

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Databanka emisivity materiálů pro měření IR teploměrem**

**vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Trnka, Ph.D.  
autor: Bc. Jaroslav Mička**

**2012**





## **Anotace**

Tato diplomová práce je zaměřena na sestavení databanky emisivity materiálů pro měření IR teploměrem. Teoretická část této práce je vysvětlena na začátku a představuje některé typy pyrometrů a také základní principy bezkontaktního měření. Praktická část ukazuje naměřená data.

## **Klíčová slova**

Emisivita, pyrometr, IR teploměr, teplota, termovize, bezdotykový teploměr, černé těleso

## **Abstract**

The diploma thesis focuses on creating a database of materials emissivities for IR temperature measurements. The theoretical part of this thesis is explained at the beginning and introduces some types of pyrometers and basic principles of non-contact sensors too. The practical part shows measured data.

## **Key words**

Emissivity, pyrometer, IR thermometer, temperature, thermovision, non-contact temperature sensor, black body

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, který byl použit při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 18.5.2012

Jméno příjmení

.....

## **Poděkování**

Velice rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Pavlu Trnkovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a metodické vedení práce a také všem, kteří mi pomohli k jejímu vypracování.

# Obsah

<b>OBSAH.....</b>	<b>8</b>
<b>ÚVOD.....</b>	<b>9</b>
<b>1 TEORIE ŠÍŘENÍ TEPLA.....</b>	<b>11</b>
1.1 DRUHY ŠÍŘENÍ TEPLA .....	11
1.2 TEPLOTA .....	12
<b>2 PRINCIP MĚŘENÍ TEPLoty POMOCÍ IR TEPLOMĚRU.....</b>	<b>13</b>
2.1 ZÁKLADNÍ KONSTRUKCE IR TEPLOMĚRU.....	15
2.2 VÝHODY A NEVÝHODY BEZDOTYKOVÉHO MĚŘENÍ TEPLoty .....	16
2.3 EMISIVITA A JEJÍ URČOVÁNÍ.....	17
2.3.1 <i>Metody získávání hodnoty emisivity</i> .....	17
2.3.2 <i>Vyzařovací charakteristiky černého tělesa</i> .....	19
2.3.3 <i>Měřená vlnová délka</i> .....	20
2.4 VLNOVÁ ROVNICE.....	20
2.4.1 <i>Základní druhy vlnění</i> .....	21
2.5 TYPY INFRAČERVENÝCH TEPLOMĚRŮ.....	23
2.5.1 <i>Druhy laserových zaměřovačů</i> .....	26
2.5.2 <i>Optický systém pyrometru</i> .....	27
2.6 KALIBRACE .....	28
2.7 POROVNÁNÍ IR TEPLOMĚRŮ S DALŠÍMI TYPY TEPLOMĚRŮ .....	29
2.7.1 <i>Dilatační teploměry</i> .....	29
2.7.2 <i>Elektrické teploměry</i> .....	30
2.7.3 <i>Speciální teploměry</i> .....	30
2.7.4 <i>Bezdotykové teploměry</i> .....	31
2.7.5 <i>Porovnání jednotlivých typů teploměrů</i> .....	31
<b>3 TERMOVIZE.....</b>	<b>33</b>
TERMOVIZNÍ MĚŘENÍ VYUŽÍVANÉ V ELEKTROTECHNICE .....	34
3.1 DETEKCE ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ .....	34
3.1.1 <i>Metody měření ČV</i> .....	35
<b>4 PRAKTICKÁ ČÁST - EXPERIMENT .....</b>	<b>37</b>
4.1 MĚŘICÍ PŘÍSTROJE A POMŮCKY .....	37
4.1.1 <i>Infrateploměr AMiR 7210-50</i> .....	37
4.1.2 <i>Digitální termočlánek Keithley 2182A</i> .....	39
4.1.3 <i>Analogový termočlánek</i> .....	41
4.1.4 <i>Sušárna VENTICELL®, s nucenou cirkulací vzduchu, +250 °C</i> .....	41
4.1.5 <i>Rtuťové teploměry</i> .....	42
4.1.6 <i>Forma na vytvrzování izolačních materiálů</i> .....	42
4.2 EXPERIMENT I.....	43
4.2.1 <i>Závislost vzorků na teplotě při emisivitě 0,95</i> .....	43
4.2.2 <i>Závislost emisivity vzorků na nastavované teplotě</i> .....	45
4.3 POPIS PŘESNOSTI MĚŘENÍ A PROBLÉMŮ PŘI MĚŘENÍ TEPLot .....	46
4.4 EXPERIMENT II .....	47
4.5 ZÁVĚR MĚŘENÍ .....	50
<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>50</b>



## Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na popis měření pomocí infračervených teploměrů a vysvětluje, jaké jsou zde výhody a naopak, pro jaká měření se tyto teploměry příliš nehodí. Co se přesnosti měření týká, tak jsou na tom poměrně dobře např. rtuťové teploměry, avšak nabízí jen malý rozsah teplot a tudíž nejsou určeny pro měření vyšších teplot. Právě tuto bariéru celkem úspěšně odstraňují právě IR (infrared = infračervené) teploměry, které nabízí rychlý způsob zjištění teploty a jsou určeny i pro měření vysokých teplot (dokonce umožňují měření teplot i objektů v pohybu). Zdálo by se tak, že tento způsob nabízí jen samé výhody, ale jsou zde také určitá omezení týkající se např. měřeného povrchu nebo měření lesklých materiálů, ale o tom blíže až v práci samotné.

Text je rozdělen na čtyři části. První se zabývá teorií šíření tepla, druhá uvádí princip měření teploty pomocí IR teploměrů. Třetí část je pak zaměřena na termovizi a detekci částečných výbojů a čtvrtá pak představuje praktickou část práce. V první části teorii šíření tepla se dozvíme něco o využívání tepelné výměny, která vzniká, pokud se nedá vyjádřit změna energie jako součin ostatních měřitelných veličin. Také si ukážeme, že se teplo může šířit třemi základními typy přenosů. Druhá část obsahuje informace o přístrojích určených k bezdotykovému měření teploty. Pro tento účel slouží např. pyrometry, u kterých si přiblížíme výhody a nevýhody při jejich používání. V třetí části se blíže podíváme na termovizi a detekci částečných výbojů a v poslední části se rozebírá praktická část, která je rozdělená na dvě hlavní podkapitoly.

## Seznam symbolů

$Q$ [J] .....	množství tepla
$m$ [kg] .....	hmotnost systému
$c$ [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ] .....	měrná tepelná kapacita systému
$\Delta T$ [K] .....	vzrůst teploty
$t$ [ $^{\circ}C$ ].....	Celsiova teplota
$T$ [K].....	Kelvinova teplota
$\lambda$ [m] .....	vlnová délka záření
$H, H_E$ [ $W \cdot m^{-2}$ ] .....	intenzita vyzařování reálného tělesa
$\Phi$ [W] .....	zářivý tok
$S$ [ $m^2$ ] .....	plocha povrchu zdroje záření
$H_0, H_{0E}$ [ $W \cdot m^{-2}$ ] .....	intenzita vyzařování černého tělesa
$\sigma$ [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ ].....	Stefan-Boltzmannova konstanta ( $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ )
$H_{0\lambda}$ [ $W \cdot m^{-3}$ ].....	spektrální hustota intenzity vyzařování
$H_{\lambda}$ [ $W \cdot m^{-3}$ ].....	spektrální hustotu intenzity vyzařování skutečného tělesa
$\varepsilon, \varepsilon_T$ .....	emisivita
$\varepsilon_{\lambda}$ .....	emisivita resp. pohltivost pro vlnovou délku $\lambda$
$t_F$ [ $^{\circ}F$ ].....	Fahrenheitova teplota
$b$ [m.K].....	Wienova konstanta ( $b = 2,898 \cdot 10^{-3}$ )
$\lambda_{max}$ [m].....	vlnová délka maxima vyzařování
$E, R, T$ .....	záření emitované, odražené, procházející
$\pi$ .....	Ludolfovo číslo ( $\pi = 3,14159$ )
$v$ [ $m \cdot s^{-1}$ ].....	fázová rychlost
$\omega$ [ $s^{-1}$ ].....	úhlový kmitočet
$k$ [ $m^{-1}$ ].....	vlnový vektor
$k_0$ .....	jednotkový vektor charakterizující směr šíření vlny
$T$ [s].....	perioda
$\nu$ [Hz].....	kmitočet
$t$ [s].....	čas
$z$ .....	skalární funkce polohy a času
$\Delta$ .....	Laplaceův operátor
$R_0, R_{100}$ [ $\Omega$ ].....	odpor materiálu při teplotě $0^{\circ}C$ a $100^{\circ}C$
$t_R$ [ $^{\circ}R$ ].....	Rankinova teplota

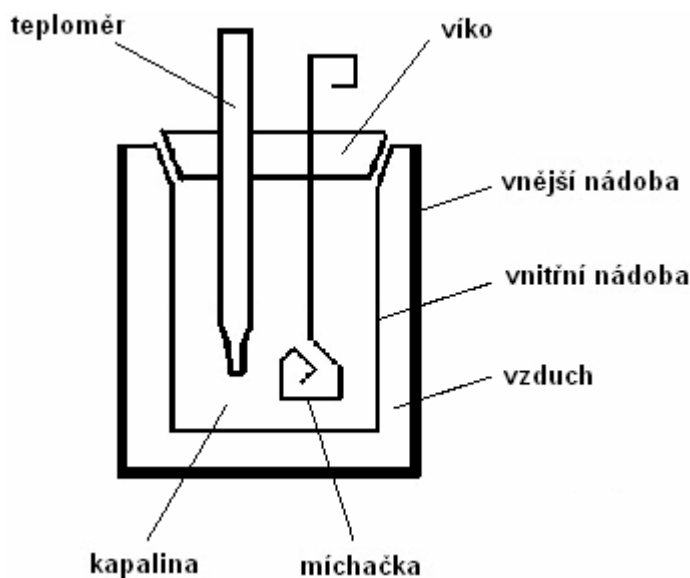
# 1 Teorie šíření tepla

Teplo je fyzikální veličina, která popisuje změnu termodynamického stavu systému, ne však stav samotný (rovnice 1.1). Můžeme ho definovat jako část vnitřní energie (přijaté nebo odevzdané), ke které dojde bez konání práce. Jde tedy o tepelnou výměnu, která vzniká, pokud se nedá vyjádřit změna energie jako součin jiných měřitelných veličin. Šíření tepla bez konání práce (nebo také sdílení tepla či termokinetika) je jedním ze způsobů přenosu energie a jeho měřením se pak zabývá kalorimetrie využívající k samotnému měření kalorimetru (ukázku kalorimetru znázorňuje *Obr. 1.1*). [26]

Základní vztah pro teplo zní:

$$Q = mc\Delta T \quad (1.1)$$

kde: **Q** – množství tepla [J]  
**m** – hmotnost systému [kg]  
**c** – měrná tepelná kapacita systému [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]  
 **$\Delta T$**  – vzrůst teploty [K]



*Obr. 1.1 Směšovací kalorimetr [28]*

## 1.1 Druhy šíření tepla

Teplo se může šířit třemi základními typy přenosů: vedením (kondukcí), prouděním (konvekce) a zářením (radiací). Těmito druhy šíření je přenášeno veškeré teplo (obvykle právě kombinací dvou či všech tří typů přenosů). [27]

- **konvekce**

Zde dochází k proudění hmoty o různé teplotě (pohybu plynů, či kapalin). Teplý vzduch proudí na studenější místa a naopak. Zvýšení teploty je závislé na teplotě a vzdálenosti zdroje záření od tělesa, dále pak na barvě či úpravě povrchu tělesa. [25], [26]

- **kondukce**

Přenos tepla vedením (přímým kontaktem) uplatňujeme hlavně u pevných těles, dále u kapalin a plynů, kde však také existuje přenos tepla prouděním. Jedná se o přenos vibrací (neboli kmitání částic kolem svých rovnovážných poloh) atomů pevných těles, či srážky molekul plynů. Tím vznikne pohyb energie od teplejší molekuly směrem ke studenější. Vedení tepla můžeme dělit z hlediska dynamiky procesu na ustálené (stacionární) a neustálené (nestacionární) vedení. Ustálené vedení tepla znamená, že se nemění v čase teplotní rozdíl mezi jednotlivými částmi tělesa a neustálené naopak vyjadřuje postupné vyrovnávání teplotních rozdílů. [25], [26], [27]

- **radiace**

Teplota je vlastně určitý druh elektromagnetického vlnění (např. jako světlo), a proto se šíří zářením, což je možné pouze v prostředí, které je pro příslušnou vlnovou délku prostupné. Těleso o vyšší teplotě, než je teplota okolí, teplo vyzařuje a těleso s nižší teplotou naopak pohlcuje. Odlišnosti od přenosu tepla předešlými dvěma způsoby spočívají např. v možnosti procházet vakuem (kde se tepelné záření šíří nejlépe), rychlostí průběhu (obdobná rychlosti světla) nebo tím, že se uskutečňuje elektromagnetickou emisí a absorpcí.

Měření tepelné infračervené radiace patří mezi základní zkoušky bezkontaktního měření teploty a IR termografie (ta je podrobněji rozebrána v kapitole 3). [25], [26], [27]

## 1.2 Teplota

Teplota patří mezi jedny z nejdůležitějších stavových veličin, protože ovlivňuje většinu procesů a dějů v přírodě. Právě proto byla sestavena jednotná teplotní stupnice, nezávislá na způsobu měření, známá jako termodynamická teplotní stupnice. Samozřejmě existují ještě další typy stupnic jako je Celsiova nebo Faradayova atd. Převody mezi nimi jsou pak uvedeny v *Tab. 1.1*.

Tab. 1.1 Převodní vztahy mezi teplotními stupnicemi; převzato z [18]

Teplota:	$T$ (K)	$t$ (°C)	$T_R$ (°R)	$t_F$ (°F)
$T$ (K) =	1	$t + 273,15$	$(5/9) \cdot T_R$	$(5/9)(t_F + 459,67)$
$t$ (°C) =	$T - 273,15$	1	$(5/9)(T_R - 491,67)$	$(5/9)(t_F - 32)$
$T_R$ (°R) =	$(9/5) \cdot T$	$(9/5) \cdot t + 491,67$	1	$t_F + 459,67$
$t_F$ (°F) =	$(9/5) \cdot T - 459,67$	$(9/5) \cdot t + 32$	$T_R - 459,67$	1

kde:  $T$  – Kelvinova teplota [K]  
 $t$  – Celsiova teplota [°C]  
 $T_R$  – Rankinova teplota [°R; °Ra]  
 $t_F$  – Faradova teplota [°F]

## 2 Princip měření teploty pomocí IR teploměru

Přístroje určené k bezdotykovému měření teploty (také označované jako pyrometry) původně nacházely uplatnění v provozech, kde bylo třeba měřit vysoké teploty (cca nad 500 °C) a zároveň nebylo možné použít teploměry dotykové (např. ve sklářství, keramickém průmyslu atd.). Během posledních let se aplikace pyrometrů posunula i k mnohem nižším teplotám (včetně měření teplot nižších než 0 °C). Nyní se lze s bezdotykovými teploměry setkat v potravinářství, elektronice, průmyslu papírenském, farmaceutickém, textilním a dalších.

Pyrometry fungují na základě toho, že všechny formy hmoty vyzařují při teplotách vyšších, než je teplota absolutní nuly ( $0\text{K} = -273,15\text{ °C}$ ) tepelné záření ve viditelném i neviditelném pásmu spektra (to se nazývá charakteristické záření). Přičemž intenzita tohoto záření závisící na teplotě objektu odpovídá teplotě hmoty a jeho příčinou je vnitřní mechanický pohyb molekul. Je vyzařováno elektromagnetické záření, které zachytává a vyhodnocuje právě pyrometr (menší teplota měřeného objektu než pyrometru znamená záporný zářivý tok).

