	propustnost	—

Seznam použitých zkratk

IRT	infrared thermography	infračervená termografie
NDT	nondestructive testing	nedestruktivní testování
IR	infrared	infračervený
NIR	near-infrared	blízké infračervené záření
SWIR	short-wavelength infrared	krátkovlnné infračervené záření
MWIR	mid-wavelength infrared	středovlnné infračervené záření
LWIR	long-wavelength infrared	dlouhovlnné infračervené záření
FIR	far-infrared	vzdálené infračervené záření
SI	Le Système International d'Unités	mezinárodní systém jednotek
SW	software	programové vybavení
IČ	–	infračervený
TEC	thermoelectric cooler	termoelektrický chladič
NETD	noise equivalent temperature difference	rozdíl teploty ekvivalentní šumu
FOV	field of view	zorné pole
IFOV	instantaneous field of view	okamžité zorné pole
MSX	multi-spectral dynamic imaging	multispektrální zobrazení
IP	ingress protection code	ochranný kód/stupeň krytí
FPA	Focal Plane Array	mozaikové uspořádání detektoru

1. Úvod

Pro bezkontaktní měření teploty se v posledních několika letech rozšířilo využití termokamer a pyrometrů. Pyrometry se původně používaly pro měření vysokých teplot, které byly obvykle vyšší než 500 °C. S postupným vývojem optiky a elektroniky se však aplikace bezdotykového měření teploty posunula k podstatně nižším teplotám. V současné chvíli lze měřit teploty výrazně nižší, než je bod mrazu (0 °C). Strmý vývoj přinesl možnost nasazení pyrometrů v různých průmyslových odvětvích, jako je např. strojírenská technologie, nebo technologie výroby kovů. Pro měření teplotních polí na povrchu měřeného objektu se stále častěji využívají termokamery, které patří mezi nejmodernější termodiagnostickou techniku současnosti. Termokamery nacházejí uplatnění např. v monitorování procesu odporového svařování, při revizi elektroinstalace, nebo při kontrole a diagnostice strojů. [3]

Na bezkontaktní měření teploty má vliv mnoho faktorů. Klíčovou roli hraje emisivita a její správné stanovení, což je jeden z hlavních důvodů vzniku této bakalářské práce. Emisivita je funkcí celé řady dílčích faktorů, mezi které patří např. druh měřeného materiálu, teplota měřeného povrchu, povrchové vlastnosti materiálu (drsnot, členitost, přítomnost oxidických vrstev u kovových povrchů, různé povrchové úpravy, atd.). Pro správné změření teploty je velmi důležitá přesná hodnota emisivity.

Hlavní motivací vzniku této bakalářské práce je zmapování vlivu úhlu měření na emisivitu v závislosti na povrchové teplotě měřeného objektu.

Hlavní cíle bakalářské práce:

1. Seznámit se s problematikou bezdotykového měření teplot.
2. Využívat normalizované postupy dle normy ČSN ISO 18434-1 při stanovení emisivity.
3. Stanovit emisivitu jako funkci úhlu pro různé povrchové teploty u vybraných materiálů.

2. Infračervená termografie

2.1. Úvod do infračervené termografie

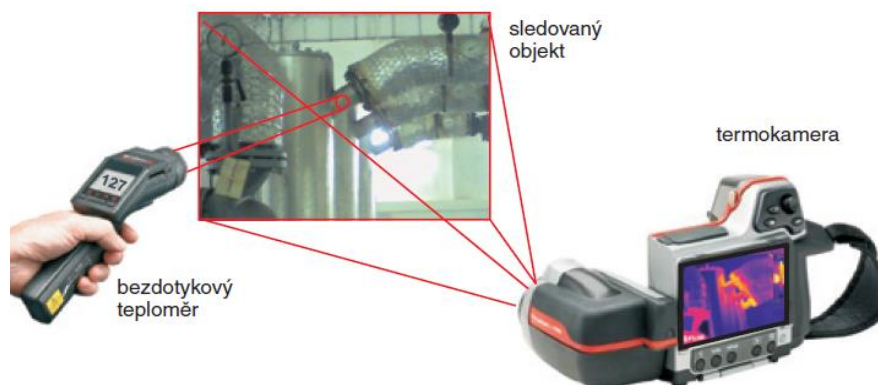
Pojem termografie obecně označuje zobrazovací metodu, která umožňuje analýzu a grafické znázornění teplot na povrchu pozorovaného objektu. Infračervená termografie je metoda **bezkontaktního měření** povrchových teplot objektů. Mezinárodně se označuje jako **IRT** (Infrared thermography). Infračervenou termografii lze v podstatě zařadit mezi **NDT** (nedestruktivní metody kontroly).

Infračervená termografie je založená na skutečnosti, že každé těleso, jehož teplota je vyšší než 0 K (nejnižší možná teplota, která je fyzikálně definovaná, tzv. teplota absolutní nuly – viz kapitola č. 2.4.1), vyzařuje do okolí elektromagnetické záření v určité části spektra. Toto záření je emitováno v důsledku tepelného pohybu částic hmoty a je označováno jako **tepelné záření**. Intenzita vyzařování závisí na teplotě a odlišuje se svou vlnovou délkou. Vzájemné relace mezi intenzitou vyzařování, teplotou, vlnovou délkou a dalšími veličinami popisují následující fyzikální zákony: **Planckův vyzařovací zákon**, **Wienův zákon posunu**, **Stefanův – Boltzmannův zákon** a **Kirchhoffovy zákony**, které budou podrobněji popsány v následujících kapitolách. [1, 2]

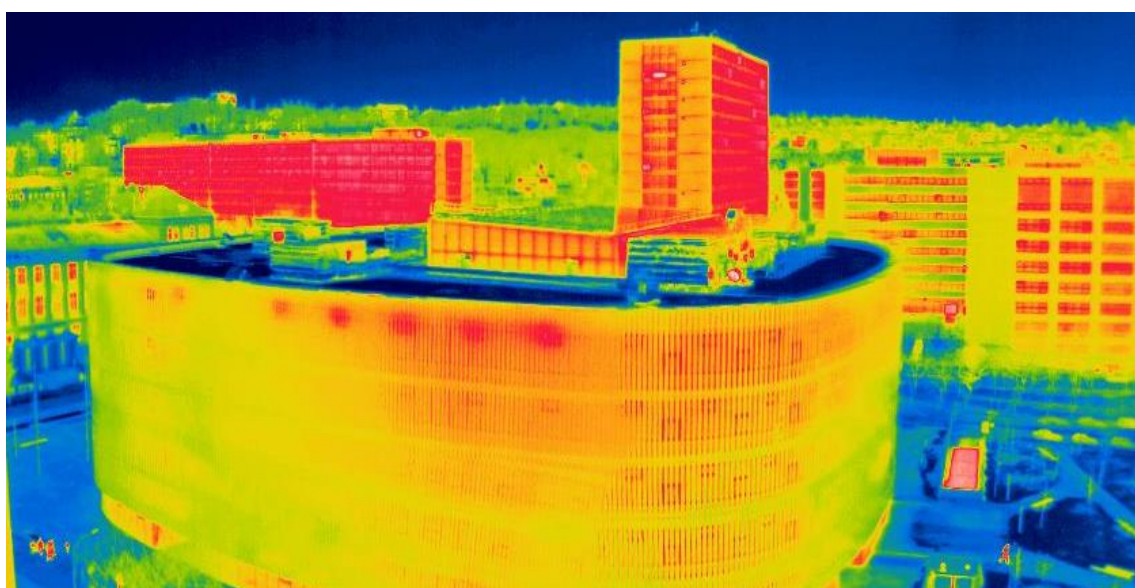
2.2. Měřicí přístroje

Pro bezdotykové měření teplot se v dnešní době využívají **termokamery** (IR kamery) a **bezdotykové teploměry** (tzv. pyrometry). Teplota je vyhodnocována na základě intenzity infračerveného záření vyzařovaného měřeným objektem.

Pyrometr měří teplotu v konkrétní úzce vymezené oblasti (bodové měření) na povrchu měřeného objektu. Výstupem je číslcový údaj na displeji měřícího přístroje (Obr. 1). Termokamera naopak snímá rozložení teploty na celém povrchu měřeného objektu (plošné měření) a výstupem je **termogram** (Obr. 2) zobrazený na displeji termokamery. Velikou výhodou termografického záznamu pořízeného termokamerou je, že s ním lze dále pracovat ve speciálních softwarech (SW) a různými způsoby hodnotit dosažené výsledky měření (viz kapitola 3.14). [3]



Obr. 1 - Bezdokové měření teploty [3]



Obr. 2 - Termogram (panoramatický snímek NTK v Dejvčích) [11]

2.3. Historie

Kořeny moderní infračervené termografie sahají na počátek 19. století. V roce 1800 objevil Sir Frederick William Herschel infračervené záření. O 100 let později přišel na scénu Max Planck, který kvantitativně popsal zákony tepelného záření. Zlom nastal po dalších více jak padesáti letech, kdy byly vyvinuty první infračervené detekční kamery. Jednalo se o velmi objemné přístroje sloužící zprvu pro vojenské účely. V 70. letech 20. století pokročil vývoj razantně dopředu. Měřicí systémy byly zmenšeny na přenosné verze a staly se dostupnějšími pro komerční a průmyslové aplikace. Tyto systémy sestávaly z fotonových detektorů záření, které byly chlazeny kapalným dusíkem. Teprve v 90. letech přišli na scénu první nechlazené termokamery s bolometrickými snímači, které položili základ pro moderní spolehlivé infračervené kamerové systémy, takové, které známe dnes. [1]

2.4. Teplota a teplotní stupnice v termografii

Teplota je skalární intenzivní stavová veličina, charakterizující termodynamický stav jakékoliv makroskopické soustavy. Intenzivní (vnitřní) veličina představuje takovou veličinu, která nezávisí na velikosti termodynamického systému. [6]

2.4.1. Termodynamická teplota

Termodynamická teplota (dříve nazývána jako **absolutní teplota**) patří mezi základní fyzikální veličiny. Je součástí mezinárodní soustavy jednotek SI. Značí se velkým písmenem **T** a její jednotkou je **kelvin (K)**. Kelvin je definován jako $\frac{1}{273,16}$ termodynamické teploty trojného bodu vody. 0 K je teplota "**absolutní nuly**" (též absolutního bodu mrazu), tedy nejnižší teplota, která je fyzikálně definována. V praxi se využívá mnohých teplotních stupnic, které našli postupem času uplatnění v různých technických odvětvích. Všechny tyto stupnice však vycházejí z termodynamické teploty (viz tab. 1). [6]

2.4.2. Celsiova teplota

Celsiovu teplotu definoval roku 1742 švédský astronom **Anders Celsius**. Jednotkou Celsiovy teploty T_C je tzv. **Celsiův stupeň (°C)**. V české republice je v současné době nejrozšířenější. Závislost mezi termodynamickou teplotou a Celsiovou teplotou definují rovnice č. 1 a 2 v kapitole 2.4.4. [5, 6]

2.4.3. Fahrenheitova teplota

Fahrenheitovu teplotu zavedl fyzik německého původu **Daniel Gabriel Fahrenheit** v roce 1714. Za jednotku Fahrenheitovy teploty T_F byl zvolen tzv. **Fahrenheitův stupeň (°F)**. V současné chvíli se s Fahrenheitovou stupnicí pracuje nejvíce ve Spojených státech amerických. Vzájemné relace mezi Celsiovou teplotou a Fahrenheitovou teplotou znázorňují rovnice č. 2, 4 a 5 v kapitole 2.4.4. [9]

2.4.4. Relace mezi jednotlivými stupnicemi

Rovnice pro přepočítání mezi termodynamickou teplotou, Fahrenheitovou teplotou a Celsiovou teplotou: [1, 6]

$$\Delta T [K] = \Delta T_C [^{\circ}C] \quad (1)$$

$$\Delta T_C [^{\circ}C] = \frac{5}{9} \cdot \Delta T_F [^{\circ}F] \quad (2)$$

$$T [K] = T_C [^{\circ}C] + 273,15 \quad (3)$$

$$T_C [^{\circ}C] = \frac{5}{9} \cdot T_F [^{\circ}F] - 32 \quad (4)$$

$$T_F [^{\circ}F] = \frac{9}{5} \cdot T_C [^{\circ}C] + 32 \quad (5)$$

Tab. 1 - výběr základních teplot pro znázornění vzájemných vztahů jednotlivých stupnic [1]

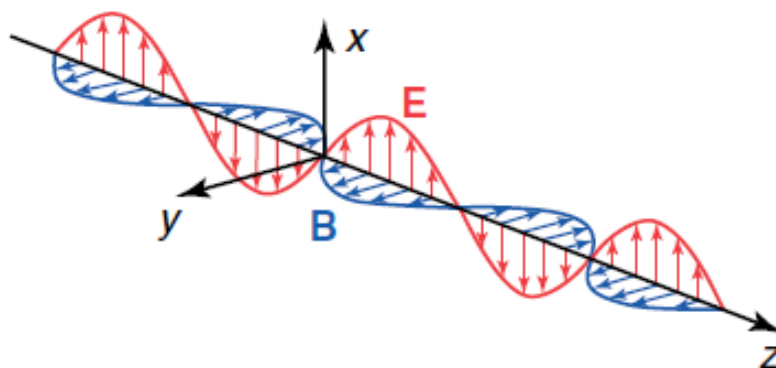
$T [K]$	$T_C [^{\circ}C]$	$T_F [^{\circ}F]$
0	-273,15	-459,67
273,15	0	32
373,15	100	212
1273,15	1000	1832

2.5. Elektromagnetické záření

Elektromagnetické záření (též elektromagnetické vlnění) je **příčné vlnění**, ve kterém dochází k oscilaci ve směru kolmém na směr šíření vlnění. Elektromagnetická vlna má dvě navzájem neoddělitelné složky. Magnetickou složku charakterizuje vektor \vec{B} a elektrickou složku vektor \vec{E} . Oba vektory \vec{E} a \vec{B} jsou na sebe kolmé (Obr. 3). Elektromagnetické vlnění je lineárně polarizované. Z toho vyplývá, že směr vektorů \vec{E} a \vec{B} se v elektromagnetické vlně nemění. Prostředí, kterým se elektromagnetické vlnění šíří má za následek ovlivnění jeho vlnové délky. Rychlost elektromagnetického vlnění ve vakuu je $c = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. V ostatních prostředích je rychlost tohoto vlnění menší podle vztahu:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r}} \quad (6)$$

kde ϵ_r je relativní permitivita prostředí a μ_r je relativní permeabilita prostředí. V uvedené podobě platí tento vztah pro relativně nízké frekvence. [9]



Obr. 3 – Složky elektromagnetického vlnění [1]

Pro bezdotykové měření teplot se využívá elektromagnetické záření v rozsahu vlnových délek 0,4 – 15 μm . Tento interval vlnových délek spadá částečně do oblasti viditelného světla a z převažující části do oblasti infračerveného záření (Obr. 4 – viz kapitola č. 2.5.1). [2]

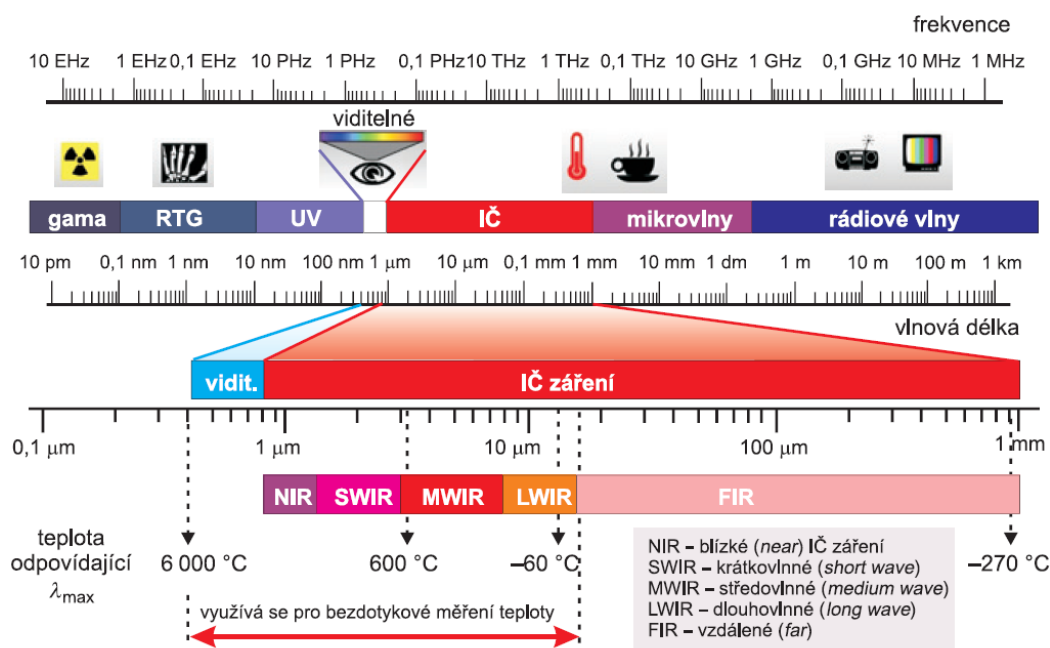
2.5.1. Pásma infračerveného záření

Infračervené záření, které se využívá v termografii, se nachází v rozsahu vlnových délek 0,76 – 15 μm a lze rozdělit do několika pásem podle vlnové délky (viz tab. 2).

Tab. 2 - Rozdělení infračerveného záření podle pásem vlnových délek [1, 2]

Anglická zkratka	Anglický název	Český ekvivalent	Rozsah vlnových délek λ [μm]
NIR	Near – infrared	Blízké infračervené záření	0,76 – 1,4
SWIR	Short – wavelenght infrared	Krátkovlnné infračervené záření	1,4 – 3
MWIR	Mid – wavelenght infrared	Středovlnné infračervené záření	3 – 8
LWIR	Long – wavelenght infrared	Dlouhovlnné infračervené záření	8 – 15
FIR	Far – infrared	Vzdálené infračervené záření	15 – 1000

Pro detekování infračerveného záření o vlnových délkách větších než $15 \mu\text{m}$ (pásmo FIR) nejsou v současné chvíli k dispozici vhodné detektory, které by vyhovely nárokům komerčně dostupným bezkontaktním měřícím přístrojům. [1]



Obr. 4 - Záření využívané při bezkontaktním měření teploty [2]

2.6. Energie přenášená elektromagnetickým zářením

Elektromagnetické záření, které se šíří prostorem, přenáší tzv. zářivou energii. Tato energie postupuje ve směru šíření záření a její přenos kvantitativně popisují veličiny: **zářivý tok** (zářivý výkon) ϕ_e a **intenzita záření** (plošná hustota výkonu) M_e . [10]

2.6.1. Zářivý tok

V prostoru, kterým se šíří energie, je zavedena plocha o plošném obsahu S_z (plocha zavedená). Pokud touto plochou za časový interval dt projde energie dW , je zářivý tok (tok energie) ϕ_e touto plochou určen vztahem:

$$\phi_e = \frac{dW}{dt} \quad (7)$$

Jednotkou zářivého toku je 1 W ($\text{J} \cdot \text{s}^{-1}$). Jedná se o výkon přenášený vlněním touto plochou. [10]

2.6.2. Intenzita záření

Přenos energie v jednotlivých bodech zvolené plochy S_z může být obecně různě vydatný. Z tohoto důvodu byla zavedena měrná veličina s názvem intenzita záření, která je označována M_e . [10]

Intenzita záření je dána vztahem:

$$M_e = \frac{d\phi_e}{dS} \quad (8)$$

kde $d\phi_e$ je elementární zářivý tok a dS je elementární plocha zvolená na ploše S_z . Číselně je intenzita záření rovna energii, která za jednotku času projde plochou jednotkové velikosti kolmou na směr šíření vlny. Jednotkou intenzity záření je tedy $1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. [2,10]

Tělesem emitované (vyzařované) tepelné záření je složeno z různých vlnových délek. Intenzita záření má tedy integrální charakter a je složena z příspěvků od jednotlivých vlnových délek podle vztahu:

$$M_e = \int_0^\infty M_\lambda d\lambda \quad (9)$$

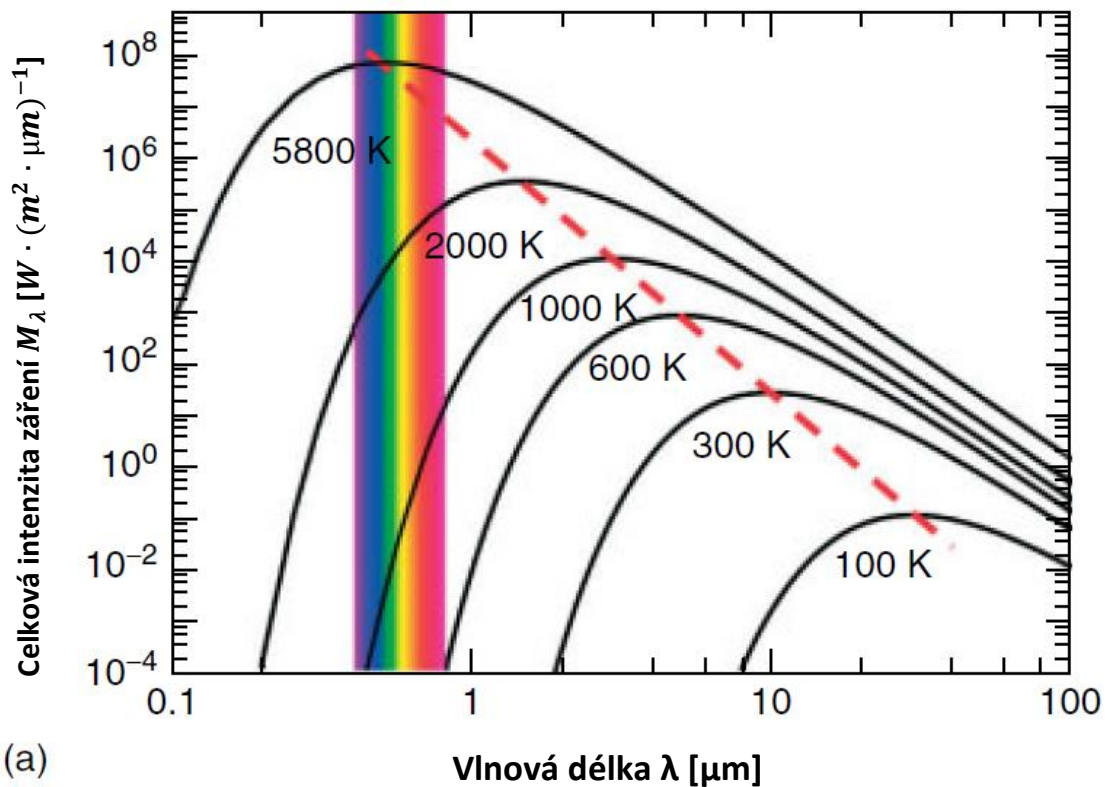
kde M_λ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$) je spektrální intenzita záření a λ (m) je vlnová délka. [2]

2.7. Planckův vyzařovací zákon

Planckův vyzařovací zákon představuje závislost spektrální intenzity záření černého tělesa $M_{o\lambda}$ na vlnové délce λ a na teplotě T podle vztahu:

$$M_{o\lambda} = f(T, \lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(\exp\left(\frac{hc}{k\lambda T}\right) - 1 \right)} = \frac{C_1}{\lambda^5 \left(\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right)} \quad (10)$$

kde h je Planckova konstanta ($h = 6,6256 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$), k je Boltzmannova konstanta ($k = 1,3805 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$), c je rychlost světla ve vakuu ($c = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), C_1 je první vyzařovací konstanta ($C_1 = 3,7413 \cdot 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$), C_2 je druhá vyzařovací konstanta ($C_2 = 1,4388 \cdot 10^{-2} \text{ K} \cdot \text{m}$), T je termodynamická teplota (K) a λ je vlnová délka (m). [2]



Obr. 5 - Závislost spektrální intenzity záření černého tělesa na vlnové délce pro jednotlivé teplotní hladiny – grafické znázornění Planckova vyzařovacího zákona [1]

2.8. Wiennův zákon posunu

Wiennův posunovací zákon získáme tak, že nejprve zjistíme parciální derivaci Planckova vyzařovacího zákona podle vlnové délky a tuto derivaci položíme rovnu nule. [4]

$$\frac{\partial M_{o\lambda}}{\partial \lambda} = 0 \quad (11)$$

Z této rovnice po úpravách vyplývá vztah:

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} \quad (12)$$

kde b je Wienova konstanta ($b = 2897,6 \mu m \cdot K$), T je termodynamická teplota (K) a λ_{max} (μm) je vlnová délka odpovídající maximu závislosti $M_{o\lambda} = f(\lambda)$. Poloha maxima je označena čárkovaně na obr. 5 (viz kapitola č. 2.7). [4]

Wiennův zákon říká, že s rostoucí teplotou se maximum spektrální intenzity vyzařování posouvá směrem ke kratším vlnovým délkám. [4]

2.9. Stefanův-Boltzmannův zákon

Stefanův-Boltzmannův zákon vyjadřuje celkovou intenzitu vyzařování černého tělesa na všech vlnových délkách jako funkci absolutní teploty (viz rovnice č. 13). [2, 3]

