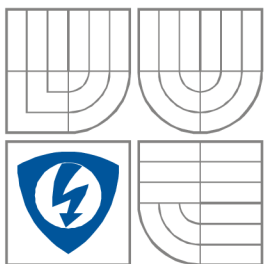


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

POUŽITÍ TERMOVIZNÍ KAMERY V MĚŘICÍ TECHNICE

USING THE INFRARED CAMERA IN THE MEASURING TECHNIQUE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

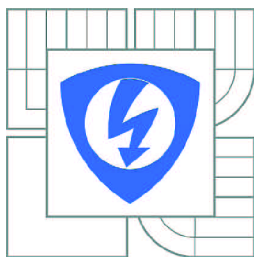
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JIŘÍ ŠVESTKA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. LUDVÍK BEJČEK, CSc.

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Automatizační a měřicí technika

Student: Jiří Švestka

ID: 106829

Ročník: 3

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Použití termovizní kamery v měřicí technice.

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s bezdotykovými metodami měření tepelných vlastností materiálů (zaměřte se zejména na izolační materiály ve stavebnictví) a jejich sortimentem na trhu.
2. Ověřte metody používající termovizní zobrazovače.
3. Změřte vybrané tepelné vlastnosti u vybraných materiálů a získané údaje porovnejte (mezi sebou i certifikáty).

DOPORUČENÁ LITERATURA:

KREIDL, M.: Měření teploty - Senzory a měřicí obvody. BEN Praha 2005, ISBN 80-7300-145-4

VAVERKA, J. a kol.: Stavební tepelná technika a energetika budov. VUTIUM Brno 2006, ISBN 80-21429-0

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 30.5.2011

Vedoucí práce: doc. Ing. Ludvík Bejček, CSc.

prof. Ing. Pavel Jura, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tématem této bakalářské práce je bezdotykové měření tepelných vlastností izolačních materiálů používaných ve stavebnictví. Uvedený je zde i seznam vybraných firem a základní přehled druhů izolačních materiálů na trhu. Cílem je změřeni a následné porovnání tepelných vlastností u vybraných materiálů.

Klíčová slova

Emisivita, černé těleso, pohltivost, propustnost, odraznost, teplo, tepelný tok, součinitel tepelné vodivosti, součinitel teplotní vodivosti, sálání, proudění, vedení, objemová hmotnost.

Abstract

The topic of this bachelor thesis is a noncontact measurement of thermal characteristics of insulating materials used in the construction. This is a list of selected companies and an overview of basic types of of insulating materials on the market. The aim is to measure and then to compare the thermal properties of selected materials.

Keywords

Emissivity, black body, absorptance, transmittance, reflectance, heat, heat flow, thermal conductivity, coefficient of thermal conductivity, radiation, convection, conduction, density.

Bibliografická citace:

ŠVESTKA, J. *Použití termovizní kamery v měřicí technice*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 52s. Vedoucí bakalářské práce byl doc. Ing. Ludvík Bejček, CSc.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma *Použití termovizní kamery v měřicí technice* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **30. května 2011**

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Ludvíku Bejčkovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: **30. května 2011**

.....
podpis autora

Obsah

1	Úvod.....	13
1.1	Cíl práce.....	13
2	Bezdotykové měření teploty [1].....	14
2.1	Rozsah záření přijímaného senzorem pokrývá.....	14
2.2	Výhody.....	14
2.3	Nevýhody.....	14
2.4	Základní pojmy.....	14
2.4.1	Pohltivost (absorbance).....	14
2.4.2	Propustnost (transmittance).....	15
2.4.3	Odraznost (reflektance).....	15
2.4.4	Emisivita.....	15
2.5	Černé těleso [2].....	16
2.6	Černý zářič.....	16
2.7	Pyrometry [2].....	17
2.8	Termovize.....	18
2.9	Nejistoty a chyby metod bezdotykového měření teploty.....	18
2.9.1	Nejistoty měření teploty způsobené zdrojem nejistoty ve stanovení emisivity ..	18
2.9.2	Chyba metody způsobená nerespektováním prostupnosti atmosféry a zářivého toku okolního prostředí.....	19
2.9.3	Chyba metody způsobená zanedbáním vzájemného zářivého toku.....	19
2.9.4	Chyba metody způsobená nedodržením velikosti měřené plochy dle technických podmínek výrobce.....	19
3	Stavební tepelná technika [3].....	20
3.1	Základní pojmy.....	20
3.1.1	Teplo.....	20
3.1.2	Tepelná kapacita.....	20
3.1.3	Měrná tepelná kapacita.....	21
3.1.4	Tepelný tok.....	21
3.1.5	Hustota tepelného toku.....	21
3.1.6	Součinitel tepelné vodivosti.....	21
3.1.7	Plošná tepelná propustnost materiálu.....	22
3.1.8	Součinitel teplotní vodivosti.....	22
3.1.9	Součinitel prostupu tepla.....	23