Toto záření je složeno z různých vlnových délek [3], [5], [6], [7], [14]:

- pro bezdotykové měření teplot se používá záření (od 0,4 až 25)  $\mu\text{m}$  vlnové délky
  - a) 0,4 - 0,78  $\mu\text{m}$  viditelné spektrum
  - b) 0,78 - 1  $\mu\text{m}$  blízké IR
  - c) 1 - 3  $\mu\text{m}$  krátkovlnné IR
  - d) 3 - 5  $\mu\text{m}$  středovlnné
  - e) 5 - 25  $\mu\text{m}$  dlouhovlnné

- daný rozsah záření pokrývá měření teploty od - 40 °C do 10 000 °C
- rozsah záření je zčásti ve viditelném a dále v infračerveném spektru (0,4 až 0,78) μm

Intenzita vyzařování určitého tělesa je dána rovnicí ( 2.1 ) :

$$H = \frac{d\Phi}{dS} \quad ( 2.1 )$$

kde: **H** – intenzita vyzařování [W.m<sup>-2</sup>]  
**Φ** – zářivý tok [W]  
**S** – plocha povrchu zdroje záření [m<sup>2</sup>]

Intenzita vyzařování dokonale černého tělesa  $H_0$  závisí na absolutní teplotě dokonale černého tělesa. Dle Stefan-Boltzmannova zákona platí:

$$H_0 = \sigma \cdot T^4 \quad ( 2.2 )$$

kde: **H<sub>0</sub>** – intenzita vyzařování černého tělesa  
**σ** – Stefan-Boltzmannova konstanta,  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  [W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-4</sup>]  
**T** – teplota tělesa [K]

Intenzita vyzařování má integrální charakter a skládá se z příspěvků při jednotlivých vlnových délkách:

$$H_0 = \int_0^{\infty} H_{0\lambda} d\lambda \quad ( 2.3 )$$

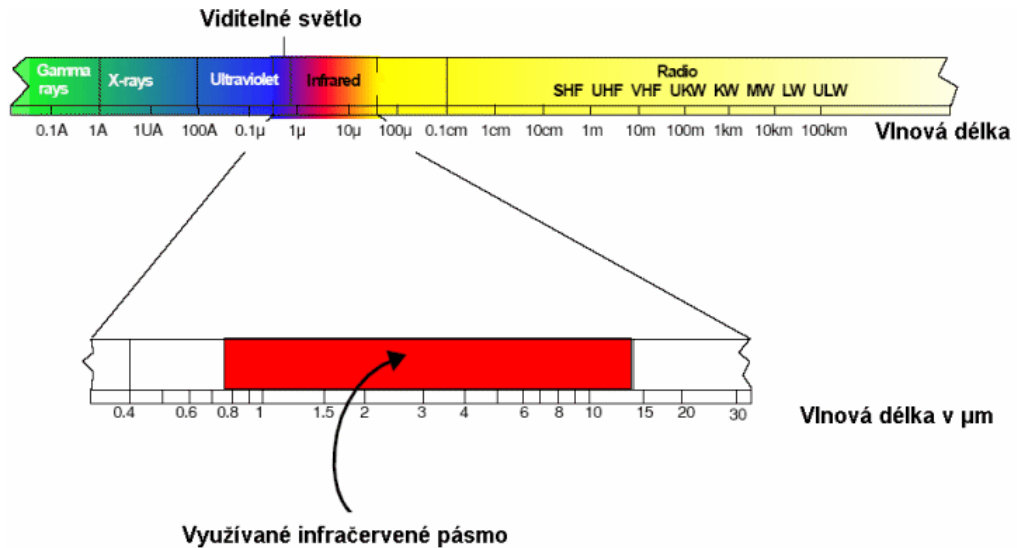
kde: **H<sub>0λ</sub>** – spektrální hustota intenzity vyzařování [W.m<sup>-3</sup>]  
**λ** – vlnová délka záření [m]

Jelikož skutečné těleso vyzařuje i pohlcuje méně než dokonale černé těleso, platí vztah pro spektrální hustotu intenzity vyzařování skutečného tělesa:

$$H_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} \cdot H_{0\lambda} \quad ( 2.4 )$$

kde: **ε<sub>λ</sub>** – emisivita resp. pohltivost pro vlnovou délku  $\lambda$  [ - ]

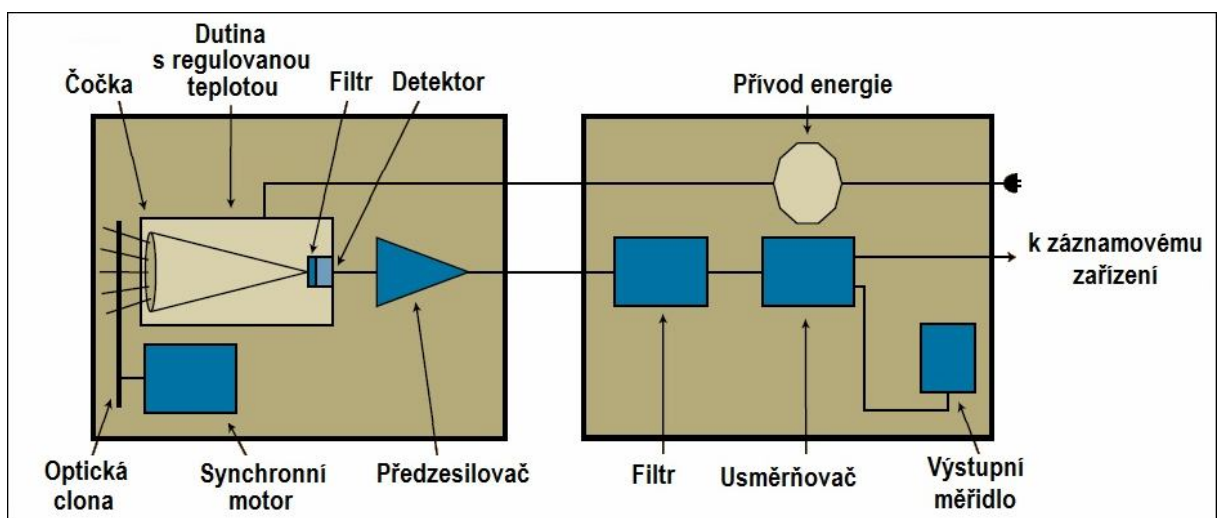
Spektrum elektromagnetického vyzařování však nemůže být viditelné pouhým okem (vlnové délky mají velikost od 0,7 do 1000 μm). Tato oblast vlnových délek leží za červenou částí viditelného světla a nazýváme ji tedy infra-červenou oblastí, schematicky na *Obr. 2.1.* [2], [7], [20]



Obr. 2.1 Elektromagnetické spektrum s rozsahem od 0,7 do 14 μm; převzato z [2]

## 2.1 Základní konstrukce IR teploměru

Základní konstrukce infračerveného pyrometru je znázorněna blokovým uspořádáním na Obr. 2.2 a skládá se z čočky, jež soustředí infračervenou energii na detektor, který konvertuje tuto energii na elektrický signál. Infračervený teploměr pracuje tedy podobně jako lidské oko. Lze si proto představit oční čočku jako optiku, skrz kterou dopadá záření z měřeného objektu na fotocitlivou vrstvu (oční sítnici) přes atmosféru. Zde je záření převedeno na signál vysílaný do mozku. Výsledný signál může být následně zobrazen (po kompenzaci) v jednotkách teploty na teplotu okolí. Použití infračervených teploměrů obecně platí ve zhoršených podmínkách, kde nemůžeme použít termočlánek či jiné sondy se snímači z různých důvodů (objekt ve vakuu/elektromagnetickém poli, potřeba rychlé odezvy, atd.). [1], [2]



Obr. 2.2 Tradiční infračervený teploměr [34]

## 2.2 Výhody a nevýhody bezdotykového měření teploty

Bezdotykové měření teploty má mnoho výhod, ale také některé nevýhody sepsané níže.

### Mezi výhody patří:

- **snadné měření teploty na obtížně dostupných či nebezpečných místech**
  - výhodou je, že lze měřit např. části pod elektrickým napětím
- **možnost bezpečného měření i objektů v pohybu (např. rotující součásti)**
  - mezi čidlem a povrchem tělesa nedochází k přímému kontaktu
- **nedochází k žádnému ovlivnění měřeného objektu – tzn. nedochází k žádnému odběru energie**
  - nedochází zde (oproti dotykovému měření) ke zkreslení naměřených hodnot tepla u materiálů, které ho špatně vedou (např. dřevo nebo plasty)
- **bezproblémové měření i velmi vysokých teplot**
  - jde o teploty nad 1300 °C do cca 3000 °C – zde už se téměř ani neuvažují dotykové teploměry
- **měření je bez rizika kontaminace a mechanických účinků na povrch měřeného objektu - možnost měření i měkkých povrchů**
  - měřený povrch nemusíme osazovat různými čidly, ať už mechanicky, chemicky atd.
- rychlost měření (v řádu milisekund)
  - umožňuje provádět měření velmi rychlých změn teploty, tudíž máme možnost uskutečnit více měření v poměrně krátké době

### Mezi nevýhody se řadí:

- objekt, který má být měřen, musí být pro teploměr opticky viditelný (vysoké úrovně kouře či prachu snižují přesnost měření)
  - pevné překážky dovolují pouze povrchové měření (nikoliv měření vnitřní teploty)
  - měří se pouze povrchová teplota materiálů (nutné brát v úvahu jejich **emisivitu**)
  - nutnost ochrany čidla před prachem a kondenzujícími kapalinami
- [5], [2], [24]



## 2.3 Emisivita a její určování

Emisivita je bezrozměrná veličina označovaná  $\varepsilon$ , je dána rovnicí ( 2.5 ) a může dosahovat hodnot od 0,0 (objekty s emisivitou pod 0,2 se měří teploměrem obtížně) až do 1,0 (tj. emisivita černého tělesa). Tělesům s emisivitou menší než 1 říkáme šedá tělesa a naopak tělesa, jejichž emisivita závisí na teplotě a vlnové délce nazýváme ne-šedá tělesa. Emisivita je poměr energie, kterou vyzařuje objekt při jeho dané teplotě k energii vyzařované ideálním tělesem (tj. radiátorem) nebo černým tělesem při stejné teplotě.

$$\varepsilon_T = \frac{H_E}{H_{0E}} \quad ( 2.5 )$$

kde:  $\varepsilon_T$  – emisivita [ - ]  
 $H_E$  – intenzita vyzařování reálného tělesa [ $\text{W.m}^{-2}$ ]  
 $H_{0E}$  – intenzita vyzařování černého tělesa [ $\text{W.m}^{-2}$ ]

Většina běžných materiálů (dřevo, kůže, textil, sklo, keramika apod.) má emisivitu přibližně 0,95. Jednodušší typy teploměrů proto mívají pevně stanovenou právě tuto hodnotu emisivity, a pokud s nimi chceme měřit teplotu materiálů s odlišnou emisivitou, lze přesnost měření zlepšit např. vhodným nátěrem nebo samolepkou. Infračervené teploměry však mají obvykle možnost nastavení emisivity pro různé materiály (většinou od 0,10 až 1,00) a tím usnadňují práci získáváním přesnějších hodnot teploty. Mezi obtížně měřitelné povrchy patří např. leštěný hliník a další lesklé a třpytivé povrchy z kovů kvůli jejich odrazivosti v infračervené oblasti, čímž mohou ovlivnit emisivitu více než samotné materiály.

K určování emisivity existují různé metody, můžeme např. vyhledat emisivitu často používaných materiálů v tabulkách, které pomáhají při zvolení správných měřicích přístrojů (nalezením správného pásma vlnových délek pro daný materiál), nebo lze emisivitu určit také experimentálně. [1], [2], [4], [15]

### 2.3.1 Metody získávání hodnoty emisivity

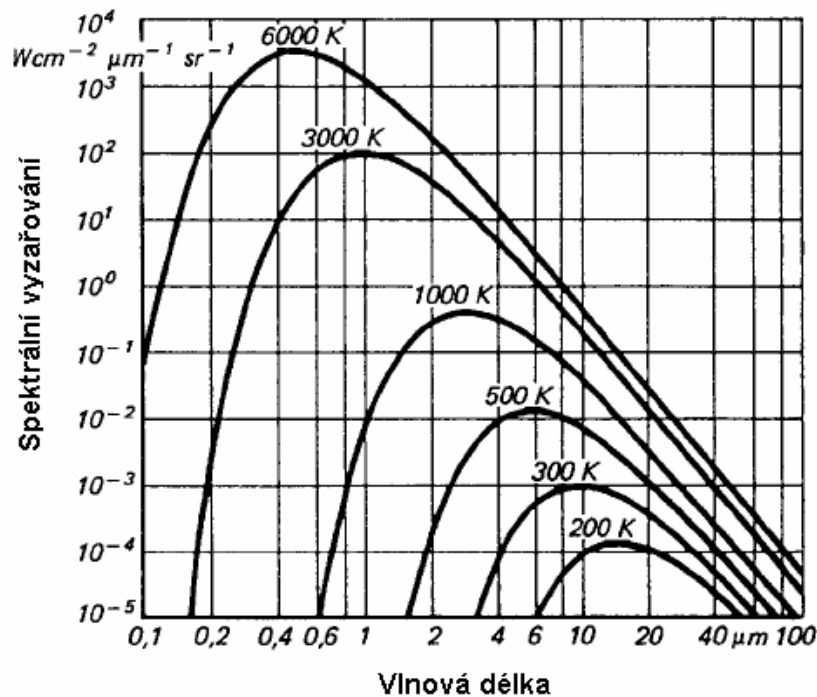
Emisivitu lze získávat několika níže uvedenými způsoby, přičemž některé jsou přesnější a některé slouží spíše jen k orientačnímu posouzení teploty. Samozřejmě volíme také způsob získávání hodnoty emisivity dle podmínek měření (např. měřená teplota atd.).

***Mezi základní způsoby získávání emisivity patří:***

- Vzorek materiálu ohřejeme na známou teplotu za pomoci přesného snímače (např. termočlánek) a změříme teplotu infračerveným teploměrem (současně však na něm nastavujeme emisivitu tak, aby ukázal stejnou teplotu). A tuto hodnotu emisivity si zapamatujeme pro případné budoucí měření teploty předmětů z tohoto materiálu.
- Do 260 °C (tj. cca 500 °F) můžeme použít speciální pásek s emisivitou 0,95 jako zaměřovací plochu. Po nastavení této emisivity změříme správnou teplotu objektu. Pokud bychom chtěli měřit mimo daný pásek, museli bychom nastavovat emisivitu tak velkou, než by na indikátoru byla shodná teplota. Nyní lze používat emisivitu určenou touto metodou pro všechna měření na objektech z tohoto materiálu.
- Při měření vysokých teplot lze vyvrtat do objektu otvor (s přibližnou hloubkou šestinásobku průměru), jež se chová obdobně jako černé těleso (tj. emisivita je 1,0). Když v něm pak chceme měřit teplotu, tak nastavíme uvedenou emisivitu a změříme správnou teplotu. Pokud však chceme měřit teplotu mimo tento otvor, nastavujeme emisivitu tak, až obdržíme shodnou teplotu na indikátoru. Takto určenou emisivitu lze používat pro všechna měření na stejném materiálu.
- Pokud materiál (nebo jeho část) pokryjeme matnou černou barvou, bude mít emisivitu přibližně 1,0. Pak se změří teplota povrchu s barvou a také teplota skutečného povrchu a emisivita se nastaví tak, aby se údaj na teploměru shodoval.
- Standardní hodnoty emisivity většiny materiálů lze najít v tabulkách. Toho využíváme pro zadávání emisivity měřených materiálů do infračerveného teploměru a tím známe alespoň přibližnou hodnotu emisivity.

[1], [2]

### 2.3.2 Vyzařovací charakteristiky černého tělesa



Obr. 2.3 Vyzařovací charakteristiky černého tělesa v závislosti na jeho teplotě; převzato z [2]

Z vyzařovacích charakteristik (Obr. 2.3) je zřejmé, že nejlepší by bylo, kdybychom nastavili infračervený teploměr na co nejširší vlnové pásmo, aby získal co nejvíce energie neboli signálu z měřeného tělesa (tj. plocha pod křivkou). Ne vždy je to však výhodné a jedním z těchto příkladů je situace, když na diagramu intenzita vyzařování roste mnohem více při 2  $\mu\text{m}$  (se zvyšováním teploty), než je nárůst při 10  $\mu\text{m}$ . Větší rozdíl vyzařování při určitém teplotním rozdílu odpovídá přesnějším měření.

