

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

FAKULTA STROJNÍ



BAKALAŘSKÁ PRÁCE

2019

KLYMOSHENKO MYKYTA

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní

Ústav přístrojové a řídicí techniky

Studijní program: Teoretické základy strojního inženýrství

Obor: Bez oboru

Bezdotykové stanovení emisivity povrchu

Contactless determination of surface
emissivity

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracoval: Klymoshenko Mykyta
Vedoucí práce: prof. Ing. Milan Hofreiter, CSc.
Rok: 2019

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně s tím, že její výsledky mohou být dále použité podle uvážení vedoucího diplomové práce jako jejího spoluautora. Souhlasím také s případnou publikací výsledku diplomové práce nebo její podstatné části, pokud budu uveden jako její spoluautor.

V Praze dne

.....
Podpis student

Abstrakt

Tato bakalářská práce je zaměřena na ověření praktických možností využití patentu Hofreiter M., Sova J.: „Způsob automatického bezdotykového stanovení emisivity povrchu a zařízení k provádění tohoto způsobu“, PV305219 pro měření teplotních polí s nehomogenní emisivitou. V teoretické části jsou stručně popsány teoretické základy bezdotykového stanovení teploty a některé metody stanovení emisivity, včetně metody dle patentu. V poslední části je navržen experiment pro ověření patentu a jeho výsledky.

Klíčová slova

Emisivita, bezkontaktní metoda, patent, zdánlivá odrazená teplota, měření emisivity, stanovení teploty, termokamera.

Abstract

This bachelor thesis is focused on the verification of practical possibilities of using the patent Hofreiter M., Sova J.: „Method of automatic contactless determination of surface emissivity and equipment for this method”, PV305219 for measurement of temperature fields with inhomogeneous emissivity. The theoretical part briefly describes the theoretical foundations of contactless temperature determination and some methods of emissivity determination, including the method according to the patent. In the last part is designed an experiment to verify the patent and its results.

Key words

Emissivity, contactless method, patent, apparent reflected temperature, emissivity measurement, temperature determination, thermal imager.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Klymoshenko** Jméno: **Mykyta** Osobní číslo: **453568**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav přístrojové a řídicí techniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Bezdotykové stanovení emisivity povrchu

Název bakalářské práce anglicky:

Contactless determination of surface emissivity

Pokyny pro vypracování:

- 1) Nastudujte problematiku bezdotykového měření teploty a souvisejících fyzikálních zákonů. Seznamte se s rovnicí termografie a vlivem jednotlivých parametrů měření.
- 2) Seznamte se s patentem 'Způsob automatického bezdotykového stanovení emisivity povrchu a zařízení k provádění tohoto způsobu', č. PV305219 a diskutujte teoretické i praktické možnosti navrženého zařízení a metody.
- 3) Postupujte podle patentu a realizujte sestavu pro bezdotykové stanovení emisivity. Postup dle patentu aplikujte alespoň na tři vybrané materiály.
- 4) Diskutujte dosažené výsledky a možnosti metody a to i stran různých emisivit snímaného povrchu. Navrhněte zlepšení postupu. Diskutujte možné průmyslové využití.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Kadlec Karel, 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
- [2] Sova Jan, Karel Kadlec: Termokamery a pyrometry – princip měření, vlastnosti a využití, All For Power č. 01/2014
- [3] Vollmer M., Möllmann K. P.: Infrared Thermal Imaging. Wiley-VCH 2010, ISBN 978-3-527-40717-0
- [4] Hofreiter M., Sova J.: Způsob automatického bezdotykového stanovení emisivity povrchu a zařízení k provádění tohoto způsobu, Patent PV305219, online: <https://isdv.upv.cz/doc/FullFiles/Patents/FullDocuments/305/305219.pdf>


Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

prof. Ing. Milan Hofreiter, CSc., U12110.3


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

Datum zadání bakalářské práce: **26.04.2019** Termín odevzdání bakalářské práce: **12.06.2019**

Platnost zadání bakalářské práce:


prof. Ing. Milan Hofreiter, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce


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.

26-04-2019

Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Poděkování

Rad bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práci prof. Ing. Milanu Hofreiterovi a firmě Workswell, která mi poskytla téma na vypracování. Dále bych rad poděkoval rodičům, které mě celou dobu studia podporovali.

Obsah

Seznam veličin a jednotek.....	9
Úvod.....	10
1. Úvod do termografie.....	11
2. Bezdotykové snímače teploty.....	12
3. Teoretické základy bezdotykového měření teploty.....	14
3.1 Černé těleso.....	14
3.2 Intenzita vyzařování.....	14
3.3 Planckův zákon vyzařování.....	15
3.4 Wienův posunovací zákon.....	15
3.5 Stefanův-Boltzmannův zákon.....	16
3.6 Kirchoffovo zákony.....	16
3.7 Emisivita.....	17
3.8 Odražená zdánlivá teplota.....	19
3.9 Rovnice termografie.....	20
4. Stanovení emisivity.....	21
4.1 Kontaktní metoda.....	21
4.2 Bezkontaktní metoda dle patentu.....	23
5. Experiment.....	23
5.1 Odvození vztahu pro bezdotykové stanovení emisivity.....	23
5.2 Návrh experimentu.....	25
5.2.1 Materiály.....	25
5.2.2 Pracoviště.....	30
5.2.3 Postup měření.....	33
5.2.3.1 Postup dle normy ISO 18434-1.....	33
5.2.3.2 Postup dle patentu.....	34
6. Naměřená data.....	35
7. Výsledky.....	38
8. Závěr.....	40
Použité zdroje.....	41
Seznam obrázků a tabulek.....	43

Seznam veličin a jednotek

M	Intenzita vyzařování	$W \cdot m^2$
Φ	Zářivý tok	W
S	Plocha povrchu	m^2
M_λ	Spektrální hustota intenzity vyzařování	$W \cdot m^{-3}$
λ	Vlnová délka	m
h	Planckova konstanta	-
C_1	1. Vyzařovací konstanta	$W \cdot m^2$
C_2	2. Vyzařovací konstanta	$K \cdot m$
c	Rychlost světla ve vakuu	Km/h
σ	Stefanova-Boltzmanova konstanta	$W/(m^2 \cdot K^4)$
T	Termodynamická teplota	K
α_λ	Spektrální pohltivost	-
ρ_λ	Spektrální odrazivost	-
τ_λ	Spektrální propustnost	-
ε	Emisivita	-
τ	Propustnost atmosféry	-
ρ	Odrazivost povrchu	-

Úvod

V současné době se značně rozšířilo používání termokamer a pyrometrů pro bezdotykové měření teploty. Tyto přístroje našly svoje uplatnění i ve strojírenství. Používají se v technologii výroby kovů, k měření rozložení teploty na povrchu objektu v diagnostických účelech atd.

Pro správné výsledky se musí nejdříve nastavit parametry měření. Jedním ze základních a nejdůležitějších parametrů při bezdotykovém měření teploty je emisivita povrchu. Ve výrobě se může měřící technik setkat s různými materiály, které navíc mohou mít v některých místech povrchovou úpravu. Především kvůli časové náročnosti při měření teploty povrchu termokamerou se uvažuje, že emisivita na celém povrchu je stejná. Tato úvaha zvětšuje chybu měření, což vede k nepřesným výsledkům. V případě, že je během měření je uvažováno, že se emisivita na povrchu měřeného tělesa liší, např. objekt je složen z více materiálů, měl by technik podle známých metod stanovovat emisivitu na každém povrchu zvlášť, což je prakticky nemožné u některých metod a nebo vyžadují dodatečnou manipulaci s objektem, což může vystavit měřícího technika nebezpečí poranění.

V praxi se převážně používají dvě metody stanovení emisivity. První je nejjednodušší a nejrychlejší, a to je odečtení emisivity z tabulek. Můžeme ji použít v případě, že známe materiál měřeného předmětu. Nevýhodou této metody je možnost použití pouze pro předměty s homogenním povrchem. Druhá možnost je provedení měření, které je různě složité v závislosti na typu vybrané metody. Tato možnost je časově náročná, ale hodnoty emisivity stanovené tímto způsobem jsou přesnější.

Patent, jehož možnosti využití budu ověřovat, odstraňuje většinu problémů, stanovení emisivity dotykovou a primou metodou dle CSN ISO 18434-1. Metoda dle patentu pro stanovení emisivity povrchu vyžaduje jenom IČ termokameru a dodatečný zdroj infračerveného (dále jen IČ) záření. Z toho vyplývá, že se jedná o bezdotykové stanovení emisivity, což vede k urychlení měření a také je bezpečnější pro měřícího technika.

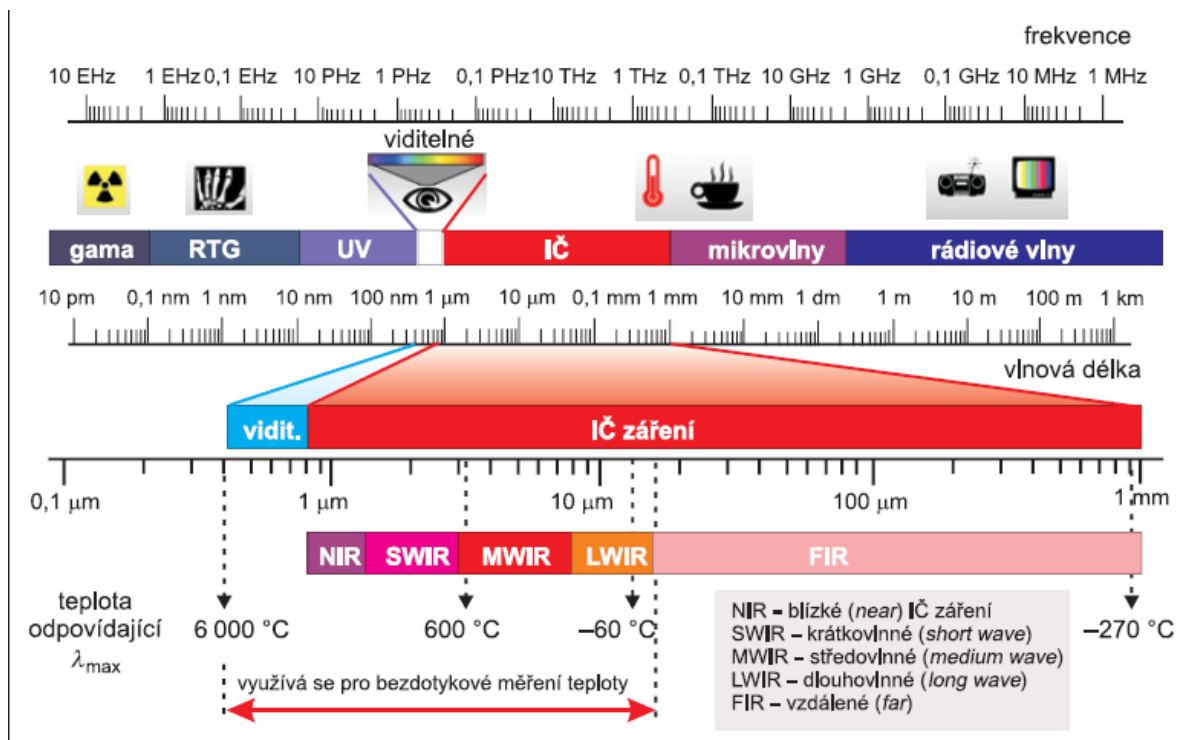
Ve svém experimentu budu zkoumat vzorky materiálu s různou emisivitou s využitím patentu pro bezdotykové stanovení emisivity.