3.1.10	Termodynamická teplota.....	23
3.1.11	Celsiova teplota.....	23
3.2	Šíření tepla	23
3.2.1	Šíření tepla vedením.....	24
3.2.2	Šíření tepla prouděním	25
3.2.3	Šíření tepla sáláním	26
3.3	Tepelně technické vlastnosti materiálů	26
3.4	Měření tepelně technických vlastností stavebních materiálů	27
3.4.1	Stacionární metody.....	27
3.4.2	Kontaktní dynamické metody na měření termo-fyzikálních parametrů.....	30
3.5	Tepelné izolační materiály [4]	30
3.6	Průzkum trhu.....	32
4	Měření	33
4.1	Změření rozložení teploty na plotýnce.....	34
4.2	Ověření nastavené teploty a určení emisivity povrchu plotýnky	35
4.3	Zkouška ochranné vrstvy	35
4.4	Rozložení ochranné vrstvy na vzorcích polystyrénu a volba místa nanesení ThermaSpray 800 na měřených vzorcích	38
4.5	Poloha Ti25	40
4.6	Zjištění tepelné závislosti daných vzorků	40
4.6.1	Polystyrénové vzorky:.....	40
4.6.2	TC Ceramic HB:	43
4.6.3	Skelná vlna:.....	45
4.7	Zhodnocení změřených výsledků:.....	48
5	Závěr.....	50
6	Literatura	51

Seznam obrázků

Obr. 2.1 Dutinový černý zářič: a) kulový, b) válcový, c) kuželový, d) inverzní kuželový, e) technická realizace černého zářiče pro rozsah teploty černého tělesa od 200 °C do 1200 °C. [1].....	17
Obr. 2.2 Vliv prostupnosti atmosféry a záření okolního prostředí. [1].....	19
Obr. 2.3 Minimální průměr kruhu na měřeném objektu v závislosti na vzdálenosti. [1].....	20
Obr. 3.1 Sdílení tepla vedením. [3].....	24
Obr. 3.2 Proudění vzduchu okolo povrchu tělesa při ohřívání vzduchu. [3].....	25
Obr. 3.3 Konstrukční uspořádání měřícího zařízení podle ČSN 72 7012-2. [4]	28
Obr. 3.4 Konstrukční uspořádání měřícího zařízení podle ČSN 72 7012-3. [4]	29
Obr. 4.1 Umístění plotýnky v ochranné krabici.....	33
Obr. 4.2 Teplotní rozložení plotýnky.....	34
Obr. 4.3 Místo nanesení černého spreje s emisivitou 0,96 a změřené teploty.....	35
Obr. 4.4 Polystyrénový vzorek po nanesení černého spreje PRIMA s ochrannou vrstvou v horizontálním směru (Styro RC).....	36
Obr. 4.5 Polystyrénový vzorek po nanesení černého spreje PRIMA s ochrannou vrstvou v horizontálním a vertikálním směru (Styro RC).	36
Obr. 4.6 Rozložení procentního zastoupení lepidla Herkules v ochranné vrstvě na vzorku polystyrénu.	37
Obr. 4.7 Polystyrénový vzorek s různým procentním zastoupením lepidla Herkules po nanesení černého spreje PRIMA.....	37
Obr. 4.8 a) Měřící místa na polystyrénovém vzorku, b) Rozměry polystyrénového vzorku.	38
Obr. 4.9 Umístění ThermaSpray 800 na vzorku TC Ceramic HB.....	39
Obr. 4.10 Umístění spreje s emisivitou 0,96 na vzorcích skelné vlny.....	39
Obr. 4.11 Umístění termokamery Ti25 a plotýnky.....	40
Obr. 4.12 Poloha polystyrénového vzorku na plotýnce.....	41
Obr. 4.13 Srovnání vzorků polystyrénu o různých tloušťkách, které byly změřené v místě T1	42
Obr. 4.14 Srovnání vzorků polystyrénu o různých tloušťkách, které byly změřené v místě T2	42