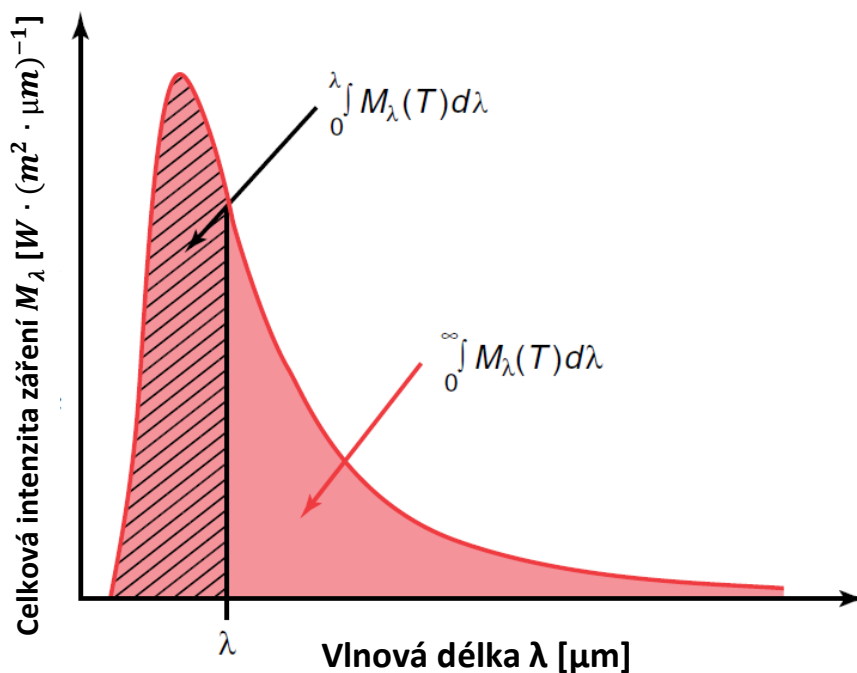
$$M_o = f(T) \quad (13)$$

Celkovou intenzitu záření černého tělesa lze získat integrací Planckova zákona přes všechny vlnové délky dle vztahu:

$$M_o = \int_0^{\infty} M_{o\lambda}(T) d\lambda = \sigma \cdot T^4 \quad (14)$$

kde σ je Stefan-Boltzmannova konstanta ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$) a T (K) je termodynamická teplota. [4]

Celková intenzita vyzařování M_o je graficky vyjádřena plochou pod křivkou vytvořenou na základě Planckova zákona pro konkrétní teplotu (Obr. 6). [2]



Obr. 6 – Celková intenzita záření černého tělesa jako obsah plochy pod křivkou [1]

2.10. Kirchhoffův zákon tepelného vyzařování

Kirchhoffův zákon říká, že množství záření absorbovaného jakýmkoliv objektem se rovná záření, které je tímto objektem emitováno (vyzařováno). Ve stavu tepelné rovnováhy platí vztah:

$$\varepsilon = \alpha \quad (15)$$

kde $\varepsilon (-)$ je emisivita a $\alpha (-)$ je pohltivost. [1]

Poměr intenzity vyzařování M_e k pohltivosti α tělesa závisí pouze na absolutní teplotě tělesa (viz rovnice č. 16).

$$\frac{M_e}{\alpha} = f(T) \quad (16)$$

Každá látka absorbuje nejsilněji záření těch vlnových délek, které nejsilněji emituje. [4]

2.11. Interakce IR záření s tělesem

U záření, které dopadá na povrch reálného tělesa, se projevují tři jevy. Část dopadajícího záření je buď **odražena**, nebo **pohlčena**, nebo prochází skrz těleso, tedy je **propuštěna** (Obr. 7). [3]

Reálné těleso si lze představit jako energetický uzel, ve kterém platí zákon zachování energie. Energie, kterou tento uzel přijme, musí být tímto uzlem ve stejné míře odevzdána. Pro zářivé toky lze na základě této myšlenky odvodit bilanci:

$$\phi_{Celk.} = \phi_{Odraž.} + \phi_{Pohlč.} + \phi_{Propuř.} \quad (17)$$

kde $\phi_{Celk.}$ je celkový zářivý tok, který dopadá na povrch reálného tělesa, $\phi_{Odrař.}$ je odražený zářivý tok, $\phi_{Pohlč.}$ je pohlčený zářivý tok tělesem a $\phi_{Propuř.}$ je propuštěný zářivý tok. [4]

Pokud bilanci zářivých toků vydělíme celkovým zářivým tokem $\phi_{Celk.}$, získáme rovnici:

$$1 = \frac{\phi_{Odraž.}}{\phi_{Celk.}} + \frac{\phi_{Pohlč.}}{\phi_{Celk.}} + \frac{\phi_{Propuš.}}{\phi_{Celk.}} \quad (18)$$

kde

$$\frac{\phi_{Odraž.}}{\phi_{Celk.}} = \rho \quad (19)$$

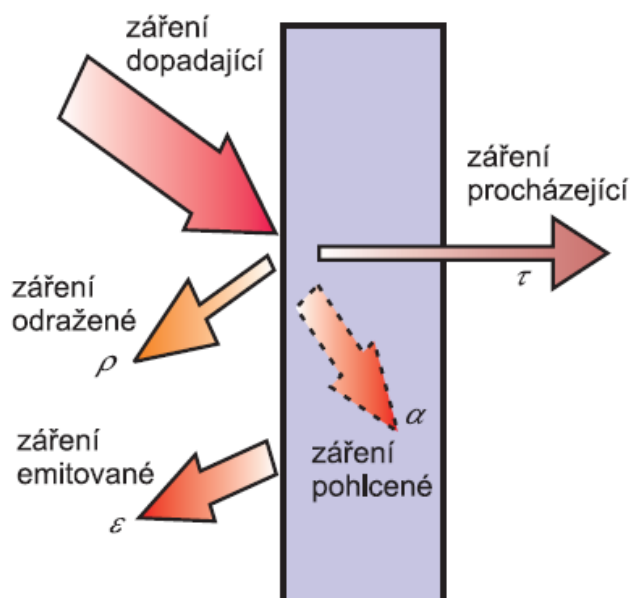
$$\frac{\phi_{Pohlč.}}{\phi_{Celk.}} = \alpha \quad (20)$$

$$\frac{\phi_{Propuš.}}{\phi_{Celk.}} = \tau \quad (21)$$

kde ρ (–) je odrazivost, α (–) je pohltivost a τ (–) je propustnost (Obr. 7). [4]

Výsledná rovnice má tvar:

$$1 = \rho + \alpha + \tau \quad (22)$$



Obr. 7 - Interakce záření s objektem [2]

2.12. Intenzita záření a Lambertův kosinový zákon

Lambertův kosinový zákon uvádí do souvislosti intenzitu záření a úhel odklonu od normálového směru vzhledem k povrchu tělesa. Lambertův kosinový zákon platí pro plošný zářič s tzv. difúzním zářením a řídí se vztahem:

$$M_{\varphi} = M_n \cdot \cos \varphi \quad (23)$$

kde M_{φ} ($W \cdot m^{-2}$) je intenzita záření ve směru odchýleném od normály, φ ($^{\circ}$) je úhel odklonu od normálového směru a M_n ($W \cdot m^{-2}$) je intenzita záření v normálovém směru. Zdroje záření, které vyhovují tomuto zákonu se nazývají kosinové či Lambertovy zářiče. [4, 6]

2.13. Emisivita

Emisivita vyjadřuje poměr mezi vyzářenou energií reálného tělesa a vyzářenou energií dokonale černého tělesa při stejné teplotě. Značí se řeckým písmenem ε a nabývá hodnot od 0 do 1. Jedná se o poměrovou (bezrozměrnou) veličinu. Emisivita obecně závisí na vlnové délce, na teplotě a na řadě dalších faktorů (tyto faktory budou podrobněji popsány v kapitole 2.13.2). Emisivita je dána vztahem:

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{M_{e \text{ reál.}}}{M_o} \quad (24)$$

kde ε (–) je emisivita, $M_{e \text{ reál.}}$ ($W \cdot m^{-2}$) je intenzita záření reálného tělesa a M_o ($W \cdot m^{-2}$) je intenzita záření černého tělesa. [1]

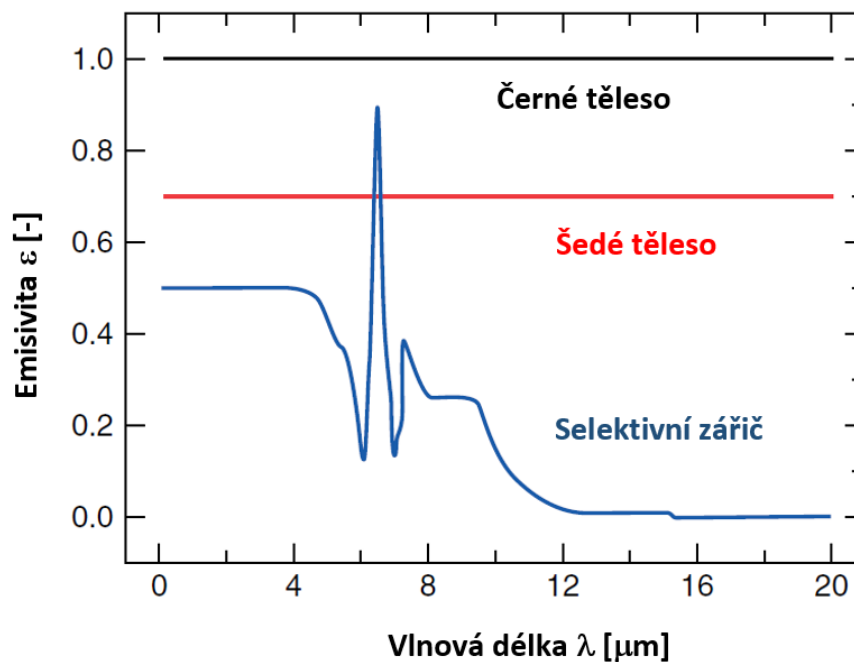
Černé těleso zde vystupuje jako standard, se kterým jsou porovnávána reálná tělesa.

2.13.1. Klasifikace objektů podle emisivity

Podle emisivity jsou objekty rozdělovány na **černá tělesa**, **šedá tělesa** a na **selektivní zářiče** (selektivní emitory). Emisivita černého tělesa nabývá hodnoty 1,0. Šedé těleso není dokonalý zářič, proto i emisivita musí nabývat menších hodnot než 1,0. U těchto dvou modelových těles se počítá s tím, že emisivita je nezávislá na vlnové délce, tedy je konstantní (Obr. 8). U selektivního zářiče nabývá emisivita různých hodnot při

různých vlnových délkách. Průběh emisivity v závislosti na vlnové délce je nekonstantní. (viz Obr. 8). [3]

V praktických aplikacích v infračervené termografii jsou všechny objekty selektivními zářiči. Pro měření je vhodné uvažovat, že zkoumané objekty jsou v příslušném rozsahu vlnových délek (např. 8 až 14 μm) tzv. „dostatečně šedé“, aby nedocházelo k příliš velkým chybám. [14]



Obr. 8 - Závislost emisivity na vlnové délce pro jednotlivé zářiče [1]

Tab. 3 - Informativní hodnoty emisivit pro vybrané materiály (povrchy) při $\lambda = 8$ až $15\mu\text{m}$ [13]

Materiál	Teplota [°C]	Emisivita [-]	Materiál	Teplota [°C]	Emisivita [-]
Bronz (leštěný)	50	0,1	Papír (bílý)	20	0,7 – 0,9
	200	0,03	Písek	20	0,9
Bronz (oxidovaný)	100	0,61	Voda, led	0 – 20	0,96
Cihla (červená, hrubá)	100	0,93	Pryž (měkká, šedá, hrubá)	20	0,95
Cihla (šamotová)	20	0,85	Olovo (lesklé)	250	0,08
Omítnutá zeď	20	0,94	Hliník, leštěný	100	0,05
Kůže (lidská)	32	0,98	Železo, oxidovaný odlitek	38	0,63
Měď (leštěná)	100	0,03		538	0,76
Měď (oxidovaná)	50	0,6 – 0,7	Dřevo bílé (vlhké)	20	0,9

2.13.2. Faktory ovlivňující hodnotu emisivity

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.13, emisivita obecně závisí na **vlnové délce** a na **teplotě**. Během bezdotykového měření teploty vstupuje do samotného procesu měření několik dalších faktorů, které nemalým dílem ovlivňují hodnotu emisivity. Mezi tyto faktory patří: **materiál, struktura povrchu snímaného objektu, geometrie snímaného objektu a směr pozorování**. Ze studia problematiky emisivity vyplývá, že pokud má být bezkontaktní měření dostatečně přesné, musí se na emisivitu nahlížet jako na funkci výše zmíněných faktorů. Každá aplikace by proto měla být posuzována individuálně. [1, 4]

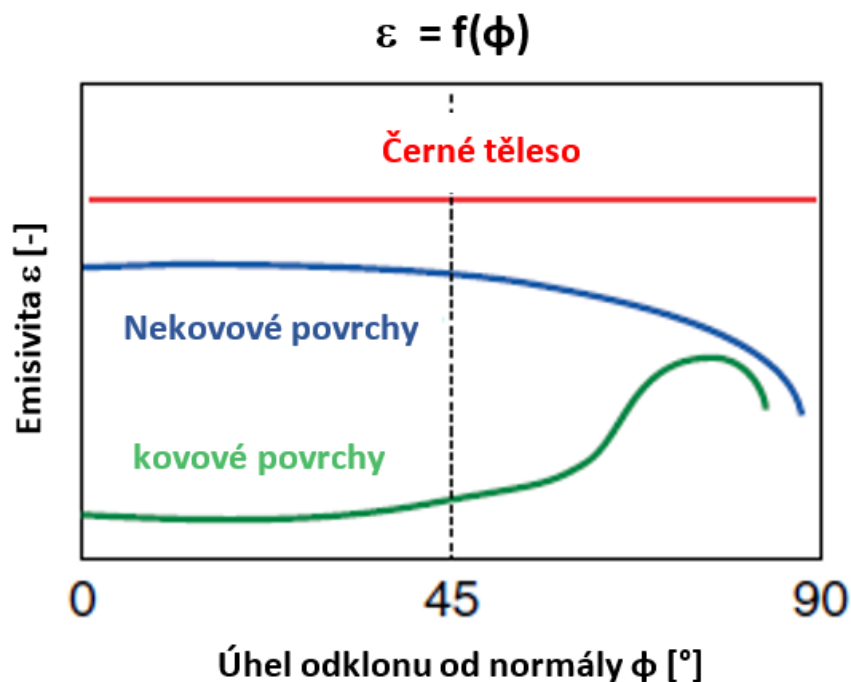
Materiály lze v termografii zjednodušeně rozdělit na kovy a na nekovy. Většina nekovů, které se používají v běžných termografických aplikacích, jsou šedými zářiči s emisivitou zpravidla vyšší než 0,8. Mezi tyto nekovové materiály patří např. kůže, papír, kameny a sklo. Kovové materiály mohou nabývat různých hodnot emisivity v závislosti na konkrétní **povrchové struktuře**.

Emisivita se u každého daného materiálu může výrazně odlišovat v závislosti na jakosti povrchu. Tento jev je však nejvýraznější u kovů, kde u leštěných povrchů může emisivita dosahovat hodnot až 0,02. Naopak je tomu u kovů se zdrsňeným povrchem, kde emisivita nabývá několikanásobně vyšších hodnot, dokonce i nad 0,8. Vysokých hodnot dosahují rovněž kovové součásti, u kterých se na povrchu projevila oxidace nebo koroze.

Úhel, pod kterým je snímán povrch, hraje rovněž neméně důležitou roli při stanovení emisivity. Černé těleso je difúzní zářič. Energie je vyzařována izotropně, tedy nezávisle na směru (emisivita je konstantní ve všech směrech). Odlišné chování vykazují povrchy skutečných objektů, u kterých se množství emitovaného záření mění se směrem snímání (viz obr. 9). Většina prakticky využívaných materiálů vykazuje podobné chování v rozmezí úhlů $0^\circ - 40^\circ$ (nebo 45°). V tomto úhlovém intervalu je emisivita přibližně konstantní. Při větších úhlech nad 45° nastává u nekovových materiálů pozvolný pokles emisivity. Kovové materiály vykazují anomálii v podobě strmého nárůstu a poté prudkého poklesu emisivity v rozmezí úhlů $45^\circ - 90^\circ$. Tuto anomálii lze vysvětlit pomocí Fresnelových rovnic. [4, 26, 33]

Pod pojmem **geometrie snímaného objektu** si lze představit vlastní uspořádání snímaného objektu (rozměrové a tvarové charakteristiky). Z hlediska stanovení správné hodnoty emisivity jsou problematické zejména členité a lesklé povrchy, u

kterých je vysoká odrazivost. Pravidelné povrchové struktury ve formě různých drážek a dutin vedou k nerovnoměrnému úhlovému rozložení emisivity. [1]



Obr. 9 - Emisivita jako funkce odklonu měřícího zařízení od povrchové normály [1]

2.13.3. Emisivita a odrazivost

V kapitolách 2.10 a 2.11 byly definovány rovnice č. 15 a 22. Pokud v rovnici č. 22 položíme pohltivost rovnu emisivitě z rovnice č. 15, získáme vztah:

$$1 = \varepsilon + \rho + \tau \quad (25)$$

kde ε (–) je emisivita, ρ (–) je odrazivost a τ (–) je propustnost.

Z takto definované rovnice vyplývá, že čím větší je propustnost a odrazivost zkoumaného materiálu, tím menší je jeho emisivita a naopak.

Emisivita, pohltivost, propustnost i odrazivost jsou v praxi funkcemi vlnové délky. [14]

2.14. Rovnice termografie

Při bezdotykovém měření je teplota vyhodnocována na základě bilance energetických toků (zářivé toky). Na detektor termokamery či pyrometru dopadá během měření celkový zářivý tok ϕ , který je složen ze tří složek:

1. zářivý tok emitovaný měřeným objektem oslabený průchodem atmosférou:

$$\phi_s \cdot \varepsilon \cdot \tau$$

2. zářivý tok odražený z okolních zdrojů (též zářivý tok pozadí) zeslabený průchodem atmosférou:

$$\phi_p \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \tau$$

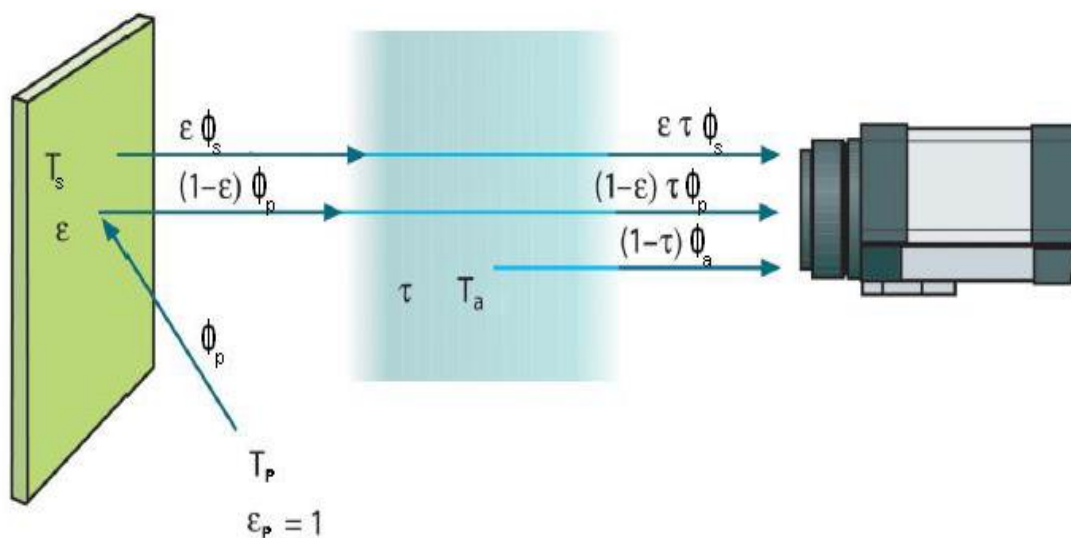
3. zářivý tok atmosféry (záření atmosféry nelze zanedbávat):

$$\phi_a \cdot (1 - \tau)$$

Pro celkový zářivý tok na detektoru měřícího přístroje platí bilance:

$$\phi = \phi_s \cdot \varepsilon \cdot \tau + \phi_p \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \tau + \phi_a \cdot (1 - \tau) \quad (26)$$

kde ϕ_s ($J \cdot s^{-1}$) je zářivý tok vycházející z měřeného objektu, ϕ_p ($J \cdot s^{-1}$) je zářivý tok pozadí, ϕ_a ($J \cdot s^{-1}$) je zářivý tok atmosféry, ε (–) je emisivita měřeného materiálu a τ (–) je propustnost atmosféry. Takto zavedená bilance je také nazývána jako tzv. **rovnice termografie**. [3, 8]

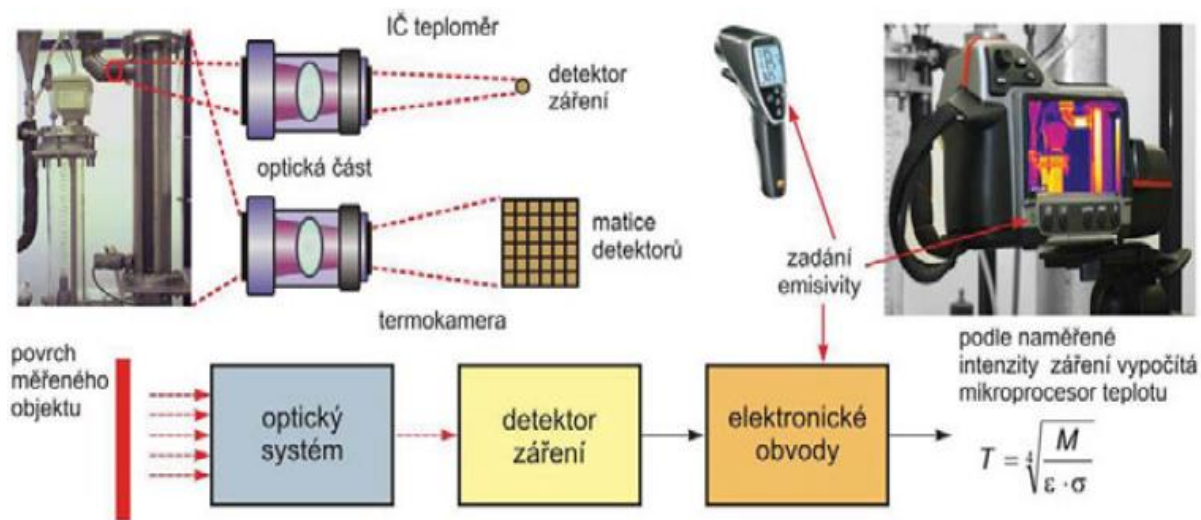


Obr. 10 - Vliv propustnosti atmosféry a záření okolního prostředí [8]

3. Termokamery a pyrometry

3.1. Uspořádání termokamery a pyrometru

Objektem emitované tepelné záření je soustředováno skrze optický systém na detektor IČ záření měřícího přístroje. Zjednodušené blokové schéma termokamery a pyrometru je znázorněno na obr. 11. Zásadní rozdíl mezi termokamerou a pyrometrem byl již podrobně popsán v kapitole 2.2. V následujících několika kapitolách budou blíže popsány a specifikovány jednotlivé části termokamery a pyrometru. [15]



Obr. 11 - Blokové schéma termokamery a pyrometru [15]

3.2. Optická soustava

Vstupní optická část termokamery vykazuje podobnost s digitálním fotoaparátem. Objektiv termokamery se od fotoaparátu liší propustností infračerveného záření specifických vlnových délek. Propustnost infračerveného záření závisí na materiálu čočky objektivu. Komerční termokamery pracují nejčastěji v rozsahu vlnových délek 8 – 14 μm (pásmo LWIR viz tab. 2) a mají objektivy vyrobené nejčastěji z **germania**. Germaniové čočky jsou navíc opatřeny antireflexivní vrstvou. [3, 13]

3.3. Detektory termokamer a pyrometrů

Infračervený detektor nebo detektorový systém funguje jako převodník, který přeměňuje elektromagnetické záření na elektrické signály. Detektory infračerveného

záření lze dle principu činnosti rozdělit do dvou skupin: **tepelné detektory**, **fotonové detektory**. [13, 15]

3.3.1. Tepelný detektor

Tepelný detektor přeměňuje absorbované elektromagnetické záření na tepelnou energii, která vyvolá nárůst teploty detektoru. Účinnost této energetické přeměny je určena pohltivostí α materiálu, ze kterého je detektor zhotoven. Nejpoužívanějším tepelným detektorem je tzv. **bolometr**. U termokamer se vyskytují tzv. mikrobolometry. Mikrobolometr je označení pro miniaturní bolometr. Jedná se o dílčí detektor v mikrobolometrickém poli (maticový detektor). Toto pole je umístěno na monolitickém křemíkovém substrátu.