Wienův zákon posunu říká, že dle posunu maxima vyzařování ke kratším vlnovým délkám s rostoucí teplotou odpovídá rozsah vlnových délek měřicímu teplotnímu rozsahu pyrometru. Za nízkých teplot by IR teploměr přestával pracovat pod 600  $^{\circ}\text{C}$  (při 2  $\mu\text{m}$ ), protože by bylo vyzařováno příliš málo energie. [2], [21]

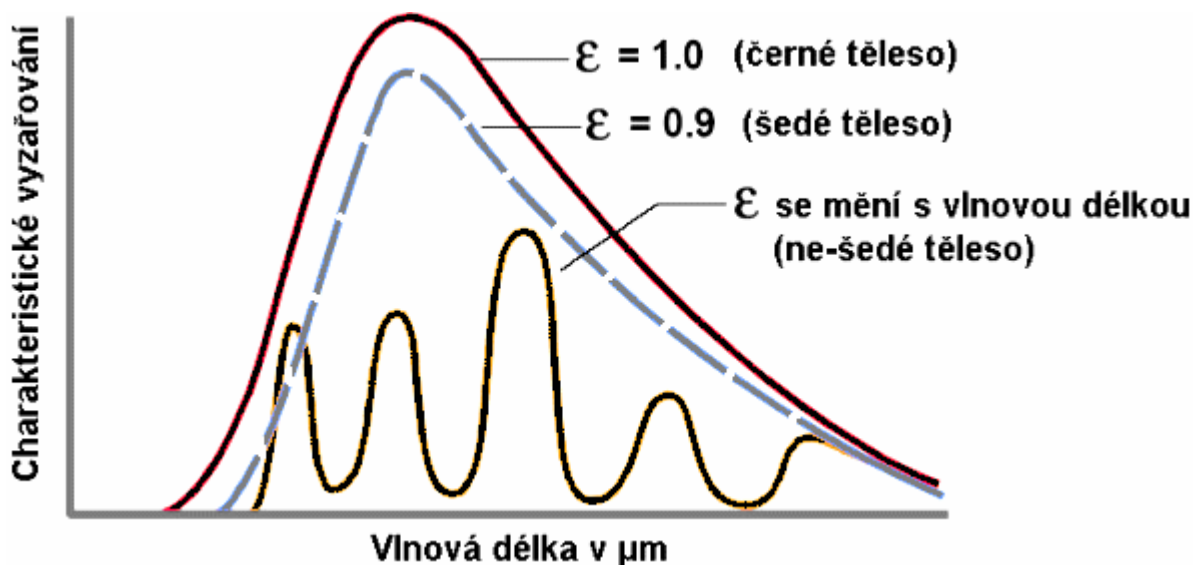
$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T} \quad (2.6)$$

kde:  $\lambda_{\max}$  – vlnová délka maxima vyzařování [m]  
**b** – Wienova konstanta ( $b = 2,898 \cdot 10^{-3}$ ) [m.K]  
**T** – teplota tělesa [K]

Celkové množství vyzařované energie je složeno ze záření emitovaného, odraženého a procházejícího a je rovno 1 (viz rovnice (2.7) a Obr. 2.4).

$$E + R + T = 1 \quad (2.7)$$

kde: **E** – emitované záření [ - ]  
**R** – odražené záření [ - ]  
**T** – procházející záření [ - ]



Obr. 2.4 Charakteristické vyzařování při různých emisivitách; [2]

### 2.3.3 Měřená vlnová délka

Šířku pásma pro měřený objekt určujeme dle zvoleného materiálu a jeho teploty (např. běžná pokojová teplota má vlnovou délku uprostřed infračerveného spektra záření). Pro měření se používají termické nebo pyroelektronické senzory. Pomocí IR fotodiod se mohou zjistit teploty od 350 °C a pro teploty od 700 °C se ve viditelném spektru záření užívá např. fotodiod. Pro největší vlnový rozsah jsou určeny vysokoteplotní pyrometry, které používají fotopřijímač. Rozsah pyrometru je snazší rozšířit směrem vzhůru než naopak. [5]

## 2.4 Vlnová rovnice

Vlnová rovnice představuje šíření vlnění. V případě kmitání jednorozměrného může jít o kmity struny, dvojrozměrné reprezentuje kmitání membrány a při trojrozměrném kmitání lze uvést šíření akustických a světelných vln do prostoru. Vlnová rovnice je důležitou hyperbolicou parciální diferenciální rovnicí druhého řádu, s jejíž pomocí můžeme popsat vlnění mnoha druhů (např. v akustice, optice, elektromagnetismu, ale i v mechanice). Pokud bychom chtěli popsat vlnění, tak je vhodné použít pojem vlnová rovnice k označení

diferenciální rovnice, která charakterizuje dynamiku daného vlnění (zde můžeme použít označení vlnová rovnice i pro nelineární diferenciální rovnici). Vlnovou rovnici použijeme, pokud chceme zjistit, zda nějaká funkce souřadnic a času popisuje vlnění. [9], [10], [29]

Vlnovou rovnici lze vyjádřit:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 z}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial x_2^2} + \dots + \frac{\partial^2 z}{\partial x_n^2} \quad (2.8)$$

Pomocí Laplaceova operátoru bývá tento vztah zpravidla ekvivalentně zapisován jako:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = \Delta z \quad (2.9)$$

kde:  $z$  – skalární funkce polohy a času

$\Delta$  – Laplaceův operátor

Pod pojmem vlnová rovnice si představujeme homogenní rovnici. Naopak pod obecnějším tvarem vnímáme nehomogenní vyjádření vlnové rovnice. [9]

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = \Delta z + f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2.10)$$

### 2.4.1 Základní druhy vlnění

Dle tvaru tzv. vlnoplochy (geometrické místo bodů, které kmitají se stejnou fází), můžeme dělit vlny na (viz rovnice (2.13) a (2.14)):

- rovinné
- kulové

Podle směru výchylek vzhledem ke směru šíření dělíme vlny (viz Obr. 2.6) na:

- příčné
- podélné

Řešením tzv. vlnové rovnice můžeme získat funkce vyjadřující jednotlivé vlny. Mezi další důležité parametry patří kromě vlnové délky nebo kmitočtu i tzv. vlnový vektor.

Mezi základní charakteristiky vlnění se řadí:

- perioda  $T$  - určuje časový interval, po kterém se kmitavý děj začíná v daném místě opakovat
- kmitočet  $\nu$  - udává množství kmitů za jednotku času
- vlnová délka  $\lambda$  - určuje vzdálenost dvou sousedících míst, kde probíhá kmitavý děj o stejné fázi
- vlnový vektor  $k$  - jeho směr je dán směrem šíření vlny. [8]

Fázová rychlost  $v$  souvisí s uvedenými veličinami podle vztahů [22]:

$$v = \nu \lambda = \frac{\omega \lambda}{2\pi} = \frac{\omega}{k} \quad (2.11)$$

kde:  $v$  – fázová rychlost [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]  
 $\nu$  – kmitočet [Hz]  
 $\omega$  – úhlový kmitočet [ $\text{s}^{-1}$ ]  
 $k$  – vlnový vektor [ $\text{m}^{-1}$ ]

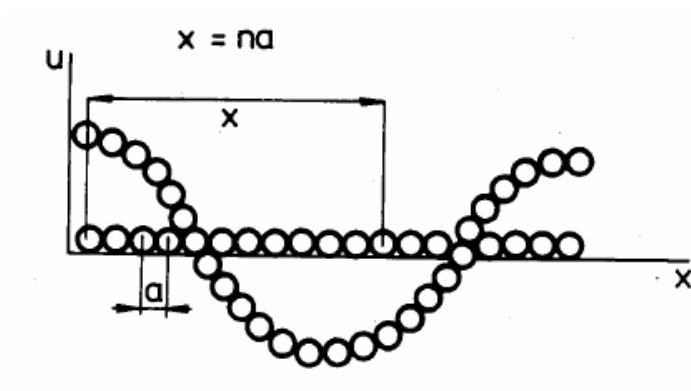
Pro jednorozměrnou, rovinnou a kulovou vlnu šířící se prostorem rychlostí  $v$  platí vyjádření pomocí periodických funkcí argumentů, tedy rovnice ( 2.12 ) až ( 2.14 ). [8]:

$$u_1 = f\left(t \pm \frac{x}{v}\right) \quad (2.12)$$

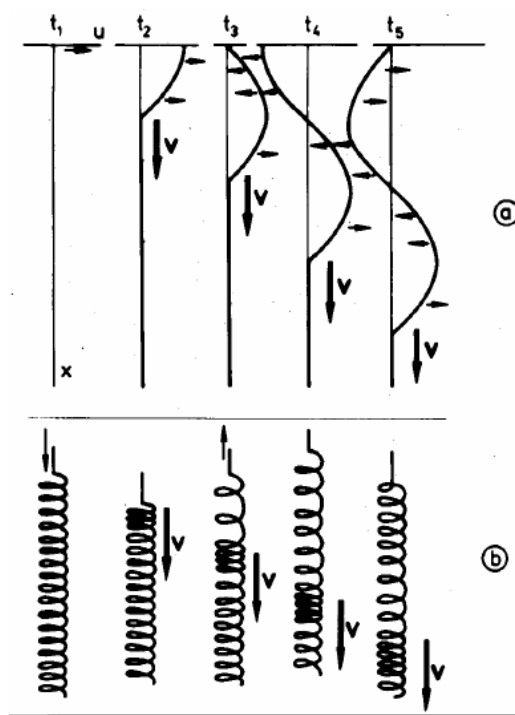
$$u_2 = f\left(t \pm \frac{r \cdot k_0}{v}\right) \quad (2.13)$$

$$u_3 = \frac{1}{r} f\left(t \pm \frac{r}{v}\right) \quad (2.14)$$

kde:  $k_0$  – jednotkový vektor charakterizující směr šíření vlny [ - ]



Obr. 2.5 Přechod od kmitání lineárního řetězce na vlnění; převzato z [8]



Obr. 2.6 Příklady vzniku vlnění: a) příčného (na struně), b) podélného (na pružině); převzato z [8]

## 2.5 Typy infračervených teploměrů

Vybavení jednotlivých teploměrů se liší, což je samozřejmě dáno jejich cenovou kategorií. Ty nejlevnější se obvykle prodávají bez laserového zaměřování, které usnadňuje nalezení středu měřené plochy. Kromě zaměřování existuje mnoho dalších funkcí a doplňků pro jednotlivé teploměry, jako je např. zobrazení teploty (také její min/max/průměr či rozdíl), možnost připojení k počítači, případně teploměr kombinovaný přímo s digitálním fotoaparátem. V příloze B lze nalézt výrobky značky Fluke a jejich specifikace.

- ***Ruční přenosné infračervené teploměry***

Tyto teploměry patří mezi nejvíce používané typy infračervených pyrometrů. I když mají v názvu ruční teploměry, lze některé uchytit. Mezi jejich vlastnosti může patřit např. patentovaný laserový bodový/kruhový zaměřovací systém, termočlánekový vstup typu K pro měření sondou, možnost měření vzdálenosti a teploty, nastavitelná emisivita atd.

- ***Kapesní infračervené teploměry***

Velkou výhodou těchto teploměrů jsou jejich rozměry (lze je nosit i v kapse), dále nízká cena a také snadná obsluha. Lze si vybrat model s nebo bez laserového zaměřování.



Obr. 2.7 vlevo: ruční přenosný infračervený teploměr  
uprostřed: kapesní infračervený teploměr  
vpravo: infračervené termočlánky; převzato z [1]

- **Infračervené termočlánky**

Jedná se o malé a levné infračervené senzory, jejichž signál se podobá signálu termočlánku. Tyto termočlánky pracují bez pohyblivých částí i bez napájecího napětí. Teplotu povrchu měří bez přímého kontaktu, navíc jsou schopny měřit přesně i teplotu částí, které jsou v pohybu. Avšak měří jen v malém rozsahu teplot.

- **Infračervené termočlánky/převodníky s pevnou montáží**

Používají se pro rychle se měnící procesy vzhledem k jejich rychlé odezvě. Uplatnění najdou např. při výrobě plastů, kovů a textilií, v papírenském průmyslu a dalších odvětvích, kde lze provést jejich montáž.



Obr. 2.8 vlevo: infračervené termočlánky/převodníky s pevnou montáží  
vpravo: dvoubarevné poměrové teploměry; převzato z [1]



- ***Dvoubarevné poměrové teploměry***

Dvoubarevné poměrové teploměry patří mezi snímače, jež jsou nezávislé na emisivitě měřených povrchů, pokud se teplota nemění příliš rychle (tato schopnost jim dává výhodu, jelikož emisivita značně ovlivňuje přesnost měření teploty pomocí infračervených teploměrů). Tyto teploměry měří poměr infračervené energie na dvou vlnových délkách. Teplota se zde tedy neurčuje na základě jasnosti, ale na základě barvy záření. Jsou schopny také posílat emailové zprávy o aktuálním nebo alarmovém stavu či se připojit k internetu. [1] , [4], [5]

**Další dělení infračervených teploměrů:**

Infračervené teploměry můžeme dělit z mnoha hledisek, jako je např. dělení dle možnosti detekce záření či podle konstrukce a dalších způsobů.

**Jedním z nich je dělení na:**

- přímo měřící bezdotykové teploměry (např. pyrometry)
- zobrazovací bezdotykové teploměry (např. termovize)

**Dle způsobu detekce záření na:**

- Subjektivní – lidské oko je detektorem záření
- Objektivní – záření je detekováno selektivními (např. Si) nebo neselektivními detektory záření (např. termoelektrické)

**Dále dělíme podle využití spektrální oblasti záření:**

- Monochromatické – využívají záření jedné nebo dvou vlnových délek
- Pásmové – pracují se zářením v širším pásmu vlnových délek
- Úhrnné – využíváno celé pásmo vlnových délek

**Podle konstrukce dělíme optický a zaměřovací systém následovně:****Optický systém**

- clonkový
- čočkový
- zrcadlový
- světlovodný

## Zaměřovací systém

- optický přes objektiv
- světelný (např. laserový paprsek)
- mířidlový (puškový)

### 2.5.1 Druhy laserových zaměřovačů

Používání laserového zaměřování napomáhá k snadnému a přesnému určování cílové polohy měřených objektů.

- **Jednoduchý laserový paprsek s posunem z optické osy**

Jedná se o nejjednodušší provedení zaměřovačů. Mimo střed optické osy vychází laserový paprsek, proto nesouhlasí přesně s optickou osou. Používá se hlavně pro přístroje s nízkým optickým rozlišením. Laserovým paprskem zamíříme přibližně na střed měřeného objektu. Ovšem při malých vzdálenostech teploměru od měřeného objektu je patrná nepřesnost v zaměření.

- **Koaxiální laserový paprsek**

Zde laserový paprsek vychází od středu optické osy a souhlasí i s optickou osou přístroje. Střed měřené plochy je vždy přesně označen, ať se jedná o jakoukoliv vzdálenost.

- **Dvojitý laser**

Tento laser je využíván pro vyznačení průměru měřené plochy, zvláště při větších vzdálenostech. U těchto laserů je dán průměr měřené plochy, což práci usnadňuje a zabraňuje i chybám (ať už z důvodu špatného zaměření nebo nesprávného odhadu velikosti měřené plochy).

- **Kruhový laser s posunem z optické osy**

Jde o nejsnazší řešení, které vyznačí mimo umístění měřené plochy i její velikost a vnější tvar. Měřená plocha je vně laserového kruhu (od určité vzdálenosti). Výrobce zde nastaví, že je laserový kruh větší než skutečné měřené místo (kvůli redukci chyby paralaxy). Uživatel by se tedy měl ujistit, že laserový kruh je vyplněn měřeným objektem pro správnost měření. Naopak to ale brání plnému využití daného geometrického rozlišení.

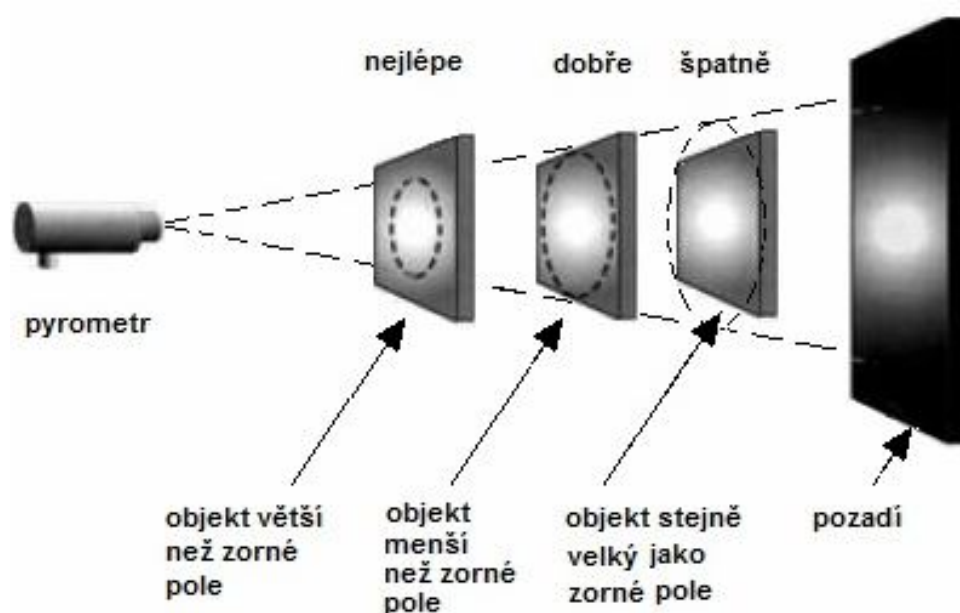
- **Přesné označení měřené plochy 3-bodovým koaxiálním laserem**

Zde je paprsek rozdělen při projekci na tři jasné laserové body, které jsou v řadě a umožňují přesně vyznačit rozměry dané měřené plochy při všech vzdálenostech či úhlech měření. Dva vnější laserové body označují průměr měřené plochy a prostřední její střed. [2]

## 2.5.2 Optický systém pyrometru

Optický systém je důležitou částí pyrometrů, protože definuje jejich zorné pole. Zorný úhel představuje kužel, v němž přístroj snímá paprsky a je určen jeho optikou. Je důležité, aby měřený objekt vyplňoval co nejlépe celé zorné pole pyrometru, protože jinak je údaj pyrometru ovlivněn teplotou pozadí objektu. Právě pozadí má jinou teplotu a může docházet k chybám při měření, jelikož pyrometr určuje průměrnou teplotu všech povrchů v zorném poli (tedy právě i pozadí). Řešením tohoto problému může být laser, který umožňuje přepínání z kruhu na bod.

Při měření menších objektů, kde je velikost zorného pole jen nepatrně větší než samotné objekty, může chybou zaostření dojít k velkým odchylkám. Některé druhy pyrometrů mají vestavěný laserový zaměřovač usnadňující zaměření objektů tím, že vyznačí kruhovou stopou snímanou plochu (využívá se u tmavých ploch). Optika musí být antireflexní a hlavně kvalitní. [1], [6]



Obr. 2.9 Příklad závislosti velikosti snímané plochy na vzdálenosti od pyrometru [6]

## 2.6 Kalibrace

Individuální kalibrace měřicích přístrojů patří mezi základní úkony před samotným měřením. Provádí se kvůli variacím ve vlastnostech materiálů použitých v konstrukci radiačních teploměrů (infrateploměrů). Kalibrujeme i k dosažení velmi malé úrovně přesnosti. Pro jiná, než zcela orientační měření, jsou nutné pravidelné recalibrace, přičemž trvalá přesnost bezdotykových teploměrů závisí na způsobu jejího provedení či četnosti a také na rychlosti driftu celého systému. Oproti kontaktním zařízením je u bezdotykových teploměrů složitější zajištění absolutní přesnosti, což souvisí s obtížností přesného stanovení emisivity reálných těles.