Obr. 4.15 Srovnání vzorků polystyrénu o různých tloušťkách, které byly změřené v místě T3	43
Obr. 4.16 Poloha keramického vzorku na plotýnce.....	43
Obr. 4.17 Srovnání vzorků TC Ceramic HB o různých tloušťkách.....	45
Obr. 4.18 Poloha vzorku skelné vlny s příčným charakterem vláken.	45
Obr. 4.19 Poloha vzorku skelné vlny s podélným charakterem vláken.....	46
Obr. 4.20 Srovnání skelné vlny o různých tloušťkách s příčným a podélným charakterem vláken	48
Obr. 4.21 Srovnání všech tří materiálů o tloušťce 0,60 cm (TC Ceramic HB, polystyren: v místě T2, skelná vlna: podélný charakter vláken)	49

Seznam tabulek

Tab. 3.1 Rozdělení tepelně izolačních materiálů. [4]	31
Tab. 3.2 Stručný přehled vybraných firem a příklady jejich materiálů používaných k izolaci vnější stěny [7, 8, 9, 10]	32
Tab. 4.1 Změřené hodnoty teplotní závislosti polystyrénových vzorků pro různé tloušťky.	41
Tab. 4.2 Změřené hodnoty teplotní závislosti keramických vzorků pro různé tloušťky.	44
Tab. 4.3 Změřené hodnoty teplotní závislosti vzorků skelné vaty pro různé tloušťky a rozdílný charakter vláken.....	47

Seznam symbolů, veličin a zkratek

α_λ	spektrální pohltivost pro danou vlnovou délku	[-]
α	pohltivost v úhrnném spektru vlnových délek	[-]
Φ_a	pohlčený zářivý tok	[W]
Φ_d	dopadající zářivý tok	[W]
τ_λ	spektrální propustnost pro danou vlnovou délku	[-]
τ	propustnost v úhrnném spektru vlnových délek	[-]
Φ_t	prostupující zářivý tok	[W]
ρ_λ	spektrální odraznost pro danou vlnovou délku	[-]
ρ	odraznost v úhrnném spektru vlnových délek	[-]
Φ_r	odražený zářivý tok	[W]
M_0	intenzita vyzařování černého tělesa	[W/m ²]
$M_{0\lambda}$	spektrální hustota intenzity vyzařování černého tělesa	[W/m ³]
ε	emisivita (je funkcí vlnové délky a teploty)	[-]
L_0	zář černého tělesa	[W/sr ¹ ·m ²]
$L_{0\lambda}$	spektrální hustota záře černého tělesa	[W/sr ¹ ·m ³]
K_x	tepelná kapacita	[J/K]
Q	přivedené teplo	[J]
c	měrná tepelná kapacita	[J/(kg·K)]
E	energie (množství přivedeného tepla)	[J]
T	termodynamická teplota	[K]
θ	Celsiova teplota	[°C]
A	plocha povrchů	[m ²]
m	hmotnost látky	[kg]
λ	součinitel tepelné vodivosti	[W/(m·K)]
a	součinitel teplotní vodivosti	[m ² /s]
$\text{grad}\theta$	gradient teploty	[K/m]
\vec{q}	vektor hustoty ustáleného tepelného toku sdíleného vedením	[W/m ²]
L	plošná tepelná prostupnost	[W/(m ² ·K)]
q	hustota tepelného toku	[W/m ²]
d	tloušťka vrstvy	[m]
Φ	tepelný tok	[W]
t	čas	[s]
ρ	objemová hmotnost ve stavu definované vlhkosti	[kg/m ³]
U	součinitel prostupu tepla	[W/(m ² ·K)]
R_T	odpor konstrukce při prostupu tepla	[(m ² ·K)/W]
$\Delta\theta_{si}$	rozdíl průměrných teplot vrstvy materiálu	[K]

$\Delta\theta$	přírůstek teploty	[K]
θ_1	teplota prostředí 1	[K]
θ_2	teplota prostředí 2	[K]
$T_1 - T_2$	termodynamický teplotní rozdíl povrchových teplot vzorku	[K]
d	vnitřní průměr válcové izolace	[m]
D	vnější průměr válcové izolace	[m]

1 ÚVOD

Rostoucí ceny energií a program Zelená úsporám výrazně zvedl zájem lidí o zateplení domů. Jedna ze základních otázek ale je, jaký izolační materiál použít. Na trhu existuje celá řada firem nabízejících různé druhy izolačních materiálů pro různé druhy použití s rozdílnými vlastnostmi.