Bolometr využívá principu odporového senzoru teploty. Nejčastěji jsou využívány tenkovrstvé odporové senzory z oxidů **MgO** (oxid hořečnatý), **NiO** (oxid nikelnatý), **MnO** (oxid manganatý), **TiO₂** (oxid titaničitý) a z **Tl₂SeAs₂Te₃** (chalkogenidové sklo), které jsou nanesené na velmi tenké elektricky nevodivé podložce. Tato podložka je dále připevněna na masivní kovový blok. [5, 13, 15]

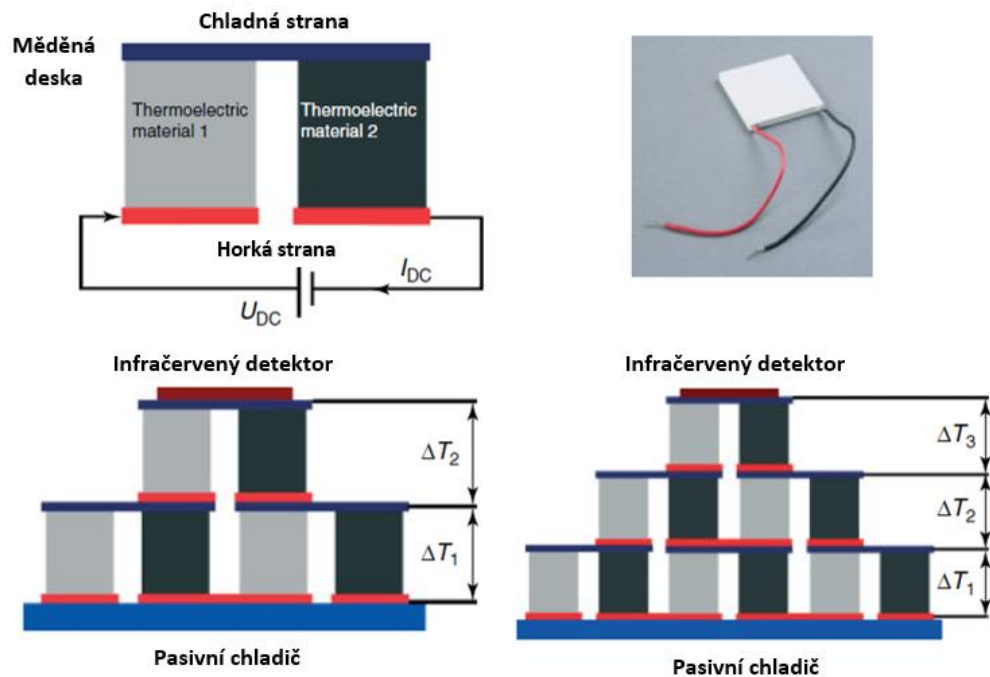
3.3.2. Fotonový (kvantový) detektor

Fotonové detektory poskytují po dopadu infračerveného záření elektrický signál v podobě změny napětí, či elektrické vodivosti. Mezi fotonové detektory využívané při bezkontaktním měření patří **photodiody** a **fotoresistory**. Fotonový detektor pracuje, zjednodušeně řečeno, na principu počítání fotonů (kvanta elektronového záření). Fotonové detektory jsou citlivější než detektory tepelné a detekují infračervené záření jen v úzkém rozsahu spektra. V rozsahu vlnových délek 1 – 5 μm se využívá tzv. Schottkyho bariéry mezi vrstvami Si a PtSi. Ve vrstvě PtSi vznikají elektrony, které překonávají Schottkyho bariéru a v křemíkové vrstvě vyvolávají vznik nosičů náboje. Využitím sloučeniny IrSi lze detekční pásmo rozšířit až do 9 μm . Perspektiva rozšíření pásma až do 25 μm spočívá v použití přechodu mezi vrstvou na bázi sloučenin $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ a vrstvou Si. Maticové (mozaikové) detektory s rozlišením 1040 x 1040 je nutné chladit v tekutém dusíku. [5, 13]

Pyrometry s **photodetektory** jsou úzkopásmové a nejčastěji jsou k dostání s rozsahy vlnových délek: **1,0 – 1,7 μm** , **1,2 – 1,7 μm** , **0,78 – 1,06 μm** . [7]

3.4. Peltierův článek

Pro optimální provoz některých vysoce výkonných infračervených detektorů je nutná regulace jejich provozní teploty. **Tepelné detektory** vyžadují stabilizaci teploty. Bolometrické detektory jsou udržovány při konstantní teplotě (cca 30°). **Fotonové detektory** vyžadují naopak chlazení. Pro tyto potřeby jsou v měřicích přístrojích hojně využívány tzv. **Peltierovy články**. Peltierův článek funguje na základě Peltierova jevu (reverzní jev k Seebeckovu jevu). Peltierův jev spočívá ve vyzáření nebo v absorpci tepla na rozhraní dvou materiálově odlišných vodičů za předpokladu, že jimi prochází stejnosměrný elektrický proud. Zda je teplo vyzařováno nebo pohlcováno určuje pouze směr elektrického proudu. Materiály vodičů jsou většinou bismut a tellur. Peltierovy články určené pro chladicí aplikace mají označení **TEC** (Thermoelectric cooler) jako tepelná čerpadla. Pro dosažení vyšších teplotních rozdílů mezi ochlazovanou a ohřívanou stranou se využívá tzv. vícestupňové zapojení Peltierových článků (Obr. 12). [1]



Obr. 12 - Schéma Peltierova článku a vícestupňové zapojení [1]

3.5. Výpočet povrchové teploty objektu

Z naměřené intenzity záření vypočítá mikroprocesor termokamery podle Stefan – Boltzmannova zákona teplotu na základě vztahu:

$$T = \sqrt[4]{\frac{M_e}{\varepsilon \cdot \sigma}} \quad (27)$$

kde $\varepsilon (-)$ je emisivita měřeného materiálu, $T(K)$ je termodynamická teplota, σ je Stefan – Boltzmannova konstanta ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-12} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$) a $M_e (W \cdot m^{-2})$ je intenzita záření. [3, 15]

3.6. Kvalifikace obslužného personálu

Pracovník obslužného personálu je odborně nazýván jako tzv. **termodiagnostik**. Termodiagnostici musí být kvalifikováni a posuzováni ve shodě s normou ČSN ISO 18436-7. Konkrétní kategorie těchto pracovníků musí být vždy odsouhlasena zákazníkem a poskytovatelem služby před zahájením jakékoli činnosti. [12]

3.7. Důležité parametry termokamer

Podobně jako jiné měřicí přístroje má termokamera celou řadu parametrů, které přímo ovlivňují použitelnost pro konkrétní aplikaci a pořizovací cenu. Mezi tyto parametry patří: **teplotní rozsah, spektrální rozsah, teplotní citlivost, přesnost stanovení teploty, rozlišení detektoru a zorné pole, způsoby zaostření a frekvence snímání**. [18]

3.7.1. Teplotní rozsah

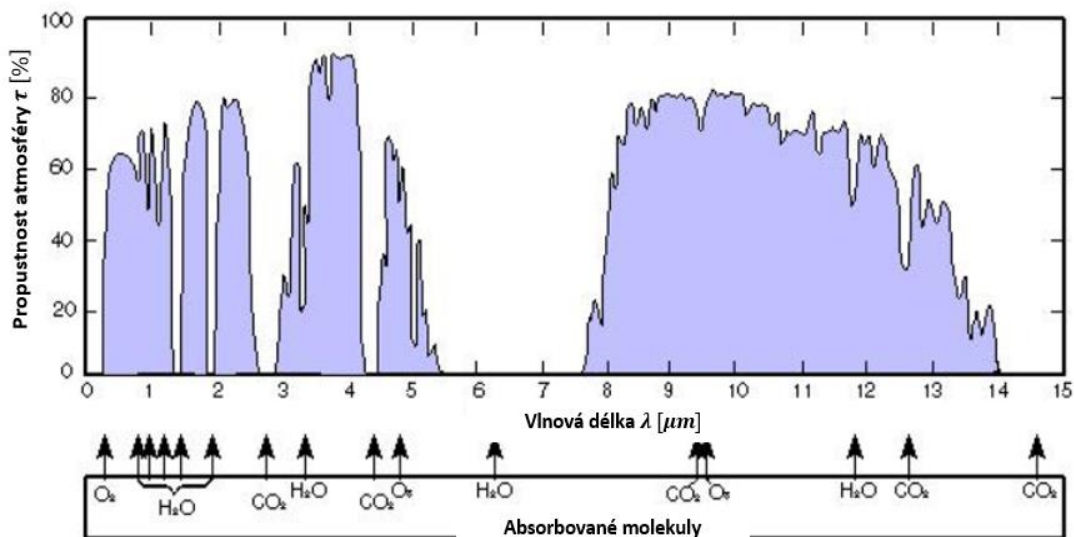
Teplotní rozsah udává, jakou nejvyšší a nejnižší teplotu je termokamera ještě schopna bezpečně změřit. Některé termokamery mají dokonce na výběr z několika měřících rozsahů, mezi kterými lze přepínat v menu termokamery. V současné době lze pomocí vysoce výkonných termokamer měřit teploty v rozsahu $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ až $+2000 \text{ }^\circ\text{C}$. [7, 18]

3.7.2. Spektrální rozsah

Spektrálním rozsahem se rozumí rozsah vlnových délek infračerveného záření, ve kterých termokamera pracuje. Spektrální rozsah přístroje je dán jednak parametry optiky, která propouští pouze elektromagnetické záření na určitém rozsahu vlnových délek (funguje jako filtr), a jednak citlivostí detektoru, který je konstruován pro detekci pouze konkrétních vlnových délek. Spektrální rozsah termokamer s tepelným detektorem je výhradně 8 – 14 μm . Lze se setkat i s rozsahy např. 2 – 5 μm nebo 8 – 9,4 μm . Termokamery s takovými rozsahy však vždy obsahují chlazené fotonové detektory. Volba spektrálního rozsahu je závislá na **teplotě** a parametrech povrchu měřeného objektu: **emisivita**, **propustnost** a **odrazivost**. V praxi je třeba volit takový spektrální rozsah, aby emisivita měřeného povrchu byla v tomto rozsahu co největší.

V praxi je spektrální rozsah termokamery omezen také útlumem atmosféry. Toto omezení se projevuje především při měření teplot na větší vzdálenosti. Zdroje útlumu jsou **molekuly vody** H_2O , **molekuly kyslíku** O_2 a **oxid uhličitý** CO_2 (viz obr. 13).

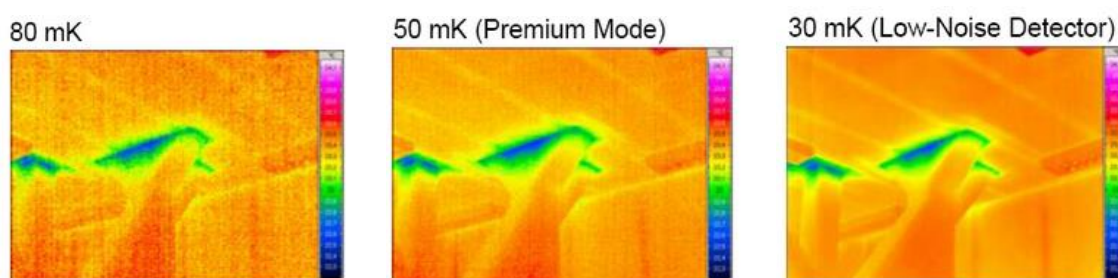
Oblasti s velkou propustností se nazývají tzv. **atmosférická okna**. Z obr. 13 je patrné, že pro bezkontaktní měření je zcela nevhodný rozsah vlnových délek 5,5 – 7,5 μm . Tyto vlnové délky atmosféra nepropouští. [2, 7, 18]



Obr. 13 - Propustnost atmosféry v závislosti na vlnové délce [18]

3.7.3. Teplotní citlivost

Teplotní citlivost vyjadřuje parametr **NETD** (Noise Equivalent Temperature Difference). Teplotní citlivost je nejmenší možný rozdíl teplot, který vyvolá signál větší, než je vlastní šum měřicího systému. Parametr NETD se udává v Kelvinech nebo ve stupních celsia a vyjadřuje jaké nejmenší možné teplotní rozdíly je termokamera schopna zaznamenat na povrchu černého tělesa. U moderních komerčních termokamer je nejmenší měřitelný teplotní rozdíl nejčastěji 100 mK. U dražších nejcitlivějších přístrojů až 15 mK. Teplotní citlivost podstatně ovlivňuje kvalitu termogramu (Obr. 14). [7, 18]



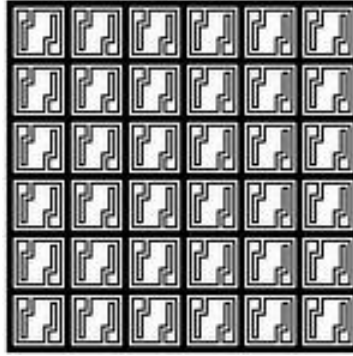
Obr. 14 - Rozdíly v termogramech u infračervených kamer s různou teplotní citlivostí - NETD [18]

3.7.4. Přesnost stanovení teploty

Přesnost stanovení teploty se u běžných měřicích přístrojů pohybuje $\pm 2^\circ\text{C}$ **nebo** $\pm 2\%$ z naměřené hodnoty, přičemž má přednost ta hodnota, která je vyšší. Nejpreciznější termokamery jsou schopny měřit s přesností až $\pm 1^\circ\text{C}$ **nebo** $\pm 1\%$. Při interpretaci výsledků měření je třeba tuto nejistotu vždy uvažovat. [18]

3.7.5. Rozlišení detektoru a zorné pole

Rozlišení detektoru termokamery udává počet tzv. **pixelů** (obrazové body) v maticovém detektoru. Počet pixelů se rovná počtu dílčích senzorů, které společně utváří maticový detektor (Obr. 15). Na současném trhu figurují infračervené kamery s rozlišením detektorů od **80 x 60 pixelů** (základní řada termokamer) až do **640 x 480 pixelů** (profesionální řada termokamer). Poměr stran bývá výhradně **4:3**. [7]



Obr. 15 - Ilustrativní náčrt maticového detektoru o rozlišení 6 x 6 [18]

Zorné pole je část prostoru, kterou zachycuje objektiv a ze které dopadá infračervené záření na maticový detektor termokamery. Zorné pole charakterizuje parametr **FOV** (Field Of View). Zkratka FOV je anglický ekvivalent zorného úhlu (Obr. 16). Jednotkou zorného úhlu je úhlový stupeň. U termokamer se rozlišují dva zorné úhly: **horizontální** (HFOV) a **vertikální** (VFOV). Běžně se lze v praxi u termokamer setkat s údajem **24° x 18°**, **42° x 32°**, nebo **14° x 10°** (HFOV x VFOV). Při nízkém rozlišení detektoru termokamery bude nutné pořizovat snímky z menší vzdálenosti nebo pomocí objektivu s menším zorným polem, jinak může dojít k chybě měření. [7]

Část prostoru, kterou je schopen zachytit pouze jeden z dílčích senzorů maticového detektoru, popisuje parametr **IFOV** (Instantaneous Field Of View), který se v češtině nazývá **okamžité zorné pole** (Obr. 16). Jednotkou okamžitého zorného pole je radián (nejčastěji se udává v miliradiánech). Pro výpočet parametru IFOV platí vztah:

$$IFOV [mrad] = \frac{FOV}{\text{počet pixelů v příslušném směru k FOV}} \cdot \frac{3,14}{180} \cdot 1000 \quad (28)$$

Některé termokamery jsou konstruovány jako přístroje s výměnnými objektivy. Záměnou objektivů (změna ohniskové vzdálenosti) lze docílit změny parametrů FOV a IFOV. [7, 28]

Rozlišení termokamery, okamžité zorné pole, objektiv a velikost měřeného objektu definují společně vzdálenost, ze které lze ještě provádět přesná měření, aniž by došlo ke zkreslení výsledků. Pro stanovení této vzdálenosti je v první řadě důležité převést parametr $IFOV [mrad]$ na $IFOV [mm]$ podle vztahu:

$$IFOV [mm] = \frac{IFOV [mrad]}{1000} \cdot l \quad (29)$$

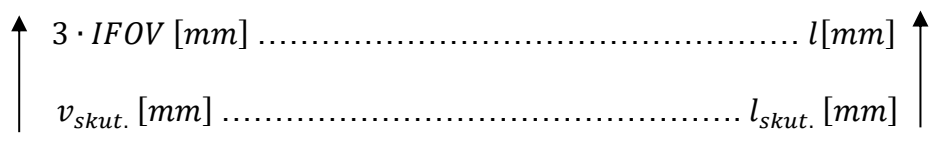
kde $l [mm]$ je libovolně zvolená vzdálenost mezi měřeným objektem a objektivem termokamery. [28]

Z takto vypočítané hodnoty $IFOV [mm]$ a příslušné libovolné vzdálenosti $l [mm]$ vyplývá tzv. **teoretický optický poměr velikosti bodu**, který vyjadřuje měřitelnou velikost jednoho pixelu (1×1). Zjednodušeně lze říct, že termokamera dokáže změřit bod o velikosti $IFOV [mm]$ ze vzdálenosti $l [mm]$ od objektu. Teoretický optický poměr velikosti bodu má tvar:

$$IFOV [mm] : l [mm] \quad (30)$$

Vzhledem k působení optické disperze záření není možné jedním pixelem určit přesnou hodnotu teploty. Je doporučeno zajistit, aby teplá oblast, ve které se měří teplota v konkrétním bodě, měla velikost alespoň 9 pixelů (3×3). V této fázi je důležité provést korekci parametru $IFOV [mm]$ tím, že v dalších výpočtech bude použit jeho trojnásobek (tedy $3 \cdot IFOV [mm]$). Některé literární zdroje uvádí, že lze uvažovat korekci i 16 (4×4) nebo 25 (5×5) pixelů. V tomto případě by byl aplikován čtyř nebo pětinasobek parametru $IFOV [mm]$. [27, 28]

Z takto připravených hodnot lze pomocí jednoduché trojčlenky (přímá úměra) určit skutečnou mezní vzdálenost $l_{skut.} [mm]$ (objekt-objektiv) na základě známé velikosti měřeného bodu $v_{skut.} [mm]$:



$$l_{skut.} = \frac{v_{skut.}}{3 \cdot IFOV} \cdot l \quad (31)$$

Pro příklad lze uvést termokameru s rozlišením 384 x 288 pixelů, která má zorné pole 24° x 18°. S touto termokamerou lze ještě přesně změřit např. bod o velikosti 54 mm ze vzdálenosti přibližně 16,5 m (viz příklad výpočtu níže). Takto vypočítané hodnoty nacházejí význam při měření poměrně malých objektů, jakými jsou např. **bodové svary** při odporovém svařování.

Pro výpočet parametru IFOV jsou v současné chvíli k dispozici on-line kalkulátory, které lze bezplatně využít v praxi. Tyto kalkulátory je možné dohledat například na webových stránkách: **Optris.cz**, **IR Cameras.com**, **Flir.Custhelp.com**, **Fluke.com**.
[28]

Příklad výpočtu:

Termokamera FLIR E85 má rozlišení 384 x 288 pixelů, zorný úhel 24°x 18°. Z jaké vzdálenosti je možné ještě změřit bod o velikosti 54 mm.

Okamžité zorné pole (IFOV):

$$IFOV [mrad] = \frac{FOV}{\text{počet pixelů v příslušném směru k FOV}} \cdot \frac{3,14}{180} \cdot 1000$$

$$IFOV = \frac{24}{384} \cdot \frac{3,14}{180} \cdot 1000 \doteq \mathbf{1,09 \text{ mrad}}$$

Přepočítání okamžitého zorného pole IFOV [mrad] na IFOV [mm]:

Vzdálenost l volím 20000 mm

$$IFOV [mm] = \frac{IFOV [mrad]}{1000} \cdot l$$

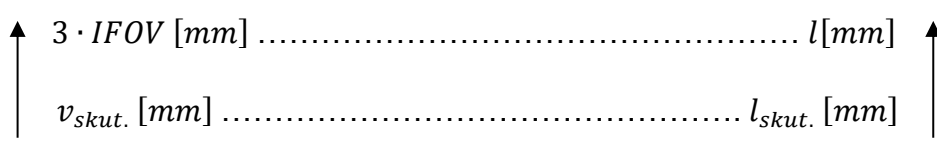
$$IFOV = \frac{1,09}{1000} \cdot 20000 = \mathbf{21,8 \text{ mm}}$$

Teoretický optický poměr velikosti bodu:

$$IFOV [mm] : l [mm]$$

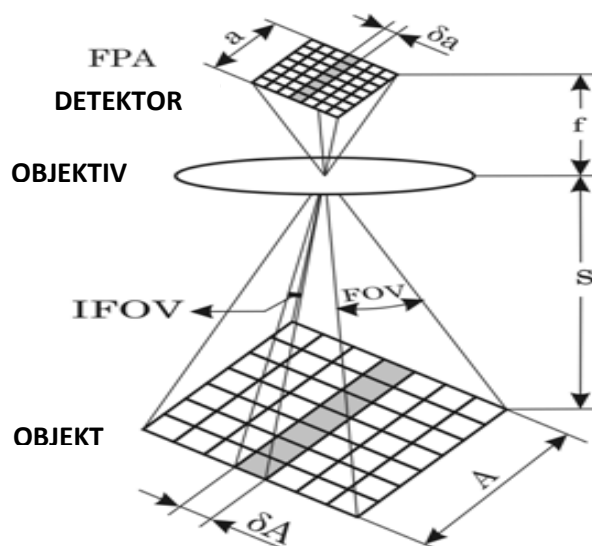
$$21,8 : 20000$$

Skutečná mezní vzdálenost $l_{skut.}$ [mm]:



$$l_{skut.} = \frac{v_{skut.}}{3 \cdot IFOV} \cdot l$$

$$l_{skut.} = \frac{54}{3 \cdot 21,8} \cdot 20000 \doteq 16513,76 \text{ mm} = 16,5 \text{ m}$$



Obr. 16 - Schematické znázornění parametrů FOV a IFOV

3.7.6. Způsoby zaostření

Pro správné výsledky měření je důležité správné zaostření termokamery a pořízení zaostřených termogramů. V současnosti existují dva způsoby zaostřování: **motorické** a **manuální**. Některé typy infračervených kamer s motorickým zaostřováním nabízejí funkci autofokus. Termokamery z řad levnějších zástupců možnost zaostření vůbec nenabízejí. Takto sestrojené termokamery jsou konstrukčně navrženy na **nekonečné zaostření** s velkou hloubkou ostrosti. [7]

3.7.7. Frekvence snímkování

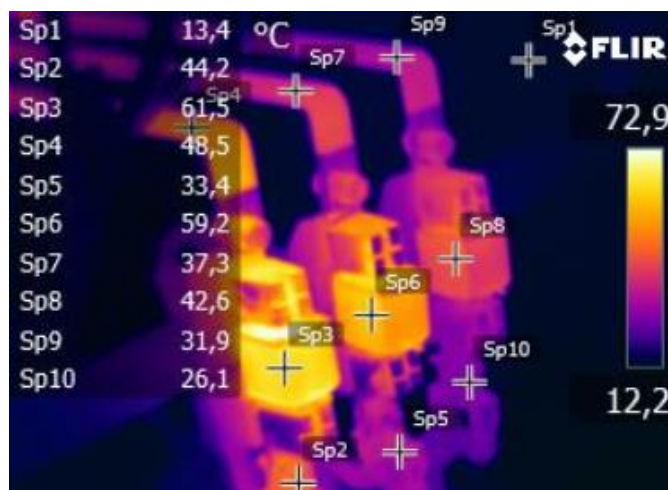
Frekvence snímkování udává počet termogramů, které je termokamera schopna zaznamenat za jednu sekundu. U termokamer s tepelným detektorem se frekvence snímkování pohybuje přibližně v rozmezí **9 – 60 Hz**. U některých termokamer existuje funkce **windowing**. Ta umožňuje pořizování termogramů ve sníženém rozlišení s frekvencí až **200 Hz**. [18]

3.8. Měřicí funkce termokamer

V následujících několika kapitolách budou podrobně popsány některé měřicí funkce, se kterými se lze setkat u současných termokamer.

3.8.1. Funkce bod

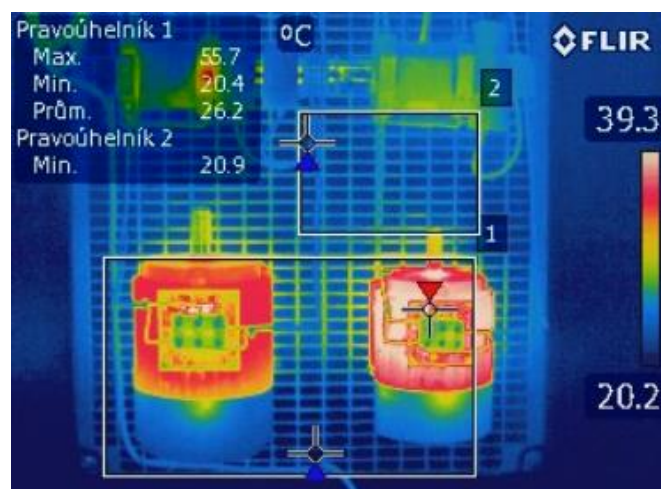
Měřicí funkce bod je určena pro stanovení teploty v jednom bodě (ve skutečnosti se jedná o malou oblast). Nejzákladnější typy termokamer umožňují měřit teplotu bodu, který je umístěn uprostřed displeje. Lepší termokamery nabízejí umístění několika měřících bodů. Tyto body lze libovolně rozmístit na displeji termokamery dle potřeby (Obr. 17). [17]



Obr. 17 - Funkce bod na termokameře značky FLIR [17]

3.8.2. Funkce oblast

Měřicí funkce oblast slouží ke stanovení povrchové teploty v určité části (oblasti) obrazu. Lze volit mezi **průměrnou**, **minimální** a **maximální** teplotou v dané oblasti (Obr. 18). V praxi slouží většinou pro detekci nejteplejších a nejstudenějších bodů na povrchu měřeného objektu. [17]



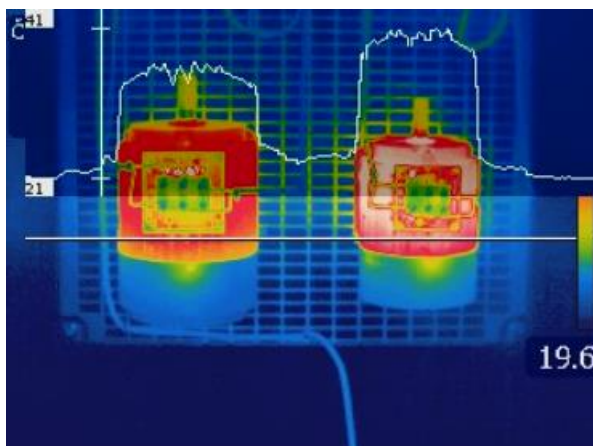
Obr. 18 - Funkce oblast na termokameře FLIR [7]

3.8.3. Funkce delta

Delta funkce umožňuje stanovení teplotních rozdílů nejčastěji mezi dvěma body. Může být využita také např. pro stanovení teplotního rozdílu maximálních teplot mezi dvěma různými oblastmi. [17]

3.8.4. Funkce teplotní profil

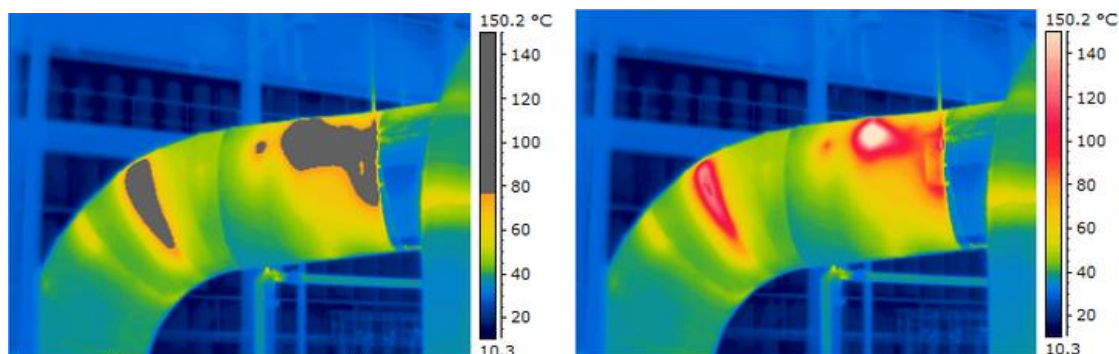
Na obrazu se nejprve definuje měřící úsečka. Funkce teplotní profil zaznamenává na této úsečce teplotní průběh v podobě grafu (Obr. 19). [7, 17]



Obr. 19 - Funkce teplotní profil [7]

3.8.5. Funkce izoterma

Funkce izoterma je určena třemi základními módy: **izoterma interval**, **izoterma pod** a **izoterma nad**. „Izoterma interval“ je funkce zobrazující oblasti, ve kterých jsou teploty, které spadají do předem definovaného intervalu. Funkce „izoterma nad“ slouží k detekci míst, v nichž byla překročena konkrétní předem definovaná maximální hodnota teploty (Obr. 20). „Izoterma pod“ je funkce detekující místa, ve kterých byla překročena nejnižší dovolená teplota. [7]



Obr. 20 - Funkce „izoterma nad“ - vpravo klasický termogram, vlevo oblasti vykreslené funkcí [7]

3.8.6. Speciální měřicí funkce

Mezi další měřicí funkce patří: **alarm vlhkosti**, **alarm izolace**, **teplotní prolnutí**, **blending**, **MSX** a **obraz v obraze**.