Existují tři obecné metody, jak kalibrovat průmyslové radiační teploměry. První spočívá v použití simulátoru absolutně černého tělesa. (tj. izotermicky zahřátá dutina s poměrně malým otvorem, na který je zaměřen infrateploměr). Emisivita dutiny je známá, nebo se dostatečně blíží jedné. Model simulátoru absolutně černého tělesa je vyobrazen na *Obr. 2.10*. Pro teplotní referenci používáme odporový teploměr či termočlánek uvnitř dutiny. Jako reference při vyšších teplotách se používají kalibrované wolframové lampy. Poslední možnost tvoří přesně zkalibrovaný referenční pyrometr, podle kterého se seřizuje výstup kalibrovaného přístroje. [34]



*Obr. 2.10 Simulátor černého tělesa; převzato z [36]*

## 2.7 Porovnání IR teploměrů s dalšími typy teploměrů

V této kapitole jsou popsány a na jejím konci porovnávány jednotlivé druhy teploměrů.

### 2.7.1 Dilatační teploměry

Využívají teplotní roztažnosti látek všech skupenství. Můžeme je dále dělit např. na plynové, tenzní, kapalinové či bimetalické.

- **Plynové teploměry**

Tento typ teploměrů využívá přímé úměrnosti tlaku plynu za stálého objemu na teplotě. Skládá se z vlastního čidla – jímky, spojovací kapiláry a měřicího ústrojí, které tvoří často deformační tlakoměr. Náplní je zde dusík, hélium či vzduch.

- **Tenzní teploměry**

Je využíváno závislosti mezi teplotou a rovnovážným tlakem v soustavě o jedné složce a dvou fázích (kapalina - pára). Tenzní teploměry jsou sestaveny z jímky, spojovací kapiláry a tlakoměrného ústrojí. Jako čidlo se používá jímka, do které zasahuje až ke dnu spojovací kapilára a kapalinou je zaplněna jen zčásti.

- **Kapalinové teploměry**

U těchto teploměrů je důležitá funkce objemové roztažnosti teploměrové kapaliny ve skle. Využívá se např. pentanová směs (přesná měření nízkých hodnot), rtuť (přesná měření středních hodnot) a toluol (určen k méně náročným měřením nízkých teplot). Tyto teploměry jsou jednoduché, spolehlivé, přesné a levné. Jejich nevýhodou je křehkost a někdy i špatná čitelnost. Dále lze dělit kapalinové teploměry na laboratorní, technické a speciální.

Laboratorní teploměry získávají správnou hodnotu, jen pokud je celý sloupec teploměrové kapaliny v kapiláře v měřeném prostoru. Technické (neboli provozní) teploměry jsou vybaveny tzv. stonkem ponořeným přímo v měřeném prostředí a provedení u speciálních teploměrů je obvykle jednoúčelové.

- **Bimetalické (kovové) teploměry**

Tyto teploměry využívají deformace kovových pásků o odlišných hodnotách teplotní délkové roztažnosti, čímž lze docílit poměrně velké deformace. [18], [32]

## 2.7.2 Elektrické teploměry

Do této kategorie patří např. termoelektrické či odporové kovové teploměry.

- **Termoelektrické teploměry**

Pro měření využívají termoelektrického jevu. Dvojice materiálů určená k výrobě těchto článků má mít velký přírůstek termoelektrického napětí s teplotou a dále např. odolnost proti chemickým či mechanickým vlivům. Mezi používané kombinace patří např. železo – měďnikl (Fe-CuNi) pro střední hodnoty.

- **Odporové kovové teploměry**

Využívají toho, že elektrický odpor kovových vodičů vzrůstá s teplotou. Tato závislost je vyjádřena teplotním součinitelem odporu  $\alpha$  (popis je vyjádřen rovnicí ( 2.15 )). K měření slouží hlavně čisté kovy.

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100 \cdot R_0} \quad ( 2.15 )$$

kde:  $R_0$ ,  $R_{100}$  – odpor materiálu při teplotě 0 °C a 100 °C

Polovodičové senzory teploty obdobně jako kovové využívají závislosti odporu na teplotě. Mezi tyto teploměry lze řadit NTC či PTC termistory a monokrystalické senzory teploty. [18], [32]

## 2.7.3 Speciální teploměry

Do této skupiny řadíme teploměry pro jednorázové speciální použití, např. pro vyhodnocování rozložení teplot na povrchu těles, teploměry pro jednorázové změření jmenovité teploty apod.

- **Keramické žároměrky**

Jsou to šikmé komolé trojboké jehlánky z keramických hmot s různým bodem měknutí. Jehlánek se po dosažení jmenovité teploty ohýbá a dotkne se vrcholem podložky, na kterou je přilepený. Využívají se v keramickém průmyslu.

- **Teploměrné barvy, pásky a tužky**

Při tzv. teplotě zvratu využívají změny barvy. Teploměrné barvy se nanášejí přímo na měřený objekt, nebo na samolepicí umělohmotné pásky a slouží pro zjištění rozložení teplotního pole. Barevné teplotní indikátory na bázi kapalných krystalů cholesterického typu se používají k měření povrchové teploty. Použití najdou při nedestruktivní kontrole správné funkce různých zařízení, k odhalování skrytých vad materiálu apod. [18], [32]

## 2.7.4 Bezdotykové teploměry

Dělení bezdotykových teploměrů je možné dle principu nebo také podle spektrálního vyzařování. Avšak teorie zabývající se těmito přístroji už je vysvětlována od začátku této kapitoly a zobrazovací systémy (termovize) je popsána v kapitole následující.

## 2.7.5 Porovnání jednotlivých typů teploměrů

Na závěr této kapitoly jsou porovnávány vlastnosti jednotlivých typů teploměrů např. z hlediska fyzikálního principu, teplotního rozsahu, atd.

Tab. 2.I Porovnání jednotlivých typů teploměrů [16], [32]

<i>skupina teploměrů</i>	<i>typ teploměru</i>	<i>fyzikální princip</i>	<i>teplotní rozsah (°C)</i>	
dilatační teploměry	plynový	změna tlaku	-5	+50
	tenzní	změna objemu	-40	+400
	kapalinový	změna tenze par	-200	+750
	kovový	délková roztažnost	0	+900
elektrické teploměry	termoelektrické	termoelektrický jev	-200	+1700
	odporové kovové	změna elektrického odporu	-250	+1000
	odporové polovodičové, diodové	změna prahového napětí	-200	+400
speciální teploměry	keramické žároměrky	bod měknutí	+600	+2000
	teploměrná tělíska	bod tání	+100	+1300
	teploměrné barvy	změna barvy	+40	+1350
bezdotykové teploměry	širokopásmové pyrometry	zachycení veškerého teplotního záření	-40	+5000
	monokrystalické pyrometry	zachycení úzkého svazku teplotního záření	+100	+3000
	poměrové pyrometry	srovnání dvou svazků teplotního záření o různých vlnových délkách	+700	+2000
	termovize	snímání teplotního obrazu tělesa	-30	+1200

V následující tabulce jsou srovnávány výhody a nevýhody jednotlivých teploměrů.

Tab. 2.II Výhody a nevýhody jednotlivých typů teploměrů [16], [18], [32], [34]

<b><i>TYP PŘÍSTROJE</i></b>	<b><i>VÝHODY</i></b>	<b><i>NEVÝHODY</i></b>
plynový teploměr	netoxická teploměrová látka (důležité v potravinářství, ve výrobě léčiv, atd.) lineární stupnice, velký rozsah délka kapiláry, vysoká přesnost a stabilita	velmi malý přírůstek tlaku s teplotou vysoké pořizovací náklady
tenzní teploměr	malé pořizovací náklady, délka kapiláry vysoká citlivost i reakce na změnu teploty není nutná kompenzace na změnu teploty	nelineární stupnice, malý rozsah malé rozpětí měření
kapalinový teploměr	lineární stupnice, poměrně velký rozsah značná představující síla	křehkost, občas špatná čitelnost nutnost korekce údaje (okolní teplota, tlak)
kovový teploměr	nízká cena, snadná údržba i obsluha značná představující síla	menší rozsah teplot a přesnost pomalá odezva na změnu teploty
termočlánek	aktivní snímač, široký teplotní rozsah jednoduchý, levný odolný, široce použitelný	nelineární, nízká úroveň signálu potřeba referenčního signálu nízká citlivost i stabilita
odporový kovový teploměr	vysoká stabilita vysoká přesnost lepší linearita než u termočlátku	celkem vysoká cena potřeba stabilizovaného napájecího zdroje malá změna odporu a jeho nízká hodnota zahřívání proudem
termistor	vysoká citlivost rychlá odezva dvouvodičové zapojení	nelineární, křehký, zahřívání proudem omezený teplotní rozsah potřeba stabilizovaného zdroje U
integrovaný senzor	lineární výstup vysoká citlivost nízká cena	potřeba napájení pomalý, omezené použití zahřívání proudem
barevné teplotní indikátory	vysoká citlivost barevné změny jsou vratné, rychlá indikace změny teploty	krátká životnost natřené vrstvy větší teplotní setrvačnost fólií menší rozlišovací schopnost fólií nemožnost teplotního proměření členitých povrchů u fólií
infráčervený termočlánek	levný, samonapájecí, vnitřní bezpečnost bez posunu (driftu) měření připojení k displeji termočlátku měření i obtížně dostupných míst	nelineární výstup ovlivnění elektromagnetickou interferencí
infráčervený pyrometr (dlouhé vlnové délky)	levný přesný a praktický hodí se k údržbě	použití je ovlivněno max. délkou kabelu sondy (1m)
infráčervený pyrometr (krátké vlnové délky)	nízká až střední cena možnost zaměřit jakýkoli cíl v téměř jakékoli vzdálenosti přenosný nebo fixní ovládání, zaměření i měření jako kamera	měří pouze fixní oblast měřeného objektu přesnost měření ovlivňuje kouř, prach, atd. ovlivnění elektromagnetickou interferencí
dvoubarevný pyrometr	měření i skrze prach, kouř, apod. nezávislost na emisivitě měřeného objektu	vysoká cena čidla i displeje/ovládacího zařízení



### 3 Termovize

Termovizi lze považovat za základní měřicí zařízení pro infračervenou diagnostiku. S její pomocí lze kontrolovat funkce zařízení, u kterých chceme ověřit správnou činnost spojenou s tvorbou nebo absorpcí tepla (např. opotřebení třením různých materiálů nebo jejich vady). Energetika využívá např. možnosti diagnostiky za provozu pod vysokým napětím izolačních stavů izolátorů, spojovacích svorek kontaktů, stavů vypínačů atd. V elektrotechnickém průmyslu je důležitá schopnost sledovat teplotu pláště elektrických motorů.

Termovize je systémem pro bezdotykové měření teplot a využívá infračerveného záření vyšetřovaných těles. Opticko-mechanický rozklad obrazu je realizován prostřednictvím snímání jednotlivých bodů objektu řízenou optickou osou. Zorné pole termovize se postupně zaměřuje na všechny body měřeného objektu. Měření termovizí je velmi rychlé a umožňuje přímé sledování teplotních změn. Výsledkem měření je termogram (plocha obsahující různé stupně šedi nebo i barevný podklad). Termovize využívá dvou hlavních pásem vlnových délek a to pásmo krátkovlnné (2  $\mu\text{m}$  a 5  $\mu\text{m}$ ) a dlouhovlnné (7  $\mu\text{m}$  a 13  $\mu\text{m}$ ) a můžeme ji dělit na detektory či snímací systémy.

- **Kvantové detektory**

- jejich elektrická vodivost roste s dopadajícím infračerveným zářením
- jsou selektivní a chladí se vodou Stirlingovým chladičem (princip kompresorové mikrochladičky) nebo termoelektrickým chladičem (princip Peltierova jevu)

- **Bolometrické detektory**

- ohřívají se při dopadu infračerveného záření a mění se jejich elektrický odpor
- oproti kvantovým detektorům nevyžadují chlazení a jsou neselektivní

- **Snímací systémy s postupným rozkladem obrazu**

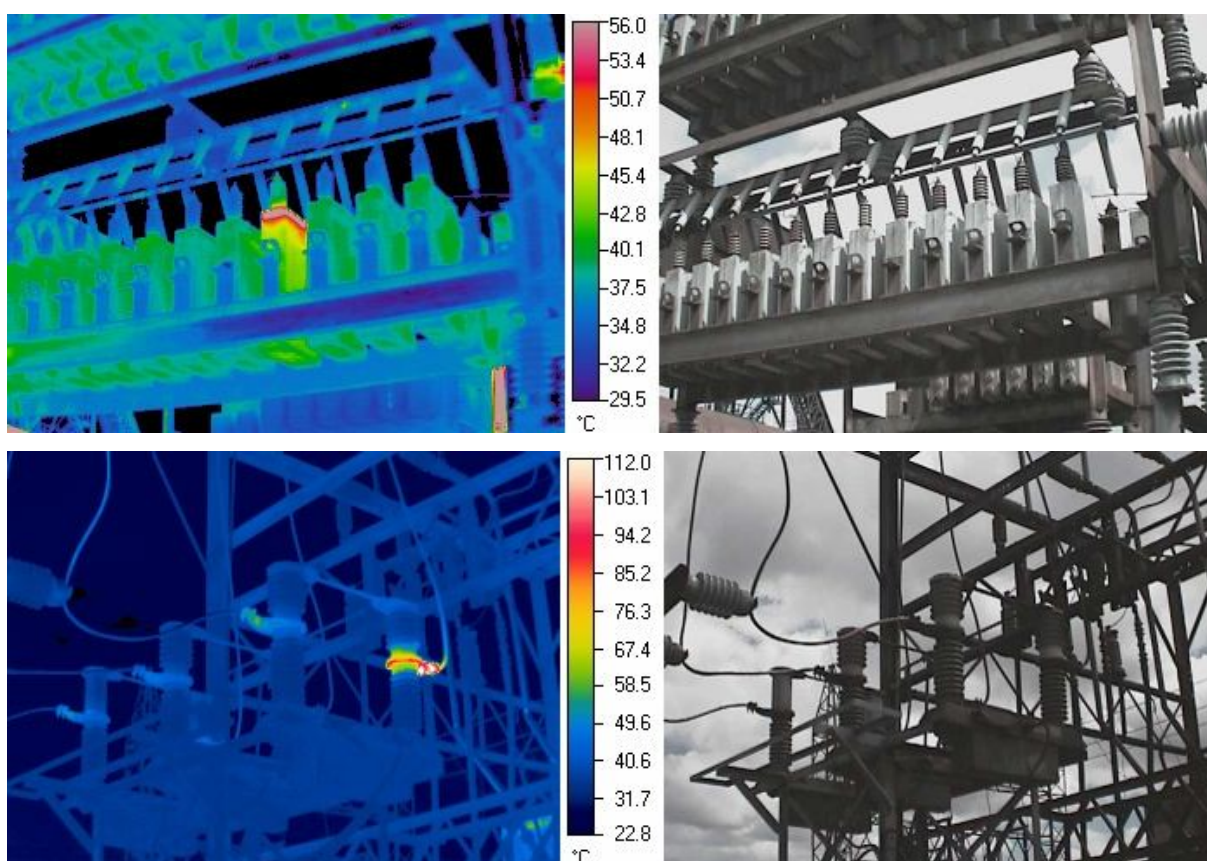
- pracují za podpory opticko-mechanickým snímačem nebo elektronickým rozkladem obrazu a kvantovým detektorem. Jejich výhodou je rozlišovací schopnost při velké přesnosti nebo teplotní rozpětí až 1000 °C.

- **Přímo zobrazovací systémy**

- tyto systémy využívají bolometrické detektory (na jejich povrchu se vytváří rozložení odporu dle přijímaného infračerveného záření).

## Termovizní měření využívané v elektrotechnice

V elektrotechnice se termovize využívá jako prostředek pro identifikování či hledání problémových oblastí při výrobě, přenosu a distribuci elektrické energie. Její velkou výhodou je možnost kontroly během normálního provozu bez zásahu do zařízení, protože je měření bezkontaktní a nedestruktivního původu. Dalším zvýhodněním je odhalování případných závad již v počátečním stádiu vlivem pravidelných kontrol, z čehož vyplývá ekonomická úspora. Termovize pomáhá při kontrole a revizi elektrických rozvodů. Měření oteplení svorek, spojů a elektrických zařízení provádíme nejméně při 50% zatížení. Na následujících snímcích jsou vidět problémy, které odhalila termovize (ukázkové snímky, které termokamerou pořídila katedra KTE jsou umístěny v příloze C).



Obr. 3.1 Použití termovize v praxi; převzato z [37]

### 3.1 Detekce částečných výbojů

Termovize neboli přístroje pro noční vidění slouží k detekci neelektrických projevů částečných výbojů. Při diagnostice je třeba brát v úvahu jejich vysokou úroveň u nových strojů, která s časem poklesne (tento jev může být dán tím, že ještě u nového stroje není

pořádně vytvrzené pojivo). Další možností detekce jsou podle jejich generování vysokofrekvenčního elektromagnetického pole. Obecně pak metody pro měření částečných výbojů dělíme na metody globální (komplexní měření) a lokalizační (využíváme je pro hledání zdrojového místa částečných výbojů). Dvěma hlavními metodami umožňujícími diagnostiku i defektů uvnitř materiálů jsou pulzní a Lock-in termografie.