1. Úvod do termografie

Při teplotě vyšší, než je absolutní nula ($-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$), emitují všechna tělesa elektromagnetické záření. IČ termografie je metoda bezkontaktního měření povrchové teploty těles (viz. Obr. 1), založená na detekci tohoto elektromagnetického záření v infračerveném spektru ($0,76 - 1000\text{ }\mu\text{m}$). Pro detekci je nejčastěji využíváno vlnových délek v rozsahu $2-5,6\text{ }\mu\text{m}$ a $8-14\text{ }\mu\text{m}$ (viz. Obr. 2), důvodem je malá pohltivost infračerveného záření atmosférou právě o těchto vlnových délkách. Metoda IČ termografie se v dnešní době nejčastěji používá v průmyslových odvětvích, ve stavebnictví a medicínských oborech. Přesnost výsledku měření IČ termografií je ovlivněna správným stanovením především emisivity, dále pak transmisivity a reflexivity měřených objektů a zanedbáním vlivu prostředí v atmosféře a infračerveného záření (tepla) odráženého okolím. Nejpřesnějších výsledků měření dosáhneme dodržením správné metody použití IČ termografie, zohledněním okolních podmínek a správnou interpretací výsledného termogramu. [1].



Obr. 1: Měření teploty bezkontaktním způsobem [8]



Obr. 2: Rozdělení spektra elektromagnetického záření s vyznačením oblasti využívané při bezdotykovém měření teploty [2]

2. Bezdotykové snímače teploty

Teplota tělesa se při bezdotykovém měření vyhodnocuje z intenzity IČ záření, které měřený objekt vyzařuje. Záření měřeného tělesa je soustředěno optickým systémem na detektor, který posílá elektrický signál, jenž se zpracovává v elektronických obvodech. Bezdotykové měření teploty se provádí pomocí bezdotykových teploměrů, např. infračervený teploměr (pyrometr), výstupem měření jsou číselné hodnoty zobrazené na displeji (viz. Obr. 4), nebo infračervené kamery (termokamery), které zobrazují výsledek měření jako termogram na barevném displeji (viz Obr. 3) [2].

Termokamera i pyrometr jsou měřicí přístroje, které neměří přímo teplotu, ale podle rovnice termografie stanovují teplotu výpočtem na základě naměřené intenzity tepelného záření (výjimkou jsou tzv. poměrové pyrometry). Pro správné stanovení povrchové teploty měřeného objektu je tedy nezbytné správně nastavit hodnoty tzv. parametrů měření, které rovnice termografie zahrnuje:

- emisivitu (ϵ),
- zdánlivou odraženou teplotu (t_a),
- teplotu atmosféry (t_a),
- relativní vlhkost atmosféry (%),
- vzdálenost mezi měřicím přístrojem a povrchem měřeného objektu (m) [3].

Infračervené teploměry a infračervené kamery se standardně používají k bezdotykovému měření teploty prakticky ve všech průmyslových oblastech s širokým rozsahem použití např. při výrobě mikroprocesorů až po náročné aplikace v hutním průmyslu [3].



Obr. 3: Měření termokamerou [9]



Obr. 4: Měření IČ teploměrem(pyrometrem), kde červená téčka ukazuje bod, ve kterém se měří teplota [10]

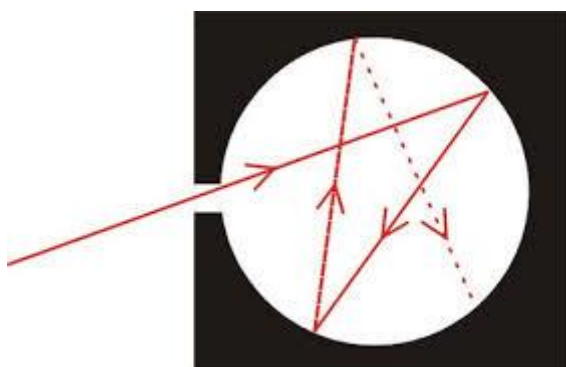
Pro pochopení principu práce IČ kamer a teploměru potřebujeme znát základní teorii bezdotykového měření teploty.

3. Teoretické základy bezdotykového měření teploty

Všechna tělesa vyzařují (emitují) elektromagnetické záření, přičemž maximum intenzity emitovaného záření závisí na teplotě tělesa a má různou intenzitu na různých vlnových délkách dle Planckova vyzařovacího zákona [4].

3.1 Černé těleso

Idealizovaný objekt, který se používá při teoretickém popisu dějů probíhajících při vyzařování, je černé těleso. Je to teoretický objekt, který při dané teplotě vyzáří nejvyšší možné množství energie, a také naopak pohltí veškerou energii, která na něj dopadá [4].



Obr. 5: Chod paprsku, který dopadá na černé těleso [11]

Absolutně černé těleso neexistuje, každý povrch odrazí část záření dopadajícího na těleso. Je možné absolutně černé těleso aproximovat dutým tělesem s velmi malým otvorem a s černěnými vnitřními stěnami. Dovnitř prochází záření, které je postupně pohlcováno odrážením od stěn, unikající záření z této dutiny je velmi slabé (viz. Obr. 5) [5].

3.2 Intenzita vyzařování

Intenzita vyzařování M ($W \cdot m^{-2}$) je dána podílem zářivého toku Φ (W) a plochy povrchu S (m^2) zdroje záření [2]:

$$M = \frac{d\Phi}{dS} \quad (1)$$

Vysílané tepelné záření je složeno z různých vlnových délek, intenzita vyzařování má integrální charakter a skládá se z příspěvků při jednotlivých vlnových délkách podle vztahu [2]:

$$M = \int_0^{\infty} M_{\lambda} d\lambda \quad (2)$$

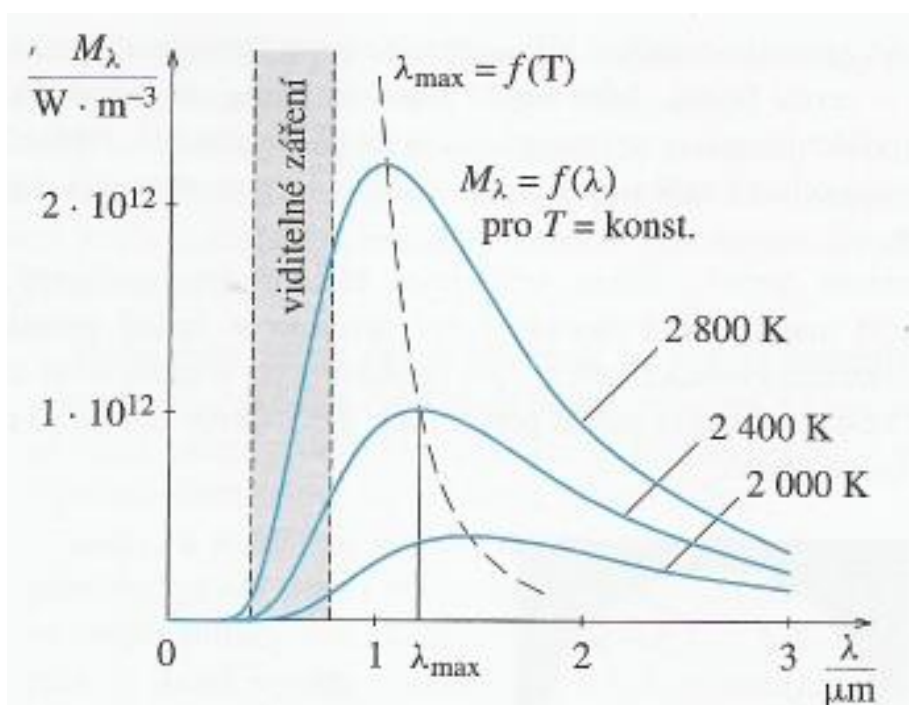
Kde M_{λ} je spektrální hustota intenzity vyzařování ($W \cdot m^{-3}$), λ vlnová délka (m).

3.3 Planckův zákon vyzařování

Závislost spektrální hustoty intenzity vyzařování na vlnové délce a na teplotě pro černé těleso (viz. Obr. 6), je dána Planckovým zákonem vyzařování [2]:

$$M_{0\lambda} = \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \cdot (e^{\frac{h \cdot c}{k \cdot \lambda \cdot T}} - 1)} = \frac{C_1}{\lambda^5 \cdot (e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T}} - 1)} \quad (3)$$

kde h je Planckova konstanta, k Boltzmannova konstanta, c rychlost světla ve vakuu; 1. a 2. vyzařovací konstanta $C_1 = 3.7413 \cdot 10^{-16} (W \cdot m^2)$ a $C_2 = 1.4388 \cdot 10^{-2} (K \cdot m)$.



Obr. 6: Vyzařování černého tělesa podle Planckova zákona [12]

3.4 Wienův posunovací zákon

Derivací Planckova zákona je možno stanovit maximum spektrální hustoty intenzity vyzařování pro danou teplotu. Toto maximum se posouvá se vzrůstající teplotou ke kratším vlnovým délkám podle Wienova zákona posuvu [2]:

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T} \quad (4)$$

kde $\lambda_{max}(\mu m)$ je vlnová délka odpovídající maximu závislosti $M_{0\lambda} = f(\lambda)$. Poloha maxima je vyznačena čárkovaně na Obr. 6.

3.5 Stefanův-Boltzmannův zákon

Integraci Planckova zákona přes všechny vlnové délky dostaneme Stefanův-Boltzmannův zákon, podle kterého je celková intenzita vyzařování černého tělesa úměrná čtvrté mocnině termodynamické teploty [2]:

$$M_0 = \sigma \cdot T^4, \quad (5)$$

kde $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$

Pro vyzařování reálného tělesa platí Stefanův-Boltzmannův zákon ve tvaru [2]:

$$M = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4,$$

kde ε je emisivita tělesa.

3.6 Kirchoffovo zákony

Podle [6] se skutečné objekty odlišují od absolutně černého tělesa a neřídí se v delších intervalech vlnových délek stejnými zákony, platnými pro absolutně černé těleso, přestože to tak v určitých rozmezích může být. Mohou se lišit třemi základními vlastnostmi. Část dopadajícího záření α může být absorbována, část záření ρ se může odrazit a část τ může objektem prostupovat (viz. Obr. 7). Všechny složky záření jsou závislé na vlnové délce, k jejich vyjádření využíváme spektrální zářivost λ .

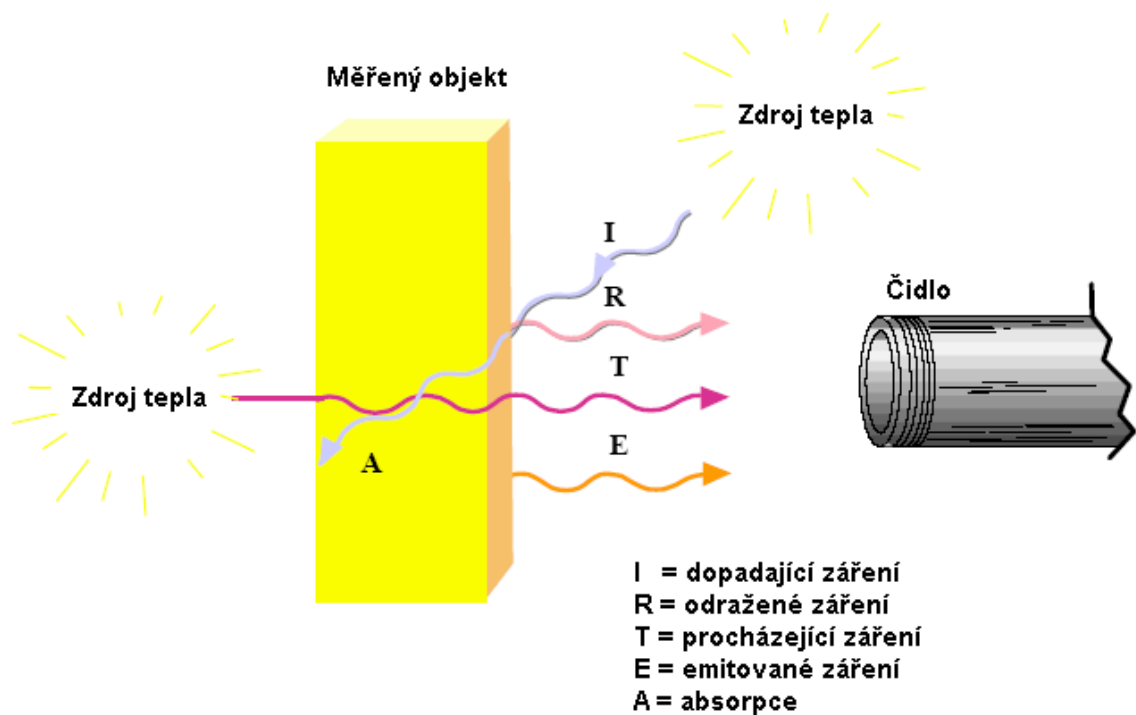
- Spektrální pohltivost α_λ = poměr energie pohlcené spektrálním zářičem a celkovým tokem.
- Spektrální odrazivost ρ_λ = poměr energie odražené spektrálním zářičem a celkovým tokem.
- Spektrální propustnost τ_λ = poměr energie propuštěné spektrálním zářičem a celkovým tokem.