Funkce **MSX** (Multi-spectral dynamic imaging) (multispektrální zobrazení) promítá hrany z reálné fotografie do termogramu. Díky této funkci lze jasně rozpoznat nejen hrany a obrysy objektů, ale také nápisy na jejich povrchu. Funkce MSX je v průmyslu velice užitečná díky jednoznačné identifikaci jednotlivých objektů (Obr. 21). [17]



Obr. 21 - Funkce MSX [7]

Obraz v obraze je funkce, která sloučí fotografii a termogram tak, že termogram překrývá pouze konkrétní část fotografie (Obr. 22). Díky tomu lze pomocí fotografie zachytit širší kontext termogramu, což se uplatňuje při hledání a lokalizaci teplotních anomálií. [17]



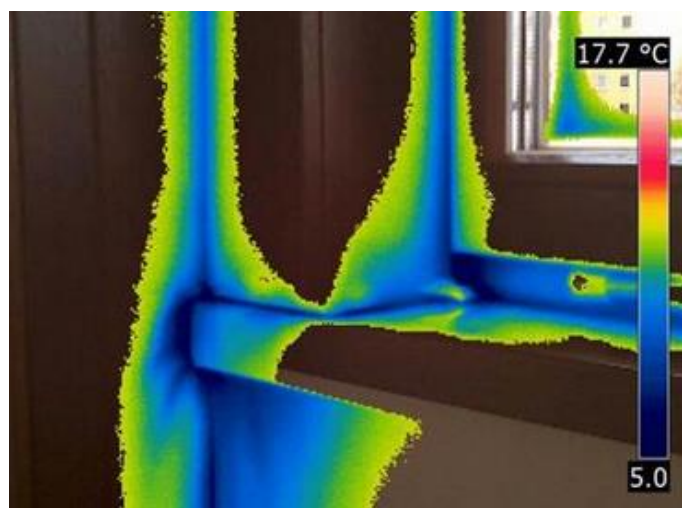
Obr. 22 - Funkce obraz v obraze [17]

Blending nebo také „bělení“ je funkce, jejíž princip spočívá v prolnutí fotografie a termogramu podobně jako je tomu u funkce MSX. Fotografie je pouze zesvětlena a stažena do pozadí termogramu (Obr. 23). Tato funkce slouží k lepší lokalizaci měřených objektů. [7, 17]



Obr. 23 - Funkce blending [7]

Funkce **teplotní prolnutí** slouží jako „filtr“. V určitém intervalu teplot je termogram nahrazen fotografií (Obr. 24). Funkce se nejvíce hodí pro přesnou lokalizaci teplotních anomálií na povrchu měřeného objektu. [7, 17]



Obr. 24 - Funkce teplotní prolnutí [17]

Funkce **alarm vlhkosti** se využívá ve stavebnictví k lokalizaci ploch, kde povrchová vlhkost přesáhne dovolenou maximální relativní vlhkost. Pro zdiva v interiérech je kritická relativní vlhkost 80 %. Při relativní vlhkosti 80 % vzniká na zdech v interiéru plíseň. Tato funkce proto slouží jako detekce („alarm“) vzniku plísní. [17]

Alarm izolace je funkce, která slouží k lokalizaci míst se sníženou povrchovou teplotou na obvodových zdech v interiéru. Snížená povrchová teplota je způsobena nedostatečnou tepelnou izolací obvodových zdí. [17]

3.9. Kalibrace

Kalibrace termokamer a pyrometrů se provádí pomocí technického černého tělesa. Kalibrace je prováděna s cílem zajistit relevantní a opakovatelné výsledky měření. Technické černé těleso je konstruováno buďto jako těleso s **fixní** nebo **nastavitelnou teplotou**. [14, 24]

Technické černé těleso je tzv. kalibrační zářič, který slouží jako zdroj referenčního infračerveného záření. Konstrukčně lze kalibrační černá tělesa rozdělit na **desková** (terčová) a **dutinová**. **Deskové černé těleso** je charakteristické velkým průměrem zářící plochy. Je primárně určeno ke kalibraci IČ teploměrů (pyrometrů), které mají nízkou hodnotu optického rozlišení $D : S$. Emisivita těchto přístrojů bývá nejčastěji 0,95. **Dutinové černé těleso** emituje záření z dutiny, která má nejčastěji válcovitý nebo kulovitý tvar (Obr. 25). Vstupní otvor do dutiny nebývá příliš velký (průměr max. 50 mm). Používá se ke kalibraci termokamer. Emisivita dutinového černého tělesa bývá většinou 0,99. [30]

Nejdůležitější parametry kalibračního přístroje, které je třeba zohlednit při konkrétní aplikaci jsou: **teplotní rozsah, teplotní rozlišení, průměr otvoru vstupní dutiny, provozní teplota**.



Obr. 25 - Kalibrační dutinové černé těleso DIAS PYROTHERM CS 500 s nastavitelnou teplotou [24]

3.10. Komunikační rozhraní termokamery

Komunikační rozhraní primárně slouží k přenosu dat z termokamery do počítače, externího úložného zařízení, na externí displej nebo televizní přijímač a ke komunikaci se samotným měřicím přístrojem. Nejčastějšími rozhraními jsou **USB**, **WiFi** a **Ethernet** pro přenos dat. Pro komunikaci s měřicím přístrojem se také využívá párové bezdrátové spojení **Bluetooth**. [7]

3.11. Stupeň krytí (IP) termokamer a pyrometrů

Stupeň krytí (**IP**) je jedním z důležitých provozních parametrů, který je nutné zohlednit při výběru měřicího přístroje pro konkrétní aplikaci. Stupeň krytí vyjadřuje odolnost elektrického přístroje proti vniknutí cizího tělesa a tekutin. Při použití speciálního opláštění u termokamer a pyrometrů lze zajistit stupeň krytí až **IP 67**. Přístroj takto označený je zcela odolný vůči vniknutí cizích předmětů, zejména pak vůči prachovým částicím. Přístroj musí také odolat ponoření do vody na 30 minut do hloubky jednoho metru. [7]

3.12. Nejistota měření v infračervené termografii

Infračervená termografie představuje úskalí v podobě zanesení značné nejistoty měření. Nejistota může být způsobena **nepřesným stanovením emisivity** měřeného objektu, dále **zanedbáním atmosférického vlivu**, **nedodržením velikosti měřené plochy** (viz kapitola 3.7.5), nebo **zanedbáním tepla odraženého z okolních zdrojů**. [8]

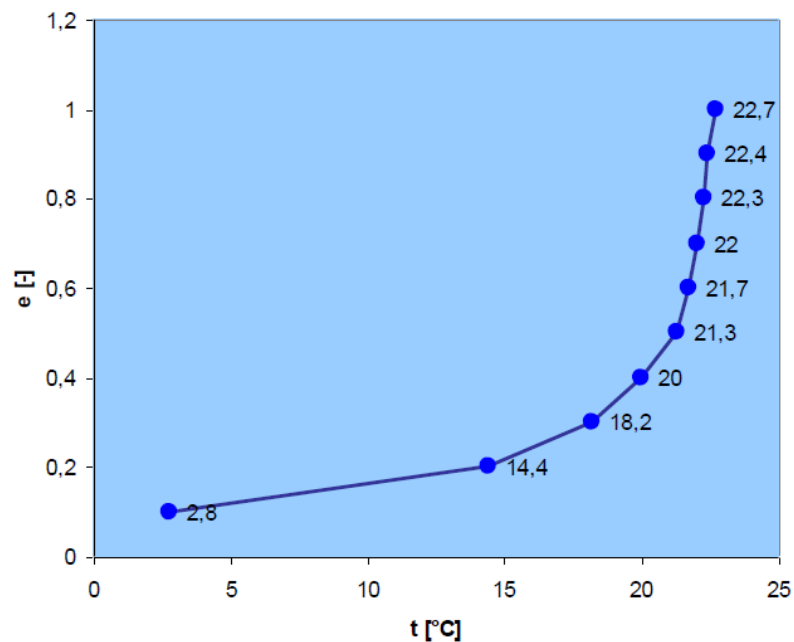
Experimentálně bylo prokázáno, že největší nejistotu do měření zanáší právě nepřesné stanovení emisivity měřeného objektu. Experimentální část této práce by měla podrobně zmapovat vliv teploty materiálu a vliv úhlu měření na stanovení emisivity u vybraných materiálů. Tabulkové hodnoty emisivit se v průmyslových aplikacích ukázaly jako nedostatečně přesné. Vhodnější je stanovit vlastní emisivitu měřeného objektu pomocí normalizovaných postupů. Od hodnoty emisivity 0,6 směrem níže nejistota měření vlivem špatně určené emisivity exponenciálně roste (Obr. 26). Příkladem může být kovově lesklý plech bez povrchové úpravy, jehož emisivita je menší než 0,6. V tomto případě může být emisivita stanovena např.

kontaktní metodou dle normy ČSN ISO 18434-1, nebo nanesením (přípevněním) materiálu s referenční emisivitou na povrch zkoumaného objektu. [8]

Ve stavebnictví je situace opačná. Emisivita běžně používaných materiálů se pohybuje v rozmezí 0,8 – 0,95. V tomto případě lze emisivita stanovit tabulkově, aniž by se do měření vnesla značná nejistota. [8]

Atmosférické vlivy jsou za běžných podmínek naprosto minimální. Experimentální měření ukázalo, že při odchylce relativní vlhkosti o $\pm 15\%$ od skutečné hodnoty na vzdálenost 1 až 20 m, se nejistota měření drží v mezích $\pm 0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Obecně čím menší je emisivita měřeného objektu, tím větší nejistotu do měření vnáší odražený zářivý tok okolí. [8]



Obr. 26 - Závislost zdánlivé povrchové teploty na emisivitě [8]

3.13. Výrobci termokamer a pyrometrů

Následuje stručný výčet nejvýznamnějších výrobců termokamer a pyrometrů včetně základního rozdělení jejich produktů.

3.13.1. FLIR SYSTEMS a WORKSWELL

Společnost FLIR byla založena v roce 1978 jako průkopník ve vývoji vysoce výkonných infračervených zobrazovacích systémů pro letecké aplikace. Akvizice

společností AGEMA (Švédsko) v roce 1998 a INFRAMETRICS (Boston, USA) v roce 1999 poskytla společnosti FLIR inženýrské týmy, prodejní a podpůrnou infrastrukturu. Společnosti AGEMA a INFRAMETRICS představovaly více než 60 let zkušeností s vývojem infračervených kamer a termografickými aplikacemi. V roce 1965 vyvinula společnost AGEMA první komerční infračervený skener určený pro inspekce elektrického vedení. V roce 1997 byla sestrojena první nechlazená termokamera s označením Agema 570. společnost INFRAMETRICS jako první vyvinula televizní infračervený systém kompatibilní s TV v roce 1975 a první plně funkční termokameru s FPA (Focal Plane Array) v roce 1995. [21]



Obr. 27 - Logo společnosti FLIR [21]

Společnost FLIR SYSTEMS disponuje zdaleka nejširší nabídkou termokamer od nejzákladnějších ručních přístrojů po vysoce citlivé, vysokorychlostní termokamery určené pro výzkumné a badatelské aplikace. Portfolio společnosti FLIR obsahuje také termokamery pro noční vidění, pro hasiče, či vozidla a vrtulníky. [21]

V České republice působí společnost WORKSWELL s. r. o, která plní funkci oficiálního zástupce zahraniční společnosti FLIR. Vznikla v roce 2010 a vzešla z akademické půdy ČVUT v Praze. V oblasti bezkontaktního měření organizuje odborné školení, přednášky a intenzivně se podílí na zavádění metodiky bezkontaktního měření teplot v českých i zahraničních společnostech. Firma Workswell rovněž vyvíjí vlastní SW a termokamery. [25]

Termokamery značky Flir jsou odstupňovány v následujících řadách: **Ex**, **Exx**, **K**, **T**, **SC** a **A**. Řada **Ex** představuje nejzákladnější typy termokamer, které jsou určené pro oblasti stavebnictví a průmyslu. Termokamery Ex nenabízejí možnost výměny objektivu. Řada **Exx** je o třídu lepší, nabízí záměnu objektivu a tím i měření z větších vzdáleností. Termokamery třídy **K** jsou konstruovány speciálně jako vybavení pro hasiče. Tomu odpovídá velmi odolná mechanická konstrukce a odolnost zařízení až do teplot cca 260 °C po dobu 5 minut. Řada **T** představuje nejvyšší třídu ručních

termokamer. Termokamery s označením T nabízejí nejvyšší rozlišení detektoru až 640 x 480 pixelů a nejvyšší teplotní citlivost dokonce až 20 mK. Skupiny stacionárních termokamer **SC** a **A** jsou určeny pro nejnáročnější výzkumné aplikace a pro potřeby vědy. Převážně se jedná o termokamery chlazené s fotonovými detektory. [21]

Společnost Workswell nabízí termokamery pro použití v **zemědělství, průmyslu, medicíně**, ale také v **protipožární ochraně**, při **detekci plynů** při **ostraze objektů** nebo jako doplněk **bezpilotních letounů pro hledání pohřešovaných osob**. Termokamera **WIRIS AGRO** je určena pro mapování vodního stresu na velkých plochách v oblasti precizního zemědělství. **MEDICAS** je termovizní plug & play systém, který byl vytvořen jako reakce na vysoké riziko globálního šíření infekčních chorob. Slouží pro měření povrchové teploty kůže, která narůstá v přítomnosti infekce. Takto je možné detekovat prakticky všechny typy virových i bakteriálních chorob. Termokamery s označením **SAFETIS** slouží jako včasná detekce rizika zahoření před vznikem požáru. Velmi zajímavý je systém pro nedestruktivní testování materiálů „**ATI**“ (Active Thermoinspector), který se používá pro kontrolu kvality ve výrobě. **WIRIS PRO** a **WIRIS SECURITY** jsou termokamery konstruované pro bezpilotní letouny a pro různé bezpečnostní aplikace. [25]

3.13.2. MICRO – EPSILON

MICRO – EPSILON je středně velká firma založená v roce 1968 v Ortenburgu ve Spolkové republice Německo (SRN). Patří ke světové špičce v oblasti sensoriky a měřicí techniky. Předmětem činnosti je vývoj a výroba snímačů pro měření vzdálenosti, polohy a profilu, **infračervených teploměrů a kamer pro bezdotykové měření povrchových teplot**, snímačů pro detekci barev a průmyslových endoskopů. Společnost se zabývá rovněž vývojem systémů pro měření rozměrů a zjišťování vad. [20]



Obr. 28 - Logo společnosti MICRO-EPSILON [20]

Společnost MICRO – EPSILON nabízí pyrometry v řadách **CT**, **CT Laser**, **CT/CS Video**, které jsou určeny pro průmyslové aplikace, jakými mohou být např. měření teploty brzd, měření teploty roztavené litiny a oceli ve slévárnách, nebo měření teploty ve sklářském průmyslu. **CT** je základní řada pyrometrů, jejichž teplotní rozsah je – 50 až 2200 °C. Pyrometry řady **CT Laser** nabízí modifikaci v podobě dvou laserových paprsků, pro přesné zaměření na cílový povrch. Řady **CT/CS Video** umožňují paralelní využití video – pozorování s křížovým laserovým zaměřováním. Všechny tyto pyrometry jsou konstrukčně řešeny jako snímače pro zabudování do šasi výrobku či zařízení.

Termokamery shrnuje řada **TIM**. Jedná se o stacionární termokamery pro průmysl, vědu a výzkum. Nová termokamera **TIM M05** pro metalurgii může měřit v teplotním rozsahu od + 900°C do 2450°C, nabízí rozlišení CMOS detektoru 764 x 480 pixelů a možnost výměny objektivu. [20]

3.13.3. OPTRIS

Společnost OPTRIS byla založena v roce 2003 v Berlíně. Produktové portfolio firmy zahrnuje infračervená zařízení pro bezdotykové měření teploty. Mezi tato zařízení patří ruční bezdotykové teploměry, stacionární průmyslové bezdotykové teploměry a infračervené kamery pro bodové i plošné měření teploty. [22]



Obr. 29 - Logo společnosti OPTRIS [22]

Termokamery od firmy OPTRIS mají označení **PI**. **PI** je zkratka pro stacionární termokamery s FPA nechlazenými detektory. Nabízejí možnost výměny objektivů. Pracují v rozsahu vlnových délek 7,5 – 13 μm . Nejvýkonnější termokamera z této produktové skupiny nabízí rozlišení detektoru 764 x 480 pixelů.

Ve firemním portfolio jsou zahrnuty ruční pyrometry s označením **P** a **MS**. S nejvýkonnějším pyrometrem řady P (pyrometr **P20/05M**) lze měřit teplotu v rozsahu od 1000 do 1300°C. [22]

3.13.4. INFRATEC a TMVSS

Společnost INFRATEC sídlí v Drážďanech a byla založena v roce 1991. Nabízí širokou škálu vysoce kvalitních, inovativních produktů a služeb v oblasti infračervené termografie. [19]



Obr. 30 - Logo společnosti INFRATEC [19]

Oficiálním prodejcem a zástupcem na českém trhu je firma TMVSS s.r.o., která se specializuje na prodej a servis měřicí techniky pro energetiku a těžký průmysl od roku 1991. Společně se společností INFRATEC pořádá odborné semináře s názvem „**Termografie pro vědu a výzkum**“. Zabývá se také kalibrací termokamer a pyrometrů. Firma TMVSS Provádí rovněž odborné školení v oblasti termodiagnostiky.

INFRATEC vyrábí dvě řady termokamer s označením **VarioCAM** a **ImageIR**. **ImageIR** jsou špičkové stacionární termokamery pro ty nejnáročnější aplikace, které obsahují chlazené fotonové detektory s rozlišením až 1920 x 1536 pixelů. **VarioCAM** je řada stacionárních a mobilních termokamer s nechlazenými tepelnými detektory s maximálním rozlišením až 1024 x 768 pixelů pro všeobecné využití. [31]

3.13.5. FLUKE

Společnost FLUKE byla založena v roce 1948. Jedná se o nadnárodní korporaci se sídlem ve městě Everett, stát Washington, USA. Výrobní střediska se nacházejí v USA, Velké Británii, Asii a Nizozemsku. Z širokého spektra společností, které spadají pod FLUKE je zapotřebí zmínit společnosti IRCON a RAYTEC. Obě firmy se specializují na vývoj a výrobu IČ teploměrů, pyrometrů a termokamer pro aplikace v průmyslu. Přístroje IRCON a REYTEC se využívají v ocelárnách, sklárnách, při výrobě desek s tištěnými spoji, při výrobě automobilů a v celé řadě dalších průmyslových oborů, kde technologické postupy zavrhuje použití konvenčních termočlánků a sond RTD. [23]



Obr. 31 - Logo společnosti FLUKE [23]

FLUKE nabízí řadu termokamer s rozmanitými parametry. Pro detekci úniku plynu vznikla termokamera **Ti450SF6**. V Plynovém režimu nabízí rozlišení detektoru 320 x 240 pixelů a lze s ní detekovat fluorid sírový (SF₆), který je obsažen v elektrorozvodnách jako izolátor. Fluorid sírový je však i skleníkový plyn, proto je potřeba v rámci údržby kontrolovat případný únik do atmosféry a případně ho eliminovat. Modely termokamer **Ti** a **TiX** nabízejí automatické laserové zaostření pomocí funkce **LaserSharp**. U těchto termokamer nelze měnit objektivy. Rozlišení detektorů je 640 x 480 pixelů. Řada **RSE** představuje stacionární kamery s pevným objektivem. Za zmínku stojí také kapesní termokamera **PTi120** s tepelnou citlivostí 60 mK a s rozlišením detektoru 120 x 90 pixelů. Velikostně lze tento přístroj přirovnat k mobilnímu telefonu. [23]

3.14. Software pro termokamery

Termogramy lze na počítači pohodlně zpracovávat, analyzovat a vyhodnocovat pomocí termografických softwarů. Software slouží pro tvorbu jednoduchých protokolů z měření ve formátu PDF. Používá se pro export snímků z termokamery na disk počítače skrze drátové nebo bezdrátové spojení. Prostřednictvím softwaru se realizují aktualizace vnitřního software termokamery (tzv. firmware), které slouží k opravě chyb nebo pro přidání nových měřicích funkcí. Některé softwary nabízejí možnost přístupu k termogramům z libovolného zařízení pomocí cloudového úložiště. Software umožňuje většinou editovat všech pět parametrů měření: **zdánlivá odražená teplota, emisivita, vzdálenost, teplota atmosféry a vlhkost atmosféry**. Během procesu editace je možné termogramy upravovat dodatečně přidáním měřicích funkcí, jako jsou např. funkce bod, funkce oblast, nebo funkce izoterma, atd.. Pokud termokamera zaznamená i reálnou fotografii, lze jí v prostředí SW zobrazit pro lepší orientaci v naměřených výsledcích a editovat spolu s termogramem. Výrobci ke svým produktům nabízí většinou vlastní software. Na internetových stránkách výrobců se lze

setkat i s mnohými speciálními SW, pro konkrétní aplikace. V následujícím odstavci bude přehled SW, které nabízí společnosti FLIR a Workswell (vybráno záměrně s ohledem na měření experimentu pomocí termokamery **Flir E95**). [19, 21, 23, 25]

Společnost FLIR dodává ke svým produktům softwary: **Flir Tools**, **Flir Tools+** a **Software pro vědu a výzkum**. Flir Tools je základní software pro editaci snímků a tvorbu měřících protokolů. Flir Tools+ je pokročilý software pro tvorbu reportů a záznam radiometrického videa. Software pro vědu a výzkum obsahuje nepřeberné množství nadstandardních funkcí. [21]

Česká společnost Workswell nabízí několik SW: **CorePlayer**, **ThermoConnector**, **ThermoFormat**. CorePlayer umožňuje editaci pořízených dat, tvorbu ucelených reportů z měření a export dat do jiných formátů, kterými jsou např. PNG, AVI. V softwaru jsou dostupné všechny běžné funkce pro analýzu radiometrických dat (např. stanovení teploty v bodě, minimum a maximum v oblasti, teplotní profil, změna teplotního rozsahu, zoom), ale také méně časté funkce (analýza radiometrického videa, včetně střihu sekvencí). ThermoConnector je aplikace pro přidání pluginu pro práci s termokamerami Workswell do softwaru DEWESoft X2. Software ThermoFormat je určen především pro hromadnou úpravu termogramů pořízených systémem Workswell WIRIS (termovizní systém pro drony). [25]

3.15. Termografie v diagnostice svařovacího procesu

Diagnostika svařovacího procesu lze provádět jak metodami **aktivní**, tak i **pasivní** termografie. **Pasivní termografie** pracuje pouze s energií uvolněnou ze samotného svařovacího procesu. Teplota povrchu je měřena on-line (tzn. souběžně) s procesem svařování. Během měření probíhá kontinuální záznam radiometrického videa a naměřené hodnoty jsou následně využity pro stanovení tzv. příznaků, na jejichž základě je rozhodnuto, zda byl svar proveden správně, či nikoliv. Pokud svar nevyhovuje, slouží získaná data pro nastavení optimálních svařovacích parametrů. Nejčastěji se pracuje s teplotními profily a histogramy. Diagnostika pomocí **aktivní termografie** probíhá dodatečně po ukončení svařovacího procesu (neprobíhá on-line). Pracuje s externím zdrojem excitační energie. Zdroj excitační energie bývá v praxi nejčastěji **optický**. Pomocí aktivních metod se zkouší materiál na přítomnost vad nebo defektů (NDT). Trhlina na povrchu svaru vykazuje chování jako **nedokonalé černé těleso**. Tepelné záření, které dopadá do povrchové trhliny („dutiny“) se uvnitř

mnohonásobně odrazí a vždy částečně pohltí. Tento jev doprovází významný nárůst emisivity, který je následně detekován a vyhodnocen v podobě změny povrchové teploty na displeji termokamery. U vnitřních defektů je to obdobné v tom smyslu, že vnitřní vady (např. dutiny nebo vměstky) představují rovněž změnu v pohltivosti záření, což se ve výsledku projeví změnou povrchové emise záření. [32]

4. Rozbor problematiky stanovení odražené zdánlivé teploty a emisivity dle normy ČSN ISO 18434-1

4.1. Odražená zdánlivá teplota a její měření

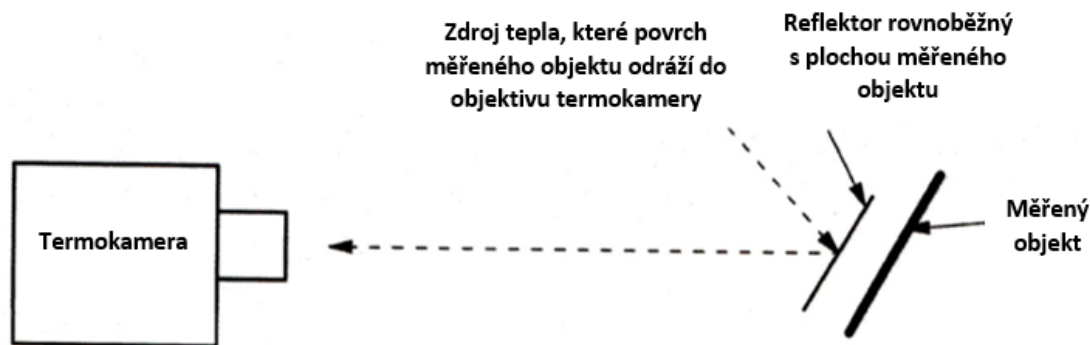
Odražená zdánlivá teplota je zdánlivá teplota jiných objektů, která se odráží od povrchu měřeného objektu na detektor termokamery. Značí se T_{odr} , T_{refl} nebo T_{amb} . Norma ČSN ISO 18434-1 definuje dvě metody stanovení této teploty: **metoda odrazu** a **přímá metoda**. Termokamera, kterou se měří zdánlivá odražená teplota, musí být kalibrována a musí umožňovat vložení hodnot zdánlivé odražené teploty T_{odr} a emisivity ε . [12]

4.1.1. Metoda odrazu

Samotný proces měření odražené zdánlivé teploty T_{odr} metodou odrazu je rozdělen do několika kroků, které jsou shrnuty v tabulce č. 4.