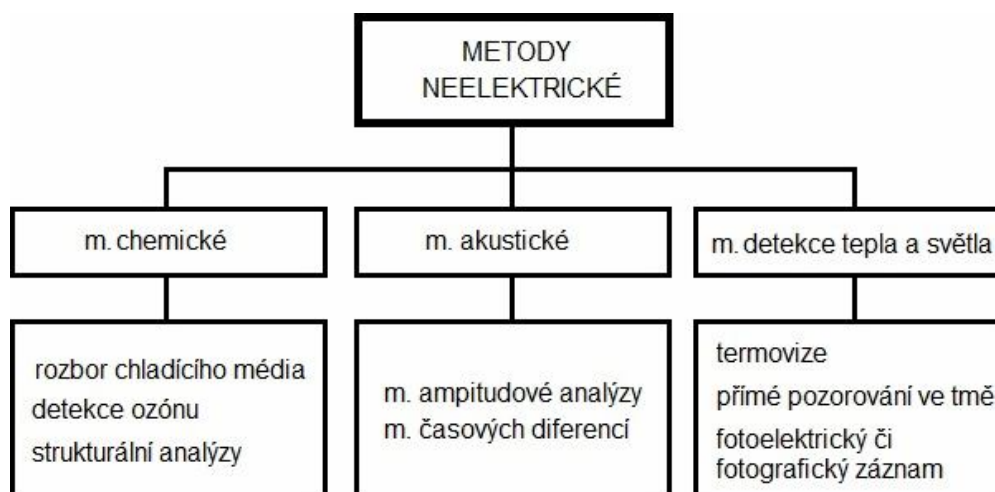
### Pulzní termografie

Ozařování diagnostikovaného objektu je prováděno za pomoci externího zářiče tepelnými stimulačními pulzy a následném snímání teploty povrchu objektu termovizní kamerou. Tato metoda se používá např. v tomografii u leteckých vrtulí z kompozitních materiálů.

### Lock-in termografie

Tento způsob využívá modulace tepelného toku, kde tepelná vlna proniká dovnitř na povrch tělesa po dopadu a odráží se v místě, v kterém došlo ke změně prostředí (defektu) zpět na povrch. Tam pak dojde k interferencím s primárním vlněním. Snímané obrazce za pomoci termovizní kamery jsou zpracovány číslicově Fourierovou rychlou transformací (FFT). Lze tedy z jednotlivých pixelů stanovit amplitudu a fázový posuv. [16], [17], [18]

### 3.1.1 Metody měření ČV



Obr. 3.2 Neelektrické metody detekce výbojové činnosti; [35]

## Vizuální detekce

Částečné výboje VN zařízení je nutno nejprve najít a lokalizovat místa jejich působení. Detekce se provádí vizuální inspekcí zařízení nebo ve viditelné části světelného spektra.

- **Sledování emise světelného záření**

Na viditelných místech je možné přímé sledování při tomto druhu výbojové činnosti. Může se to provádět buď pozorováním zařízení v zatemněné místnosti (po zadaptování očí na tmu), nebo pomocí fotografického záznamu na citlivý materiál při použití dlouhé doby expozice. Sledovat korónu není lehké a s výjimkou zatemněné místnosti prakticky neproveditelné.

- **Hledání stop po výbojové činnosti**

Hledání stop po výbojové činnosti lze provádět buď přímo nebo při osvětlení ultrafialovým světlem. Využití je jen u přístupných částí zařízení. Slouží ke srovnání s výsledky detekce jiných druhů měření.

- **Snímání UV záření - kamera pro nízké hodnoty osvětlení**

Koróna může být sledována zařízením citlivým v ultrafialové části spektra - přidáním vysoce selektivních filtrů zvyšujících kontrast. Problémem je potlačení rušivého slunečního pozadí při viditelném spektru koróny.

- **Kamera snímající dvojité spektrum (denní)**

Pro tyto účely se využívá ultrafialový snímač s klasickou kamerou. Tato metoda dovoluje sledovat slabé korónové výboje řádu jednotek pC ze vzdálenosti desítek metrů.

- **Snímání IČ záření (termovize) optické metody**

Při vzniku částečných výbojů se ohřívá i blízké okolí porušených míst. Výbojovou aktivitu lze najít sledováním teploty na povrchu daného objektu (soustava termočlánků, termovize). U transformátorů se sledují průchodky transformátorů, či rozložení teplotního pole na nádobách transformátorů. [35]

## 4 Praktická část - experiment

Experimentální část je rozdělena na dvě hlavní části. V první části se experiment nejdříve zabývá stanovováním emisivity jednotlivých vzorků měřených materiálů a ověřením jejich chování při různě nastavované teplotě. Dále je pak také prověřována teplota při pevně nastavené emisivitě na 0,95 v IR teploměru. Experiment II je věnován hledání a praktickému ověřování správného teplotního cyklu při vytvrzování izolačních vzorků v ocelové formě.

Cílem prvního experimentu je především získat emisivitu vybraných vzorků a její závislost na nastavované teplotě. Další část tohoto experimentu týkající se získávání teploty při emisivitě nastavené pevně na 0,95, je tedy uvedena spíše pro zajímavost.

Druhý experiment má za úkol vylepšit teplotní cyklus při vytvrzování vzorků v ocelové formě, jelikož vyvstal problém, že při doposud využívaném cyklu se některé vzorky po celé době věnované vytvrzovacímu procesu rozpadly, tudíž se mohl celý experiment opakovat znovu. Tím se čerpalo nejen drahocenným časem, ale samozřejmě i použitými prostředky pro vytvrzování.

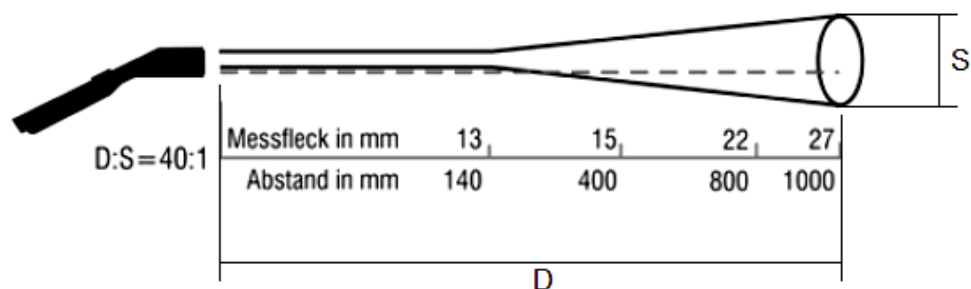
### 4.1 Měřicí přístroje a pomůcky

V této kapitole jsou popsány použité měřicí přístroje a pomůcky použité při obou experimentech.

#### 4.1.1 Infrateploměr AMiR 7210-50

K měření teploty a emisivity jsem použil IR teploměr AMiR 7210-50 od firmy Ahlborn, který nachází využití v automobilovém průmyslu, servisu topení a klimatizace, stavebnictví, strojírenství, požární bezpečnosti, údržbě i výrobě. Je vhodný zejména pro měření ze středních vzdáleností přibližně do 5 m.

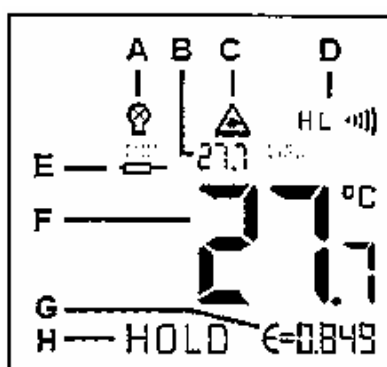
Optická charakteristika je údaj označovaný většinou jako  $D : S$ , jež určuje vzdálenost, z které lze měřit teplotu. Hodnota  $D : S$  udává, že teplotu plochy s průměrem  $S$  je možné měřit ze vzdálenosti  $D$  (např. má-li teploměr optickou charakteristiku  $(D : S) 3 : 1$ , pak teplotu tělesa o průměru 10 cm můžeme měřit ze vzdálenosti nejvýše 30 cm). Optická charakteristika použitého teploměru je vyobrazena na *Obr. 4.1*. [4], [19], [30]

Obr. 4.1 Optická charakteristika (závislost  $D : S$ ); [19]**Specifikace produktu:**

Rozsah teplot	- 32 až 760 °C
Spektrum	8 ÷ 14 μm
Přesnost měření	± 1 % nebo ± 1 °C (0...760 °C) ± 1 °C ± 0,07 °C / °C (0...-32 °C)
Emisivita	nastavitelná 0,10 ÷ 1,50
Optická charakteristika	40 : 1 / (13 mm bod do vzdálenosti ≤ 260 mm)
Zaměřování	1 bodový laser
Rozlišení	0,1 °C
Doba odezvy (95%)	300 ms
Napájení	9 V baterie
Výdrž	20 hod při 50 % užití laseru a podsvícením displeje 40 hod s vypnutým laserem i podsvícením displeje
Rozměry	190 x 38 x 45 mm
Hmotnost	180 g
Další funkce:	paměť MAX., MIN. a okamžité hodnoty funkce HOLD (přidržení naměřeného údaje po určitou dobu) HIGH (H) a LOW (L) indikace alarmu OFFSET (nastavení +/- nulového bodu) vstup pro termočláňkové čidlo K teplota v °C nebo °F optický a zvukový alarm, rozhraní USB, funkce RESET
Cena v ČR (s DPH)	8 664 Kč
Výrobce	<a href="http://www.ahlborn.cz">www.ahlborn.cz</a>

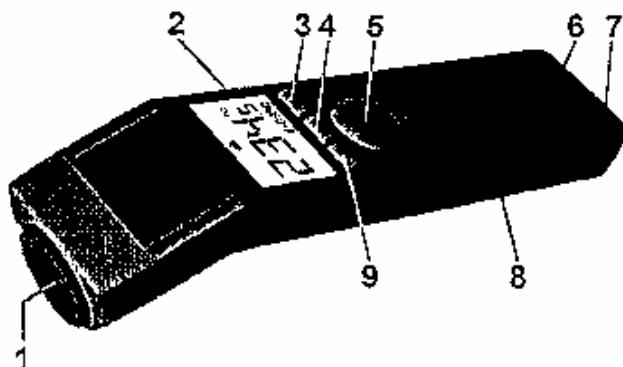


Obr. 4.2 IR teploměr AMiR 7210-50



- A – podsvícení displeje
- B – zobrazení MAX nebo MIN hodnoty
- C – symbol laseru
- D – HIGH a LOW indikace alarmu
- E – zobrazení hodnoty měřené dotykově
- F – současná hodnota teploty
- G – emisivita
- H – funkce HOLD

Obr. 4.3 Popis indikátorů na displeji [31]



- 1 – Optika
- 2 – LCD displej
- 3 – tlač. DOWN / podsvícení LCD
- 4 – tlač. pro výběr režimu
- 5 – spoušť
- 6 – vstup pro termočlánek
- 7 – USB rozhraní
- 8 – kryt baterie
- 9 – tlač. UP / LASER

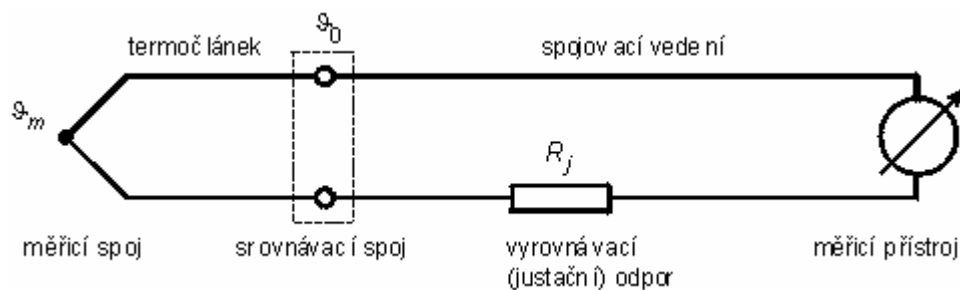
Obr. 4.4 Popis IR teploměru [31]

#### 4.1.2 Digitální termočlánek Keithley 2182A

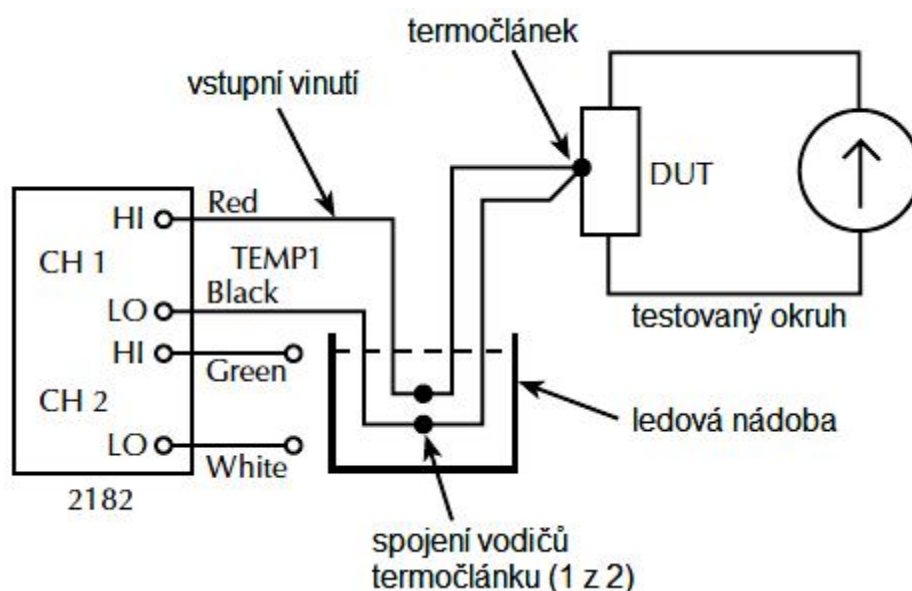
K ověření teploty jednotlivých vzorků jsem použil termočlánek Keithley 2182A v zapojení K. Dále byl přístroj použit při sledování teploty formy při vytvrzovacím procesu. Celé uspořádání použité při experimentu schematicky na *Obr. 4.6*, přístroj pak na *Obr. 4.7*.

**Typy termočlánků:**

TYP	ROZSAH	ROZLIŠENÍ	PŘESNOST
J	-200 to +760°C	0.001 °C	±0.2 °C
K	-200 to +1372°C	0.001 °C	±0.2 °C
N	-200 to +1300°C	0.001 °C	±0.2 °C
T	-200 to +400°C	0.001 °C	±0.2 °C
E	-200 to +1000°C	0.001 °C	±0.2 °C
R	0 to +1768°C	0.1 °C	±0.2 °C
S	0 to +1768°C	0.1 °C	±0.2 °C
B	+350 to +1820°C	0.1 °C	±0.2 °C



Obr. 4.5 Zapojení termočlánku [32]



Obr. 4.6 Obecné schéma uspořádání termočlánku [33].

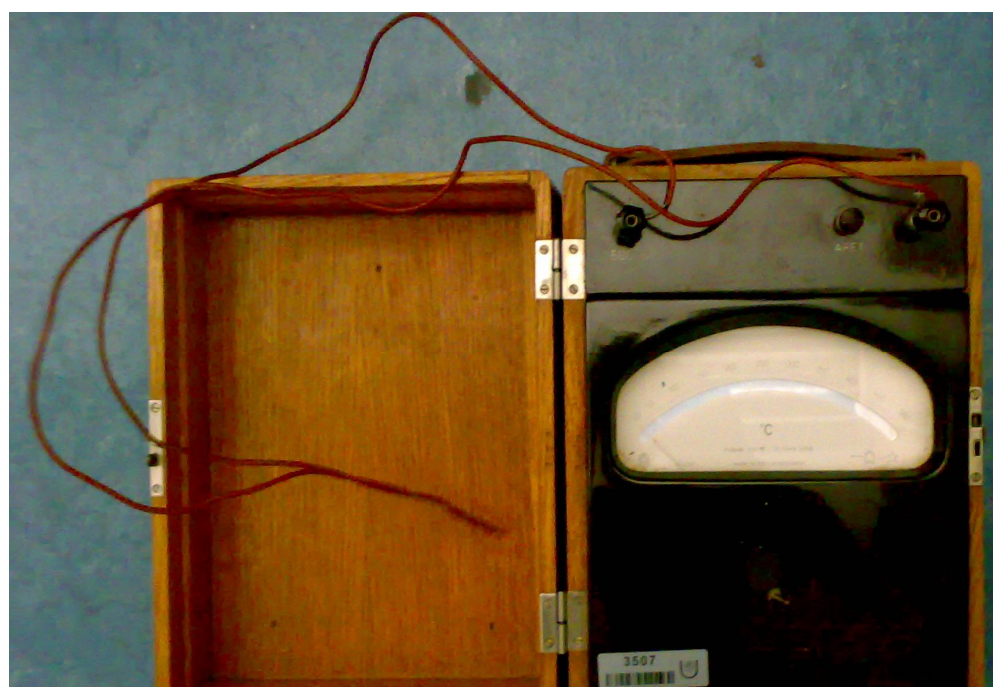




Obr. 4.7 Termočlánek Keithley 2182A [33]

#### 4.1.3 Analogový termočlánek

Termočlánek na Obr. 4.8 byl použit jako další přístroj k porovnání teploty při jejím nárůstu u druhého experimentu. Avšak u tohoto termočláneku docházelo k celkem výrazným odchylkám naměřených hodnot od ostatních přístrojů.