Suma všech faktorů je vždy rovna jedné, a to bez ohledu na vlnovou délku, výsledný vztah je [6]:

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1 \quad (6)$$

U nepropustných materiálů je τ_λ rovno nule vztah se potom zredukuje na [6]:

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda = 1 \quad (7)$$



Obr. 7: Interakce záření s objektem [13]

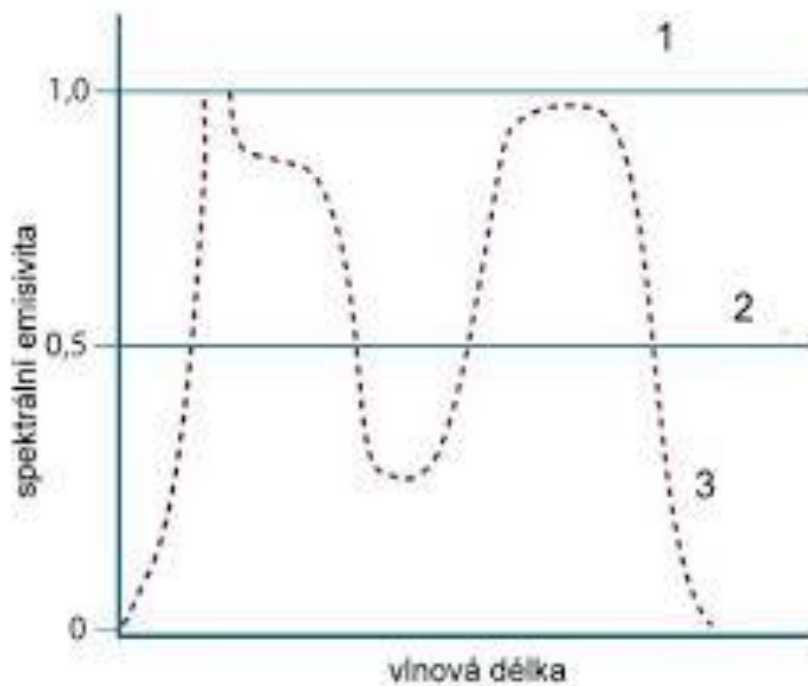
3.7 Emisivita

Emisivita je faktor, který koriguje schopnost tělesa vyzařovat i pohlcovat tepelné záření. Je to jeden z nejdůležitějších parametrů pro správné stanovení teploty tělesa.

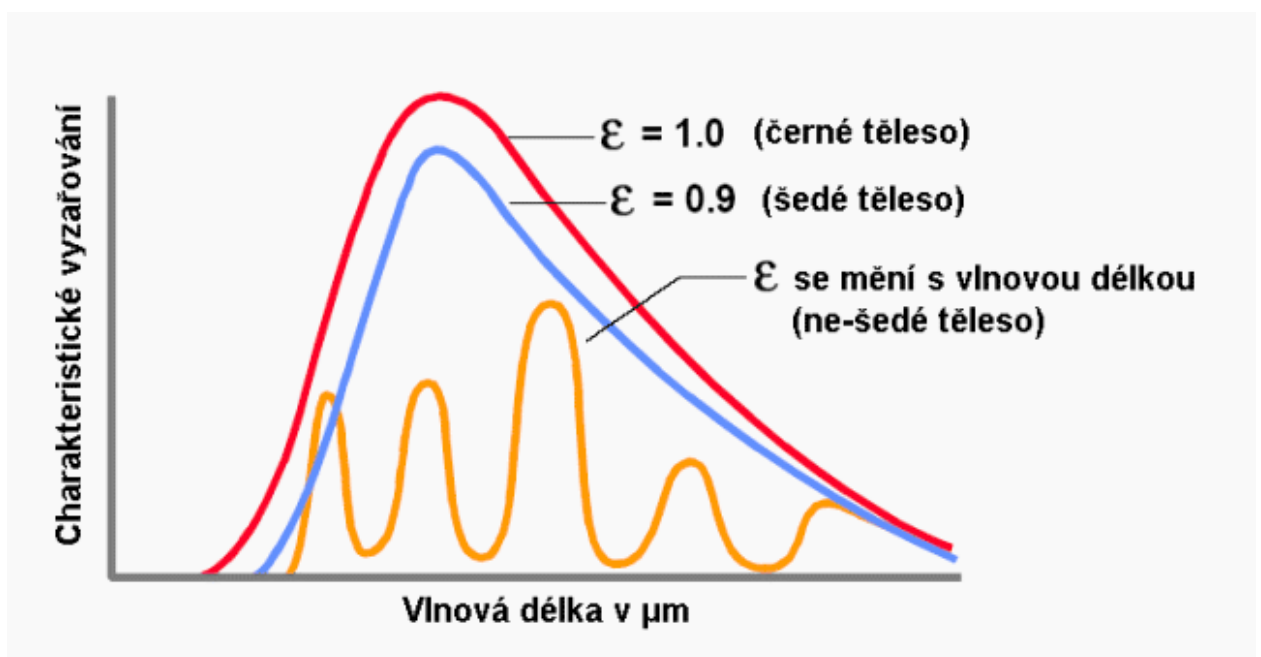
Emisivita je definována jako poměr energie vyzařované objektem při dané teplotě k energii vyzařované černým tělesem při stejné teplotě. Emisivita může nabývat hodnot 0 až 1; emisivita černého tělesa je rovna 1; pro reálná tělesa je emisivita vždy menší než 1. Emisivita závisí obecně na vlnové délce a na teplotě (viz. Obr. 9,10), dále pak na materiálu (viz. Obr. 8), kvalitě povrchu a úhlu pozorování [4]:

$$\varepsilon = f(\lambda, T)$$

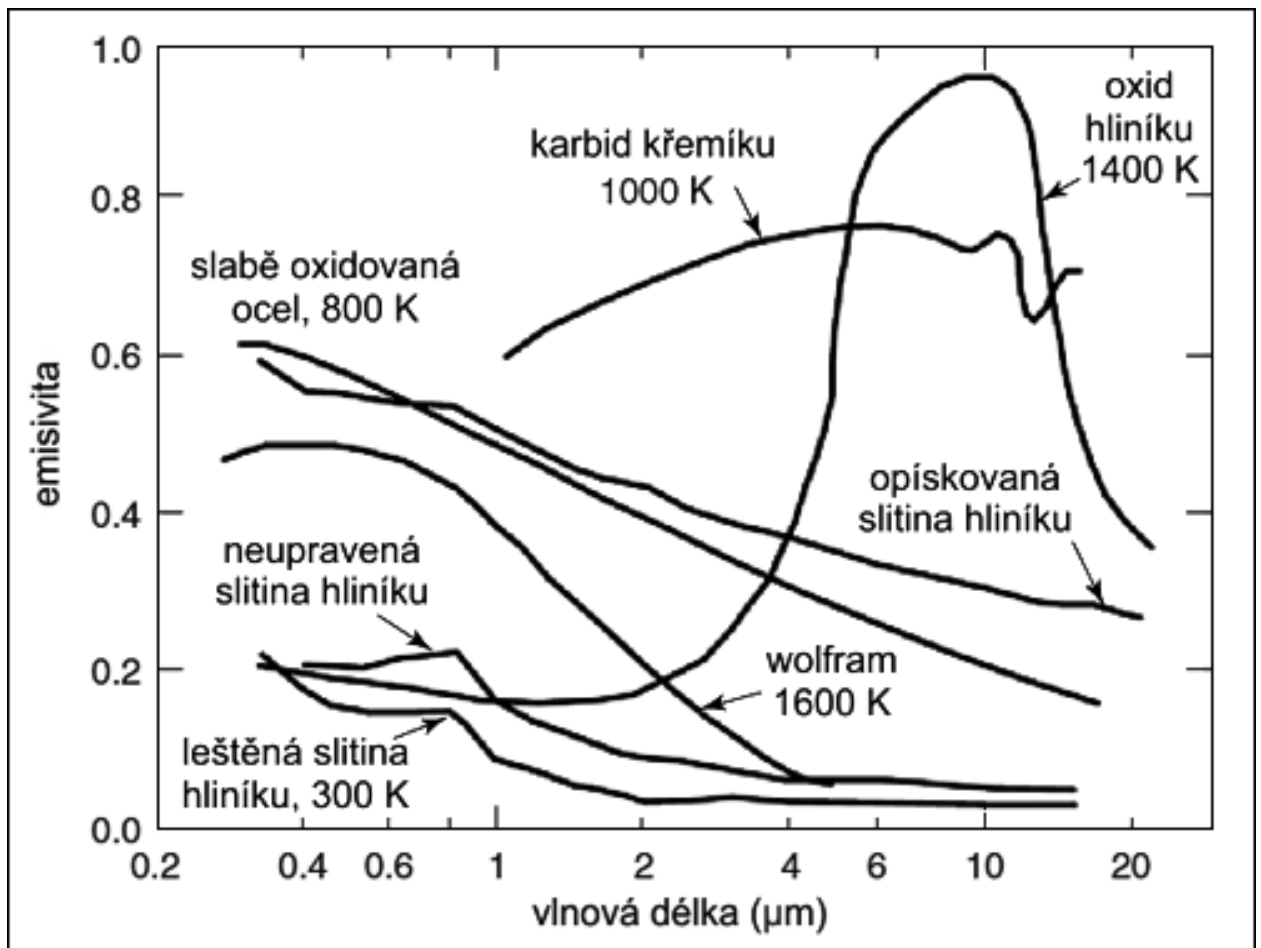
Nejvhodnější tělesa pro bezdotykové měření jsou tělesa, jejichž emisivita je konstantní v širokém pásmu vlnových délek. Zářiče, které tomu odpovídají označujeme jako šedá tělesa s emisivitou menší než 1 [4].



Obr. 8: Spektrální emisivita 3 druhu zářiče: 1) černé těleso; 2) šedé těleso; 3) selektivní zářič [6]



Obr. 9: Charakteristické vyzařování při různých vlnových délkách [13]



Obr. 10: Závislost emisivity na vlnové délce u vybraných materiálu [14]

3.8 Odražená zdánlivá teplota

Záření, které se od povrchu měřeného objektu odráží charakterizuje odražená zdánlivá teplota.

Při vysvětlení významu odražené zdánlivé teploty je třeba se vrátit k souvislosti mezi emisivitou a odrazivostí povrchu. Odrazivost ρ tělesa s povrchem nepropouštějícím záření je $\rho = 1 - \epsilon$, kde ϵ je emisivita. Pro praxi je to velmi důležitý závěr, ze kterého vyplývá, že čím menší je emisivita povrchu, tím větší bude vliv zdánlivé odražené teploty. V praxi je tudíž snazší měřit povrchy s velkou emisivitou, a proto je také snaha, pokud je to možné, zvolit takový spektrální rozsah měřicího přístroje, ve kterém je emisivita co největší.