Tab. 4 - Postup stanovení odražené zdánlivé teploty metodou odrazu [12]

Krok	Popis konkrétní činnosti
1.	Na termokameře nastavit vzdálenost $l = 0$ a emisivitu $\varepsilon = 1,00$.
2.	Umístit termokameru do konkrétního místa v definované vzdálenosti (l) od objektu, který se má měřit. Zaměřit termokameru na daný objekt.
3.	Umístit infračervený odražeč (reflektor) před objekt do zorného pole termokamery rovnoběžně s měřenou plochou objektu. Jako odražeč lze využít zmačkaná a opětovně vyrovnaná hliníková folie připevněná na rovnou desku (např. z kartonu) lesklou stranou nahoru. (Obr. 32)
4.	Změřit odraženou zdánlivou teplotu T_{odr} na infračerveném odražeči pomocí termokamery.
5.	Opakovat předchozí kroky alespoň třikrát a zapsat si jednotlivé hodnoty odražených zdánlivých teplot T_{odr} .
6.	Zprůměrovat získané hodnoty T_{odr} a vložit průměrnou hodnotu do vnitřního software termokamery.



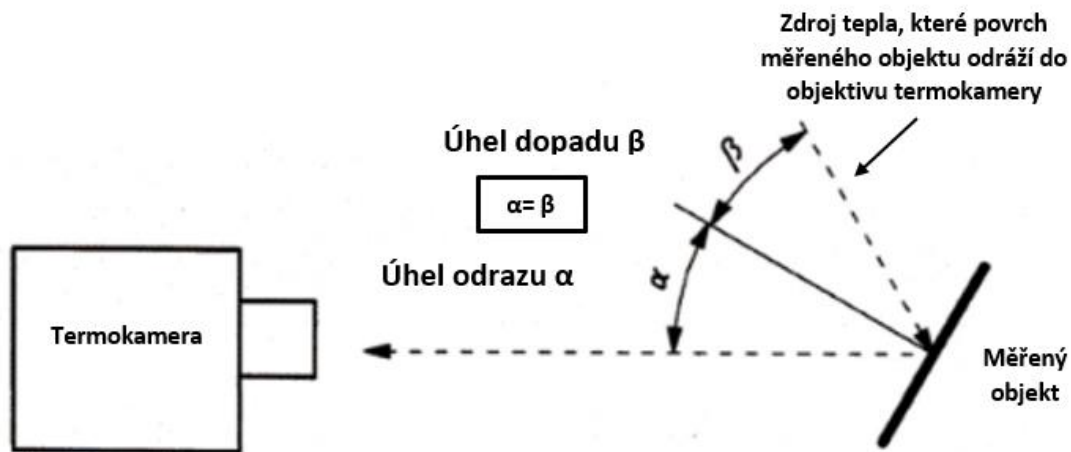
Obr. 32 - Schéma uspořádání při měření metodou odrazu [12]

4.1.2. Přímá metoda

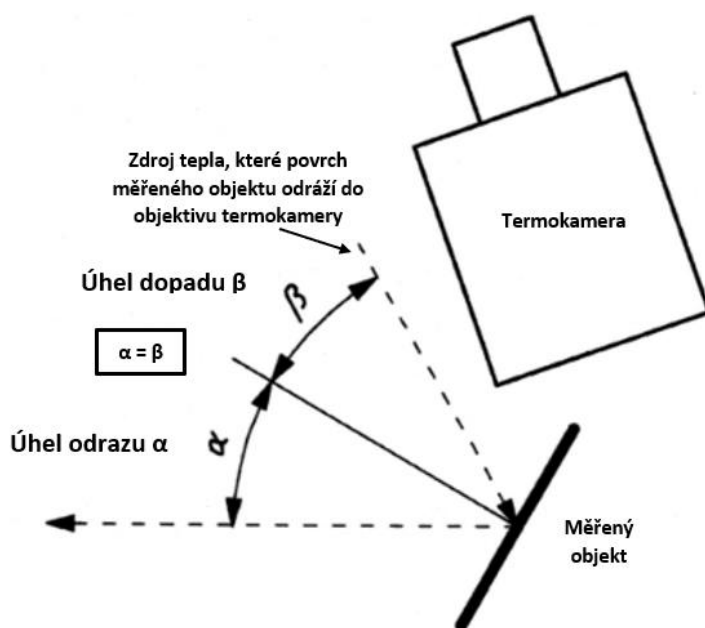
Přímá metoda nevyžaduje využití přídavného infračerveného reflektoru. Měření touto metodou musí probíhat podle následující tabulky č. 5.

Tab. 5 - Chronologický postup měření zdánlivé odražené teploty přímou metodou [12]

Krok	Popis konkrétní činnosti
1.	Na termokameře nastavit emisivitu $\varepsilon = 1,00$
2.	Umístit termokameru do konkrétního místa v definované vzdálenosti (l) od objektu, který se má měřit. Zaměřit termokameru na daný objekt. Odhadnout úhel odrazu α a úhel dopadu β z místa umístění termokamery (Obr. 33).
3.	Umístit termokameru před měřený objekt a zaměřit objektiv na zdroj odraženého záření. Termokamera musí svírat s povrchem měřeného objektu úhel, který odpovídá úhlu odrazu α (Obr. 34).
4.	Pomocí termokamery změřit průměrnou zdánlivou teplotu zdroje odraženého záření (resp. zdrojů). Pro toto měření využít funkci průměrná teplota v oblasti (nebo jinou podobnou funkci), aby došlo ke zprůměrování zdánlivé teploty.
5.	Opakovat předchozí postup alespoň třikrát a zapsat si hodnoty T_{odr} .
6.	Zprůměrovat získané hodnoty T_{odr} a vložit průměrnou hodnotu do vnitřního software termokamery.



Obr. 33 - Přímá metoda (krok č. 2) [12]



Obr. 34 - Přímá metoda (krok č. 3) [12]

4.2. Emisivita a její měření

Norma ČSN ISO 18434-1 definuje dvě metody pro měření emisivity: **kontaktní metoda** a **metoda využívající materiálu s referenční emisivitou**. Obě tyto metody vyžadují kontakt s povrchem měřeného objektu. Při měření emisivity je důležité počítat s teplotním rozdílem mezi odraženou zdánlivou teplotou a měřeným objektem. Teplota měřeného objektu musí být větší nebo menší alespoň o 20 °C vzhledem k odražené zdánlivé teplotě. Pro tyto potřeby lze využít přírodní zdroje tepla. V laboratorních podmínkách se měřené vzorky ohřívají v peci nebo ochlazují v mrazáku. [12]

4.2.1. Kontaktní metoda

Postup měření emisivity kontaktní metodou je rozdělen do několika fází (viz Tab. 6).

Tab. 6 - Návod pro měření emisivity kontaktní metodou [12]

Krok	Popis konkrétní činnosti
1.	Umístit termokameru do konkrétního místa v definované vzdálenosti od objektu (l), který se má měřit. Zaměřit termokameru na daný objekt.
2.	Změřit a vykompenzovat odraženou zdánlivou teplotu T_{odr} od objektu.
3.	Zaostřit termokameru na měřený objekt. Zastavit obraz, pokud je to u konkrétní termokamery možné.
4.	Pomocí vhodné funkce (např. teplota v bodě) stanovit teplotu měřeného bodu ve středu obrazu kamery.
5.	Změřit kontaktním teploměrem teplotu v bodě, ve kterém byla stanovena teplota pomocí termokamery.
6.	Měnit nastavení emisivity v termokameře tak dlouho, dokud se teplota, kterou měří termokamera, neshoduje s teplotou změřenou kontaktně.
7.	Lepší přesnosti lze dosáhnout, pokud se kroky 2-6 opakují nejméně třikrát. Z takto získaných hodnot emisivit stanovit průměrnou hodnotu.
8.	Vykompenzovat emisivitu vložení průměrné hodnoty do vnitřního software termokamery.

4.2.2. Metoda využívající materiálu s referenční emisivitou

Tato metoda spočívá v nanesení materiálu s referenční emisivitou na měřený povrch objektu, což má za následek změnu povrchových vlastností (viz Tab. 7). Modifikací povrchu však nesmí dojít ke změně původní teploty povrchu, jinak by výsledná emisivita byla vyhodnocena chybně. Nejčastěji se využívá **termovizní barva ve spreji** (Obr. 35) nebo **samolepící folie** s vysokou emisivitou. Součástí termovizní barvy je produktový list, který obsahuje přesně definované fyzikální vlastnosti a diagramy závislosti emisivity na vlnové délce, úhlu snímání termokamery a na teplotě měřeného povrchu. [12, 29]



Obr. 35 - Termovizní barva ve spreji od firmy Lab IR [29]

Tab. 7- Postup měření emisivity metodou využívající materiálu s referenční emisivitou [12]

Krok	Popis konkrétní činnosti
1.	Umístit termokameru do konkrétního místa v definované vzdálenosti (l) od objektu, který se má měřit. Zaměřit a zaostřit termokameru na daný objekt.
2.	Změřit a vykompenzovat odraženou zdánlivou teplotu T_{odr} od objektu.
3.	Na část povrchu měřeného objektu nanést materiál s referenční emisivitou (ϵ_R).
4.	Do vnitřního software termokamery zadat známou hodnotu emisivity referenčního materiálu (ϵ_R).
5.	Zaměřit a zaostřit termokameru na upravený povrch měřeného objektu. Změřit a zaznamenat vyhodnocenou teplotu referenčního materiálu (T_{RM}).
6.	Zaměřit a zaostřit termokameru na neupravený povrch měřeného objektu v bezprostřední blízkosti referenčního materiálu. Změřit a zaznamenat vyhodnocenou teplotu neupraveného povrchu (T_M).
7.	Měnit nastavení emisivity v termokameře tak dlouho, dokud se teplota, kterou vyhodnocuje termokamera, neshoduje s teplotou změřenou na upraveném povrchu.
8.	Lepší přesnosti lze dosáhnout, pokud se kroky 3-7 opakují nejméně třikrát. Z takto získaných hodnot emisivit stanovit průměrnou hodnotu.
9.	Vykompenzovat emisivitu vložení průměrné hodnoty do vnitřního software termokamery.

5. Praktická část

5.1. Úvod

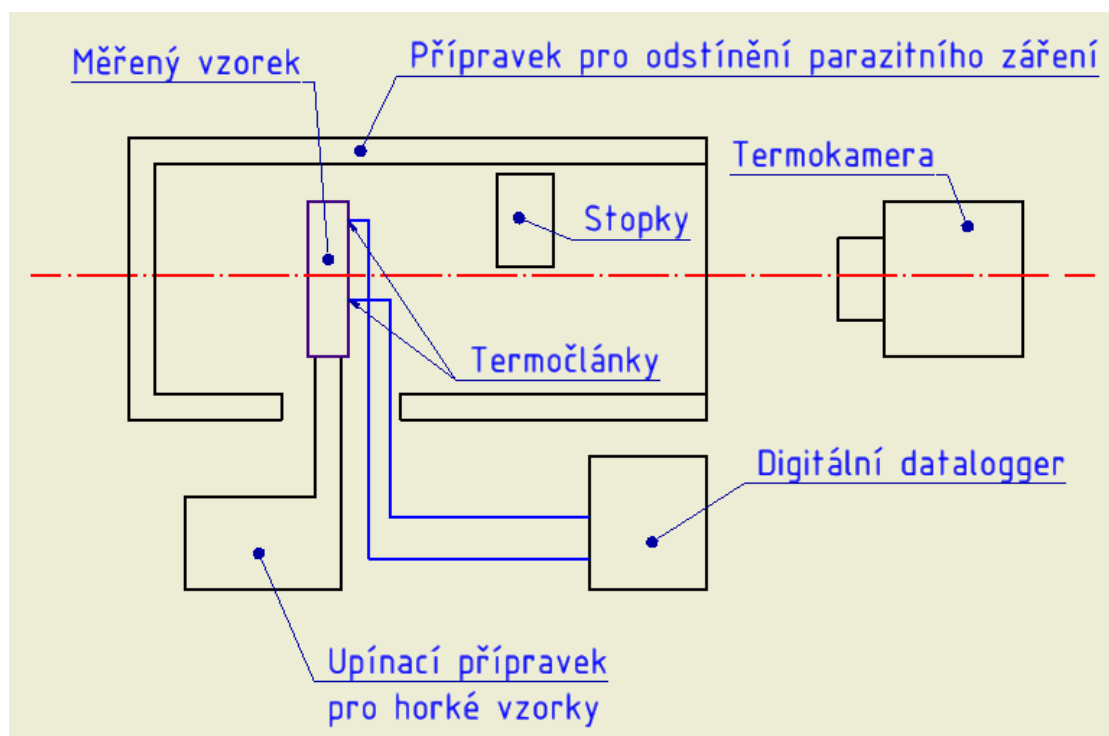
Stěžejním výrazem pro tuto bakalářskou práci je emisivita (viz kapitola 2.13). Hlavním cílem praktické části je realizace experimentu, při kterém bude stanovena směrová emisivita u ocelového vzorku pomocí termokamery se spektrálním rozsahem 7,5 – 14 μm (nechlazený mikrobolometrický detektor). K měření emisivity je užito normalizovaného postupu dle normy ČSN ISO 18436-1 (viz kapitola 4.2.). Zvolený přístup spočívá v umístění termočlánku na měřený povrch vzorku a v následných iteracích ve vyhodnocovacím SW termokamery, kde se mění hodnota emisivity až do chvíle, dokud se teplota vyhodnocovaná termokamerou neshoduje s teplotou snímanou termočlánkem.

Závěrem by mělo být zmapování a zhodnocení změn hodnoty emisivity v závislosti na **změně úhlu snímání termokamery** a na **změně povrchové teploty vzorku**.

5.2. Návrh experimentu

5.2.1. Princip a uspořádání měření

K měření emisivity **kontaktní metodou** lze přistupovat různými způsoby. Pro měření přesné hodnoty povrchové teploty jsou zvoleny termočlánky propojené s digitálním dataloggerem (měřicí stanice). Důležitým krokem je určit, jakým způsobem bude vlastní měření probíhat. Klíčové je stanovení emisivity ocelového vzorku při různých povrchových teplotách a při různých směrech snímání termokamerou. Z těchto předpokladů lze vyvodit dva možné způsoby měření. **První způsob** spočívá v ohřívání měřeného vzorku při současném pořizování termogramů v určitých časových intervalech. **Druhý způsob** pracuje s již ohřátým vzorkem, který je snímán termokamerou během chladnutí. Pořizování termogramů probíhá stejným způsobem jako v předchozím přístupu. S přihlédnutím na přístrojové a materiálové vybavení je zvolen druhý způsob. Pro ohřev je využita elektrická laboratorní pec. První způsob je složitý z hlediska konstrukce a realizace ohřevu měřeného vzorku přímo v měřicí sestavě. Změna směru snímání je realizována pomocí otočného upínacího přípravku na ohřáté vzorky. Termokamera je upnuta ve stativu. Pro měření je důležitá synchronizace času z měřicí stanice s časem pořízení termogramů. K tomuto účelu poslouží stopky zachycené na jednotlivých snímcích. Uspořádání měřicí sestavy je zachyceno na obr. 36.



Obr. 36 - Schéma uspořádání měření

5.2.2. Návrh postupu měření

Měření by mělo probíhat chronologicky dle stanovených bodů:

1. Připravit vzorky pro měření (viz kapitola 5.4).
2. Nastavit tepelný cyklus pece (ohřev na teplotu 600 °C za 30 minut).
3. Umístit přípravek pro horké vzorky do konkrétního místa, které je voleno s ohledem na míru odraženého parazitního záření. Pokud je míra odražené zdánlivé teploty zobrazované na termokameře vysoká, je třeba pracoviště „odstínit“ pomocí speciálního přípravku.
4. Umístit termokameru do předem stanovené a výpočtem ověřené vzdálenosti (viz kapitola 5.5) v příslušném směru k měřenému povrchu.
5. Zvolit vhodný měřicí rozsah termokamery (maximální teplota měřeného vzorku se předpokládá v rozsahu 450 až 520 °C) – nastavit rozsah termokamery do 650 °C.
6. Připravit stopky pro měření času (je třeba nasnímat hodnoty času společně s termografickými daty), aby bylo možné provést synchronizaci teplot z termočládku se získanými termografickými daty.
7. Změřit a vykompenzovat hodnotu odražené zdánlivé teploty ve vyhodnocovacím software termokamery. Odražená zdánlivá teplota je měřena pomocí metody odrazu (viz kapitola 4.1.1).
8. Ohřát vzorek na 550 °C v elektrické peci (výdrž na této teplotě po dobu 10 minut).
9. Vyjmout vzorek z pece a umístit ho do připraveného přípravku. Uzavřít pec a případně ji odstínit, aby nedocházelo k úniku parazitního záření během měření.
10. Zahájit měření povrchové teploty termokamerou se současným měřením teploty pomocí termočládku. Pro vyhodnocování je vhodnější pořizovat jednotlivé termografické snímky oproti videu.
11. Pro zaznamenání změny emisivity s teplotou je vhodné pořizovat termografický snímek každých 10–30 s (nutno vyfotit i s měřením času na stopkách). Pokud se pracuje se synchronizovanou termokamerou a měřicí stanicí, je čas zaznamenáván automaticky (tzn. že termokamera zachytí jak termografická data, tak i reálný obraz).

12. Vyhodnocení naměřených dat:

- Přiřadit konkrétní teploty z termočlátku jednotlivým termogramům podle času ve kterém byly termogramy pořízeny.
- Ve vyhodnocovacím software termokamery měnit hodnotu emisivity postupnými iteracemi, dokud se vyhodnocovaná teplota z termokamery neshoduje s teplotou z termočlátku.

13. Celý postup opakovat pro jednotlivé zvolené úhly odklonu termokamery od povrchové normály.

5.3. Měřicí přístroje, přípravky a další přístrojové vybavení

Termokamera FLIR E95

Pro měření byla využita termokamera, kterou zapůjčila společnost Workswell s.r.o.. Technická specifikace měřicího přístroje je shrnuta v tabulce č. 8.



Obr. 37 - Termokamera FLIR E95 [21]

Tab. 8 - Technická specifikace termokamery FLIR E95 [21]

Rozlišení senzoru	464 x 348 pixelů	Digitální zoom	Ano, 1 – 4x
Teplotní rozsah	-20 až +1500 °C	Fotoaparát	Ano, 5 Mpx
Teplotní citlivost	30 mK	Radiometrické video	Ano
Zorné pole (FOV)	1. 24° x 18° 2. 42° x 32° 3. 14° x 10°	Funkce MSX	Ano
Okamžité zorné pole (IFOV)	1. 0,90 mrad 2. 1,58 mrad 3. 0,53 mrad	Funkce obraz v obraze	Ano
Frekvence snímkování	30 Hz	Funkce UltraMax	Ano
Typ senzoru (FPA) / spektrální rozsah	Nechlazený mikrobolometr / 7,5 – 14 μm	Bluetooth/WiFi	Ano
Software	Flir Tools, Flir Tools +, Workswell CorePlayer	Obrazové poznámky	Ano
Hledáček	Ne	Zabudovaná GPS	Ano
Přesnost	±2 °C nebo ± 2 % z naměřené hodnoty	Váha	1 kg
Stupeň krytí	IP 54	Rozměry (D x Š x V)	278 x 116 x 113 mm
Akumulátor	Li-Ion (2,5 h provoz při plném nabití)	Rozsah provozních teplot	-15 až +50 °C

Zařízení pro navařování termočlánků BT-2



Obr. 37 - Kondenzátorový svařovací zdroj BT - 2

BT-2 je zařízení, které pracuje na principu kondenzátorového výboje. Slouží k navařování termočlánků pro měření teploty. BT-2 je akumulátorový typ pro

navařování i v místech bez přívodu elektrického proudu. Technická data shrnuje tabulka č. 9.

Tab. 9 - Technická specifikace zařízení BT - 2

Maximální průměr drátu [mm]	1,4
Přibližný počet výbojů při plném nabití	800
Nabíjecí proud [mA]	150
Napájecí napětí – AC [V]	220
Nabíjecí doba akumulátoru [hod]	cca 5
Váha [kg]	2,5
Krytí	IP 23
Rozměry [mm]	130 x 140 x 175

Univerzální měřicí ústředna AHLBORN ALMEMO 5690-2

Měřicí stanice ALMEMO 5690-2 představuje modulární systém, který lze nakonfigurovat dle přání uživatele. Stanice je vybavena podsvíceným grafickým displejem s rozlišením 128 x 128 bodů. Umožňuje zobrazení měřených hodnot jednotlivě, po skupinách, nebo formou liniového grafu a sloupcových diagramů. Použití A/D Delta-Sigma převodníku s rozlišením 24 bitů zaručuje vysokou přesnost během měření. Rychlost měření je 2,5 až 100 měření za sekundu. Při plném osazení vstupními kartami lze připojit 99 snímačů a využít 100 měřících kanálů s volbou až 70 měřících rozsahů.

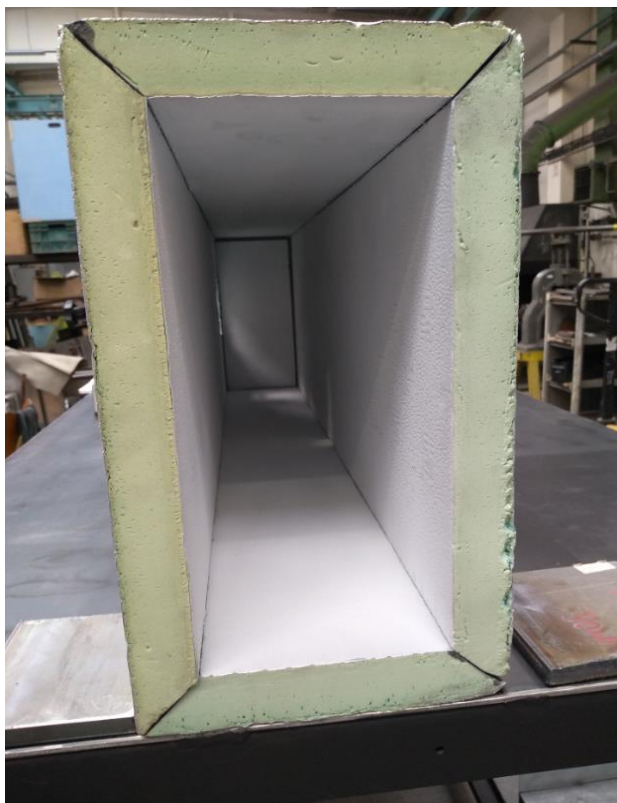


Obr. 38 - Digitální datalogger AHLBORN ALMEMO 5690-2

Pro měření teploty jsou použity termočlánky typu **K** (rozsah měřitelných teplot je -200 až 1250 °C).

Přípravek pro odstínění parazitního záření

Pro odstínění parazitního záření z okolních zdrojů slouží tzv. „měřící tunel“ (viz obr. 39). Pro výrobu posloužila polyuretanová deska potažená hliníkovou folií. Vzhledem k nízké emisivitě a vysoké odrazivosti bylo potřeba modifikovat vnitřní stěny tunelu barvou s vysokou referenční emisivitou, aby nedocházelo ke znehodnocení naměřených údajů. Platí, že čím menší emisivita je, tím větší je odrazivost a naopak. Pro modifikaci povrchu byla zakoupena termografická barva ve spreji ThermaSpray 500 od firmy “TMVSS” spol. s.r.o. (viz obr. 40). Barva má referenční emisivitu $\varepsilon = 0,97$ a je odolná do 500°C.