Obr. 4.8 Termočlánek připojený k analogovému přístroji

#### 4.1.4 Sušárna VENTICELL®, s nucenou cirkulací vzduchu, +250 °C

Oba experimenty probíhaly v sušárně BMT Venticell (viz Obr. 4.9 vlevo), na které byla ručně nastavována požadovaná teplota.



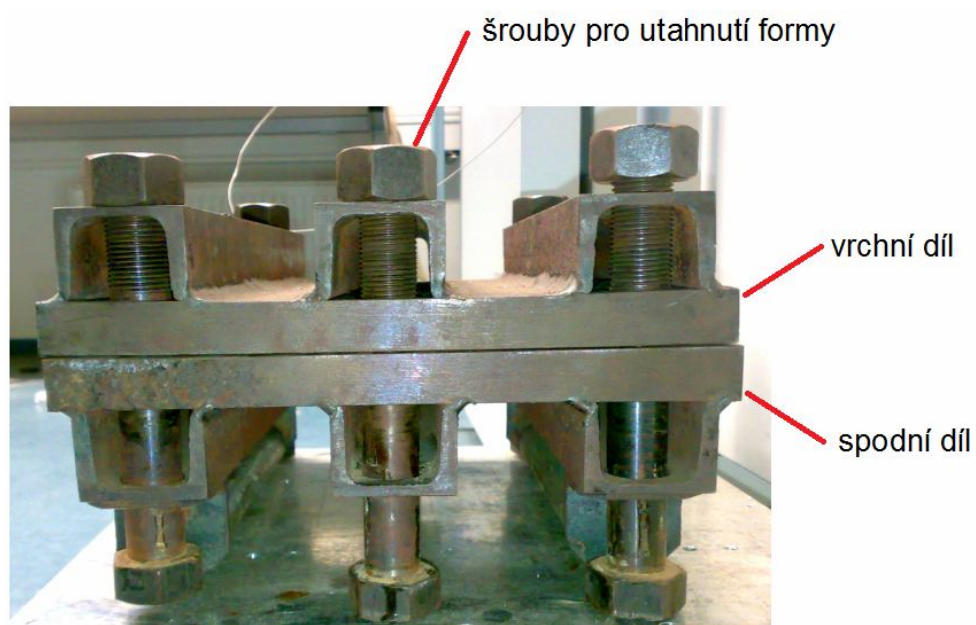
Obr. 4.9 Sušárna VENTICELL + Rtuťové teploměry; převzato z [23]

#### 4.1.5 Rtuťové teploměry

Pro kontrolu teploty v sušárně u obou experimentů a dále teploty v nádobě s ledem u druhého experimentu (sledování 0 °C) byly použity rtuťové teploměry (Obr. 4.9 vpravo).

#### 4.1.6 Forma na vytvrzování izolačních materiálů

K vytvrzování vzorků byla použita ocelová forma skládající se ze dvou hlavních dílů a potřebných šroubů k utažení, aby na materiály při vytvrzování doléhal patřičný tlak.



Obr. 4.10 Ocelová forma k vytvrzování materiálů

## 4.2 Experiment I

Při praktickém experimentu jsem stanovoval emisivitu jednotlivých materiálů. Použil jsem vzorky popsané v příloze A, za podmínek stanovených v jednotlivých kapitolách. Některé naměřené hodnoty se mohou lišit od hodnot tabulkových, což může být dáno závislostí na povrchu každého materiálu (např. jestli je daný materiál slitinou, lesklý či zoxidovaný, případně míra oxidace apod.).

Pokud bychom chtěli pro měření teploty povrchu těles použít právě bezdotykové teploměry, lze považovat znalost hodnoty emisivity za klíčovou. Proto existují tabulky emisivit různých materiálů určené alespoň k orientačnímu posouzení emisivity, abychom nemuseli dlouze hledat správné nastavení hodnot pro jednotlivé materiály. Nyní zde uvedu emisivitu alespoň některých běžných materiálů.

Tab. 4.I Tabulka emisivit vybraných materiálů [7], [11], [12],[13]

<b>Materiál</b>	<b>Teplota [°C]</b>	<b>Emisivita [ - ]</b>
<b>Obecně:</b> černé těleso		1
černý matový lak		0,99
<b>Kovy:</b> cín (nezoxidovaný)	100	0,05
hliník (nezoxidovaný)	100	0,03
hořčík (oxid hořečnatý)	1027-1727	0,16 - 0,20
měď (oxid měďný)	38	0,87
mosaz (73%Cu, 27%Zn, leštěná)	247	0,03
<b>Nekovy:</b> azbest (deska)	38	0,96
bavlněná látka	20	0,77
beton (drsňý)	0-1093	0,94
cihla (červená, surová)	21	0,93
dřevo (bukové, hoblované)	70	0,94
guma, světle šedá	23	0,89
korek	20	0,7
papír	20	0,97
sklo	90	0,94

### 4.2.1 Závislost vzorků na teplotě při emisivitě 0,95

Při tomto experimentu jsem nastavil pevně emisivitu na 0,95 a odečítal naměřenou teplotu (Tab. 4.II). Tato hodnota emisivity je nastavená přímo výrobcem na některých jednodušších IR teploměrech, protože se hodí pro měření nekovových materiálů, plastů,

potravin apod. Vzorky materiálů jsem proměřil při nastavené teplotě v sušárně na 27, 45, 60 a 75 °C. Při experimentu jsem teplotu vzorků kromě infrateploměru ověřoval ještě digitálním termočlánkem Keithley 2182A v zapojení K, dále pak rtuťovým teploměrem v sušárně a dalším termočlánkem připojeným k analogovému přístroji (použité přístroje viz kapitola 4.1). Experiment byl připraven po ustálení teplot na každém materiálu a probíhal tak, že jsem vždy otevřel krátce sušárnu a změřil vždy jeden vzorek materiálu, aby se teplota uvnitř příliš nesnížila a tím nedošlo k odchylkám při měření. Tento způsob určování teploty není příliš přesný a slouží spíše k orientačnímu posouzení teploty, protože se teplota s emisivitou mění.

Tab. 4.II Tabulka teplot měřených materiálů (při emisivitě = 0.95 a různě nastavených teplotách)

	$t_{nast} = 27 [^{\circ}C]$	$t_{nast} = 45 [^{\circ}C]$	$t_{nast} = 60 [^{\circ}C]$	$t_{nast} = 75 [^{\circ}C]$
<b>Materiál</b>	$t_{ziskana} [^{\circ}C]$	$t_{ziskana} [^{\circ}C]$	$t_{ziskana} [^{\circ}C]$	$t_{ziskana} [^{\circ}C]$
bavlněná látka	26,50	43,10	56,20	70,20
drážková izolace (NEN)	26,50	44,50	57,10	72,10
dřevo	26,00	42,00	56,90	70,20
forma na vytvrzování	26,60	43,50	58,20	-
guma	26,20	44,50	58,20	73,10
hliník	26,90	43,20	56,50	71,40
kartit	26,20	42,60	58,10	70,80
korek	25,40	40,60	53,40	68,30
křída	26,30	42,00	55,70	-
lepenka	27,00	43,90	57,90	71,80
měď	24,60	39,20	55,90	73,30
měď (tenká)	26,60	41,90	56,10	72,30
mosaz	26,40	43,30	58,90	71,50
ocel	24,80	42,10	58,10	72,1
olovo, zoxidované	26,30	43,50	54,30	-
plast	26,30	42,40	56,10	71,70
plexisklo	27,00	43,80	58,90	-
polyester	23,20	41,20	52,50	-
pozinkovaný plech	26,50	43,80	55,20	72,30
pryskyřice	27,10	43,20	58,00	-
relastik	27,00	43,00	56,10	72,60
sklo	27,20	45,10	57,10	73,10
teflon	26,30	43,30	58,50	72,30
teflonová páska	26,30	42,50	57,90	70,20
transformátorový papír	25,50	40,10	55,70	70,60
voda	27,00	38,10	49,40	56,30

#### 4.2.2 Závislost emisivity vzorků na nastavované teplotě

Při dalším měření jsem hledal emisivitu každého materiálu zvlášť a to tak, že jsem nastavoval různou emisivitu pro každý materiál a zapsal takovou hodnotu, při které souhlasila výsledná teplota zobrazená infračerveným teploměrem s teplotou měřenou dalšími měřicími přístroji. Opět jsem při tomto experimentu ověřoval teplotu dvěma termočládky a rtuťovým teploměrem umístěným v sušárně. Po každém proměřeném vzorku jsem počkal na ustálení teplot na dalším materiálu, který měl být právě otestován. Teploty byly při této zkoušce nastavené na 27, 45, 60 a 75 °C.

Tab. 4.III Tabulka emisivit měřených materiálů (při různě nastavených teplotách)

	$t_{nast} = 27 [^{\circ}C]$	$t_{nast} = 45 [^{\circ}C]$	$t_{nast} = 60 [^{\circ}C]$	$t_{nast} = 75 [^{\circ}C]$
<b>Materiál</b>	$\varepsilon_{ziskana} [-]$	$\varepsilon_{ziskana} [-]$	$\varepsilon_{ziskana} [-]$	$\varepsilon_{ziskana} [-]$
bavlněná látka	0,93	0,91	0,86	0,83
drážková izolace (NEN)	0,93	0,92	0,87	0,86
dřevo	0,92	0,88	0,83	0,83
forma na vytvrzování	0,94	0,92	0,87	0,86
guma	0,93	0,90	0,89	0,90
hliník	0,95	0,90	0,91	0,86
kartit	0,93	0,90	0,87	0,85
korek	0,85	0,84	0,80	0,78
křída	0,91	0,90	0,86	-
lepenka	0,95	0,92	0,87	0,86
měď	0,86	0,84	0,80	0,78
měď (tenká)	0,95	0,94	0,91	0,88
mosaz	0,94	0,90	0,89	0,86
ocel	0,89	0,88	0,85	0,83
olovo, zoxidované	0,64	0,62	0,61	0,6
plast	0,93	0,93	0,89	0,87
plexisklo	0,95	0,93	0,88	-
polyester	0,65	0,69	0,65	-
pozinkovaný plech	0,93	0,91	0,90	0,91
pryskyřice	0,95	0,95	0,89	-
relastik	0,95	0,92	0,84	0,88
sklo	0,95	0,98	0,88	0,90
teflon	0,93	0,93	0,88	0,89
teflonová páska	0,93	0,90	0,83	0,83
transformátorový papír	0,89	0,80	0,76	0,70
voda	0,95	0,90	0,85	0,85

Některé vzorky (především s lesklým povrchem) nemohly být běžným způsobem kvůli jejich odrazivosti změřeny, tudíž jsem na ně nalepil černou pásku a měření provedl na místě, kde byla páska. Při experimentu s nastavenou teplotou rovnající se 75 °C už nebyly raději otestovány všechny vzorky, aby se v sušárně nezačaly roztékat.

#### 4.3 Popis přesnosti měření a problémů při měření teplot

Přesnost měření je dána nejen podmínkami při měření, ale také použitou metodou a jejím provedením. Měření nekovů se měří lépe u infračerveného pyrometru. Infračervený pyrometr určuje průměrnou teplotu všech povrchů, které jsou umístěny v zorném poli, tedy i pozadí zaměřeného objektu, který má odlišnou teplotu a může způsobit chybu měření. V tabulce níže je vidět, pro jaké aplikace jsou vhodné různé vlnové délky (např. infrateploměr, který byl použit při experimentu má vlnovou délku 8 – 14 μm).

Tab. 4.IV Tabulka použitelné vlnové délky (μm) u různých aplikací; převzato z [34]

Typické aplikace	0,65	0,9	1,0	2 barevné 0,7-1,08 a 1,68 μm	2 barevné 1,55 a 1,68 μm	1,65	2,0	3,43	3,9	5,0	7,9	8-14
Hliník			•		•	•	•					
Asfalt										•	•	
Automobilový průmysl		•	•	•	•	•	•	•			•	•
Přístroje							•	•			•	•
Střelivo							•	•				•
Baterie							•					•
Cement	•	•	•	•			•		•		•	•
Konstrukční materiály							•			•	•	
Skleněná vlákna	•		•	•			•	•		•		•
Zpracování potravin							•	•				•
Slévárna	•	•	•	•			•					
Tavení skla	•	•	•	•						•		
Broušení a řezání skla										•	•	
Skleněné láhve		•								•	•	•
Tepelné zpracování		•		•	•	•		•				
Indukční ohřev		•		•	•	•		•				
Vypalovací pece	•	•		•			•		•	•		•
Zpracování kovů		•		•	•	•		•				
Dolování				•								
Neželezné kovy			•		•	•		•				
Pece		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Papír							•			•	•	
Farmaceutický průmysl											•	
Plasty							•			•	•	
Plastové filmy								•			•	
Guma							•			•	•	
Polovodiče		•	•	•	•		•		•	•		
Ocel	•		•	•		•		•		•		
Textil							•	•			•	•
Služby				•							•	



Při měření je pro zachování co nejlepší přesnosti vhodné, aby teplota byla měřena z co nejmenší vzdálenosti. Pokud je to tedy možné, tak měřit ze vzdálenosti ještě menší, než je maximální možná. Přesnost měření se pohybuje obvykle kolem  $\pm(1 \text{ až } 2) \%$  z měřené hodnoty nebo  $\pm(1 \text{ až } 2) \text{ }^\circ\text{C}$ , přičemž platí vyšší z obou hodnot. Každý pyrometr má trochu odlišnou chybu při měření. [1], [4], [7]

#### 4.4 Experiment II

Zde si představíme vytvrzovací proces v ocelové formě. Úkolem tohoto experimentu bylo vylepšit teplotní cyklus při vytvrzování vzorků v ocelové formě, jelikož vyvstal problém s doposud využívaným vytvrzovacím procesem. Problém spočíval v tom, že se občas některé vzorky po celém vytvrzovacím procesu rozpadaly a tak se mohl celý experiment opakovat znovu. Tím se samozřejmě zbytečně plýtvalo prostředky k vytvrzování.

Při experimentu byl jako vzorek k vytvrzení použit materiál Resin-Rich, což byla páska, která se nastříhala a slepila lepenkou do tvaru čtverce zhruba 12x12cm (v příloze E je přesně popsáno o jaký typ pásky jde). Těchto čtverců bylo pro každý vytvrzovací cyklus na sobě položených několik. Při prvním vytvrzování byla páska lepena ve stejném směru s polovičním překrytím a při druhém byla každá část pootočená o  $90^\circ$ . Jednotlivé slepené vrstvy pásky se položily na podložku do formy a forma se opatrně utáhla šrouby, aby nedošlo k posunutí vrstev. Při vytvrzování byly použity k ověřování teploty dva termočlánky a infrateploměr. Den před vytvrzováním zůstala forma přes noc v sušárně, aby byla dostatečně prohřátá. Ráno se do ní dal vzorek Resin-Rich a samotné měření se zaznamenávalo každých pět minut (hodnoty měření jsou umístěny v Příloze D).

Vytvrzovací proces probíhá tak, že se po vyndání formy ze sušárny čeká 30 minut (gelace =  $90^\circ\text{C}$ ) pak se teprve může do formy dát vzorek k vytvrzení. U prvního vytvrzovacího pokusu se nepodařilo dosáhnout teploty  $155 \text{ }^\circ\text{C}$ , která byla cílem k vytvrzení. Proto se po celé pracovní směně (kterou vytvrzení trvalo), nechal vzorek v sušárně ještě čtyři hodiny dotvrdit. Pak byla nastaveno vypnutí sušárny automaticky.