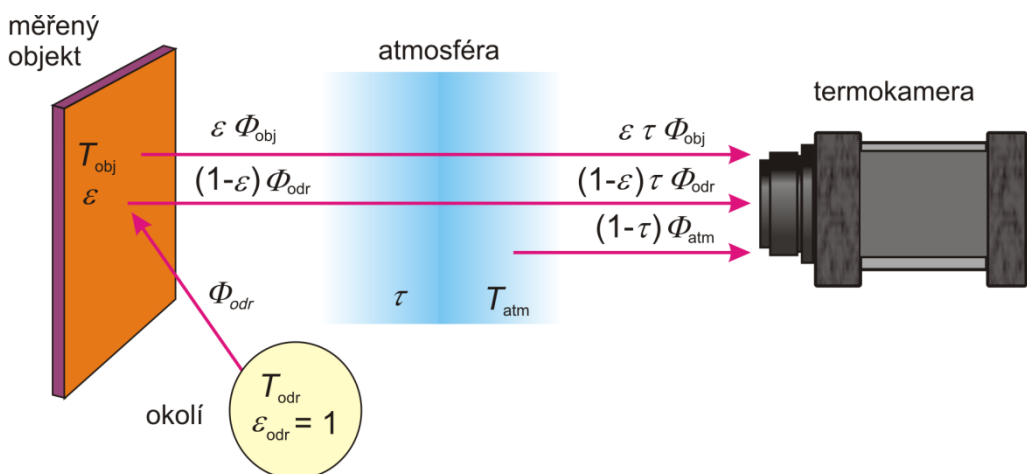
Zdánlivou odraženou teplotu i emisivitu lze stanovit několika metodami [3].

3.9 Rovnice termografie

Nyní lze sestavit rovnici pro celkový zářivý tok, který dopadá na detektor termokamery.

Jednotlivé složky zářivého toku přijaté detektorem termokamery jsou [2]:

- Zářivý tok z objektu zeslabený průchodem atmosférou: $\varepsilon \cdot \tau \cdot \Phi_{obj}$
(teplota objektu je T_{obj} , propustnost atmosféry je τ , emisivita povrchu je ε)
- Odražený zářivý tok z okolních zdrojů: $(1 - \varepsilon) \cdot \tau \cdot \Phi_{odr}$, kde $(1 - \varepsilon)$ vyjadřuje odrazivost objektu. (Předpokládáme, že záření přicházející z okolí představuje záření z povrchů v myšlené polokouli, které mají emisivitu = 1 a stejnou teplotou T_{odr}). Zdánlivá odražená teplota T_{odr} je zdánlivá teplota jiných objektů, jejichž záření se odráží od povrchu měřeného objektu do termokamery.
- Zářivý tok emitovaný atmosférou: $(1 - \tau) \cdot \Phi_{atm}$, kde $(1 - \tau)$ vyjadřuje emisivitu atmosféry, jejíž teplota je T_{atm}
- Uvažuje se plná transparentnost optiky termokamery a zářivý tok optických komponent se považuje za zanedbatelný



Obr. 11: Situace při termografickém měření [3]

Rovnice termografie pro celkový zářivý tok:

$$\Phi_{celk} = \varepsilon \cdot \tau \cdot \Phi_{obj} + (1 - \varepsilon) \cdot \tau \cdot \Phi_{odr} + (1 - \tau) \cdot \Phi_{atm} \quad (8)$$

[4]

Z této rovnice v praktické části odvodím rovnice pro stanovení emisivity.

4. Stanovení emisivity

Stanovení emisivity povrchu předmětu je možné pomocí více metod, ale jejich nevýhodou je často omezení na použití ve speciálně vybavené laboratoři.

4.1 Kontaktní metoda

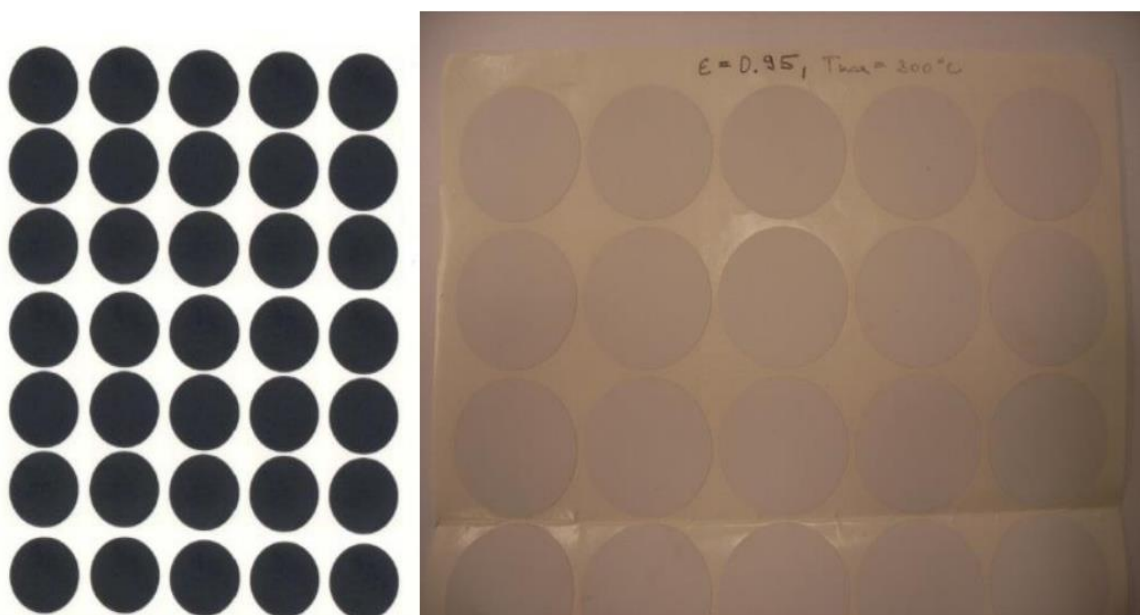
Stanovení emisivity povrchu předmětu je možné pomocí více metod, ale jejich nevýhodou je často omezení na použití ve speciálně vybavené laboratoři.

Norma ČSN ISO 18434-1 „Monitorování stavu a diagnostika strojů – Termografie – Část 1: Všeobecné postupy“ doporučuje dvě metody, kontaktní metodu a metodu využívající materiál s referenční emisivitou.

Pro stanovení emisivity pomocí IČ termokamery nejdříve je třeba zjistit skutečnou hodnotu teploty měřeného povrchu.

V případě metody kontaktní teplota měřeného povrchu je stanovena dotykovým teploměrem. Dále se teplota povrchu naměří IČ termokamerou. Poloha termokamery zůstává stejná a mění se nastavení hodnoty emisivity tak, aby naměřena termokamerou teplota odpovídala teplotě, která byla změřena dotykovým teploměrem.

Při použití metody využívající materiál s referenční emisivitou na povrch se nalepí vhodná lepicí páska nebo nátěr se známou emisivitou (viz Obr. 12), dále je termokamerou stanovena jeho skutečná teplota. Poloha termokamery zůstává stejná a mění se nastavení hodnoty emisivity tak, aby naměřena termokamerou teplota odpovídala teplotě na materiálu s referenční emisivitou [4].



Obr. 12: Maskovací folie se známou emisivitou [17]

V experimentu použijí kontaktní metodu a pro stanovení skutečně hodnoty teploty povrchu využijí dotykový teploměr Testo 905-T2 a multimetr s termočlánkem M89OG.



Obr. 13: Stanovení teploty dotykovým teploměrem [15]

Nevýhodami kontaktní metody nebo metody s použitím materiálu s referenční emisivitou jsou:

- Časová náročnost
- Speciální okolnosti, které tyto metody vyžadují
- Potřebná manipulace s měřeným objektem
- Náročnost obsluhy
- Nedá se měřit emisivita u pohybujících se objektů, objektů pod vysokým napětím atd.

4.2 Bezkontaktní metoda dle patentu

Automatické bezdotykové stanovení emisivity povrchu, kterým se zabývá ověřovaný patent, minimalizuje komplikace spojené s kontaktním měřením emisivity. Při bezkontaktní metodě dle patentu je současně použita IČ termokamera a dodatečný zdroj IČ záření [7].

„Podstatou vynálezu je způsob stanovení emisivity, který se vyznačuje ozářením měřeného povrchu IČ zářením z externího zdroje. K určení emisivity jsou pak použité dva výsledky měření. Za prvé bez ozářením měřeného objektu zdrojem IČ záření a za druhé s ozářením měřeného objektu zdrojem IČ záření. Emisivita je pak stanovena na základě rozdílu naměřených hodnot odražené a vyzářené zdánlivé teploty z obou výsledků měření [7].“

Hlavní výhodou použití bezkontaktní metody stanovení emisivity dle patentu je, že nevyžaduje dodatečnou manipulaci s měřeným předmětem a je možné stanovit i emisivitu nebezpečných, nedostupných či pohyblivých se objektů. Dále je méně náročné na obsluhu, na rozdíl od dnes nejčastěji používaných metod stanovení emisivity [7].

5. Experiment

5.1 Odvození vztahu pro bezdotykové stanovení emisivity

Při odvození vztahu pro bezdotykové měření emisivity vycházím z rovnice termografie (8), kterou jsem odvodil v teoretické části práce. Avšak u celkového zářivého toku při použití dodatečného zdroje IČ záření se objeví navíc složka zářivého toku od zdroje záření $(1 - \varepsilon) \cdot \tau^2 \cdot \Phi_{IČ_zdroj}$. Propustnost atmosféry je ve druhé mocnině, protože záření se projde atmosférou dvakrát, cestou k materiálu a po odražení do objektivu termokamery (viz. Obr. 14).

$$\Phi_{celk_IČ} = \varepsilon \cdot \tau \cdot \Phi_{obj} + (1 - \varepsilon) \cdot \tau \cdot \Phi_{odr} + (1 - \tau) \cdot \Phi_{atm} + (1 - \varepsilon) \cdot \tau^2 \cdot \Phi_{IČ_zdroj} \quad (9)$$

Odečtením celkového zářivého toku s použitím zdroje IC záření (9) od celkového zářivého toku bez zdroje (8) dostaneme difference podle které se pak stanoví emisivita povrchu dle patentu:

$$\Phi_{celk_IČ} - \Phi_{celk} = (1 - \varepsilon) \cdot \tau^2 \cdot \Phi_{IČ_zdroj}$$

Přepočtem zářivého toku na napětí v detektoru termokamery $U_{celk} = c \cdot \Phi_{celk}$, kde c je konstanta uměření, dostaneme vztah:

$$\frac{U_{celk_IČ} - U_{celk}}{c} = \frac{(1 - \varepsilon) \cdot \tau^2 \cdot U_{IČ_zdroj}}{c}$$

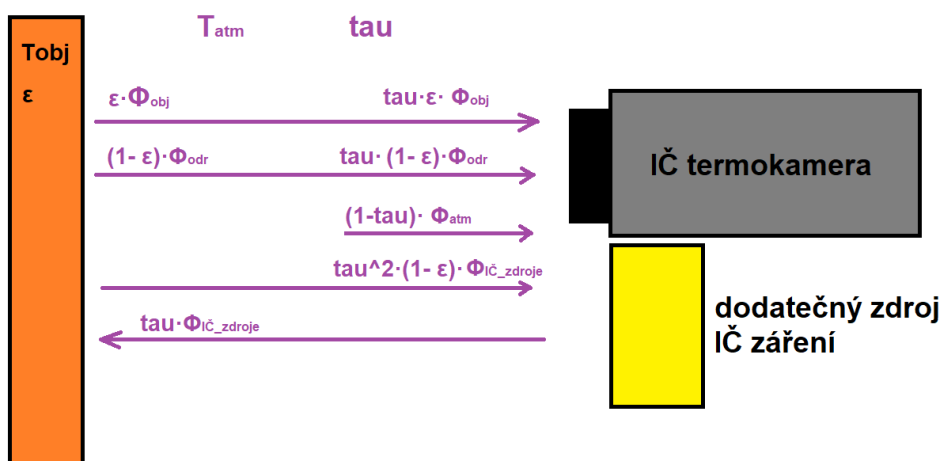
Po jednoduchých úpravách dostaneme finální vztah pro stanovení emisivity metodou dle patentu:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\Delta U}{\tau^2 \cdot U_{I\check{C}_{zdroj}}} \quad (10)$$

Pro lepší pochopení souvislosti emisivity a zdánlivé teploty co budu měřit vztah (10) se převede do formy:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\Delta\Phi}{\tau^2 \cdot \Phi_{I\check{C}_{zdroj}}} \quad (11)$$

kde $\Delta\Phi$ je rozdíl zářivých toků před a po ozáření povrchu dodatečným zdrojem IČ záření, který je uměřen rozdílu zdánlivých teplot, které stanovím pomocí experimentu.