Obr. 39 - Přípravek pro odstínění parazitního záření



Obr. 40 - termografická barva

Laboratorní elektrická pec ZC (Zlatarna-Celje)

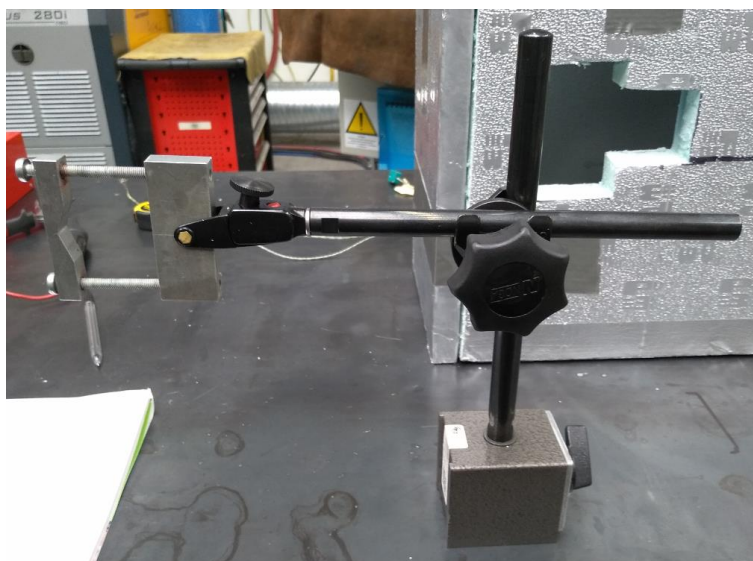
Použitá laboratorní pec má výkon 2500 W. Maximální možná teplota je 1200 °C (viz obr. 41). Rozměry vnitřní části šamotové vyzdívky jsou 200 x 100 x 250 mm.



Obr. 41 - Laboratorní elektrická pec

Upínací přípravek pro ohřáté vzorky

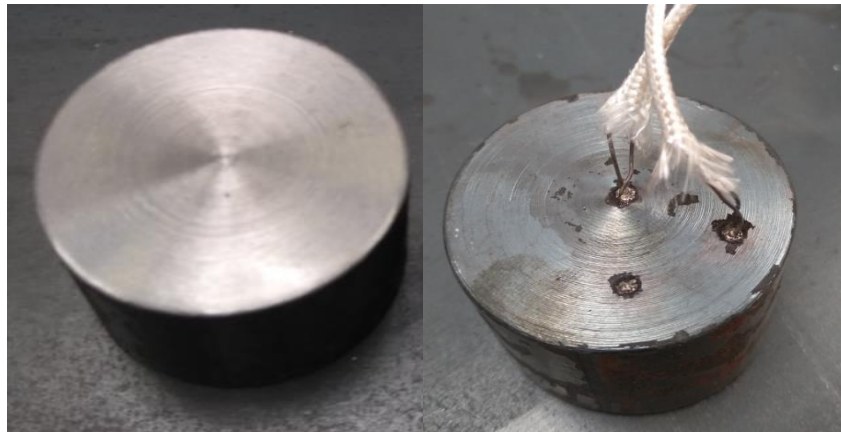
Pro upínání horkých vzorků slouží stavitelný magnetický stojánek určený pro upínání úchylkoměru (viz obr. 42). Nastavení různých úhlů snímání vzhledem k povrchové normále je realizováno pomocí digitálního úhloměru.



Obr. 42 - Magnetický stojánek

5.4. Příprava vzorků

Jako vzorek je zvolen přířez kruhové tyče o průměru **40 mm** a délce **25 mm**. Materiál tyče je ocel **S355J2+AR**. Označení oceli odpovídá evropskému značení dle normy ČSN EN ISO 1027-1. Písmeno **S** představuje konstrukční ocel a **příslušné trojčíslí** označuje minimální stanovenou mez kluzu R_e [$N/mm^2 = MPa$] pro nejmenší rozsah tloušťky výrobku. Přídavný symbol **J2** představuje minimální zaručenou nárazovou práci **27 J** při zkušební teplotě **- 20 °C**. Symbol **AR** značí válcováno (bez zvláštních podmínek na válcování a tepelné zpracování). K povrchu vzorku jsou přivařeny dva termočlánky (viz obr. 43).



Obr. 43 - Ocelový vzorek (v pravé části s přivařenými termočlánky)

Tab. 10 - Chemické složení oceli S 355 J2 + AR v hm. % [34]

C	0,16	Ni	0,010
Mn	1,45	Mo	0,003
Si	0,166	V	0,001
P	0,012	Sn	0,001
S	0,013	As	0,001
Cu	0,03	Ti	0,001
Cr	0,03		

Tab. 11 - Mechanické vlastnosti oceli dle inspekčního certifikátu [34]

Mez kluzu R_e [$N \cdot mm^{-2}$]	331
Mez pevnosti R_m [$N \cdot mm^{-2}$]	523
Tažnost A_5 [%]	34,8
Kontrakce Z [%]	65,2

5.4.1. Drsnost měřeného povrchu

Vyhodnocení drsnosti bylo provedeno pomocí drsnoměru **Mitutoyo Surftest SJ-301**. Naměřené hodnoty drsnosti měřeného povrchu jsou **Ra 3,36 μm** a **Rz 19,38 μm** (viz tab. 12).

Tab. 12 - Naměřené hodnoty drsností a vyhodnocení

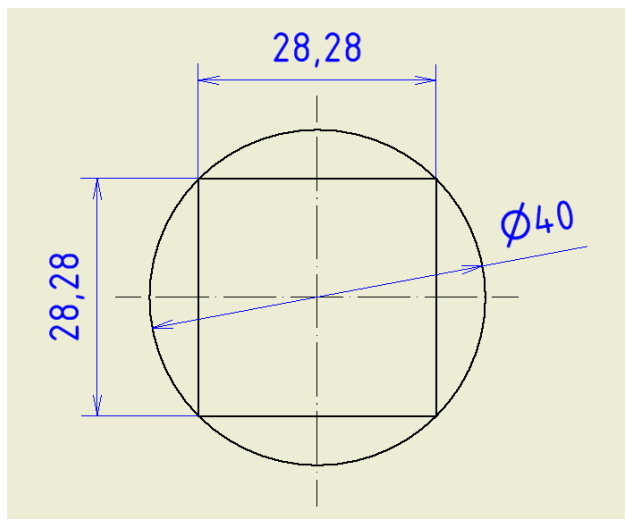
Č. měření	Ra [μm]	Rz [μm]
1	3,08	14,09
2	2,84	15,95
3	3,12	18,53
4	3,88	23,40
Pootočeno o 90°		
5	3,12	17,55
6	4,13	26,59
7	3,58	20,2
8	3,12	18,73
Aritmetický průměr	3,36	19,38

5.4.2. Čistění vzorku mezi ohřevy

Během ohřevu v peci a následného chladnutí vzorku v přípravku dochází k povrchové oxidaci. Na povrchu ocelového vzorku dochází k růstu **okují**, které mohou být tvořeny třemi stabilními oxidy: **FeO** – oxid železnatý (wüstit), **Fe_3O_4** – oxid železnato-železitý (magnetit) a **Fe_2O_3** – oxid železitý (hematit). Vzhledem k opakovanému ohřevu a měření vzorku je před každým měřením provedeno očištění povrchu pomocí ocelového kartáče ve dvou navzájem kolmých směrech. Čistění slouží k zachování podobných podmínek během bezkontaktního měření teploty.

5.5. Návrh velikosti měřené plochy a vzdálenosti měření

Pro stanovení přesné mezní vzdálenosti měření $l_{skut.}$ (viz kapitola 3. 7. 5) volím na příslušném vzorku čtvercovou oblast o hraně **$a = 28,28 mm$** (viz Obr. 38).



Obr. 38 - Návrh velikosti měřené plochy

Výpočet skutečné mezní vzdálenosti měření $l_{skut.}$ pro termokameru FLIR E95 a zvolený vzorek (viz kapitola 3. 7. 5):

<u>Rozlišení senzoru:</u>	464 x 348 pixelů
<u>Zorné pole (FOV):</u>	24° x 18°
<u>Skutečná velikost vzorku:</u>	$v_{skut.} = 28,28 \text{ mm}$

Tab. 13 - Výpočet skutečné mezní vzdálenosti měření pro 24 ° objektiv a termokameru FLIR E95

Okamžité zorné pole IFOV [mrad]	0,90230
Okamžité zorné pole IFOV [mm]	13,53
Zvolená vzdálenost l [mm]	15000
Teoretický optický poměr velikosti bodu	13,53 : 15000
Skutečná mezní vzdálenost $l_{skut.}$ [mm]	10450,85

Na základě vypočítaných hodnot skutečné mezní vzdálenosti navrhuji pro zvolenou termokameru stejnou vzdálenost měření (objekt-objektiv) $l_{měření} = 1,5 \text{ m}$. Navrhovaná vzdálenost měření musí být vždy menší nebo rovna skutečné mezní vzdálenosti, aby nedocházelo k zanášení chyby do procesu měření. Do vzdálenosti 10,4 m je zvolená sestava termokamera-objektiv vhodná pro přesné měření teploty na zvolené oblasti (viz tab. 13).

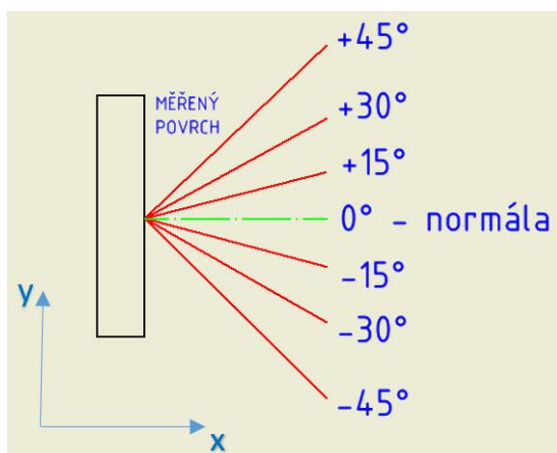
5.6. Vlastní měření

Nejprve se upraví hodnoty měřících parametrů ve vnitřním SW termokamery. **Emisivita** se nastaví na hodnotu černého tělesa ($\varepsilon = 1$). Změří se **odražená zdánlivá teplota, teplota okolí, relativní vlhkost a vzdálenost objekt - objektiv**. Naměřené hodnoty se rovněž vloží do vnitřního SW termokamery. Na závěr se zvolí vhodný rozsah měření (v tomto případě 0 – 650 °C). Vlastní měření začíná po ustavení upínacího přípravku s horkým vzorkem do měřícího tunelu. Pořizování jednotlivých termogramů probíhá v časových intervalech **20 s**. Jedno měření trvá přibližně hodinu čistého času, dokud teplota vzorku neklesne na **50 °C**. Teplota 50 °C je zvolena s přihlédnutím na doporučení normy ČSN ISO 18434-1. Teplota měřeného objektu musí být větší nebo menší alespoň o 20 °C vzhledem k odražené zdánlivé teplotě.



Obr. 39 - Měřící pracoviště

Celkem experiment zahrnuje **sedm** měření při různých směrech snímání povrchu vzorku (viz obr. 40 a tab. 14).



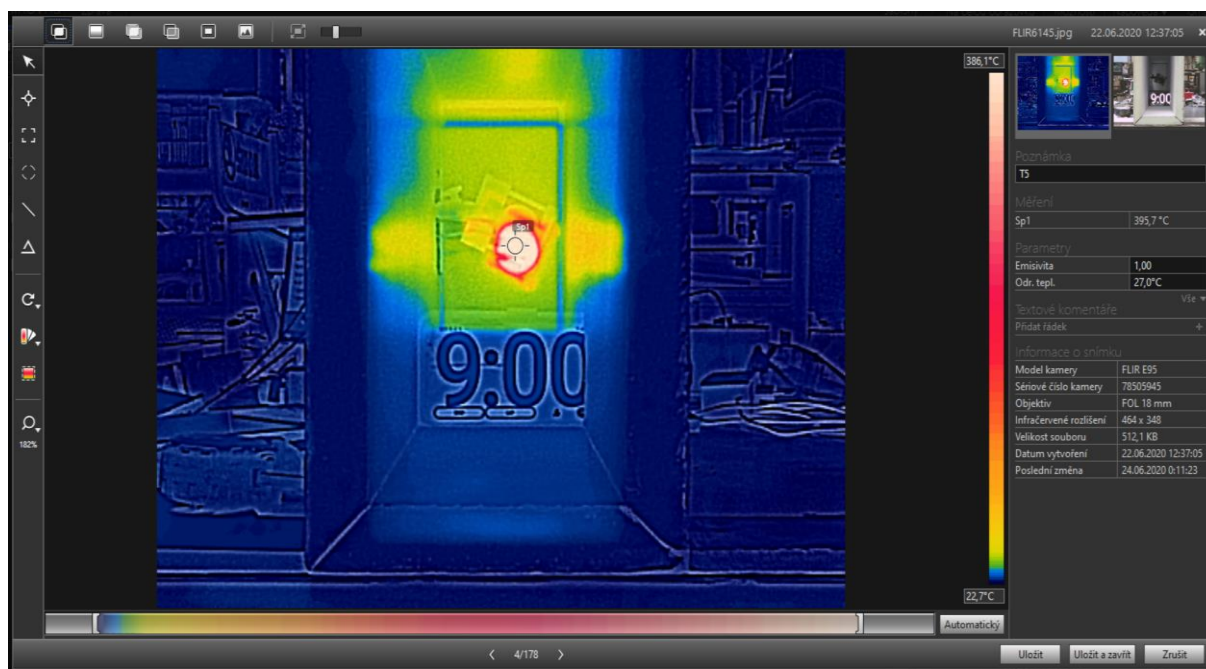
Obr. 40 - Zvolené úhly snímání

Tab. 14 - naměřené hodnoty (přehled příloh)

Měření č.	Úhel odklonu od normály	Naměřená data
1	0°	Příloha 1
2	+15°	Příloha 2
3	+30°	Příloha 3
4	+45°	Příloha 4
5	-15°	Příloha 5
6	-30°	Příloha 6
7	-45°	Příloha 7

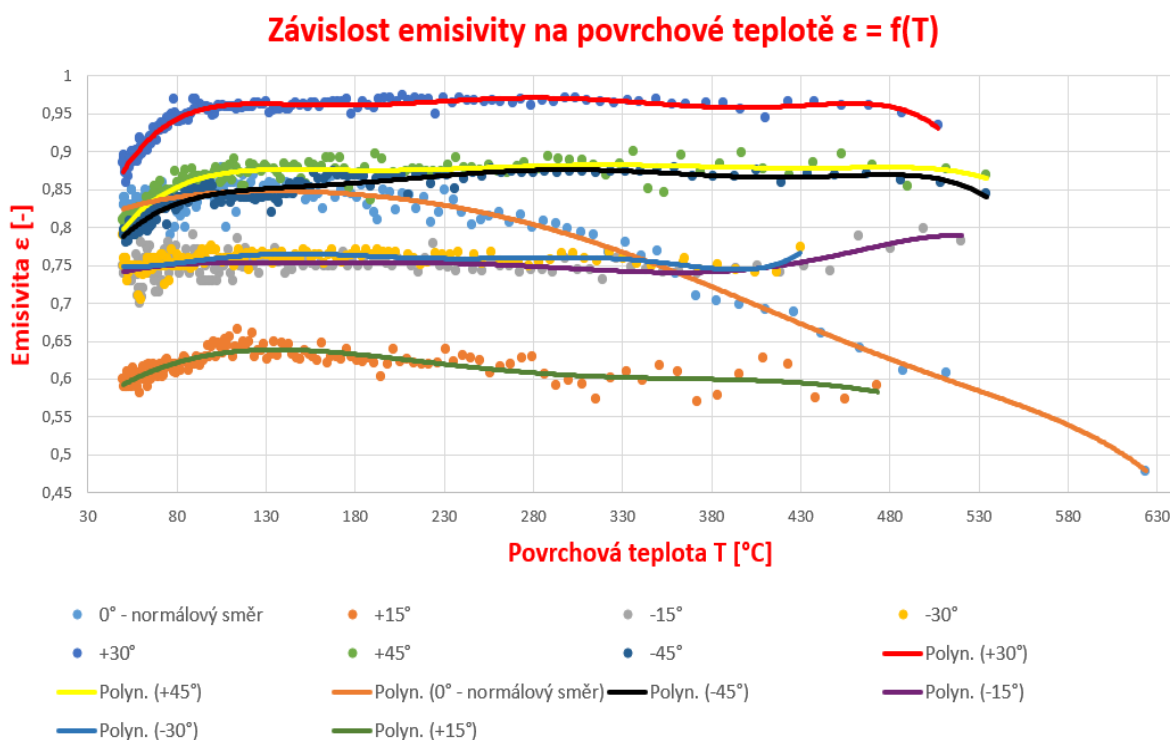
5.7. Vyhodnocení měření

V první řadě je důležité synchronizovat reálný čas z měřicí stanice Almemo a jednotlivým pořízeným termogramům přiřadit konkrétní teplotu. Vlastní vyhodnocení měření pak probíhá v software **Flir Tools** (viz kapitola 3.14). Postupnými změnami hodnoty emisivity v tomto software se docílí shody v teplotách. Přiřazené hodnoty emisivity jednotlivým teplotám se nacházejí v tabulkách v kapitole č. 9. Pro vyhodnocení byla zvolena funkce „**bod**“ (viz obr. 41).



Obr. 41 - prostředí vyhodnocovacího SW Flir Tools – funkce MSX

Na obrázku č. 41 lze vidět umístěné stopky v záběru termokamery pro lepší orientaci v pořízených termogramech.



Obr. 42 - Vyhodnocená měření pro zvolené úhly snímání

Obrázek č. 42 znázorňuje změny v hodnotách emisivity v závislosti na teplotě při různých úhlech snímání. Zajímavý je průběh emisivity v normálovém směru. Emisivita s rostoucí teplotou nejprve mírně roste do teploty 100 °C a poté při teplotě přibližně 180 °C začíná prudce klesat. Ostatní úhly snímání nevykazují tak prudký pokles emisivity s rostoucí teplotou. Emisivitu lze naopak považovat přibližně za konstantní v poměrně širokém teplotním intervalu. Oba úhly $\pm 45^\circ$ mají velmi podobný průběh. Největší rozdíly mezi sebou vykazují měření pod úhly 15° a 30° vzhledem k povrchové normále. Různé hladiny emisivity těchto měření lze přisuzovat vzniklým okujím na měřeném povrchu. Do 180 °C lze pozorovat velmi podobný trend v průbězích jednotlivých křivek.

Z naměřených hodnot vyplývá, že přesněji bude termokamera měřit teplotu v širším teplotním intervalu (přibližně 100 až 400 °C) při úhlech snímání povrchu 30° a 45° oproti normálovému směru.

5.8. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo stanovit emisivitu jako funkci úhlu pro různé povrchové teploty u vzorku z oceli S355J2+AR. Pro měření emisivity byl navržen experiment založený na principu kontaktní metody dle normy ČSN ISO 18434-1 (viz kapitola 4.2.1). Experiment spočíval v ohřátí ocelového vzorku a v následném měření teploty pomocí termočlánků při souběžném pořizování termogramů během chladnutí. Uskutečnilo se celkem sedm měření pro vybrané úhly snímání (viz kapitola 5.6).

Vyhodnocení termogramů proběhlo v software Flir Tools. Naměřené hodnoty byly vyneseny do bodového grafu a proloženy regresní křivkou (viz obr. 42). Získané křivky jednotlivých měření slouží pro zmapování změn hodnoty emisivity v závislosti na úhlu měření a na povrchové teplotě (viz kapitola 5.7). Další velký vliv na hodnotu emisivity má vznik okují na měřeném povrchu. Povrchová oxidace není rovnoměrná, což vede k odlišným podmínkám během provedených měření.

V návaznosti na provedený experiment by bylo vhodné pokračovat sérií dalších měření v rámci diplomové práce. Vznik okují je možné eliminovat nanesením termografické barvy s vysokou referenční emisivitou na měřený povrch v několika vrstvách. Pro experiment lze využít černou barvu ThermaSpray 800 s odolností do 800 °C. Pro každé měření by bylo vhodné použít nový zkušební vzorek ze stejného materiálu (eliminovat by se tím vznik okují a změna měřeného povrchu). V rámci vyhodnocení je možné rovněž využít funkci „oblast“ a pracovat s průměrnou hodnotou teploty. Další měření by mohla dále posloužit pro **zmapování vlivu opakovaného ohřevu ocelového vzorku na hodnotu emisivity při různých úhlech snímání povrchu**. Experimentální měření by bylo založené na kombinaci kontaktní metody a metody využívající materiálu s referenční emisivitou.

6. Použité literární zdroje

- [1] VOLLMER, Michael a Klaus-Peter MÖLLMANN. *Infrared thermal imaging: fundamentals, research and applications*. Weinheim: Wiley-VCH, 2010. ISBN 978-3-527-40717-0
- [2] KADLEC, Karel. Teoretické základy bezdotykového měření teploty: (část 1). *AUTOMA* [online]. 2014, 12(2), 3 [cit. 2019-10-31]. ISSN 1210-9592. Dostupné z: https://www.automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/52890.pdf
- [3] SOVA, Jan a Karel KADLEC. Termokamery a pyrometry-princip, měření, vlastnosti a využití. *All For Power* [online]. 2014, (1), 11 [cit. 2019-10-31]. ISSN 1802-8535. Dostupné z: http://www.allforpower.cz/UserFiles/file/termokamery_1.pdf
- [4] KARWA, Rajendra. *Heat and Mass Transfer* [online]. Singapore: Springer Singapore, 2017 [cit. 2019-10-31]. DOI: 10.1007/978-981-10-1557-1. ISBN 978-981-10-1556-4.
- [5] ĎAĎO, Stanislav a Marcel KREIDL. *Senzory a měřicí obvody*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1996. ISBN 80-01-01500-9
- [6] NOŽIČKA, Jiří. *Základy termomechaniky*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02409-1.
- [7] SOVA, Jan a Jan KOVÁŘ. Termokamery a pyrometry. *AUTOMA* [online]. 2014, 12(2), 7 [cit. 2019-10-31]. ISSN 1210-9592. Dostupné z: https://www.automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/52891.pdf
- [8] LANGHAMMER a TŮMOVÁ. Vlivy dílčích nejistot měření na celkovou nejistotu měření v infračervené termografii. *ElectroScope* [online]. 2013, 7(3), 4 [cit. 2019-10-31]. ISSN 1802-4564. Dostupné z: http://ek702p10-ket.fel.zcu.cz/images/PDF/Rocnik2013/Cislo3_2013/r7c3c8.pdf
- [9] LEPIL, Oldřich a Přemysl ŠEDIVÝ. *Fyzika pro gymnázia*. 6. vyd. Praha: Prometheus, 2010. ISBN 978-80-7196-385-1.
- [10] SOPKO, Bruno, Ladislav SAMEK a František ČERNÝ. *Fyzika II*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03194-2.

- [11] Panoramatický snímek NTK v Dejvicích v Praze. In: *Termogram.cz* [online]. Praha [cit. 2019-11-26]. Dostupné z: <http://www.termogram.cz/img/galery/knihovna.png>
- [12] ČSN ISO 18434-1. *Monitorování stavu a diagnostika strojů-Termografie-Část 1: Všeobecné postupy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [13] Konstrukce termokamery. *Termokamera.cz* [online]. Praha [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/konstrukce-termokamery/>
- [14] SOVA, Jan. *Centrum Termografie: Principy IČT*. Praha, 2012.
- [15] KADLEC, Karel. Bezdotykové snímače provozních veličin-Přednosti a omezení (část 1). *AUTOMA* [online]. 2016, 13(11), 6 [cit. 2020-02-03]. ISSN 1210-9592. Dostupné z: https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/9184.pdf
- [16] KADLEC, Karel. Teoretické základy bezdotykového měření teploty (část 2). *AUTOMA* [online]. 2014, 11(4), 3 [cit. 2020-02-03]. ISSN 1210-9592. Dostupné z: https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/52626.pdf
- [17] Funkce termokamery. *Termokamera.cz* [online]. Praha [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/funkce-termokamery/>
- [18] Parametry termokamery. *Termokamera.cz* [online]. Praha [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/parametry-termokamery/>
- [19] INFRADEC. *Infratec.eu* [online]. [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <https://www.infratec.eu/>
- [20] MICRO-EPSILON. *Micro-epsilon.cz* [online]. [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <https://www.micro-epsilon.cz/>
- [21] FLIR. *Termokamery-flir.cz* [online]. [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <https://www.termokamery-flir.cz/>
- [22] OPTRIS INFRARED MEASUREMENTS. *Optris.cz* [online]. [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <https://www.optris.cz/>

- [23] FLUKE. Fluke.com [online]. [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <https://www.fluke.com/cs-cz>
- [24] Kalibrační černé těleso DIAS PYROTHERM CS 500. In: W-technika.cz [online]. [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: https://www.w-technika.cz/out/pictures/z1/PYROTHERM_CS_500_z1.png
- [25] WORKSWELL INFRARED CAMERAS AND SYSTEMS. Workswell.cz [online]. [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <https://workswell.cz/>
- [26] NUNAK, T., K. RAKRUEANGDET, N. NUNAK a T. SUESUT. Thermal Image Resolution on Angular Emissivity Measurements using Infrared Thermography. IMECS [online]. Hong Kong, 2015, 5 [cit. 2020-02-28]. ISSN 2078-0966. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/fcf0/8b9169ae0e6e06ab620d290215d967600167.pdf>
- [27] STRAKA, Václav a Pavel PETRÁŇ. Způsoby a prostředky navýšení technických parametrů termografických radiometrických kamer s mikrobolometrickými detektory. Řízení a údržba průmyslového podniku [online]. Český Těšín: Trade Media International, 2019, 12(4), 4 [cit. 2020-03-08]. ISSN 1803-4535. Dostupné z: [http://udrzbapodniku.cz/index.php?id=47&no_cache=1&tx_ttnews\[tt_news\]=8060&cHash=abcbccdeed&type=98](http://udrzbapodniku.cz/index.php?id=47&no_cache=1&tx_ttnews[tt_news]=8060&cHash=abcbccdeed&type=98)
- [28] Na jakou vzdálenost můžete měřit? Klíčem k odpovědi je optický poměr velikosti bodu. DPS Elektronika od A do Z [online]. Liberec: CAD ware, 2018, 9(6), 2 [cit. 2020-03-08]. ISSN 1805-5044. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/mereni/id:57601/na-jakou-vzdalenost-muzete-merit-klicem-k-odpovedi-je-opticky-pomer-velikosti-bodu>
- [29] Paints.LabIR.cz. LabIR.cz [online]. Plzeň [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: https://paints.labir.cz/?_ga=2.81339799.1205992631.1583996854-1853824658.1583763466
- [30] Kalibrační postup termokamery. Praha, 2013. Dostupné také z: http://spolky.csvts.cz/cms/sites/default/files/kp_3230213_termokamery.pdf
- [31] TMVSS.cz [online]. [cit. 2020-03-18]. Dostupné z: <https://www.tmvss.cz/>

- [32] SOVA, Jan, Jan KOVÁŘ, Petr VÁVRA a Ladislav KOLAŘÍK. Termovizní diagnostika svařovacích procesů. In: Tlak 2018: sborník přednášek. Líbeznice: Medim, spol. s.r.o, 2018. ISBN 978-80-87140-49-9.
- [33] BERGMAN, Theodore, Adrienne LAVINE, Frank INCROPERA a David DEWITT. Fundamentals of heat and mass transfer [online]. 7th ed. Hoboken: John Wiley, 2011 [cit. 2020-03-18]. ISBN 978-0470-50197-9. Dostupné z: https://docs.google.com/file/d/0B3_fsg2ipzHca0NkUkpjcThFNnc/view
- [34] Inspekční certifikát 3.1, EN 10204:2004: Ocel S355J2 + AR. Dąbrowa Górnicza, 2019.