Všechny tepelně izolační materiály využívají velmi malé tepelné vodivosti vzduchu (nebo jiných plynů), při zabránění pohybu (konvenci). To se docílí uzavřením do malých komůrek, mezi tenká vlákna, nebo částice. Jedná se o poměrně lehké a porézní materiály. Tepelná izolace je lepší, čím je nižší teplota (radiální přenos tepla i tepelná vodivost plynů se s rostoucí teplotou zvětšuje). Tepelná vodivost záleží na struktuře, velikosti pórů, objemové hmotnosti a také na teplotě.

Volba správného izolačního materiálu je první krok k budoucím větším úsporám. Proto je potřeba u izolačních materiálů zvažovat nejen cenu, ale také izolační vlastnosti (tepelná vodivost, tepelný odpor).

V dnešní době existují normované postupy pro měření celé škály vlastností stavebních izolačních materiálů. Tyto metody jsou ale časově náročné, proto jsme se pokusili v této bakalářské práci zjistit, jestli je možné tyto normované postupy nahradit termokamerou, se kterou je měření podstatně rychlejší.

1.1 Cíl práce

Cílem této bakalářské práce je seznámení s bezdotykovými metodami pro měření tepelných vlastností materiálů. Získání základního přehledu v izolačních materiálech používaných ve stavebnictví. Změření vybraných tepelných vlastností u vybraných materiálů a jejich porovnání.

2 BEZDOTYKOVÉ MĚŘENÍ TEPLoty [1]

Rovněž označované jako infračervená pyrometrie je měření povrchové teploty těles na základě vysílaného elektromagnetického záření tělesem a přijímaného senzorem (detektorem) záření vlnové délky od 0,4 μm do 25 μm .

2.1 Rozsah záření přijímaného senzorem pokrývá

- oblast viditelného spektra (od 0,4 μm do 0,78 μm)
- oblast blízkého infračerveného spektra (od 0,78 μm do 1 μm)
- oblast krátkovlnného infračerveného spektra (od 2 μm do 3 μm)
- oblast středovlnného infračerveného spektra (od 3 μm do 5 μm)
- oblast dlouhovlnného infračerveného spektra (od 5 μm do 25 μm)

2.2 Výhody

- Zanedbatelný vliv měřicí techniky na měřený objekt.
- Možnost měření teploty na rotujících nebo pohybujících se objektech.
- Měření teploty z bezpečné vzdálenosti.
- Možnost měření velmi rychlých změn teploty.
- Možnost měřit a dále číslicově zpracovávat teploty celých povrchů těles.

2.3 Nevýhody

Různé nejistoty:

- Neznalost emisivity povrchu tělesa.
- Neznalost hodnoty propustnosti prostředí mezi čidlem a objektem.
- Nesprávná korekce parazitního odraženého záření z okolního prostředí na měřený objekt.

2.4 Základní pojmy

2.4.1 Pohltivost (absorbance)

α záření je dána vztahem:

$$\alpha_{\lambda} = \frac{\Phi_{\lambda a}}{\Phi_{\lambda d}} \quad (2.1)$$

$$\alpha = \frac{\Phi_a}{\Phi_d} = \frac{\int_0^{\infty} \Phi_{\lambda a} \cdot \alpha_{\lambda} \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{\lambda d} \cdot d\lambda} \quad (2.2)$$

kde

- α_λ je spektrální pohltivost pro danou vlnovou délku,
 α pohltivost v úhrnném spektru vlnových délek,
 Φ_a pohlcený zářivý tok,
 Φ_d dopadající zářivý tok.

2.4.2 Propustnost (transmittance)

τ záření je dána vztahem:

$$\tau_\lambda = \frac{\Phi_{\lambda t}}{\Phi_{\lambda d}} \quad (2.3)$$

$$\tau = \frac{\Phi_t}{\Phi_d} = \frac{\int_0^\infty \Phi_{\lambda t} \cdot \tau_\lambda \cdot d\lambda}{\int_0^\infty \Phi_{\lambda d} \cdot d\lambda} \quad (2.4)$$

kde

- τ_λ je spektrální propustnost pro danou vlnovou délku,
 τ propustnost v úhrnném spektru vlnových délek,
 Φ_t prostupující zářivý tok,
 Φ_d dopadající zářivý tok.