Obr. 14: Situace při termografickém měření s použitím dodatečného zdroje IČ záření

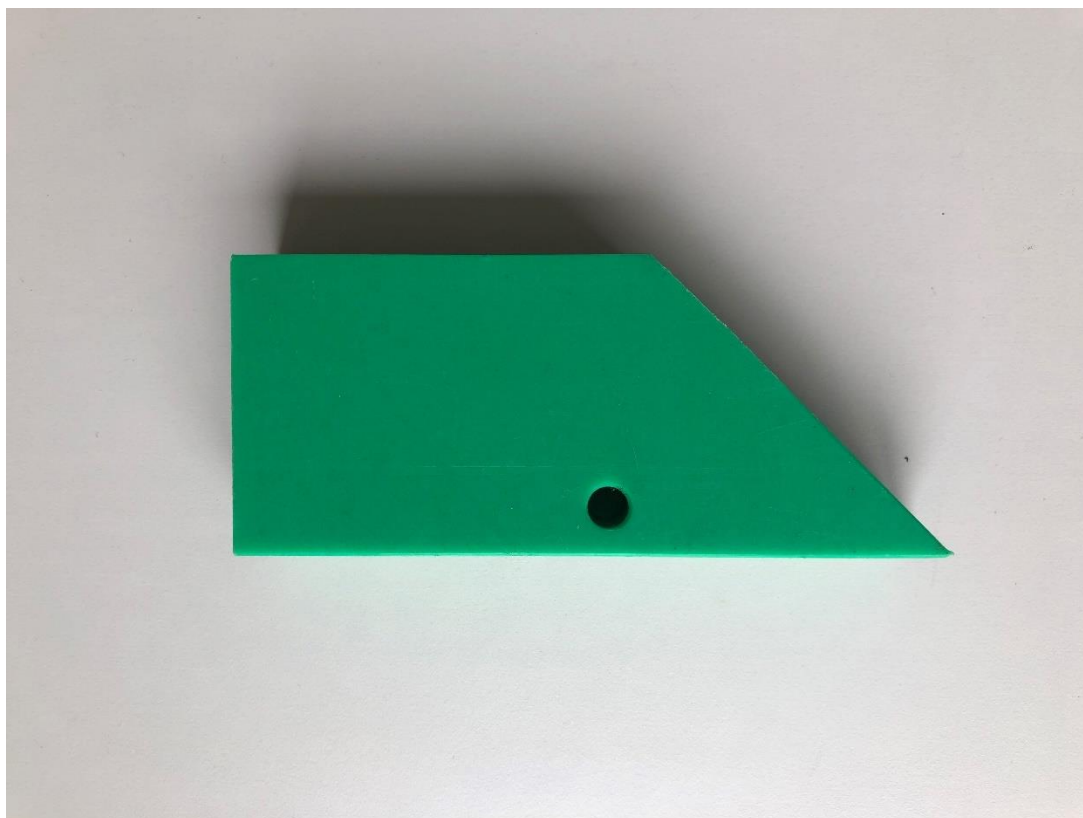
5.2 Návrh experimentu

Součástí experimentu je také stanovení emisivity kontaktní metodou a stanovení zdánlivé odražené teploty dle normy ISO 18434-1, která vyhovuje technickým požadavkům diagnostiky i prognostiky, výsledky pak porovnám s výsledky měření dle patentu.

5.2.1 Materiály

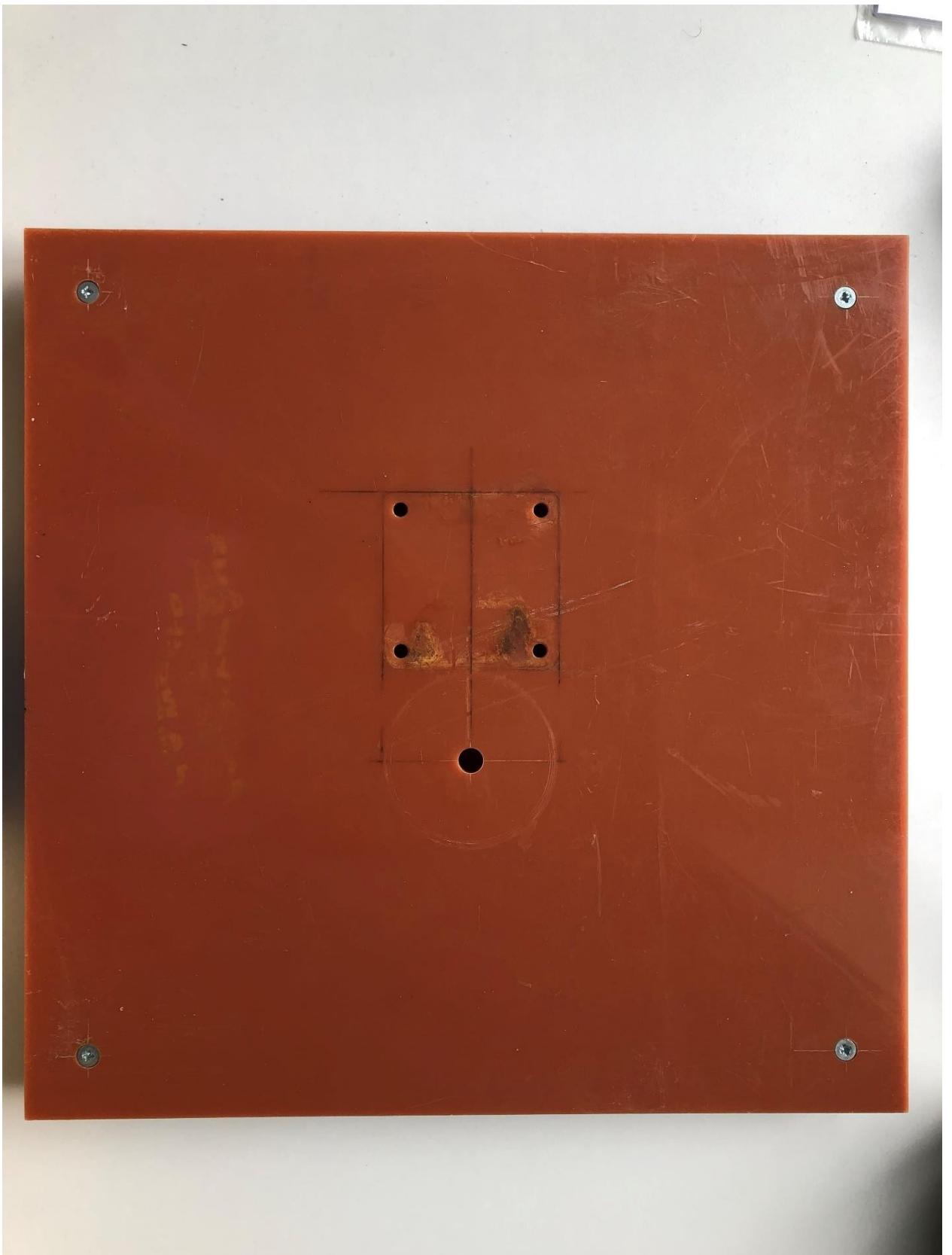
Jako vzorky pro ověření možnosti využití metody stanovení emisivity dle patentu jsem zvolil různá tělesa, jejichž povrchy reprezentují různou emisivitu.

Prvním vzorkem (I.) (viz. Obr. 14), jehož povrch představuje vysokou emisivitu, je kus plastu PE 1000 (Polyethylen), vytištěný na 3D tiskárně. Má ultra vysokou molekulovou hmotnost (5.000.000 g/mol) a vysokou odolnost proti otěru a oděru. Používá se hlavně při výrobě třecích ploch, v chemickém průmyslu, potravinářském průmyslu a při výrobě dopravníkových pasů.



Obr. 15: Kus plastu PE-1000 vytištěný na 3D tiskárně (I.)

Dalším vzorkem (II.) (viz. Obr. 15) je laboratorní lakovaná deska. Neznám, z jakého materiálu je udělaná a materiál laku. Slouží jako vzorek s materiálem s neznámou emisivitou což je běžný pro měření teploty nebo emisivity v praxi.



Obr. 16: Vzorek s lakovaným povrchem (II.)

Třetím vzorkem (III.) (viz. Obr. 16) je kus plechu z nerezové (korozivzdorné) oceli. Materiál má poměrně malou emisivitu při porovnání s předchozími materiály. Je to vysokolegovaná ocel, která má zvýšenou odolnost vůči chemické a elektrochemické korozi. Používá se téměř ve všech odvětvích průmyslu od chemického a potravinářského průmyslu až po automobilový průmysl, také v architektuře a stavebnictví.



Obr. 17: Nerezová ocel (III.)

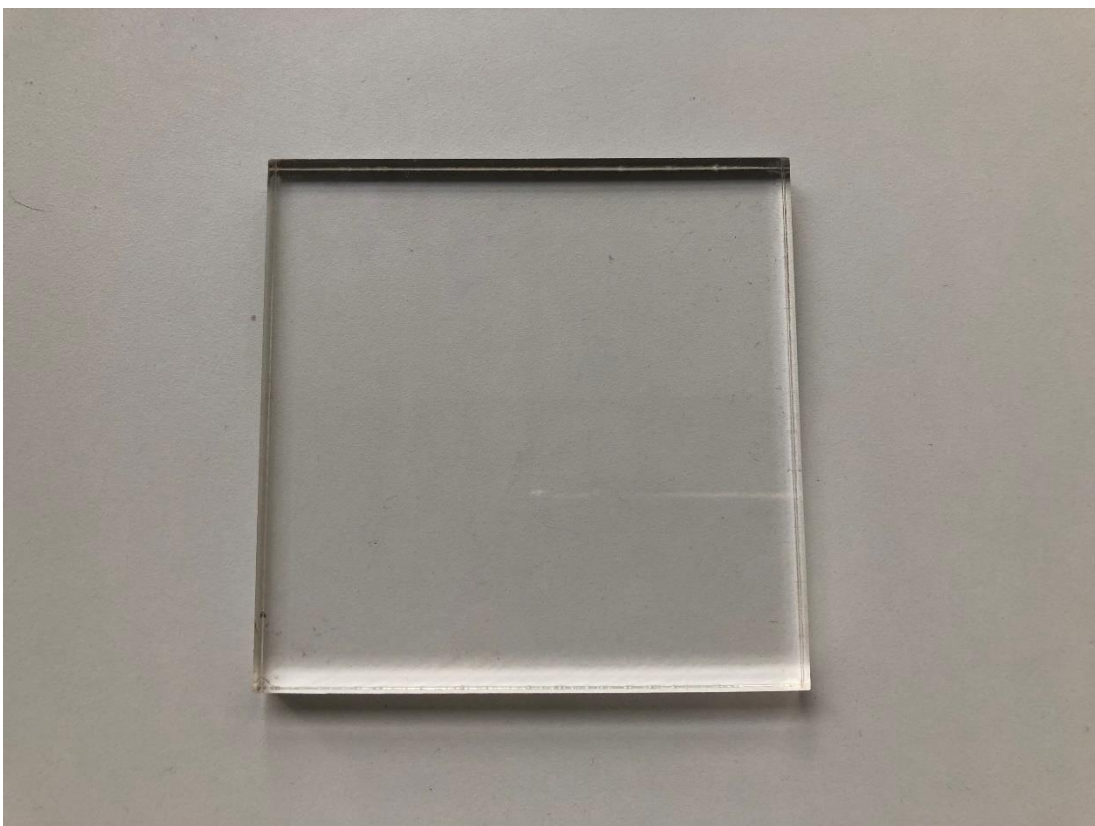
Čtvrtém vzorkem (IV.) bude tenký kus oceli, ze všech materiálů, co budu zkoumat by měl mít nejmenší emisivitu (viz. Obr. 17).