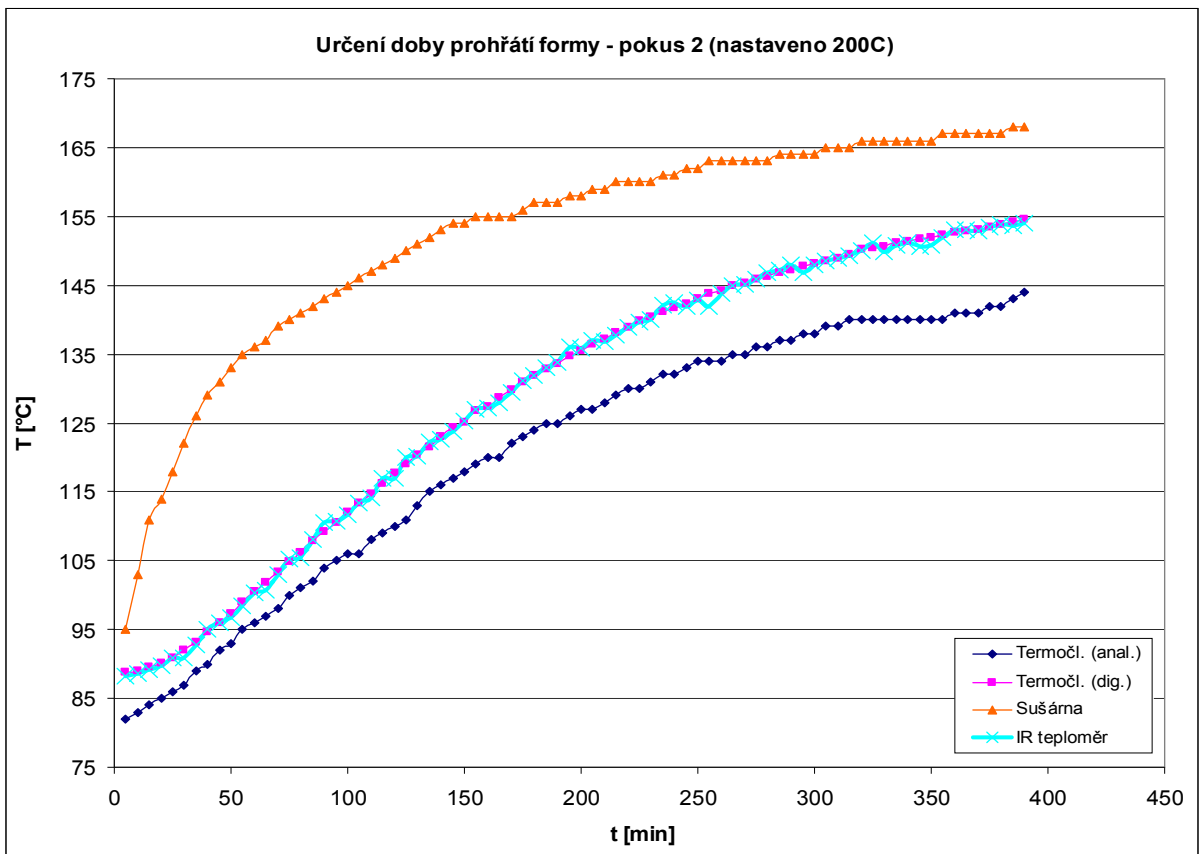
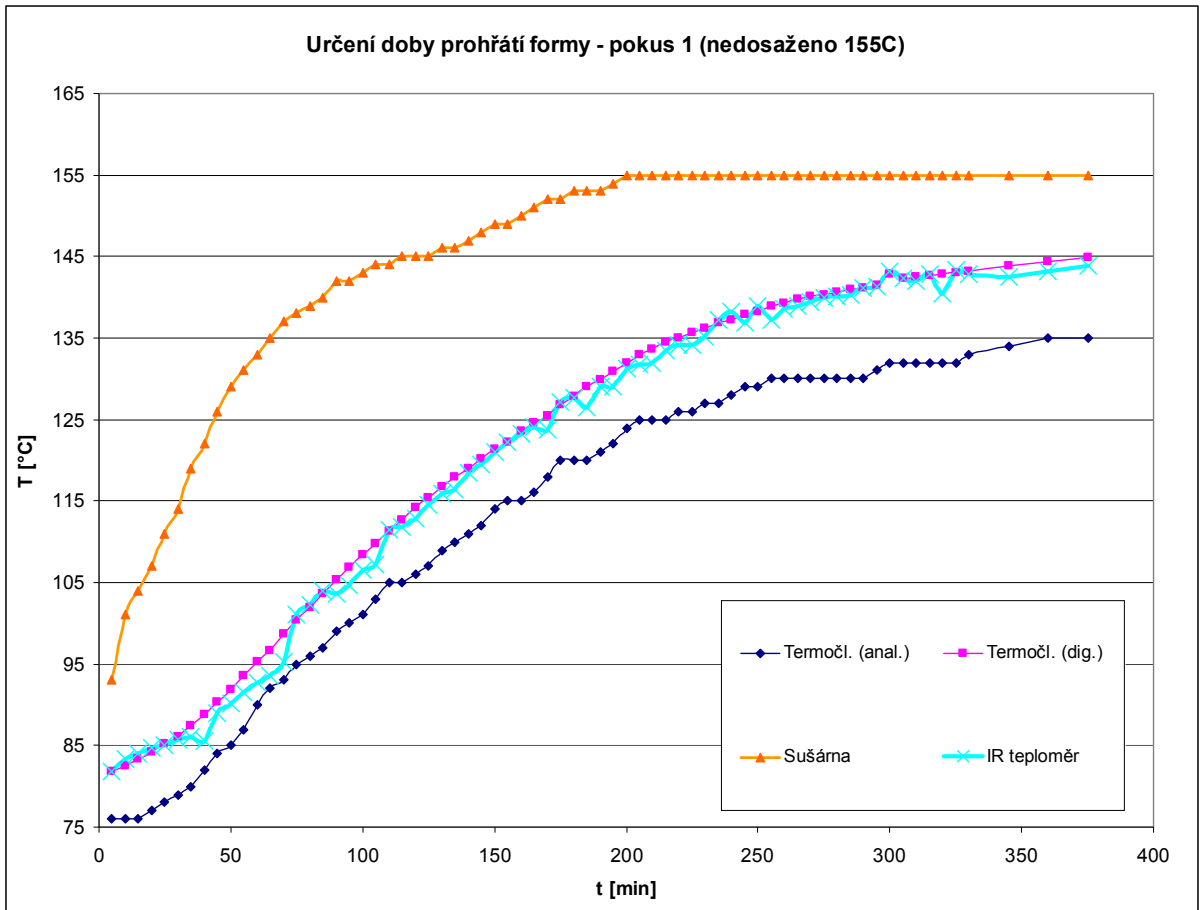
Obr. 4.11 Páska Resin-Rich (před nastříháním (vlevo) a před a po vytvrzení (střed a vpravo)



Obr. 4.12 Spodní část formy se vzorkem k vytvrzení

Příští pokus tedy byla nastavena teplota před vytvrzením vyšší a to 200 °C. Po gelaci však klesla na 97 °C. Tento experiment byl úspěšný a na konci pracovní směny bylo dosaženo požadované teploty. Tento vytvrzovací proces je tedy vhodný a měl by se používat k vytvrzování budoucích vzorků. Na Obr. 4.13 jsou znázorněny jednotlivé průběhy vytvrzovacích procesů (spodní graf představuje úspěšné vytvrzení).





Obr. 4.13 Grafy vytvrzovacích procesů

## 4.5 Závěr měření

Závěrem bych dodal, že pro správné měření teplot IR teploměry je důležité znát alespoň přibližné hodnoty emisivity a dát si pozor na skutečnost, že její hodnota není pořád konstantní, ale s teplotou se mění. Pro každou aplikaci a podmínky při experimentu bychom také měli užít vhodnou metodu stanovování emisivity (např. se rozhodnout podle přesnosti metody nebo její náročnosti, atd.). Dále bychom také měli vzít v úvahu vliv různých povrchů materiálů (i jejich stav a znečištění) a to hlavně u kovů. Obecně tak platí, že ruční IR teploměry jsou určeny spíše pro rychlé orientační určování teplot.

Z druhého experimentu nám vychází, že forma se zahřívá značnou dobu a tak by se měla nastavovat teplota vždy vyšší, než je požadovaná, aby se vytvrzovací proces vůbec stihl.

## Závěr

Na závěr bych chtěl dodat, že bezdotykové měření teplot IR teploměry určitě usnadňuje způsob měření teploty, jak jen to jde, navíc je časově vcelku nenáročné a umožňuje měřit i velmi vysoké teploty, kde se už dotykové teploměry téměř neuvažují. Výhodou je jistě i možnost měření objektů, které jsou v pohybu. Dále se jedná o bezpečný způsob měření materiálů bez jejich samotného ovlivnění měřicím přístrojem, a tím částečným znehodnocením dosažených výsledků.

Samozřejmě si při měření musíme také dávat pozor na způsob, jakým je prováděno. Vždy by se mělo měřit vhodnou a pokud možno co nejpřesnější metodou. Ovšem je také velmi důležité, aby paprsek IR teploměru nepřesahoval měřicí plochu, tedy správné užití IR teploměru. Dále pokud chceme získat správné hodnoty lesklých povrchů (nejčastěji kovů), tak bychom měli nějak upravit místo dopadu paprsku, protože v opačném případě bychom neměřili teplotu daného materiálu, ale teplotu objektu, který se právě odráží a výsledky by byly nepoužitelné. Předejít odrazu lze více způsoby a každý si určitě vybere ten správný nebo vyhovující pro svůj experiment.

Pokud tedy budeme dbát při manipulaci s IR teploměry na správné zásady při měření, tak si myslím, že by nikdo neměl mít nějaké větší problémy s jejich používáním. Bezdotykové měření teplot tedy má dle mého názoru jistě slibnou budoucnost a čeká ho ještě pořádný rozvoj a případná implementace do dalších odvětví, kde se s ním ještě nemůžeme setkat, nebo jen ojediněle.

## Použitá literatura

- [1] Omega Engineering Česká republika  
<http://www.omegaeng.cz> (říjen 2010)
- [2] Princip bezdotykového měření teploty  
<http://www.qtest.cz/bezdotykove-teplomery/bezdotykove-mereni-teploty.htm>  
(březen 2011)
- [3] Laboratoř bezdotykového měření teploty  
<http://web.vscht.cz/kadleck/aktual/LO.html> (1.05.10)
- [4] DÍTĚ, I. Bezkontaktní infračervené teploměry. *Elektro* [online]. 2004, č. 7, [cit. 2011-03-09]. Dostupný z WWW:  
<[http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=25918](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25918)>.
- [5] Pyrometr  
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Pyrometr> (březen 2011)
- [6] KABEŠ, Karel. Infračervené pyrometry – přehled trhu. *Automatizace* [online]. 2005, 48, č. 9, [cit. 2011-03-09]. Dostupný z WWW:  
<<http://www.automatizace.cz/article.php?a=827>>.
- [7] Bezdotykové teploměry  
<http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/predn/txt-Bc/5-FCHI09-IC-teplom.pdf> (březen 2011)
- [8] KREMPASKÝ, J.; SCHAUER, F. *Fyzika I a II* [online]. Zlín : [s.n.], 2004 [cit. 2011-03-18]. Vlnění, s. . Dostupné z WWW:  
<<http://kf-lin.elf.stuba.sk/KrempaskyFyzika/24.pdf>>.
- [9] Vlnová rovnice  
[http://cs.wikipedia.org/wiki/Vlnová\\_rovnice](http://cs.wikipedia.org/wiki/Vlnová_rovnice) (leden 2011)
- [10] HOFMANN, J.; URBANOVÁ, M. *Fyzika I* [online]. [s.l.] : [s.n.], 2005 [cit. 2011-03-09]. Kmity a vlnění, s. . Dostupné z WWW:  
<[http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid\\_ekniha-001/pages-img/159.html](http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_ekniha-001/pages-img/159.html)>.
- [11] Tabulka emisivity kovů  
<http://newport.cz/techinfo/emiskovy.html> (březen 2011)
- [12] Tabulka emisivity nekovů  
<http://newport.cz/techinfo/emisnekovy.html> (březen 2011)
- [13] Návod k obsluze  
[http://marcomplet.cz/docs/Testo/testo\\_830\\_T1\\_T2\\_n%C3%A1vod.pdf](http://marcomplet.cz/docs/Testo/testo_830_T1_T2_n%C3%A1vod.pdf) (březen 2011)
- [14] Elektromagnetické záření  
[http://if.vsb.cz/Kontakt/Hlavacova/elmg\\_zareni.doc](http://if.vsb.cz/Kontakt/Hlavacova/elmg_zareni.doc) (duben 2011)

- [15] LYSENKO, V. *Detektory pro bezdotykové měření teplot*. 1. vydání. Praha : BEN - technická literatura, 2005. 160 s. ISBN 80-7300-180-2.
- [16] KREIDL, M. *Měření teploty : senzory a měřicí obvody*. 1. vydání. Praha : BEN - technická literatura, 2005. 240 s. ISBN 80-7300-145-4.
- [17] MENTLÍK, V., et al. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd. Praha : BEN – technická literatura, 2008. 440 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [18] JENČÍK, J.; VOLF, J. *Technická měření*. 1. vydání. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2000. 212 s. ISBN 80-01-02138-6.
- [19] AMIR INFRARED MEASURING TECHNOLOGY  
[http://www.orionesrl.it/home.html?file\\_id=82&product\\_id=84&page=shop.getfile](http://www.orionesrl.it/home.html?file_id=82&product_id=84&page=shop.getfile)  
(prosinec 2010)
- [20] Stefanova-Boltzmannova konstanta  
[http://cs.wikipedia.org/wiki/Stefanova-Boltzmannova\\_konstanta](http://cs.wikipedia.org/wiki/Stefanova-Boltzmannova_konstanta) (duben 2011)
- [21] Wienův posunovací zákon  
[http://cs.wikipedia.org/wiki/Wienův\\_posunovací\\_zákon](http://cs.wikipedia.org/wiki/Wienův_posunovací_zákon) (květen 2011)
- [22] Mechanické vlny  
[http://fyzweb.cz/materialy/hvizdy/2\\_mechvlny.pdf](http://fyzweb.cz/materialy/hvizdy/2_mechvlny.pdf) (květen 2011)
- [23] Sušárna VENTICELL  
[http://www.vitrum.cz/susarna-venticell-reg-s-nucenou-cirkulaci-vzduchu-250-deg-c\\_k625\\_p1545.html](http://www.vitrum.cz/susarna-venticell-reg-s-nucenou-cirkulaci-vzduchu-250-deg-c_k625_p1545.html) (březen 2011)
- [24] Bezdotykové měření teploty  
<http://utp.fs.cvut.cz/vz/clanky/104.pdf> (květen 2011)
- [25] Teorie výpočtu tepelných ztrát objektu  
<http://www.revitalizace.com/teorie-vypocty/teorie-vypoctu-tepelnych-ztrat-objektu/>  
(květen 2011)
- [26] Teplo  
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Teplo> (květen 2011)
- [27] Teorie měření teploty, tepla a infraradiace  
[http://www.termokamera.cz/index.php?option=com\\_content&task=view&id=3&Itemid=9](http://www.termokamera.cz/index.php?option=com_content&task=view&id=3&Itemid=9) (květen 2011)
- [28] Kalorimetr  
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Kalorimetr> (květen 2011)
- [29] Příklady užití parciálních diferenciálních rovnic ve fyzice  
[http://eamos.pf.jcu.cz/amos/kat\\_fyz/externi/kat\\_fyz\\_0062/kapitola2.pdf](http://eamos.pf.jcu.cz/amos/kat_fyz/externi/kat_fyz_0062/kapitola2.pdf) (květen 2011)

- [30] Infrateploměr AMiR 7210-50  
<http://www.ahlborn.cz/cs/produkt/infrateplomer-amir-7210-50/> (červenec 2011)
- [31] Infrared Thermometer  
[https://extranet.fisher.co.uk/webfiles/fr/Pjointes/Mdemploi/DST003\\_EN%20THERMOMETRE%20IR%20-32%20%20+760%20degreC.pdf](https://extranet.fisher.co.uk/webfiles/fr/Pjointes/Mdemploi/DST003_EN%20THERMOMETRE%20IR%20-32%20%20+760%20degreC.pdf) (červenec 2011)
- [32] Měření teploty  
<http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F4/F4k43-tepl.htm> (červenec 2011)
- [33] Nanovoltmeter  
<http://www.testequity.com/documents/pdf/2182A.pdf> (červenec 2011)
- [34] Zpravodaj pro měření a regulaci  
[http://www.newport.cz/techinfo/PDF/techinfo\\_1.pdf](http://www.newport.cz/techinfo/PDF/techinfo_1.pdf) (duben 2012)
- [35] Diagnostika elektrotechnických zařízení  
[http://webs.zcu.cz/fel/ket/dez/- cviceni dez -/Diagnostika elektrotechnick%ecch za%fd%a1zen%a1 - cvi%9fen%a1 \[Re%a7im kompatibility\].pdf](http://webs.zcu.cz/fel/ket/dez/- cviceni dez -/Diagnostika elektrotechnick%ecch za%fd%a1zen%a1 - cvi%9fen%a1 [Re%a7im kompatibility].pdf) (červenec 2011)
- [36] Simulátor černého tělesa  
<http://www.processsensorsir.co.uk/BBS4000-Blackbody.asp> (březen 2012)
- [37] Termokamera v průmyslu  
[http://www.termokamera.cz/index.php?option=com\\_content&task=view&id=12&Itemid=9](http://www.termokamera.cz/index.php?option=com_content&task=view&id=12&Itemid=9) (duben 2012)
- [38] Infračervené teploměry Fluke  
<http://www.metravolt.cz/download/fluke2010-2011.pdf> (květen 2012)
- [39] Ti55FT-Datasheet  
<http://www.aikencolon.com/assets/images/Fluke/pdfs/tir-ti/Ti55FT-Datasheet.pdf>  
(květen 2012)
- [40] Ti55FT-Datasheet  
<http://www.professionalequipment.com/fluke-ti55ft-infrared-flexcam-thermal-imager-w-ir-fusion-technology-flk-ti55ft-20-2649053/thermal-infrared-cameras/> (leden 2012)
- [41] CALMICA 70 0866  
[http://www.wes.uk.com/downloads/isovoltaData\\_sheets/Calmica%2070%200867.pdf](http://www.wes.uk.com/downloads/isovoltaData_sheets/Calmica%2070%200867.pdf)  
(únor 2012)