7. Seznam obrázků

Obr. 1 - Bezdotykové měření teploty [3].....	13
Obr. 2 - Termogram (panoramatický snímek NTK v Dejvicích) [11].....	13
Obr. 3 – Složky elektromagnetického vlnění [1]	16
Obr. 4 - Záření využívané při bezkontaktním měření teploty [2].....	17
Obr. 5 - Závislost spektrální intenzity záření černého tělesa na vlnové délce pro jednotlivé teplotní hladiny – grafické znázornění Planckova vyzařovacího zákona [1]	19
Obr. 6 – Celková intenzita záření černého tělesa jako obsah plochy pod křivkou [1]	20
Obr. 7 - Interakce záření s objektem [2].....	22
Obr. 8 - Závislost emisivity na vlnové délce pro jednotlivé zářiče [1].....	24
Obr. 9 - Emisivita jako funkce odklonu měřícího zařízení od povrchové normály [1]	26
Obr. 10 - Vliv propustnosti atmosféry a záření okolního prostředí [8].....	27
Obr. 11 - Blokové schéma termokamery a pyrometru [15].....	28
Obr. 12 - Schéma Peltierova článku a vícestupňové zapojení [1]	30
Obr. 13 - Propustnost atmosféry v závislosti na vlnové délce [18]	32
Obr. 14 - Rozdíly v termogramech u infračervených kamer s různou teplotní citlivostí - NETD [18]	33
Obr. 15 - Ilustrativní nákres maticového detektoru o rozlišení 6 x 6 [18].....	34
Obr. 16 - Příklad výpočtu parametru IFOV a vzdálenosti měřeného bodu podle výše uvedených vztahů v programu MS Excel	38
Obr. 16 - Schematické znázornění parametrů FOV a IFOV	38
Obr. 17 - Funkce bod na termokameře značky FLIR [17]	39
Obr. 18 - Funkce oblast na termokameře FLIR [7]	39
Obr. 19 - Funkce teplotní profil [7].....	40
Obr. 20 - Funkce „izoterma nad“ - vpravo klasický termogram, vlevo oblasti vykreslené funkcí [7]	40
Obr. 21 - Funkce MSX [7]	41
Obr. 22 - Funkce obraz v obraze [17].....	41
Obr. 23 - Funkce blending [7].....	42
Obr. 24 - Funkce teplotní prolnutí [17].....	42
Obr. 25 - Kalibrační dutinové černé těleso DIAS PYROTHERM CS 500 s nastavitelnou teplotou [24]	43
Obr. 26 - Závislost zdánlivé povrchové teploty na emisivitě [8]	45

Obr. 27 - Logo společnosti FLIR [21]	46
Obr. 28 - Logo společnosti MICRO-EPSILON [20].....	47
Obr. 29 - Logo společnosti OPTRIS [22].....	48
Obr. 30 - Logo společnosti INFRADEC [19]	49
Obr. 31 - Logo společnosti FLUKE [23].....	50
Obr. 32 - Schéma uspořádání při měření metodou odrazu [12]	54
Obr. 33 - Přímá metoda (krok č. 2) [12].....	55
Obr. 34 - Přímá metoda (krok č. 3) [12].....	55
Obr. 35 - Termovizní barva ve spreji od firmy Lab IR [29].....	57
Obr. 36 - Schéma uspořádání měření.....	59
Obr. 37 - Termokamera FLIR E95 [21].....	61
Obr. 37 - Kondenzátorový svařovací zdroj BT - 2	62
Obr. 38 - Digitální datalogger AHLBORN ALMEMO 5690-2	63
Obr. 40 - termografická barva	64
Obr. 39 - Přípravek pro odstínění parazitního záření	64
Obr. 41 - Laboratorní elektrická pec.....	65
Obr. 42 - Magnetický stojánek.....	65
Obr. 43 - Ocelový vzorek (v pravé části s přivařenými termočlánky).....	66
Obr. 38 - Návrh velikosti měřené plochy	68
Obr. 39 - Měřicí pracoviště.....	69
Obr. 40 - Zvolené úhly snímání.....	69
Obr. 41 - prostředí vyhodnocovacího SW Flir Tools – funkce MSX	70
Obr. 42 - Vyhodnocená měření pro zvolené úhly snímání	71

8. Seznam tabulek

Tab. 1 - výběr základních teplot pro znázornění vzájemných vztahů jednotlivých stupnic [1].....	15
Tab. 2 - Rozdělení infračerveného záření podle pásem vlnových délek [1, 2]	16
Tab. 3 - Informativní hodnoty emisivity pro vybrané materiály (povrchy) při $\lambda = 8$ až $15\mu\text{m}$ [13].....	24
Tab. 4 - Postup stanovení odražené zdánlivé teploty metodou odrazu [12].....	53
Tab. 5 - Chronologický postup měření zdánlivé odražené teploty přímou metodou [12].....	54
Tab. 6 - Návod pro měření emisivity kontaktní metodou [12]	56
Tab. 7- Postup měření emisivity metodou využívající materiálu s referenční emisivitou [12]	57
Tab. 8 - Technická specifikace termokamery FLIR E95 [21].....	62
Tab. 9 - Technická specifikace zařízení BT - 2	63
Tab. 10 - Chemické složení oceli S 355 J2 + AR v hm. %	66
Tab. 11 - Mechanické vlastnosti oceli dle materiálového listu	66
Tab. 12 - Naměřené hodnoty drsností a vyhodnocení	67

9. Přílohy

Příloha 1 – Naměřené teploty pomocí termočlánku a příslušné hodnoty emisivit stanovené pomocí software FLIR Tools pro úhel 0° (měření č. 1)

Použitá termokamera		Odražená zdánlivá teplota			Atmosférická teplota		Relativní vlhkost		Vzdálenost měření
FLIR E95		27°			24°		50 %		1,5 m
Čas T [s]	Teplota T [°C]	Emisivita ϵ [-]	Čas T [s]	Teplota T [°C]	Emisivita ϵ [-]	Čas T [s]	Teplota T [°C]	Emisivita ϵ [-]	
0:00:00	623,4	0,479	0:20:20	138	0,845	0:40:40	70,3	0,84	
0:00:20	511,6	0,608	0:20:40	136	0,854	0:41:00	69,6	0,84	
0:00:40	487,1	0,612	0:21:00	133,9	0,858	0:41:20	69	0,84	
0:01:00	463,3	0,641	0:21:20	132,1	0,86	0:41:40	68,4	0,84	
0:01:20	441,6	0,661	0:21:40	130,2	0,842	0:42:00	67,9	0,84	
0:01:40	426	0,689	0:22:00	128,7	0,854	0:42:20	67,2	0,83	
0:02:00	410,3	0,692	0:22:20	126,9	0,84	0:42:40	66,6	0,85	
0:02:20	395,2	0,698	0:22:40	125,2	0,84	0:43:00	66,3	0,85	
0:02:40	382,5	0,704	0:23:00	123,3	0,87	0:43:20	65,7	0,84	
0:03:00	371,2	0,71	0:23:20	121,9	0,86	0:43:40	65,2	0,84	
0:03:20	359,6	0,74	0:23:40	120,5	0,844	0:44:00	64,6	0,84	
0:03:40	349,7	0,769	0:24:00	119,2	0,842	0:44:20	64	0,84	
0:04:00	340,6	0,762	0:24:20	117,5	0,87	0:44:40	63,5	0,84	
0:04:20	331,9	0,78	0:24:40	116,1	0,856	0:45:00	63,2	0,84	
0:04:40	322,4	0,768	0:25:00	114,7	0,846	0:45:20	62,2	0,84	
0:05:00	313,9	0,79	0:25:20	113,2	0,82	0:45:40	62,2	0,85	
0:05:20	306,7	0,793	0:25:40	111,9	0,86	0:46:00	61,8	0,83	
0:05:40	299,4	0,799	0:26:00	110,2	0,86	0:46:20	61,2	0,83	
0:06:00	292,7	0,805	0:26:20	109,1	0,86	0:46:40	60,8	0,84	
0:06:20	286	0,808	0:26:40	107,7	0,8	0:47:00	60,3	0,82	
0:06:40	279,3	0,8	0:27:00	106,4	0,85	0:47:20	59,9	0,82	
0:07:00	272,8	0,816	0:27:20	104,9	0,88	0:47:40	59,4	0,836	
0:07:20	266,9	0,807	0:27:40	104	0,86	0:48:00	59,1	0,81	
0:07:40	261	0,82	0:28:00	102,7	0,85	0:48:20	58,7	0,805	
0:08:00	255,4	0,815	0:28:20	101,5	0,837	0:48:40	58,2	0,81	
0:08:20	250,4	0,81	0:28:40	100,5	0,85	0:49:00	57,8	0,84	
0:08:40	245,3	0,803	0:29:00	99,1	0,859	0:49:20	57,3	0,84	
0:09:00	239,8	0,82	0:29:20	97,7	0,846	0:49:40	57	0,84	
0:09:20	235,3	0,837	0:29:40	97,2	0,843	0:50:00	56,7	0,82	
0:09:40	230,4	0,85	0:30:00	96	0,85	0:50:20	56,3	0,83	
0:10:00	227,3	0,82	0:30:20	95,2	0,862	0:50:40	56,1	0,83	
0:10:20	222,8	0,807	0:30:40	94,1	0,86	0:51:00	55,7	0,81	
0:10:40	218,6	0,84	0:31:00	93,1	0,85	0:51:20	55,3	0,83	
0:11:00	214,4	0,825	0:31:20	92	0,833	0:51:40	54,8	0,85	
0:11:20	210,3	0,843	0:31:40	91	0,827	0:52:00	54,5	0,85	
0:11:40	206,6	0,845	0:32:00	90	0,853	0:52:20	54	0,83	
0:12:00	202,8	0,823	0:32:20	89,2	0,845	0:52:40	53,8	0,82	
0:12:20	199,4	0,847	0:32:40	88,2	0,86	0:53:00	53,4	0,82	
0:12:40	196	0,85	0:33:00	87,2	0,84	0:53:20	53,1	0,81	
0:13:00	192,8	0,81	0:33:20	86,4	0,85	0:53:40	52,8	0,81	

0:13:20	190,8	0,82	0:33:40	85,6	0,82	0:54:00	52,4	0,81
0:13:40	187,1	0,83	0:34:00	84,5	0,8	0:54:20	52,1	0,83
0:14:00	183,9	0,857	0:34:20	83,7	0,83	0:54:40	51,7	0,826
0:14:20	180,9	0,84	0:34:40	83,1	0,83	0:55:00	51,5	0,83
0:14:40	178,2	0,845	0:35:00	82,2	0,815	0:55:20	51,1	0,83
0:15:00	175	0,847	0:35:20	81,3	0,836	0:55:40	50,7	0,84
0:15:20	172,2	0,85	0:35:40	80,5	0,82	0:56:00	50,5	0,83
0:15:40	169,1	0,84	0:36:00	79,7	0,84	0:56:20	50,2	0,83
0:16:00	166,9	0,867	0:36:20	79,1	0,8	0:56:40	50	0,84
0:16:20	164,4	0,865	0:36:40	78,3	0,83			
0:16:40	161,9	0,825	0:37:00	77,7	0,84			
0:17:00	159,4	0,844	0:37:20	77	0,83			
0:17:20	157,1	0,84	0:37:40	76,2	0,79			
0:17:40	154,8	0,847	0:38:00	75,5	0,84			
0:18:00	152,5	0,836	0:38:20	74,8	0,84			
0:18:20	150,2	0,855	0:38:40	74,2	0,83			
0:18:40	147,4	0,86	0:39:00	73,5	0,835			
0:19:00	145,6	0,856	0:39:20	72,8	0,85			
0:19:20	143,7	0,845	0:39:40	72,1	0,86			
0:19:40	141,8	0,86	0:40:00	71,5	0,84			
0:20:00	139,7	0,85	0:40:20	70,9	0,85			

Příloha 2 – Naměřené teploty pomocí termočlánku a příslušné hodnoty emisivity stanovené pomocí software FLIR Tools pro úhel + 15° (měření č. 2)

Použitá termokamera		Odražená zdánlivá teplota			Atmosférická teplota		Relativní vlhkost		Vzdálenost měření
FLIR E95		27°			24°		50 %		1,5 m
Čas T [s]	Teplota T [°C]	Emisivita ε [-]	Čas T [s]	Teplota T [°C]	Emisivita ε [-]	Čas T [s]	Teplota T [°C]	Emisivita ε [-]	
0:00:00	472,9	0,591	0:20:20	130,8	0,626	0:40:40	66,2	0,61	
0:00:20	454,8	0,574	0:20:40	129	0,646	0:41:00	65,5	0,6	
0:00:40	438,4	0,575	0:21:00	127,2	0,637	0:41:20	65	0,61	
0:01:00	422,9	0,619	0:21:20	125,5	0,637	0:41:40	64,5	0,62	
0:01:20	409,1	0,628	0:21:40	123,8	0,63	0:42:00	63,9	0,59	
0:01:40	395,8	0,607	0:22:00	122,1	0,66	0:42:20	63,4	0,6	
0:02:00	383,4	0,578	0:22:20	120,4	0,65	0:42:40	62,9	0,618	
0:02:20	371,6	0,571	0:22:40	118,8	0,642	0:43:00	62,4	0,61	
0:02:40	361	0,609	0:23:00	117,3	0,65	0:43:20	61,9	0,61	
0:03:00	350,9	0,618	0:23:20	115,7	0,642	0:43:40	61,4	0,616	
0:03:20	341,1	0,598	0:23:40	114,2	0,665	0:44:00	60,9	0,6	
0:03:40	332,1	0,61	0:24:00	112,8	0,643	0:44:20	60,4	0,604	
0:04:00	323,1	0,602	0:24:20	111,4	0,629	0:44:40	60	0,61	
0:04:20	315,4	0,573	0:24:40	109,9	0,656	0:45:00	59,5	0,582	
0:04:40	307,6	0,593	0:25:00	108,5	0,645	0:45:20	59	0,602	
0:05:00	300	0,599	0:25:20	107,2	0,653	0:45:40	58,6	0,6	
0:05:20	293	0,592	0:25:40	105,8	0,635	0:46:00	58,2	0,59	
0:05:40	286,2	0,607	0:26:00	104,4	0,643	0:46:20	57,7	0,6	
0:06:00	279,4	0,629	0:26:20	103,2	0,647	0:46:40	57,4	0,59	
0:06:20	273,3	0,628	0:26:40	102	0,63	0:47:00	56,9	0,596	
0:06:40	267,2	0,619	0:27:00	100,8	0,65	0:47:20	56,5	0,6	

0:07:00	261,3	0,617	0:27:20	99,5	0,642	0:47:40	56	0,6
0:07:20	255,7	0,608	0:27:40	98,3	0,63	0:48:00	55,7	0,61
0:07:40	250,2	0,624	0:28:00	97,2	0,645	0:48:20	55,3	0,615
0:08:00	245	0,628	0:28:20	96,1	0,629	0:48:40	54,9	0,6
0:08:20	240,3	0,631	0:28:40	95	0,625	0:49:00	54,5	0,59
0:08:40	235,5	0,623	0:29:00	93,9	0,628	0:49:20	54,2	0,605
0:09:00	230,7	0,639	0:29:20	92,9	0,618	0:49:40	53,8	0,6
0:09:20	226,1	0,622	0:29:40	91,8	0,619	0:50:00	53,4	0,6
0:09:40	221,6	0,62	0:30:00	90,8	0,63	0:50:20	53,1	0,61
0:10:00	217,4	0,619	0:30:20	89,8	0,62	0:50:40	52,7	0,59
0:10:20	213,2	0,622	0:30:40	88,7	0,62	0:51:00	52,4	0,61
0:10:40	209,2	0,626	0:31:00	87,8	0,622	0:51:20	52,1	0,605
0:11:00	205,3	0,623	0:31:20	86,8	0,612	0:51:40	51,7	0,59
0:11:20	201,5	0,639	0:31:40	85,9	0,622	0:52:00	51,4	0,59
0:11:40	198	0,62	0:32:00	85	0,628	0:52:20	51	0,6
0:12:00	194,4	0,604	0:32:20	84,1	0,63	0:52:40	50,7	0,6
0:12:20	190,9	0,622	0:32:40	83,2	0,625	0:53:00	50,4	0,6
0:12:40	187,6	0,628	0:33:00	82,4	0,612	0:53:20	50,1	0,59
0:13:00	184,4	0,623	0:33:20	81,5	0,619	0:53:40	49,7	0,6
0:13:20	181,2	0,624	0:33:40	80,7	0,618			
0:13:40	178,2	0,629	0:34:00	79,9	0,608			
0:14:00	175,2	0,64	0:34:20	79,1	0,62			
0:14:20	172,3	0,626	0:34:40	78,2	0,609			
0:14:40	169,5	0,629	0:35:00	77,5	0,62			
0:15:00	166,7	0,63	0:35:20	76,7	0,62			
0:15:20	164,2	0,622	0:35:40	75,9	0,62			
0:15:40	161,5	0,648	0:36:00	75,2	0,616			
0:16:00	159	0,625	0:36:20	74,5	0,627			
0:16:20	156,5	0,63	0:36:40	73,8	0,625			
0:16:40	154	0,633	0:37:00	73	0,613			
0:17:00	151,7	0,638	0:37:20	72,4	0,605			
0:17:20	149,4	0,626	0:37:40	71,7	0,603			
0:17:40	147,1	0,628	0:38:00	71	0,61			
0:18:00	144,9	0,632	0:38:20	70,4	0,62			
0:18:20	142,8	0,646	0:38:40	69,8	0,605			
0:18:40	140,8	0,645	0:39:00	69,1	0,603			
0:19:00	138,8	0,647	0:39:20	68,5	0,615			
0:19:20	136,7	0,631	0:39:40	67,9	0,606			
0:19:40	134,8	0,65	0:40:00	67,3	0,605			
0:20:00	132,9	0,632	0:40:20	66,7	0,62			

Příloha 3 – Naměřené teploty pomocí termočlánku a příslušné hodnoty emisivity stanovené pomocí software FLIR Tools pro úhel + 30° (měření č. 3)

Použitá termokamera		Odražená zdánlivá teplota			Atmosférická teplota			Relativní vlhkost		Vzdálenost měření
FLIR E95		28°			27°			50 %		1,5 m
Čas T [s]	Teplota T [°C]	Emisivita ε [-]	Čas T [s]	Teplota T [°C]	Emisivita ε [-]	Čas T [s]	Teplota T [°C]	Emisivita ε [-]		
0:00:00	506,9	0,935	0:20:20	145	0,962	0:40:40	73,6	0,935		
0:00:20	486,9	0,951	0:20:40	142,7	0,957	0:41:00	73,1	0,93		

0:00:40	468,3	0,961	0:21:00	141,3	0,956	0:41:20	72,4	0,933
0:01:00	452,8	0,962	0:21:20	139,4	0,958	0:41:40	71,7	0,93
0:01:20	437,5	0,966	0:21:40	137,7	0,957	0:42:00	71,1	0,939
0:01:40	422,8	0,967	0:22:00	135,9	0,956	0:42:20	70,5	0,929
0:02:00	410,4	0,945	0:22:20	133,8	0,955	0:42:40	69,9	0,93
0:02:20	396,2	0,957	0:22:40	132	0,951	0:43:00	69,3	0,933
0:02:40	386,8	0,965	0:23:00	130,2	0,966	0:43:20	68,8	0,915
0:03:00	377,3	0,965	0:23:20	128,7	0,963	0:43:40	68,2	0,928
0:03:20	365,7	0,963	0:23:40	127,1	0,963	0:44:00	67,7	0,923
0:03:40	357,6	0,963	0:24:00	125,3	0,965	0:44:20	67,1	0,923
0:04:00	348,7	0,969	0:24:20	123,6	0,965	0:44:40	66,6	0,931
0:04:20	339,5	0,967	0:24:40	122,3	0,96	0:45:00	66	0,917
0:04:40	332,7	0,968	0:25:00	120,7	0,959	0:45:20	65,5	0,911
0:05:00	325,3	0,965	0:25:20	119,3	0,96	0:45:40	64,9	0,921
0:05:20	317,8	0,967	0:25:40	117,9	0,959	0:46:00	64,4	0,917
0:05:40	310,3	0,968	0:26:00	116,4	0,958	0:46:20	64	0,91
0:06:00	303,3	0,971	0:26:20	114,7	0,963	0:46:40	63,4	0,903
0:06:20	297,6	0,972	0:26:40	113,4	0,957	0:47:00	63	0,903
0:06:40	291,3	0,967	0:27:00	112,1	0,959	0:47:20	62,6	0,903
0:07:00	284,9	0,968	0:27:20	110,7	0,959	0:47:40	62,1	0,907
0:07:20	278,5	0,962	0:27:40	109,6	0,959	0:48:00	61,6	0,91
0:07:40	273,2	0,97	0:28:00	108,3	0,959	0:48:20	61,3	0,903
0:08:00	268,3	0,964	0:28:20	106,9	0,96	0:48:40	60,7	0,903
0:08:20	261,7	0,967	0:28:40	105,7	0,961	0:49:00	60,3	0,897
0:08:40	257	0,968	0:29:00	104,6	0,96	0:49:20	59,8	0,907
0:09:00	252,4	0,967	0:29:20	103,4	0,961	0:49:40	59,4	0,918
0:09:20	247	0,968	0:29:40	102	0,957	0:50:00	58,9	0,917
0:09:40	242,8	0,968	0:30:00	101,1	0,95	0:50:20	58,6	0,893
0:10:00	238,2	0,971	0:30:20	99,9	0,949	0:50:40	58,2	0,887
0:10:20	234,5	0,965	0:30:40	98,8	0,958	0:51:00	57,8	0,891
0:10:40	229,8	0,971	0:31:00	97,7	0,955	0:51:20	57,3	0,903
0:11:00	225,4	0,95	0:31:20	96,7	0,96	0:51:40	57	0,9
0:11:20	221,4	0,97	0:31:40	95,6	0,96	0:52:00	56,6	0,89
0:11:40	217,6	0,97	0:32:00	94,7	0,959	0:52:20	56,1	0,9
0:12:00	213,5	0,972	0:32:20	93,8	0,959	0:52:40	55,8	0,887
0:12:20	210,1	0,968	0:32:40	92,7	0,963	0:53:00	55,4	0,893
0:12:40	206,3	0,974	0:33:00	91,7	0,96	0:53:20	55	0,9
0:13:00	203,3	0,967	0:33:20	90,7	0,97	0:53:40	54,7	0,889
0:13:20	199,6	0,971	0:33:40	89,8	0,956	0:54:00	54,3	0,89
0:13:40	196,2	0,972	0:34:00	89	0,97	0:54:20	53,9	0,884
0:14:00	192,9	0,97	0:34:20	88	0,95	0:54:40	53,5	0,885
0:14:20	190,7	0,958	0:34:40	87,1	0,951	0:55:00	53,3	0,88
0:14:40	187,7	0,962	0:35:00	86,5	0,942	0:55:20	53	0,867
0:15:00	184,3	0,967	0:35:20	85,5	0,95	0:55:40	52,7	0,88
0:15:20	181,6	0,958	0:35:40	84,7	0,948	0:56:00	52,3	0,881
0:15:40	178,1	0,95	0:36:00	83,7	0,941	0:56:20	52	0,889
0:16:00	175,4	0,97	0:36:20	82,8	0,942	0:56:40	51,6	0,881
0:16:20	172,8	0,966	0:36:40	82,1	0,946	0:57:00	51,3	0,86
0:16:40	170,2	0,966	0:37:00	81,3	0,94	0:57:20	51,1	0,872
0:17:00	167,4	0,967	0:37:20	80,5	0,94	0:57:40	50,8	0,88
0:17:20	165,3	0,965	0:37:40	79,8	0,949	0:58:00	50,4	0,895
0:17:40	162,9	0,964	0:38:00	79,2	0,952	0:58:20	50,1	0,892

0:18:00	160,3	0,96	0:38:20	78,4	0,97	0:58:40	49,8	0,885
0:18:20	157,7	0,965	0:38:40	77,7	0,943			
0:18:40	155,7	0,964	0:39:00	76,9	0,95			
0:19:00	153,4	0,96	0:39:20	76,2	0,945			
0:19:20	151,2	0,963	0:39:40	75,5	0,946			
0:19:40	149,1	0,962	0:40:00	75	0,933			
0:20:00	146,8	0,964	0:40:20	74,3	0,945			