Patý vzorek (V.) je odříznutý kus plexiskla (viz. Obr. 18).

Šestý vzorek (VI.) je plastové průhledné viko (viz. Obr. 19).



Obr. 18: Tenký kus oceli (IV.)



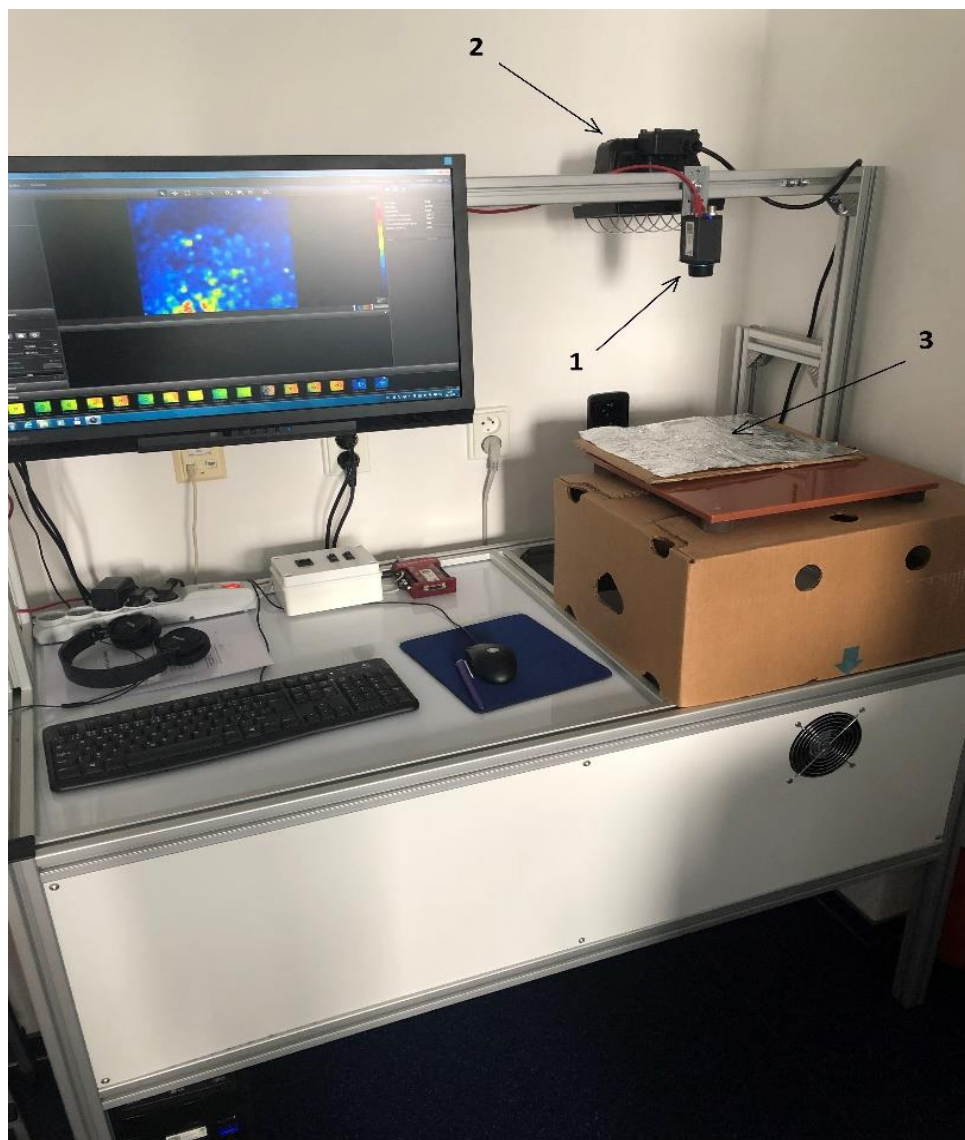
Obr. 19: Plexisklo (V.)



Obr. 20: Plastové průhledné viko (VI.)

5.2.2 Pracoviště

Dle patentu jsou dvě možnosti provedení zařízení při měření: 1. když je zdroj dodatečného IČ záření umístěn přímo na IČ termokameře; 2. zdroj IČ záření je externě umístěn tak ze záření se odrazí do objektivu termokamery pod požadovaným úhlem, kde 1 – IČ termokamera, 2 – zdroj dodatečného IČ záření, 3 – měřený objekt (viz. Obr. 20).



Obr. 21: Místo provedení experimentu

Zařízení, které bylo použito u měření:

- IČT Termokamera: Flir Ax5

Imaging and optical data	
IR resolution	80 × 64 pixels
Thermal sensitivity/NETD	< 0.05°C @ +30°C (+86°F) / 50 mK
Field of view (FOV)	44° × 36°
Focal length	5 mm (0.20 in.)
Spatial resolution (IFOV)	10.0 mrad
F-number	1.25
Image frequency	60 Hz
Focus	Fixed
Detector data	
Detector type	Focal plane array (FPA), uncooled VOX microbolometer
Spectral range	7.5–13 μm
Detector pitch	50 μm
Detector time constant	Typical 12 ms
Measurement	
Object temperature range	<ul style="list-style-type: none"> • -25 to +135°C (-13 to 275°F) • -40 to +550°C (-40 to +1022°F)
Accuracy	±5°C (±9°F) or ±5% of reading

Obr. 22: Technická data termokamery Flir Ax5[16]

- Zdroj dodatečného IČ záření: Halogenový reflektor
- Software: Flir Tools +
- Dotykový teploměr: Testo 905 - T2 (měření I., II., III.)

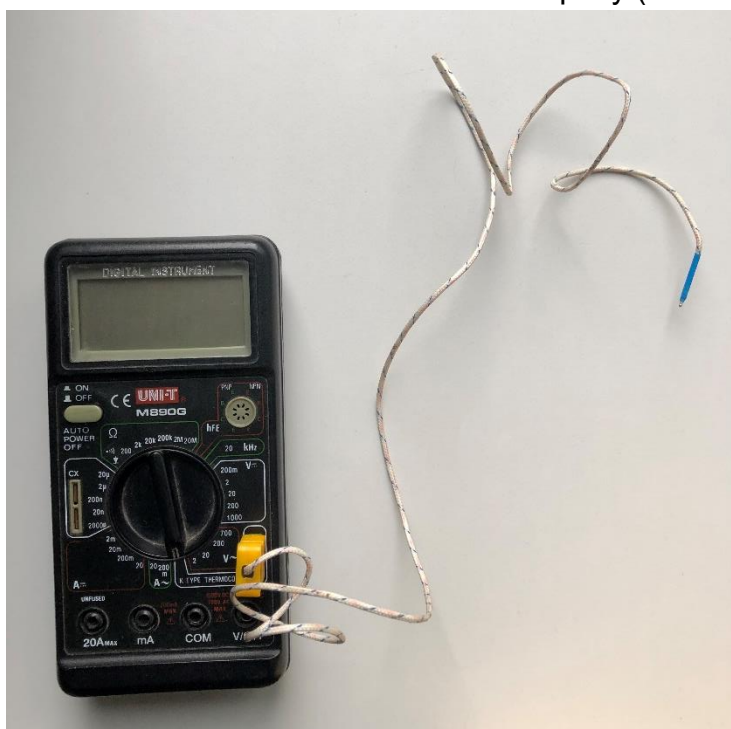
Teplota	
Měřicí rozsah	-50 do +350 °C (short-term to +500 °C)
Přesnost	±1 °C (-50 do +99.9 °C) ±1 % z mv (Zbývající rozsah)
Rozlišení	0.1 °C
Doba odezvy	t99 = 5 s

Obr. 23: Technická data dotykového teploměru Testo 905-T2[10]



Obr. 24: Dotykový teploměr Testo 905-T2

- Multimetr s termočlánkem na měření teploty (měření IV., V., VI)



Obr. 25: Digitální multimetr s termočlánkem M890G

Temperature

"K" type thermocouple

Range	Resolution	Accuracy
-50°C - 400°C	1°C	± 0.75% of rdg ± 3 digits
400°C-1000°C	1°C	± 1.5% of rdg ± 15 digits

Obr. 26: Technická data multimetru s termočlánkem M89OG

- PC na kterém je nainstalován kamerový software

5.2.3 Postup měření

5.2.3.1 Postup dle normy ISO 18434-1

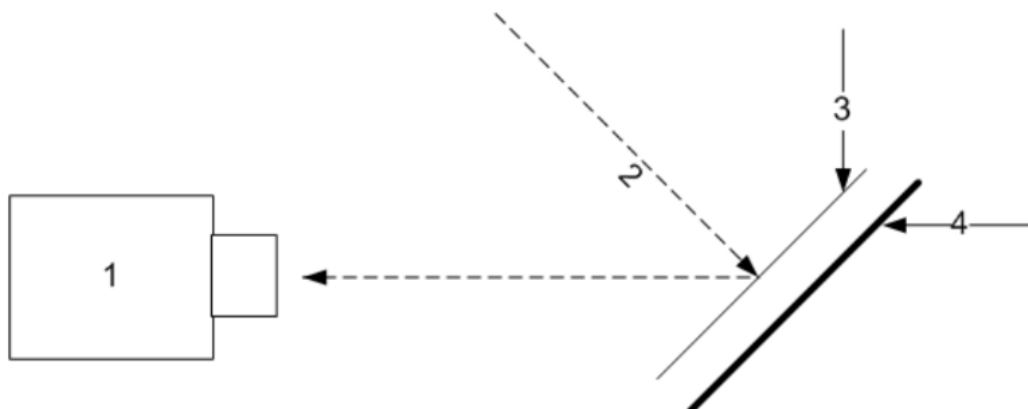
Nejdříve stanovíme emisivitu povrchu kontaktní metodou dle normy ISO 18434-1, která byla popsána v teoretické části. Postup bude stejný pro všechny materiály.

Abych správně stanovil emisivitu dle této normy potřebuji správně naměřit teplotu povrchu což znamená, že mám dobře nastavit všechny parametry. Dalším důležitým parametrem kromě emisivity je odražená zdánlivá teplota.

Odraženou zdánlivou teplotu stanovím přímou metodou dle normy ISO 18434-1. Pro stanovení zdánlivé teploty jsem použil IČT kameru a zmačkanou a opětovně narovnanou hliníkovou folie, která slouží reflektorem. Provedení zařízení bylo uděláno podle Obr. 21, kde 1 - IČT kamera, 2 – paprsek odrážené zdánlivé teploty, 3 - reflektor, 4 – zkoušený materiál (viz. Obr. 26).

Postup stanovení odrážené zdánlivé teploty nepřímou metodu:

- Nastavil jsem hodnotu emisivity na 1 a vzdálenost na hodnotu 0 v softwaru kamery.
- Umístil jsem hliníkovou folie lesklou stranou nahoru do zorného pole kamery tak že byl před objektem a jeho plocha byla rovnoběžná s plochou měřeného objektu.
- Bez změny pozice kamery jsem změřil teplotu na reflektoru, takto zjištěná teplota je v podstatě tou od objektu se odrážející zdánlivou teplotou.



Obr. 27: Provedení zařízení pro stanovení zdánlivé odražené teploty dle ISO 18434-1

Po stanovení odražené zdánlivé teploty mám všechny parametry, které potřebuji k správnému stanovení emisivity. Umístění zařízení je stejně jako u měření odražené zdánlivé teploty bez použití reflektoru.

Podmínkou přesnějších výsledku je teplota měřeného povrchu, která má být minimálně o 20° vyšší než je teplota okolí.