## Příloha A – Vzorčky použité při experimentu I

Tab. Rozměry a hmotnost vzorků

Materiál	rozměry [mm]			hmotnost [g]
bavlněná látka	248	168	0,39	9,9
drážková izolace (NEN)	100	100	0,21	2,5
dřevo	104	74	35	169,8
forma na vytvrzování	350	270	172	46200
guma	124	45	4,95	30
hliník	174	96	0,97	49,1
kartit	108	35	8,16	33,8
korek	ø27	/	56	9,2
křída	31	11	11	3,8
lepenka	100	100	0,53	6,1
měď	92	21	1,03	9,1
měď (tenká)	140	140	0,09	14,2
mosaz	ø73	/	30	1021,3
ocel	53	15,5	5,52	31,8
olovo	180	121	1,94	456,4
plast	77	67	2,45	21,9
plexisklo	102	102	3,01	36,7
polyester	77	71	66	5,7
pozinkovaný plech	110	98	0,53	45,2
pryskyřice	ø100	/	17	150
relastik	102	102	0,28	5,1
sklo	37	35	1,17	3,8
teflon	ø40	/	30	83,2
teflonová páska	57	21	0,24	0,5
transformátorový papír	97	25	0,08	0,2
voda				298,2



dřevo



drážková izolace (NEN)



pozinkovaný plech



měď



guma



měď

mosaz

hliník

Obr. Detail vybraných vzorků

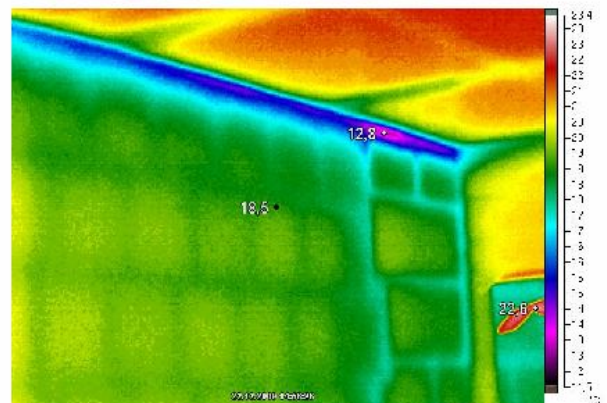
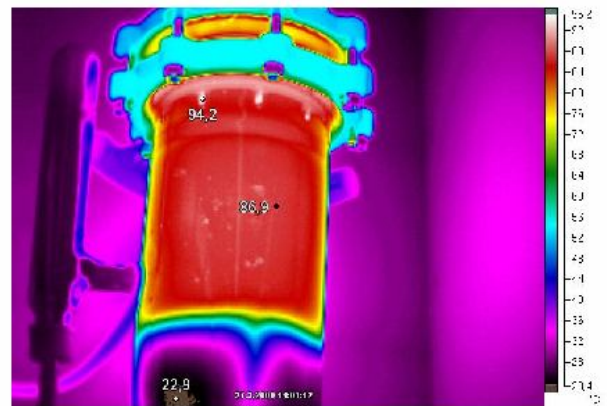
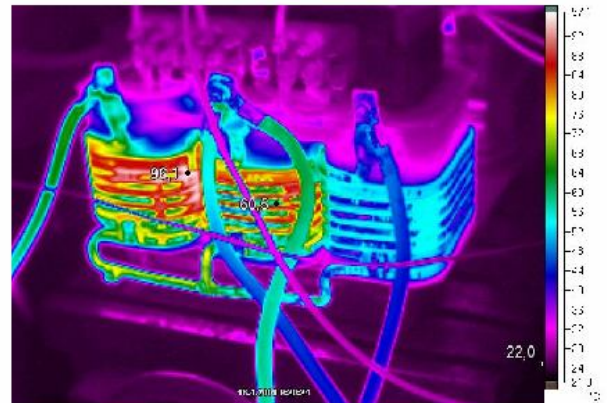
Příloha B – Běžné typy infračervených teploměrů značky Fluke; převzato z [38]

Srovnávací tabulka infračervených teploměrů	Řada Fluke 60							Řada Fluke 560			Řada Fluke 570	
	Fluke 61	Fluke 62	Fluke 63	Fluke 66	Fluke 68	Fluke 561	Fluke 566	Fluke 568	Fluke 572	Fluke 574		
Teplotní rozsah	-18 až 275° C	30 až 500° C	-32 až 535° C	-32 až 600° C	-32 až 760° C	-40 až 550° C	-40 až 650° C	-40 až 800° C	-30 až 900° C	-30 až 900° C		
Přesnost	2%	1,5%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	0,75%	0,75%		
Doba odezvy	< 500 ms	< 500 ms	< 500 ms	< 500 ms	< 500 ms	< 500 ms	< 500 ms	< 500 ms	< 250 ms	< 250 ms		
Optické rozlišení	8:1	10:1	12:1	30:1	50:1	12:1	30:1	50:1	60:1 (CloseFocus) optikou CloseFocus	60:1 (CloseFocus) optikou Close Focus		
K dispozici je model i s optikou Close Focus												
Vzáblňnost od místa měření	Do 2 m	Do 2 m	Do 2,5 m	Do 4,5 m	Do 7,5 m	Do 7,5 m	Do 4,5 m	Do 7,5 m	300 mm (s optikou Close Focus) až do 10,5 m	300 mm (s optikou Close Focus) až do 10,5 m		
Laserové zaměření	Jednobodový laser	Jednobodový laser	Jednobodový laser	Jednobodový laser	Jednobodový laser	Jednobodový laser	Jednobodový laser	Jednobodový laser	Třibodový laser	Třibodový laser		
Nastavitelná emisivita												
MIN/MAX hodnoty												
AVG hodnoty												
DIF hodnoty												
Podsvícený LCD displej												
Histogramový displej												
Akustické upozornění na VYSNIZ hodnotu												
Optická signalizace VYSNIZ hodnoty												
Obsahuje kontaktní sondy												
Vstup sondy (typy)												
Zánam dat (počet měření)				12 bodů	12 bodů		20 bodů	99 bodů		100 bodů		
Počet bodů rozhraní								USB		RS232		
Kompatibilita se softwarem FlukeView Forms												
Viz strana karta logu	48	48	48	48	48	50	49	49	47	47		47



Příloha C – Snímky z termokamery Fluke Ti-55FT pořízené katedrou KTE; převzato z [39], [40]

Model number	Ti55FT
<b>Other Features</b>	
Detector size	320 x 240
Detector type	Uncooled Microbolometer, Focal Plane Array
Field of View (FOV)	23° horizontal x 17° vertical
Spatial Resolution (IFOV)	1.30 mrad
Minimum Focus Distance	0.15m
Thermal Sensitivity (NETD)	≤0.05 °C at 30 °C (50 mK)
Detector data acquisition/###Image frequency	60 Hz or 7.5 Hz
Focus	SmartFocus manual
IR Digital Zoom	2x, 4x, 8x
Spectral Band	8 μm to 14 μm
<b>Measurement modes</b>	
Centerpoint	Yes
Center box (area, min/max, average)	Yes
User defined spots/boxes	in software only
Advanced on-board analysis functions	Yes
User defined field/text annotations	Yes
Voice annotation	Yes
Automatic hot and cold point detection	Yes
<b>Image presentation</b>	
Digital display	5" High Resolution LCD
Video output	RS170 EIA/NTSC or CCIR/PAL composite video
Palettes	8
<b>Optional lenses</b>	
54 mm Telephoto	Yes
10.5 mm Wide angle lens	Yes
<b>Image and data storage</b>	
Storage medium	> 1000 images on compact flash card (512 MB)
On imager file formats	IS2
File formats supported in software	BMP, JPG, GIF, PNG, TIF, WMF, DOC, PDF, XLS
<b>Imager features</b>	
Fully radiometric	Yes
Flash and torch light	Yes
Laser pointer	Yes
Windows CE based navigation menu	Yes
AutoCapture (Programmable Image Capture)	Yes
180° articulating lens	Yes
Software included	Yes (SmartView)
<b>Environmental and mechanical design</b>	
Operating temperature	-10 to +50°C (14 °F to 122 °F)
Storage temperature	-40 to +70°C (-40 °F to 158 °F)
Relative humidity	10% to 95% non-condensing
Water and dust resistant	IP54
Weight (including batteries)	1.95 kg (4.3 lb)
Camera size (HxWxD)	162 x 262 x 101 mm (6.5 in x 10.5 in x 4.0 in)
Warranty	2 years
<b>Power</b>	
Battery type	Li-ion rechargeable battery, field replaceable (2)
Battery operating time	2 hours continuous
Battery re-charge time	3 Hours
AC operation (110/220 VAC, 50/60 Hz)	Yes
Automatic shut down	Yes
Sleep mode	Yes
<b>Applications</b>	
Electrical distribution/power generation	Yes
In plant electrical	Yes
Electromechanical	Yes
Mechanical systems	Yes
Electronics	Yes
Other	Yes
<b>IR-Fusion Technology</b>	
IR-Fusion Technology	Yes
Full thermal	Yes
Full visual light	Yes
Picture in Picture	Yes
Color Alarm	Yes
<b>Temperature measurement</b>	
Temperature range	-20 °C to 600 °C in 3 ranges (-4 °F to 1112 °F in 3 ranges)
Accuracy	±2 °C or 2% whichever is greater
Emissivity correction	Yes





## Příloha D – Naměřené hodnoty u experimentu II

Tab. vytvrzovací proces č. 1

Čas [min]	Term. 1 [°C]	Term. 2 [°C]	Sušárna [°C]	IR [°C]
5	76	81,83	93	81,80
10	76	82,50	101	83,40
15	76	83,28	104	84,00
20	77	84,27	107	84,80
25	78	85,24	111	85,00
30	79	86,09	114	85,70
35	80	87,51	119	86,10
40	82	88,80	122	85,50
45	84	90,40	126	89,00
50	85	91,96	129	90,10
55	87	93,64	131	91,60
60	90	95,30	133	92,70
65	92	96,68	135	93,50
70	93	98,67	137	95,20
75	95	100,42	138	101,00
80	96	101,92	139	102,20
85	97	103,63	140	104,00
90	99	105,35	142	103,70
95	100	106,80	142	104,60
100	101	108,40	143	106,50
105	103	109,80	144	107,30
110	105	111,31	144	111,50
115	105	112,71	145	111,80
120	106	114,15	145	112,80
125	107	115,44	145	114,50
130	109	116,68	146	115,90
135	110	117,87	146	116,50
140	111	118,94	147	118,50
145	112	120,12	148	119,50
150	114	121,38	149	121,10
155	115	122,28	149	122,20
160	115	123,51	150	123,30
165	116	124,52	151	124,10
170	118	125,39	152	123,80
175	120	126,80	152	127,10
180	120	127,90	153	127,60
185	120	128,95	153	126,50
190	121	129,90	153	129,00
195	122	130,95	154	129,10
200	124	131,85	155	131,30
205	125	132,93	155	131,70
210	125	133,60	155	132,00
215	125	134,43	155	133,50
220	126	135,00	155	134,20
225	126	135,63	155	134,10
230	127	136,24	155	135,24
235	127	136,80	155	137,20
240	128	137,24	155	138,30

245	129	137,90	155	136,80
250	129	138,30	155	138,90
255	130	138,87	155	137,20
260	130	139,25	155	138,60
265	130	139,69	155	138,90
270	130	140,07	155	139,50
275	130	140,35	155	139,90
280	130	140,70	155	140,10
285	130	140,96	155	140,30
290	130	141,17	155	141,10
295	131	141,54	155	141,30
300	132	142,83	155	143,10
305	132	142,31	155	142,30
310	132	142,53	155	142,00
315	132	142,68	155	142,80
320	132	142,88	155	140,50
325	132	143,09	155	143,30
330	133	143,25	155	142,80
345	134	143,92	155	142,50
360	135	144,45	155	143,20
375	135	144,84	155	143,80

Tab. vytvrzovací proces č. 2

Čas [min]	Term. 1 [°C]	Term. 2 [°C]	Sušárna [°C]	IR [°C]
5	82	88,80	95	88,20
10	83	88,91	103	88,60
15	84	89,59	111	89,20
20	85	90,15	114	89,80
25	86	90,95	118	90,90
30	87	92,04	122	90,80
35	89	93,23	126	92,80
40	90	94,60	129	95,10
45	92	95,91	131	95,90
50	93	97,25	133	96,70
55	95	99,00	135	98,50
60	96	100,51	136	100,40
65	97	101,82	137	100,80
70	98	103,42	139	103,00
75	100	104,84	140	105,20
80	101	106,11	141	105,50
85	102	107,84	142	108,00
90	104	109,24	143	110,50
95	105	110,61	144	110,80
100	106	111,98	145	111,60
105	106	113,42	146	113,30
110	108	114,75	147	114,20
115	109	116,29	148	117,00
120	110	117,65	149	116,90
125	111	119,00	150	120,00
130	113	120,29	151	120,20
135	115	121,50	152	122,30

140	116	123,06	153	122,70
145	117	124,42	154	123,70
150	118	125,15	154	125,30
155	119	126,78	155	127,00
160	120	127,35	155	127,10
165	120	128,69	155	127,90
170	122	129,85	155	129,50
175	123	130,89	156	131,10
180	124	131,90	157	131,90
185	125	132,88	157	133,00
190	125	133,69	157	133,80
195	126	134,71	158	136,00
200	127	135,48	158	135,80
205	127	136,45	159	137,00
210	128	137,22	159	136,90
215	129	138,13	160	137,80
220	130	138,91	160	138,80
225	130	139,80	160	139,60
230	131	140,40	160	140,10
235	132	141,22	161	142,20
240	132	141,74	161	142,50
245	133	142,30	162	141,90
250	134	143,01	162	142,80
255	134	143,82	163	141,90
260	134	144,15	163	143,90
265	135	144,91	163	145,00
270	135	145,28	163	145,10
275	136	145,94	163	145,90
280	136	146,25	163	146,80
285	137	146,81	164	147,30
290	137	147,24	164	148,00
295	138	147,77	164	146,90
300	138	148,10	164	148,00
305	139	148,57	165	148,50
310	139	149,00	165	148,90
315	140	149,54	165	149,30
320	140	150,17	166	150,00
325	140	150,38	166	151,10
330	140	150,69	166	149,80
335	140	151,16	166	150,80
340	140	151,32	166	151,20
345	140	151,68	166	150,60
350	140	151,85	166	150,80
355	140	152,33	167	152,00
360	141	152,70	167	153,10
365	141	152,90	167	153,00
370	141	153,14	167	152,90
375	142	153,40	167	153,50
380	142	153,74	167	153,80
385	143	154,16	168	153,70
390	144	154,60	168	154,00

Příloha E – Typ pásky Resin-Rich (CALMICA 70 0866); převzato z [41]

# CALMICA<sup>®</sup> 70 0866, 70 0867

## Description

CALMICA<sup>®</sup> 70 0866 consists of mica paper based on uncalcined muscovite, impregnated with B-stage epoxy resin and a PET-film as carrier. CALMICA<sup>®</sup> 70 0866 is a flexible mica paper compound which shows excellent process ability and high dielectric strength due to the PET-film. In order to prevent blocking, the flexibility of CALMICA 70 0867 is lower. CALMICA<sup>®</sup> 70 0866 is supplied with polyethylene release film. CALMICA<sup>®</sup> 70 0867 is supplied without polyethylene release film.

## Application

CALMICA<sup>®</sup> 70 0866 and CALMICA<sup>®</sup> 70 0867 are used e. g. for the insulation of bars and coils of high voltage motors and generators where high resin flow (higher than e.g. CALMICA 70 900) is needed. CALMICA<sup>®</sup> 70 0866 and CALMICA<sup>®</sup> 70 0867 are applied in full width (roll) or as a tape. Forming and curing is done in a hot press.

## Formats

Rolls: maximum width 1000 mm  
Tapes: from 10 mm width upward

## Storability

Minimum 6 months at 20 °C  
Minimum 12 months at 5 °C

## Processing Advice

Pressing conditions (to achieve form stability):

Temperature: 130 – 180 °C  
Pressure: 2 - 3 N/mm<sup>2</sup>  
Time: 8.0 - 0.5 h  
Example: 1 hour at 160 °C and 2 N/mm<sup>2</sup>  
Fully cured status is achieved after 4 hours at 160 °C.

## Technical Data

CALMICA <sup>®</sup>			70 0866	70 0867	
Properties	Test method	Unit	Value	Value	Value
Nominal thickness	IEC 60371-2	mm	0.17 ± 0.02	0.16 ± 0.02	0.19 ± 0.02*
Total substance	IEC 60371-2	g/m <sup>2</sup>	267 ± 25	262 ± 20	300 ± 25
Mica paper	IEC 60371-2	g/m <sup>2</sup> %	160 ± 15 59.9	160 ± 15 61.1	160 ± 15 53.3
Epoxy resin	IEC 60371-2	g/m <sup>2</sup> %	65 ± 6 24.3	70 ± 7 26.7	70 ± 7 23.3
PET-film	IEC 60371-2	µm g/m <sup>2</sup> %	30 42 ± 4 15.7	23 32 ± 3 12.2	50 70 ± 7 23.3
Tensile strength	IEC 60371-2	N/cm	≥ 30	≥ 30	≥ 30
Breakdown voltage	IEC 60243-1	kV	≥ 5	≥ 5	≥ 5
Thermal class	IEC 60216-2		155 (F)	155 (F)	155 (F)
Volatile content (15 min 150 °C)	IEC 60371-2	%	≤ 1	≤ 1	≤ 1

\* Available only on request!