2.4.3 Odraznost (reflektance)

ρ záření je dána vztahem:

$$\rho_\lambda = \frac{\Phi_{\lambda r}}{\Phi_{\lambda d}} \quad (2.5)$$

$$\rho = \frac{\Phi_r}{\Phi_d} = \frac{\int_0^\infty \Phi_{\lambda r} \cdot \rho_\lambda \cdot d\lambda}{\int_0^\infty \Phi_{\lambda d} \cdot d\lambda} \quad (2.6)$$

kde

- ρ_λ je spektrální odraznost pro danou vlnovou délku,
 ρ odraznost v úhrnném spektru vlnových délek,
 Φ_r odražený zářivý tok,
 Φ_d dopadající zářivý tok.

2.4.4 Emisivita

Je poměr vyzařování tepelného zářiče k vyzařování černého tělesa při též teplotě.
Pro emisivitu platí vztah:

$$\varepsilon = \frac{M}{M_0} = \frac{\int_0^\infty \varepsilon(\lambda, T) \cdot M_{0\lambda} \cdot d\lambda}{\int_0^\infty M_{0\lambda} \cdot d\lambda} \quad (2.7)$$

kde

M_0 je intenzita vyzařování černého tělesa,
 $M_{0\lambda}$ spektrální hustota intenzity vyzařování černého tělesa,
 $\varepsilon(\lambda, T)$ emisivita (je funkcí vlnové délky a teploty).

Pro kosinový zářič pak platí:

$$\varepsilon = \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda, T) \cdot L_{0\lambda} \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} L_{0\lambda} \cdot d\lambda} \quad (2.8)$$

kde

L_0 je zář černého tělesa,
 $L_{0\lambda}$ spektrální hustota záře černého tělesa.

2.4.4.1 Spektrální emisivita

Je poměr spektrální hustoty intenzity vyzařování tepelného zářiče ke spektrální hustotě vyzařování černého tělesa při téže teplotě.

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{M_{\lambda}}{M_{0\lambda}} \quad (2.9)$$

2.4.4.2 Směrová (směrová spektrální) emisivita

Je poměr hustoty (spektrální hustoty) záře tepelného zářiče ve směrech φ (směrový úhel) a ν (stranový úhel) k hustotě (spektrální hustotě) záře černého tělesa při téže teplotě.

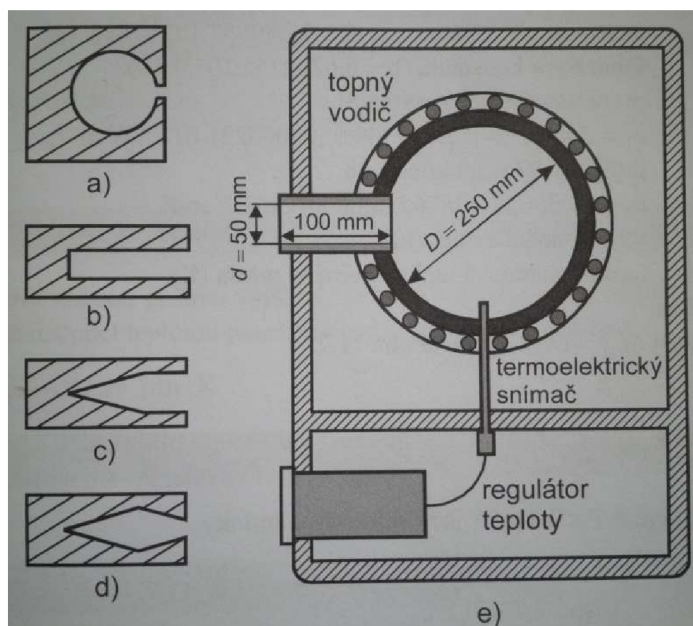
2.5 Černé těleso [2]

V roce 1860 definoval Kirchhoff absolutně černé těleso jako povrch, který záření neodráží ani nepropouští, ale pouze veškeré dopadající záření absorbuje, nezávisle na jeho směru a vlnové délce. Absolutně černé těleso nejenom pohlcuje veškeré dopadající záření, ale je také dokonale vyzařujícím tělesem. Emisivita absolutně černého tělesa $\varepsilon = 1$. Ačkoliv některé povrchy se svými vlastnostmi podobají absolutně černému tělesu, všechny reálné objekty a povrchy mají emisivitu menší než 1. Reálné objekty jsou buď šedá tělesa, jejichž emisivita nezávisí na vlnové délce záření a tělesa barevná, u nichž emisivita závisí na vlnové délce záření. Většina organických objektů jsou tělesa šedá, s emisivitou 0,90 - 0,95.