Postupoval jsem dalším způsobem:

- Dotykovým teploměrem jsem zjistil teplotu materiálu.
- Umístil jsem materiál na určitou vzdálenost od kamery.
- Zaostřil jsem kameru na objektu a měřil jsem teplotu povrchu bez pohybu kamerou.
- Měnil jsem nastavení emisivity (primo v softwaru kamery) pokud teplota co měří termokamera nestala stejná jako ta co jsem naměřil dotykovým teploměrem.
- Postup jsem opakoval třikrát.

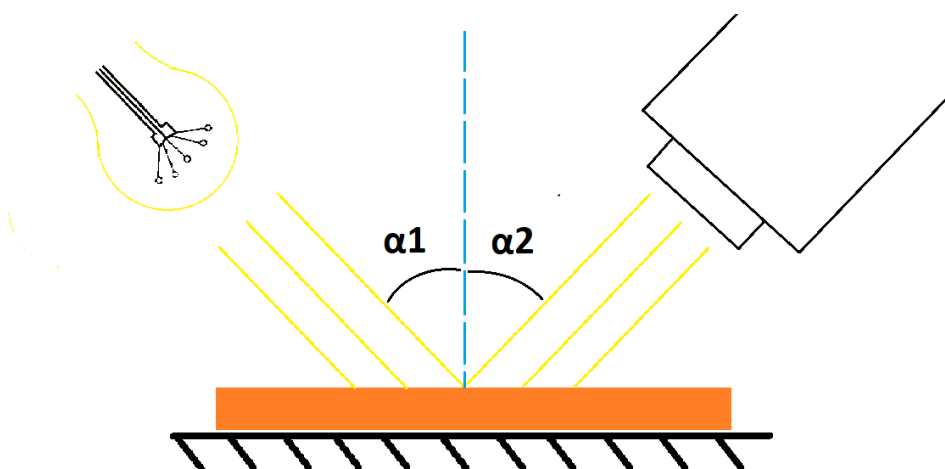
5.2.3.2 Postup dle patentu

Nejdůležitější v tom to měření je nastavit správný úhel odrazu teploty kterou vyzařuje zdroj dodatečného IČ záření a která dopadá na termokameru. Postup je stejný pro všechny vzorky.

Postup měření:

- Nastavil jsem požadovaný úhel odrazu, aby veškeré vyzařované záření se po odrazu od měřeného tělesa odrazilo do objektivu IČ termokamery.
- Zaostřil jsem kameru na objektu a měřil jsem zdánlivou teplotu povrchu bez pohybu kamerou.
- Ozářil jsem materiál krátkým impulsem záření dodatečného zdroje.
- Změřil jsem zdánlivou teplotu povrchu po ozáření zářičem.
- Opakoval jsem to třikrát.

Při měření jsem použil provedení zařízení podle Obr.22 ($\alpha_1 = \alpha_2$) z důvodu toho že zdroj dodatečného IČ záření který jsem používal byl větší než termokamera tím pádem neodráželo se veškeré záření od objektu do objektivu termokamery.



Obr. 28: Provedení zařízení pro měření

6. Naměřená data

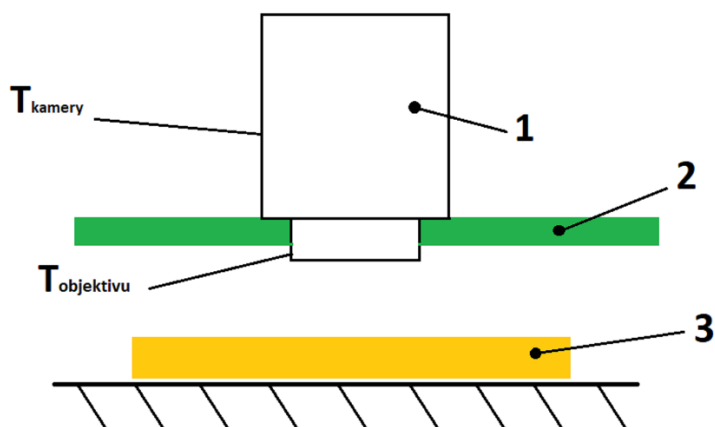
Stanovení odražené zdánlivé teploty okolí dle normy ISO 18434-1:

Průměrná hodnota odražené zdánlivé teploty:

U vzorku číslo I., II., III. $t = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$, je způsobena vedle se nacházejícím zdrojem záření, kterým jsem ohříval tělesa a teplotou kamery ($T_{\text{kamery}} \doteq 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{objektivu}} \doteq 25\text{ }^{\circ}\text{C}$) viz. Obr. 28, neměřilo se pod uhlím 5° až 15° a proto se teplota kamery odrazela zpátky do objektivu.

U vzorku číslo IV. $t = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$, bylo to první měření, odstínil jsem kameru a zářič.

U vzorku číslo V., VI. $t = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, je způsobena dlouhou prací zářiče v místnosti, kterým jsem ohříval tělesa, teplota kamery je odstíněna.



Obr. 29: Provedeni při měření kontaktní metodou, kde 1-termokamera, 2-"stínítko", 3-měřeny povrch.

Dotyková metoda dle normy:

I. PE-1000:

Číslo pokusu	Teplota [°C]	Emisivita [-]
1	43,3	0,98
2	48,9	0,98
3	59,4	0,97

Tab. 1: Stanovení emisivity dotykovou metodou vzorku PE 1000

II. Materiál s lakovaným povrchem:

Číslo pokusu	Teplota [°C]	Emisivita [-]
1	54,9	0,97
2	65,1	0,96
3	65,4	0,96

Tab. 2: Stanovení emisivity dotykovou metodou vzorku s lakovaným povrchem

III. Nerezová ocel:

Číslo pokusu	Teplota [°C]	Emisivita [-]
1	48,5	0,75
2	50	0,77
3	51,8	0,75

Tab. 3: Stanovení emisivity dotykovou metodou vzorku nerezové oceli

IV. Ocelový plech:

Číslo pokusu	Teplota [°C]	Emisivita [-]
1	48	0,20
2	55	0,20
3	51	0,21

Tab. 4: Stanovení emisivity dotykovou metodou vzorku tenkého ocelového plechu

V. Plexisklo:

Číslo pokusu	Teplota [°C]	Emisivita [-]
1	56	0,93
2	70	0,94
3	76	0,95

Tab. 5: Stanovení emisivity dotykovou metodou vzorku plexiskla

VI. Plastové viko:

Číslo pokusu	Teplota [°C]	Emisivita [-]
1	66	0,98
2	63	0,97
3	63	0,97

Tab. 6: Stanovení emisivity dotykovou metodou vzorku plastového vika

Stanovení odražené zdánlivé teploty povrchu materiálu dle patentu:

I. PE 1000:

Číslo pokusu	Zdánlivá teplota před ozáření [°C]	Zdánlivá teplota po ozáření [°C]	Δt [°C]
1	31,23	38,24	7,01
2	31,07	38,46	7,39
3	31,07	38,46	7,39

Tab. 7: Stanovení odražené zdánlivé teploty vzorku PE 1000

II. Lakovaný povrch:

Číslo pokusu	Zdánlivá teplota před ozáření [°C]	Zdánlivá teplota po ozáření [°C]	Δt [°C]
1	31,27	39,54	8,27
2	31,27	39,77	8,5
3	31,41	40,14	8,73

Tab. 8: Stanovení odražené zdánlivé teploty vzorku s lakovaným povrchem

III. Nerezová ocel:

Číslo pokusu	Zdánlivá teplota před ozáření [°C]	Zdánlivá teplota po ozáření [°C]	Δt [°C]
1	25,68	46,54	20,86
2	25,07	46,12	21,05
3	24,69	45,37	24,69

Tab. 9: Stanovení odražené zdánlivé teploty vzorku nerezové oceli

IV. Ocelový plech

Číslo pokusu	Zdánlivá teplota před ozáření [°C]	Zdánlivá teplota po ozáření [°C]	Δt [°C]
1	29,21	91,84	62,63
2	29,32	92,88	63,56
3	29,36	93,40	64,04

Tab. 10: Stanovení odražené zdánlivé teploty vzorku tenkého ocelového plechu

V. Plexisklo

Číslo pokusu	Zdánlivá teplota před ozáření [°C]	Zdánlivá teplota po ozáření [°C]	Δt [°C]
1	31,85	49,25	17,4
2	32,56	48,85	16,29
3	32,64	48,44	15,8

Tab. 11: Stanovení odražené zdánlivé teploty vzorku plexiskla

VI. Plastové viko

Číslo pokusu	Zdánlivá teplota před ozáření [°C]	Zdánlivá teplota po ozáření [°C]	Δt [°C]
1	28,06	37,1	9,04
2	28,07	36,99	8,92
3	27,92	36,72	8,8

Tab. 12: Stanovení odražené zdánlivé teploty vzorku plastového vika

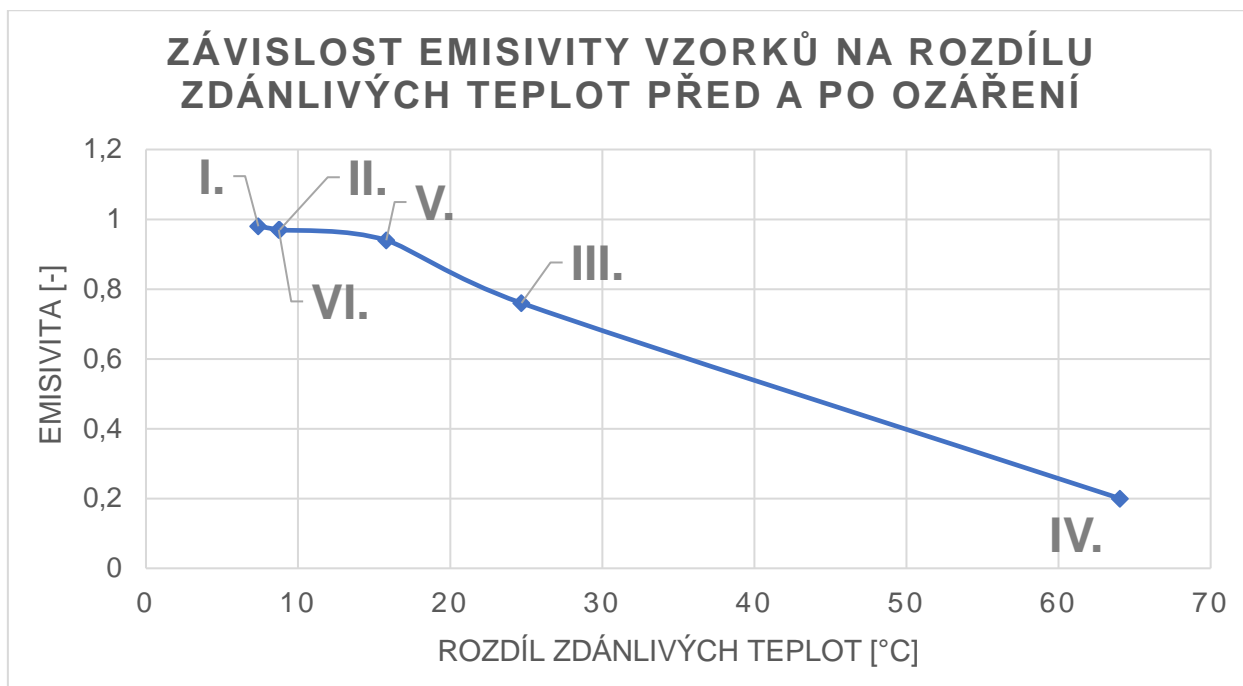
7. Výsledky

Po měření dotykovou metodou dle normy ISO 18434-1 pořadí emisivit vzorku od největší do nejmenší:

- Vzorek I. PE – 1000 – $\underline{\varepsilon = 0,98}$
- Vzorek II. Materiál s lakovaným povrchem – $\underline{\varepsilon = 0,97}$
- Vzorek VI. Plastové viko – $\underline{\varepsilon = 0,97}$
- Vzorek V. Plexisklo – $\underline{\varepsilon = 0,94}$
- Vzorek III. Nerezová ocel – $\underline{\varepsilon = 0,76}$
- Vzorek IV. Ocelový plech – $\underline{\varepsilon = 0,2}$

Rozdíl zdánlivých teplot před a po ozáření od nejmenší do největší dle patentu:

- Vzorek I. PE – 1000 – $\underline{\Delta t = 7,39 \text{ °C}}$
- Vzorek II. Materiál s lakovaným povrchem – $\underline{\Delta t = 8,73 \text{ °C}}$
- Vzorek VI. Plastové viko – $\underline{\Delta t = 8,8 \text{ °C}}$
- Vzorek V. Plexisklo – $\underline{\Delta t = 15,8 \text{ °C}}$
- Vzorek III. Nerezová ocel – $\underline{\Delta t = 24,69 \text{ °C}}$
- Vzorek IV. Ocelový plech – $\underline{\Delta t = 64,04 \text{ °C}}$



Obr. 30: Závislost Emisivity vzorků na rozdílu zdánlivých teplot před a po ozáření

Na Obr. 29 je znázorněn graf závislosti emisivity vzorků na rozdílu zdánlivých teplot před a po ozáření, který ukazuje že emisivita materiálu je zpětně závislá na odrážené zdánlivé teplotě což odpovídá vztahu (11) pro stanovení emisivity povrchu dle patentu kterou jsem odvodil v dílu 5.1.