Příloha 4 – Naměřené teploty pomocí termočlánku a příslušné hodnoty emisivit stanovené pomocí software FLIR Tools pro úhel + 45° (měření č. 4)

Použitá termokamera		Odražená zdánlivá teplota		Atmosférická teplota		Relativní vlhkost		Vzdálenost měření
FLIR E95		28°		27°		50 %		1,5 m
Čas T [s]	Teplota T [°C]	Emisivita ε [-]	Čas T [s]	Teplota T [°C]	Emisivita ε [-]	Čas T [s]	Teplota T [°C]	Emisivita ε [-]
0:00:00	534,3	0,869	0:20:20	145,9	0,882	0:40:40	72,8	0,84
0:00:20	511,4	0,878	0:20:40	144	0,88	0:41:00	72,2	0,845
0:00:40	489,9	0,855	0:21:00	142	0,88	0:41:20	71,5	0,83
0:01:00	470,2	0,882	0:21:20	140	0,884	0:41:40	70,9	0,861
0:01:20	452,9	0,898	0:21:40	138,2	0,864	0:42:00	70,3	0,85
0:01:40	436,9	0,886	0:22:00	136,2	0,872	0:42:20	69,7	0,85
0:02:00	423,3	0,87	0:22:20	134,4	0,877	0:42:40	69,1	0,843
0:02:20	408,7	0,877	0:22:40	132,6	0,842	0:43:00	68,5	0,843
0:02:40	396,8	0,899	0:23:00	130,8	0,88	0:43:20	67,9	0,85
0:03:00	384,7	0,884	0:23:20	129,1	0,882	0:43:40	67,3	0,855
0:03:20	373,9	0,875	0:23:40	127,5	0,874	0:44:00	66,7	0,845
0:03:40	363,2	0,896	0:24:00	125,7	0,877	0:44:20	66,3	0,83
0:04:00	353,4	0,847	0:24:20	124,3	0,877	0:44:40	65,7	0,823
0:04:20	344,5	0,852	0:24:40	122,7	0,883	0:45:00	65,1	0,828
0:04:40	335,9	0,9	0:25:00	121	0,884	0:45:20	64,6	0,84
0:05:00	328,3	0,884	0:25:20	119,6	0,873	0:45:40	64,1	0,827
0:05:20	321,1	0,87	0:25:40	118,1	0,854	0:46:00	63,6	0,84
0:05:40	313,9	0,882	0:26:00	116,5	0,855	0:46:20	63	0,84
0:06:00	307,4	0,889	0:26:20	115,2	0,873	0:46:40	62,5	0,82
0:06:20	300,7	0,889	0:26:40	113,7	0,88	0:47:00	62,1	0,82
0:06:40	294,1	0,89	0:27:00	112,4	0,89	0:47:20	61,6	0,828
0:07:00	288,3	0,894	0:27:20	111	0,863	0:47:40	61,1	0,82
0:07:20	282,3	0,878	0:27:40	109,7	0,883	0:48:00	60,6	0,815
0:07:40	274,7	0,885	0:28:00	108,4	0,87	0:48:20	60,2	0,817
0:08:00	270,9	0,881	0:28:20	107	0,88	0:48:40	59,7	0,827
0:08:20	265,5	0,873	0:28:40	105,9	0,862	0:49:00	59,3	0,821
0:08:40	260,3	0,875	0:29:00	104,6	0,86	0:49:20	58,9	0,795
0:09:00	255,2	0,882	0:29:20	103,4	0,874	0:49:40	58,4	0,827
0:09:20	250,3	0,876	0:29:40	102,2	0,88	0:50:00	58	0,808
0:09:40	245,6	0,88	0:30:00	101	0,875	0:50:20	57,6	0,82
0:10:00	241,1	0,88	0:30:20	99,8	0,87	0:50:40	57,2	0,81
0:10:20	236,7	0,893	0:30:40	98,7	0,851	0:51:00	56,7	0,819
0:10:40	232,2	0,883	0:31:00	97,6	0,867	0:51:20	56,4	0,79
0:11:00	228,3	0,875	0:31:20	96,5	0,87	0:51:40	56	0,809
0:11:20	223,9	0,874	0:31:40	95,4	0,87	0:52:00	55,6	0,8

0:11:40	219,8	0,875	0:32:00	94,5	0,865	0:52:20	55,2	0,81
0:12:00	216	0,878	0:32:20	93,4	0,863	0:52:40	54,9	0,817
0:12:20	212,1	0,877	0:32:40	92,3	0,867	0:53:00	54,5	0,798
0:12:40	208,5	0,875	0:33:00	91,4	0,867	0:53:20	54,1	0,81
0:13:00	204,9	0,867	0:33:20	90,4	0,863	0:53:40	53,7	0,803
0:13:20	201,5	0,873	0:33:40	89,5	0,86	0:54:00	53,4	0,79
0:13:40	198,1	0,87	0:34:00	88,6	0,877	0:54:20	53,1	0,808
0:14:00	194,8	0,89	0:34:20	87,6	0,864	0:54:40	52,7	0,8
0:14:20	191,6	0,898	0:34:40	86,7	0,863	0:55:00	52,3	0,81
0:14:40	188,5	0,836	0:35:00	85,8	0,837	0:55:20	52	0,8
0:15:00	185,6	0,88	0:35:20	84,9	0,876	0:55:40	51,7	0,815
0:15:20	182,5	0,872	0:35:40	84,1	0,86	0:56:00	51,4	0,815
0:15:40	179,6	0,87	0:36:00	83,2	0,868	0:56:20	51	0,813
0:16:00	176,8	0,853	0:36:20	82,4	0,855	0:56:40	50,7	0,8
0:16:20	174,2	0,878	0:36:40	81,6	0,86	0:57:00	50,5	0,808
0:16:40	171,4	0,892	0:37:00	80,8	0,86	0:57:20	50,2	0,812
0:17:00	168,9	0,878	0:37:20	80	0,86	0:57:40	49,8	0,81
0:17:20	166,4	0,893	0:37:40	79,2	0,874			
0:17:40	163,9	0,892	0:38:00	78,5	0,846			
0:18:00	161,5	0,881	0:38:20	77,6	0,84			
0:18:20	159,1	0,88	0:38:40	77	0,849			
0:18:40	156,8	0,882	0:39:00	76,2	0,848			
0:19:00	154,4	0,885	0:39:20	75,5	0,833			
0:19:20	152,4	0,858	0:39:40	74,8	0,85			
0:19:40	150,1	0,865	0:40:00	74,2	0,83			
0:20:00	148	0,879	0:40:20	73,5	0,83			

Příloha 5 – Naměřené teploty pomocí termočlánku a příslušné hodnoty emisivit stanovené pomocí software FLIR Tools pro úhel - 15° (měření č. 5)

Použitá termokamera		Odražená zdánlivá teplota			Atmosférická teplota		Relativní vlhkost		Vzdálenost měření
FLIR E95		27°			24°		50 %		1,5 m
Čas T [s]	Teplota T [°C]	Emisivita ε [-]	Čas T [s]	Teplota T [°C]	Emisivita ε [-]	Čas T [s]	Teplota T [°C]	Emisivita ε [-]	
0:00:00	520,2	0,783	0:20:20	142,7	0,75	0:40:40	72,4	0,76	
0:00:20	499,2	0,799	0:20:40	140,9	0,74	0:41:00	71,8	0,73	
0:00:40	480,1	0,773	0:21:00	139	0,757	0:41:20	71,1	0,725	
0:01:00	462,7	0,789	0:21:20	137,1	0,754	0:41:40	70,6	0,76	
0:01:20	446,6	0,743	0:21:40	135,1	0,772	0:42:00	70	0,715	
0:01:40	432,2	0,749	0:22:00	133,3	0,758	0:42:20	69,4	0,74	
0:02:00	418,4	0,742	0:22:20	131,5	0,758	0:42:40	68,8	0,75	
0:02:20	405,8	0,749	0:22:40	129,7	0,76	0:43:00	68,3	0,715	
0:02:40	393,9	0,746	0:23:00	128	0,765	0:43:20	67,7	0,76	
0:03:00	382,5	0,746	0:23:20	126,4	0,74	0:43:40	67,2	0,73	
0:03:20	372	0,74	0:23:40	124,7	0,76	0:44:00	66,7	0,755	
0:03:40	361,9	0,743	0:24:00	123,1	0,75	0:44:20	66,2	0,76	
0:04:00	352,5	0,741	0:24:20	121,5	0,76	0:44:40	65,6	0,74	
0:04:20	343,4	0,744	0:24:40	120	0,746	0:45:00	65,1	0,775	
0:04:40	335	0,747	0:25:00	118,4	0,773	0:45:20	64,6	0,76	
0:05:00	326,8	0,759	0:25:20	117,1	0,748	0:45:40	64,2	0,74	

0:05:20	319,1	0,731	0:25:40	115,5	0,75	0:46:00	63,7	0,77
0:05:40	311,9	0,745	0:26:00	114,1	0,786	0:46:20	63,2	0,745
0:06:00	304,6	0,745	0:26:20	112,7	0,757	0:46:40	62,8	0,775
0:06:20	297,8	0,759	0:26:40	111,5	0,73	0:47:00	62,3	0,76
0:06:40	291,1	0,742	0:27:00	110,1	0,74	0:47:20	61,8	0,76
0:07:00	284,8	0,745	0:27:20	108,8	0,77	0:47:40	61,4	0,75
0:07:20	278,5	0,745	0:27:40	107,5	0,76	0:48:00	61	0,72
0:07:40	272,6	0,742	0:28:00	106,2	0,75	0:48:20	60,5	0,708
0:08:00	266,9	0,75	0:28:20	105	0,75	0:48:40	60,1	0,78
0:08:20	261,5	0,75	0:28:40	103,7	0,74	0:49:00	59,7	0,72
0:08:40	256,3	0,756	0:29:00	102,6	0,73	0:49:20	59,3	0,7
0:09:00	251,1	0,743	0:29:20	101,4	0,744	0:49:40	58,8	0,72
0:09:20	246,1	0,744	0:29:40	100,2	0,73	0:50:00	58,5	0,76
0:09:40	241,4	0,755	0:30:00	99,1	0,77	0:50:20	58,1	0,71
0:10:00	236,8	0,743	0:30:20	98,1	0,73	0:50:40	57,7	0,738
0:10:20	232,3	0,747	0:30:40	96,1	0,75	0:51:00	57,3	0,74
0:10:40	227,9	0,75	0:31:00	95,9	0,73	0:51:20	57	0,765
0:11:00	223,7	0,779	0:31:20	94,8	0,73	0:51:40	56,7	0,75
0:11:20	219,6	0,76	0:31:40	93,8	0,73	0:52:00	56,3	0,75
0:11:40	215,6	0,742	0:32:00	92,8	0,74	0:52:20	55,9	0,75
0:12:00	211,7	0,75	0:32:20	91,9	0,77	0:52:40	55,7	0,75
0:12:20	208	0,756	0:32:40	90,9	0,76	0:53:00	55,3	0,75
0:12:40	204,3	0,76	0:33:00	90	0,77	0:53:20	54,9	0,74
0:13:00	200,9	0,75	0:33:20	89	0,79	0:53:40	54,7	0,73
0:13:20	197,4	0,753	0:33:40	88,1	0,76	0:54:00	54,4	0,74
0:13:40	194	0,759	0:34:00	87,3	0,74	0:54:20	54	0,73
0:14:00	190,8	0,76	0:34:20	86,4	0,743	0:54:40	53,7	0,73
0:14:20	187,7	0,75	0:34:40	85,5	0,77	0:55:00	53,3	0,74
0:14:40	184,6	0,759	0:35:00	84,7	0,76	0:55:20	53,1	0,74
0:15:00	181,6	0,75	0:35:20	83,9	0,755	0:55:40	52,8	0,75
0:15:20	178,7	0,757	0:35:40	83	0,76	0:56:00	52,5	0,75
0:15:40	175,8	0,75	0:36:00	82,2	0,75	0:56:20	52,2	0,75
0:16:00	173,2	0,768	0:36:20	81,4	0,74	0:56:40	52	0,74
0:16:20	170,5	0,76	0:36:40	80,6	0,76	0:57:00	51,7	0,74
0:16:40	167,9	0,75	0:37:00	79,9	0,775	0:57:20	51,3	0,75
0:17:00	165,3	0,75	0:37:20	79,1	0,75	0:57:40	51,1	0,75
0:17:20	162,8	0,75	0:37:40	78,4	0,75	0:58:00	50,8	0,76
0:17:40	160,4	0,753	0:38:00	77,7	0,77	0:58:20	50,5	0,74
0:18:00	158	0,75	0:38:20	77	0,75	0:58:40	50,3	0,75
0:18:20	155,7	0,752	0:38:40	76,4	0,76	0:59:00	50,1	0,74
0:18:40	153,4	0,76	0:39:00	75,6	0,74	0:59:20	49,8	0,75
0:19:00	151,2	0,75	0:39:20	74,9	0,78			
0:19:20	149,1	0,756	0:39:40	74,3	0,76			
0:19:40	146,9	0,76	0:40:00	73,7	0,768			
0:20:00	144,9	0,744	0:40:20	73	0,77			

Příloha 6 – Naměřené teploty pomocí termočlánku a příslušné hodnoty emisivit stanovené pomocí software FLIR Tools pro úhel - 30° (měření č. 6)

Použitá termokamera		Odražená zdánlivá teplota			Atmosférická teplota		Relativní vlhkost		Vzdálenost měření
FLIR E95		27°			24°		50 %		1,5 m
Čas T [s]	Teplota T [°C]	Emisivita ε [-]	Čas T [s]	Teplota T [°C]	Emisivita ε [-]	Čas T [s]	Teplota T [°C]	Emisivita ε [-]	
0:00:00	429,9	0,774	0:20:20	137,3	0,76	0:40:40	71	0,764	
0:00:20	416,7	0,741	0:20:40	135,4	0,766	0:41:00	70,4	0,75	
0:00:40	404,6	0,742	0:21:00	133,6	0,752	0:41:20	69,8	0,75	
0:01:00	393,7	0,745	0:21:20	131,9	0,764	0:41:40	69,2	0,76	
0:01:20	383,4	0,751	0:21:40	130,2	0,765	0:42:00	68,7	0,754	
0:01:40	373,4	0,745	0:22:00	128,4	0,768	0:42:20	68,1	0,75	
0:02:00	364	0,755	0:22:20	126,7	0,764	0:42:40	67,6	0,76	
0:02:20	365	0,759	0:22:40	125,1	0,764	0:43:00	67	0,75	
0:02:40	346,5	0,75	0:23:00	123,6	0,762	0:43:20	66,5	0,745	
0:03:00	338,3	0,752	0:23:20	122,1	0,767	0:43:40	66	0,75	
0:03:20	330,4	0,759	0:23:40	120,5	0,744	0:44:00	65,5	0,76	
0:03:40	322,9	0,767	0:24:00	119,1	0,766	0:44:20	65	0,75	
0:04:00	315,7	0,756	0:24:20	117,6	0,76	0:44:40	64,5	0,75	
0:04:20	308,8	0,76	0:24:40	116,1	0,76	0:45:00	63,9	0,76	
0:04:40	302,2	0,766	0:25:00	114,7	0,77	0:45:20	63,5	0,76	
0:05:00	295,8	0,766	0:25:20	113,4	0,763	0:45:40	63,1	0,74	
0:05:20	289,5	0,758	0:25:40	112	0,75	0:46:00	62,6	0,75	
0:05:40	283,5	0,755	0:26:00	110,6	0,76	0:46:20	62,1	0,75	
0:06:00	277,7	0,75	0:26:20	109,4	0,76	0:46:40	61,7	0,745	
0:06:20	272	0,755	0:26:40	108	0,76	0:47:00	61,2	0,74	
0:06:40	266,6	0,755	0:27:00	106,8	0,76	0:47:20	60,8	0,738	
0:07:00	261,3	0,756	0:27:20	105,6	0,754	0:47:40	60,4	0,74	
0:07:20	256,3	0,767	0:27:40	104,3	0,76	0:48:00	59,9	0,705	
0:07:40	251,4	0,752	0:28:00	103,2	0,758	0:48:20	59,5	0,74	
0:08:00	246,6	0,764	0:28:20	102	0,77	0:48:40	59,1	0,75	
0:08:20	242	0,754	0:28:40	100,8	0,77	0:49:00	58,7	0,71	
0:08:40	237,6	0,767	0:29:00	99,7	0,775	0:49:20	58	0,745	
0:09:00	233,3	0,765	0:29:20	98,6	0,77	0:49:40	57,5	0,744	
0:09:20	229	0,764	0:29:40	97,5	0,77	0:50:00	57,2	0,75	
0:09:40	224,9	0,766	0:30:00	96,5	0,76	0:50:20	56,8	0,75	
0:10:00	220,8	0,754	0:30:20	95,4	0,753	0:50:40	56,4	0,75	
0:10:20	217	0,751	0:30:40	94,4	0,77	0:51:00	56	0,75	
0:10:40	213,2	0,759	0:31:00	93,5	0,76	0:51:20	55,7	0,75	
0:11:00	209,5	0,764	0:31:20	92,5	0,765	0:51:40	55,4	0,748	
0:11:20	206	0,756	0:31:40	91,5	0,76	0:52:00	55	0,75	
0:11:40	202,5	0,768	0:32:00	90,6	0,76	0:52:20	54,7	0,75	
0:12:00	199,1	0,768	0:32:20	89,6	0,75	0:52:40	54,4	0,748	
0:12:20	195,9	0,767	0:32:40	88,7	0,75	0:53:00	54	0,75	
0:12:40	192,6	0,77	0:33:00	87,8	0,746	0:53:20	53,7	0,748	
0:13:00	189,5	0,765	0:33:20	86,9	0,76	0:53:40	53,3	0,743	
0:13:20	186,5	0,77	0:33:40	86,1	0,754	0:54:00	53	0,75	
0:13:40	183,6	0,762	0:34:00	85,2	0,755	0:54:20	52,7	0,74	
0:14:00	180,7	0,77	0:34:20	84,4	0,75	0:54:40	52,4	0,73	
0:14:20	177,9	0,764	0:34:40	83,5	0,76	0:55:00	52,1	0,75	

0:14:40	175,2	0,763	0:35:00	82,8	0,757	0:55:20	51,8	0,75
0:15:00	172,5	0,754	0:35:20	82	0,75	0:55:40	51,5	0,76
0:15:20	169,9	0,761	0:35:40	81,2	0,75	0:56:00	51,2	0,75
0:15:40	167,3	0,77	0:36:00	80,4	0,764	0:56:20	50,9	0,75
0:16:00	164,9	0,765	0:36:20	79,7	0,755	0:56:40	50,6	0,76
0:16:20	162,4	0,753	0:36:40	78,9	0,75	0:57:00	50,4	0,75
0:16:40	160,1	0,765	0:37:00	78,2	0,75	0:57:20	50,1	0,76
0:17:00	157,7	0,765	0:37:20	77,5	0,75	0:57:40	49,8	0,79
0:17:20	155,5	0,76	0:37:40	76,8	0,77			
0:17:40	153,3	0,768	0:38:00	76,1	0,753			
0:18:00	151,1	0,77	0:38:20	75,5	0,73			
0:18:20	149	0,76	0:38:40	74,8	0,76			
0:18:40	146,9	0,765	0:39:00	74,1	0,75			
0:19:00	144,9	0,76	0:39:20	73,5	0,725			
0:19:20	143	0,76	0:39:40	72,8	0,75			
0:19:40	141	0,76	0:40:00	72,2	0,764			
0:20:00	139,1	0,767	0:40:20	71,6	0,75			

Příloha 7 – Naměřené teploty pomocí termočlánku a příslušné hodnoty emisivit stanovené pomocí software FLIR Tools pro úhel - 45° (měření č. 7)

Použitá termokamera		Odražená zdánlivá teplota		Atmosférická teplota		Relativní vlhkost		Vzdálenost měření
FLIR E95		28°		27°		50 %		1,5 m
Čas T [s]	Teplota T [°C]	Emisivita ε [-]	Čas T [s]	Teplota T [°C]	Emisivita ε [-]	Čas T [s]	Teplota T [°C]	Emisivita ε [-]
0:00:00	534	0,844	0:20:20	137,3	0,833	0:40:40	68,9	0,81
0:00:20	508,6	0,86	0:20:40	135,4	0,838	0:41:00	68,3	0,82
0:00:40	486	0,863	0:21:00	133,3	0,82	0:41:20	67,7	0,825
0:01:00	466,8	0,871	0:21:20	131,5	0,842	0:41:40	67,1	0,82
0:01:20	449,3	0,87	0:21:40	129,6	0,843	0:42:00	66,6	0,821
0:01:40	433,5	0,871	0:22:00	127,8	0,84	0:42:20	66	0,803
0:02:00	418,9	0,86	0:22:20	126,1	0,84	0:42:40	65,5	0,824
0:02:20	405,4	0,876	0:22:40	124,3	0,836	0:43:00	65	0,8
0:02:40	393,1	0,867	0:23:00	122,7	0,838	0:43:20	64,4	0,8
0:03:00	381,1	0,867	0:23:20	121	0,84	0:43:40	63,9	0,795
0:03:20	369,1	0,868	0:23:40	119,4	0,839	0:44:00	63,4	0,81
0:03:40	359,2	0,88	0:24:00	117,9	0,839	0:44:20	62,9	0,812
0:04:00	349,7	0,877	0:24:20	116,3	0,84	0:44:40	62,5	0,81
0:04:20	339,7	0,874	0:24:40	114,8	0,845	0:45:00	62	0,812
0:04:40	331,5	0,874	0:25:00	113,3	0,843	0:45:20	61,5	0,818
0:05:00	323,1	0,874	0:25:20	111,9	0,84	0:45:40	61	0,815
0:05:20	315	0,873	0:25:40	110,5	0,834	0:46:00	60,6	0,802
0:05:40	307,5	0,874	0:26:00	109,1	0,843	0:46:20	60,2	0,803
0:06:00	300,2	0,874	0:26:20	107,7	0,843	0:46:40	59,6	0,815
0:06:20	293,4	0,873	0:26:40	106,4	0,843	0:47:00	59,2	0,807
0:06:40	286,5	0,875	0:27:00	105,2	0,833	0:47:20	58,9	0,793
0:07:00	279,7	0,873	0:27:20	103,9	0,84	0:47:40	58,4	0,803
0:07:20	273,6	0,873	0:27:40	102,6	0,843	0:48:00	58	0,803
0:07:40	267,7	0,874	0:28:00	101,4	0,83	0:48:20	57,6	0,803
0:08:00	262	0,873	0:28:20	100,2	0,855	0:48:40	57,2	0,8

0:08:20	256,2	0,877	0:28:40	99	0,86	0:49:00	56,8	0,803
0:08:40	251,1	0,867	0:29:00	97,9	0,849	0:49:20	56,4	0,79
0:09:00	245,9	0,873	0:29:20	96,8	0,857	0:49:40	55,9	0,793
0:09:20	240,9	0,864	0:29:40	95,7	0,855	0:50:00	55,6	0,795
0:09:40	236,2	0,852	0:30:00	94,6	0,85	0:50:20	55,3	0,79
0:10:00	231,4	0,87	0:30:20	93,6	0,85	0:50:40	54,9	0,8
0:10:20	226,7	0,87	0:30:40	92,5	0,849	0:51:00	54,5	0,807
0:10:40	222,6	0,858	0:31:00	91,5	0,842	0:51:20	54,1	0,79
0:11:00	218,1	0,873	0:31:20	90,5	0,84	0:51:40	53,8	0,792
0:11:20	214	0,87	0:31:40	89,5	0,852	0:52:00	53,4	0,808
0:11:40	210	0,843	0:32:00	88,6	0,848	0:52:20	53,1	0,783
0:12:00	206,1	0,87	0:32:20	87,6	0,845	0:52:40	52,8	0,8
0:12:20	202,4	0,87	0:32:40	86,7	0,833	0:53:00	52,6	0,793
0:12:40	198,7	0,87	0:33:00	85,7	0,85	0:53:20	52,1	0,792
0:13:00	195,3	0,868	0:33:20	84,9	0,85	0:53:40	51,8	0,78
0:13:20	191,8	0,865	0:33:40	84	0,84	0:54:00	51,4	0,797
0:13:40	188,5	0,854	0:34:00	83,2	0,84	0:54:20	51,2	0,79
0:14:00	185,2	0,868	0:34:20	82,3	0,84	0:54:40	50,9	0,794
0:14:20	181,9	0,87	0:34:40	81,5	0,828	0:55:00	50,6	0,79
0:14:40	179	0,87	0:35:00	80,7	0,84	0:55:20	50,3	0,797
0:15:00	176	0,868	0:35:20	79,9	0,824	0:55:40	50	0,79
0:15:20	173,1	0,87	0:35:40	79,1	0,83			
0:15:40	170,1	0,87	0:36:00	78,3	0,834			
0:16:00	167,5	0,875	0:36:20	77,6	0,836			
0:16:20	164,7	0,87	0:36:40	76,8	0,838			
0:16:40	162,3	0,865	0:37:00	76,1	0,83			
0:17:00	159,6	0,865	0:37:20	75,4	0,834			
0:17:20	157,1	0,873	0:37:40	74,7	0,804			
0:17:40	154,7	0,853	0:38:00	74	0,825			
0:18:00	152,2	0,856	0:38:20	73,3	0,832			
0:18:20	149,9	0,86	0:38:40	72,7	0,83			
0:18:40	147,6	0,86	0:39:00	72	0,835			
0:19:00	145,5	0,845	0:39:20	71,3	0,826			
0:19:20	143,4	0,858	0:39:40	70,7	0,83			
0:19:40	141,2	0,844	0:40:00	70,1	0,83			
0:20:00	139,2	0,844	0:40:20	69,5	0,825			