2.6 Černý zářič

Slouží pro kalibraci pyrometrů. Jeho emisivita $\varepsilon \approx 1$. Jeho rozsah emisivity je $1 > \varepsilon < 0,99$. Obvykle se realizuje tzv. dutinovým zářičem s reflexním, difuzním nebo

difúzně reflexním povrchem. Černý zářič je zdrojem záření pro kalibraci všech typů pyrometrů.



Obr. 2.1 Dutinový černý zářič: a) kulový, b) válcový, c) kuželový, d) inverzní kuželový, e) technická realizace černého zářiče pro rozsah teploty černého tělesa od 200 °C do 1200 °C. [1]

2.7 Pyrometry [2]

Původně byl termín pyrometr užíván k pojmenování přístrojů, které byly schopny měřit teplotu objektů, které vyzařovaly viditelné záření. Původní pyrometry byly bezdotykové optické přístroje.

Moderní a přesnější definice definuje pyrometry jako všechny bezkontaktní přístroje, které zachycují a měří termální radiaci emitovanou zkoumaným objektem, s cílem zjistit teplotu zkoumaného povrchu.

Pyrometry se dělí na:

- Úhrnné pyrometry (pyrometry na celkové záření)
- Monochromatické pyrometry
- Pásmové pyrometry
- Poměrové pyrometry
- Vícepásmové pyrometry
- Pyrometry s automatickou korekcí emisivity
- Pyrometry s optickými vlnovody v infračervené oblasti

2.8 Termovize

Termovize je základním měřícím zařízením pro infračervenou diagnostiku. Na základě znalosti rozložení teplotního pole diagnostikovaného objektu lze kontrolovat funkce zařízení, jejichž činnost je spojena s vývinem nebo absorpcí tepla.

Pro diagnostiku se používají termokamery, které zobrazí infračervené záření tělesa tak, aby bylo vidět (termogram). Termogram je termovizní snímek, na kterém je pomocí barevných palet zachyceno infračervené záření, které je pro lidské oko neviditelné. Barevnou paletu si uživatel může zvolit, proto je možné jeden snímek zobrazit ve větším počtu barevných provedení. Můžeme diagnostikovat defekty na povrchu materiálu, ale i defekty uvnitř materiálu.

Pro diagnostiku defektů uvnitř materiálu existují dvě metody:

- **Pulzní termografie**

Je založená na ozáření diagnostikovaného objektu z externího zářiče tepelnými stimulačními pulzy a následném snímání teploty povrchu objektu termovizní kamerou.

- **Lock-in termografie**

Je založena na modulaci tepelného toku.

Termovizní kamery se v současné době využívají například pro:

- Měření rozložení povrchové teploty
- Hledání úniků tepla z budov
- Detekci pohybu ve střežených objektech
- Detekce poškození vyzdívek pecí
- Sledování teplot elektrických součástí a jiné.

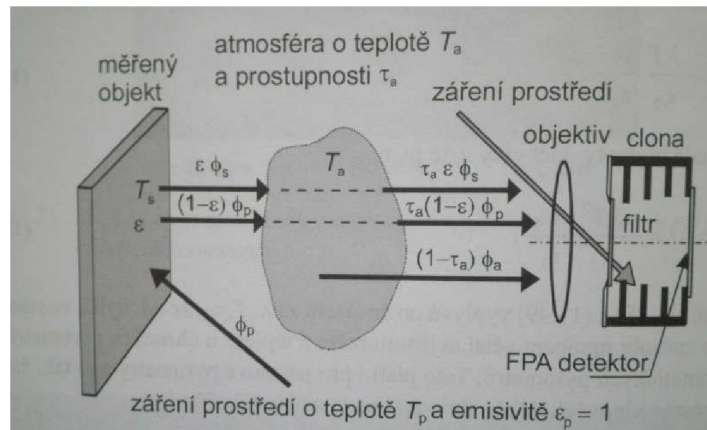
2.9 Nejistoty a chyby metod bezdotykového měření teploty