Metoda stanovení emisivity povrchu dle patentu umožňuje stanovit emisivitu v každém bodě termogramu, kam dopadne záření od dodatečného zdroje IČ záření, naměřeného termokamerou. Jako výsledek získáváme mapu rozložení emisivity na povrchu což vede k přesnějšímu stanovení teploty povrchu v každém jeho bodě.

Metoda dle patentu se může v průmyslu použít skoro všude, kde se při výrobě, kontrole nebo údržbě, využívají termokamery. Avšak bude méně přesná u stanovení emisivity velkých objektu, které jsou podstatně větší, než je dodatečný zdroj IČ záření. Důvodem toho je, že intenzita záření zdroje s uhlím dopadem klesá. Nejvíce vhodné použití této metody lze předpokládat při měření emisivity, a následně teploty, plošných objektu, jako je třeba zeď nebo plošné svařované desky atd.

8. Závěr

Zadáním bakalářské práce bylo ověřit praktické možnosti využití patentu Hofreiter M., Sova J.: „Způsob automatického bezdotykového stanovení emisivity povrchu a zařízení k provádění tohoto způsobu“, PV305219 pro měření teplotních polí s nehomogenní emisivitou, který spočívá v závislosti emisivity na odrážené zdánlivé teplotě.

Pro ověření byl navržen experiment pro stanovení emisivity povrchu metodou dle patentu. Součástí, kterého bylo stanovení emisivity kontaktní metodou dle normy ISO 18431-1 která odpovídá normám diagnostiky.

Jako zkoumané materiály jsem použil šest vzorků s neznámými emisivity povrchu. Jsou to materiály, které běžné vyskytují v různých odvětvích průmyslu.

Metoda dle patentu by měla ukázat ze čím větší je rozdíl zdánlivých teplot, před a po ozáření materiálu dodatečným zdrojem IČ záření, tím emisivita je menší i naopak čím je rozdíl zdánlivých teplot menší tím emisivita je větší. Výsledky, které jsem popsal v poslední části práce ukazují, že toto tvrzení o emisivitě je správné, což znamená že metoda dle patentu může být použita a odpovídá normám diagnostiky.

Z naměřených hodnot zdánlivých teplot, podle vzorečku (11), se dopočítá hodnota emisivity povrchu. Přesně stanovení emisivity však přesahuje rámec této bakalářské práce z důvodu nedostatku informace o jednotlivých složkách zářivého toku, které jsou částí finálního vztahu pro stanovení emisivity dle patentu.

Po provedení experimentu jednou z nevýhod použití této metody bych řekl je potřeba využití dost výkonného zdroje dodatečného IČ záření kvůli tomu, aby mohl udělat dostatečný rozdíl zdánlivých teplot před a po ozáření. Další nevýhodou bych nazval správné určení úhlu odrazu. Za některých okolních podmínek je dost těžký najít správný úhel odrazu teploty od dodatečného zářiče do objektivu kamery.

Pro případně další experiment na ověření metody dle patentu navrhnul bych u měření kontaktní metodou používat „stínítko“ na kameru dle Obr. 28, aby záření od termokamery mělo co nejmenší vliv na měřenou teplotu povrchu teploměrem.

Použité zdroje

- [1] TŮMOVÁ, Olga a Tomáš LANGHAMMER. *Electroscope: Vliv dílcích nejistot měření na celkovou nejistotu měření v infračervené termografii*[online]. 2013[cit. 2019-07-14]. ISSN 1802-4564.Dostupne z: http://ek702p10-ket.fel.zcu.cz/images/PDF/Rocnik2013/Cislo3_2013/r7c3c8.pdf
- [2] KADLEC, Karel, Miloš KMÍNEK a Pavel KADLEC. *Měření a řízení v potravinářských a biotechnologických výrobcích technologie potravin*. Ostrava: Key Publishing, 2015. ISBN 978-80-7418-232-7.
- [3] KADLEC, Karel. *Automa: Teoretické základy bezdotykového měření teploty*[online].02/2014[cit. 2019-07-14]. ISSN 1210-9592.Dostupne z: http://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/52890.pdf
- [4] SOVA, Jan, KADLEC, Karel. *All For Power: Termokamery a pyrometry – princip měření, vlastnosti a využití* [online]. 01/2014[cit.2019-07-14]. ISSN 1802-8535.Dostupne z: http://www.allforpower.cz/UserFiles/file/termokamery_1.pdf
- [5] In: GYMNÁZIUM SUŠICE [online]. Gymnázium, Sušice Copyright © 2014. [cit.2019-07-14]. Dostupné z: https://www.gymsusice.cz/images_users/predmety/fyzika/f_texty-zareni_cerneho_telesa.pdf
- [6] BRYNDA, Petr. *Využití termovizního měření k hodnocení jakosti obrobků*. Praha, 2009. Bakalářská práce (Bc.). České vysoké učení technické v Praze. Fakulta dopravní, Ústav aplikované matematiky.[online].Dostupne z: https://www.fd.cvut.cz/projects/k611x1s/doc/works/teorie_brynda.pdf
- [7] MILAN, Hofreiter, SOVA, Jan. *Způsob automatického bezdotykového stanovení emisivity povrchu a zařízení k provádění tohoto způsobu*. Patent PV305219
- [8] In: elektrorevize [online]. Pavel Vrátný, Copyright © 2019. [cit.2019-07-14] Dostupné z: <https://www.elektrorevize.cz/>
- [9] In: TERMOKAMERY [online]. AHLBORN měřicí a regulační technika spol. s r.o., Copyright 2013 ©. [cit.2019-07-14]. Dostupné z: <https://www.termokamery.cz/>
- [10] In: Testo [online]. Testo SE & Co. KGaA, Copyright © 2019. [cit.2019-07-14]. Dostupné z: <https://www.testo.com/cz-CZ/>
- [11] In: GYMNÁZIUM SUŠICE [online]. Gymnázium, Sušice Copyright © 2014. [cit.2019-07-14]. Dostupné z: <http://www.gymsusice.cz/>
- [12] <http://www.fyzika007.cz/>
- [13] In: RESCOM [online]. RESCOM s.r.o., 26.09.12. [cit.2019-07-14] Dostupné z: <http://www.rescom.cz/cz/aktuality/bezdotykově-infra-mereni-teploty-5>
- [14] In: CENTRUM TERMOGRAFIE [online]. Workswell Systems s.r.o., Copyright © 2019. [cit.2019-07-14]. Dostupné z: <https://centrumtermografie.cz/>

-
- [15] In: Meteostanice [online]. Meteostanice.cz, Copyright © 2019.
[cit.2019-07-14].
Dostupné z: <http://www.meteostanice.cz/>
- [16] In: FLIR [online]. FLIR® Systems, Inc., Copyright © 2019.
[cit.2019-07-14].
Dostupné z: <https://www.flir.com/>
- [17] STRÁNSKÝ, Marek. Zvyšování účinnosti pracovního cyklu klasické tepelné elektrárny. Plzeň, 2012. bakalářská práce (Bc.). ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI. Fakulta elektrotechnická

Seznam obrázků a tabulek

Obr. 1: Měření teploty bezkontaktním způsobem [8]	11
Obr. 2: Rozdělení spektra elektromagnetického záření s vyznačením oblasti využívané při bezdotykovém měření teploty [2]	12
Obr. 3: Měření termokamerou [9]	13
Obr. 4: Měření IČ teploměrem(pyrometrem), kde červená téčka ukazuje bod ve kterém se měří teplota [10].....	13
Obr. 5: Chod paprsku, který dopadá na černé těleso [11]	14
Obr. 6: Vyzařování černého tělesa podle Planckova zákona[12].....	15
Obr. 7: Interakce záření s objektem [13]	17
Obr. 8: Spektrální emisivita 3 druhu zářiče: 1) černé těleso; 2) šedé těleso; 3) selektivní zářič [6]	18
Obr. 9: Charakteristické vyzařování při různých vlnových délkách [13]	18
Obr. 10: Závislost emisivity na vlnové délce u vybraných materiálu [14]	19
Obr. 11: Situace při termografickém měření [3].....	20
Obr. 12: Maskovací folie se známou emisivitou [17].....	21
Obr. 13: Stanovení teploty dotykovým teploměrem [15]	22
Obr. 14: Situace při termografickém měření s použitím dodatečného zdroje IC záření	24
Obr. 15: Kus plastu PE-1000 vytištěný na 3D tiskárně (I.).....	25
Obr. 16: Vzorek s lakovaným povrchem (II.)	26
Obr. 17: Nerezová ocel (III.).....	27
Obr. 18: Tenký kus oceli (IV.).....	28
Obr. 19: Plexisklo (V.)	28
Obr. 20: Plastové průhledné viko (VI.)	29
Obr. 21: Místo provedení experimentu	30
Obr. 22: Technická data termokamery Flir Ax5[16]	31
Obr. 23: Technická data dotykového teploměru Testo 905-T2[10]	31
Obr. 24: Dotykový teploměr Testo 905-T2	32
Obr. 25: Digitální multimetr s termočlánkem M89OG	32
Obr. 26: Technická data multimetru s termočlánkem M89OG	33
Obr. 27: Provedení zařízení pro stanovení zdánlivé odražené teploty dle ISO 18434-1	34
Obr. 28: Provedení zařízení pro měření	35
Obr. 29: Provedení při měření kontaktní metodou, kde 1-termokamera, 2-"stínítko", 3-měření povrch.....	36
Obr. 30: Závislost Emisivity vzorků na rozdílu zdánlivých teplot před a po ozáření	39
Tab. 1: Stanovení emisivity dotykovou metodou vzorku PE 1000	36
Tab. 2: Stanovení emisivity dotykovou metodou vzorku s lakovaným povrchem	36
Tab. 3: Stanovení emisivity dotykovou metodou vzorku nerezové oceli	36
Tab. 4: Stanovení emisivity dotykovou metodou vzorku tenkého ocelového plechu	36
Tab. 5: Stanovení emisivity dotykovou metodou vzorku plexiskla	37
Tab. 6: Stanovení emisivity dotykovou metodou vzorku plastového vika.....	37
Tab. 7: Stanovení odražené zdánlivé teploty vzorku PE 1000.....	37
Tab. 8: Stanovení odražené zdánlivé teploty vzorku s lakovaným povrchem	37
Tab. 9: Stanovení odražené zdánlivé teploty vzorku nerezové oceli	37
Tab. 10: Stanovení odražené zdánlivé teploty vzorku tenkého ocelového plechu	38
Tab. 11: Stanovení odražené zdánlivé teploty vzorku plexiskla.....	38
Tab. 12: Stanovení odražené zdánlivé teploty vzorku plastového vika	38