2.9.1 Nejistoty měření teploty způsobené zdrojem nejistoty ve stanovení emisivity

Emisivita je funkcí teploty, vlnové délky a řady vlastností povrchu měřeného objektu (pouze šedé těleso má konstantní emisivitu pro všechny vlnové délky). U tuhých těles jsou závislosti emisivity na teplotě spojité, zatímco u plynů mají závislosti diskrétní charakter. Stanovit emisivitu můžeme pomocí vhodných tabulek, pomocí spektrometru, pomocí dotykových snímačů, pomocí speciálních laků se známou emisivitou.

2.9.2 Chyba metody způsobená nerespektováním prostupnosti atmosféry a zářivého toku okolního prostředí

Termovize stejně jako pyrometry je kalibrována na černém zářiči a teprve při znalosti emisivity objektu, propustnosti atmosféry a teploty okolního prostředí lze chyby metody korigovat.



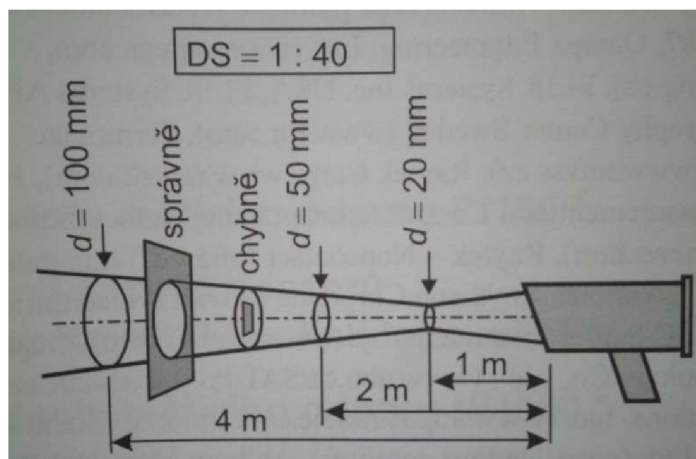
Obr. 2.2 Vliv prostupnosti atmosféry a záření okolního prostředí. [1]

2.9.3 Chyba metody způsobená zanedbáním vzájemného zářivého toku

U detektorů záření vzniká tato chyba mezi měřeným objektem a detektorem. Zářivý tok z objektu dopadá na detektor, kde se při nulové propustnosti detektoru částečně pohltí a částečně odrazí. Současně ale vychází opačným směrem zářivý tok z detektoru, který dopadá na měřený objekt a opět se částečně pohltí a částečně odrazí. Uvedené odrazy se opakují. Detektor tedy snímá nejen zářivý tok měřeného objektu, ale i vlastní odražený zářivý tok.

2.9.4 Chyba metody způsobená nedodržením velikosti měřené plochy dle technických podmínek výrobce

Každý pyrometr nebo termovizní kamera má od výrobce grafické zobrazení závislosti minimální plochy (obvykle kruhové) na měřeném objektu na vzdálenosti od objektivu zorného úhlu. Nikdy se nesmí měřit plocha povrchu objektu, která nesplňuje graf výrobce.



Obr. 2.3 Minimální průměr kruhu na měřeném objektu v závislosti na vzdálenosti. [1]

3 STAVEBNÍ TEPELNÁ TECHNIKA [3]

3.1 Základní pojmy

3.1.1 Teplo

Označuje se Q , je zvláštní forma fyzikální práce, konané při interakcích mezi látkovými částicemi o různých kinetických energiích. Teplo je energie vyměněná mezi systémem a okolím, jako důsledek teplotního rozdílu mezi nimi. Přijímaným nebo vydávaným teplem se zvětšuje nebo zmenšuje jednak kinetická energie neuspořádaného pohybu částic, jednak potenciální energie jejich vzájemných poloh, zvláště při změnách skupenství. Soustavou přijaté nebo vydané teplo působí přírůstek nebo úbytek její vnitřní energie.

3.1.2 Tepelná kapacita

Vyjadřuje schopnost tělesa nebo soustavy přijímat teplo. Je definována podílem přivedeného tepla a současné změny teploty:

$$K_x = \frac{dQ}{dT} \quad (3.1)$$

kde

K_x je tepelná kapacita,
 Q přivedené teplo,
 T teplota.

3.1.3 Měrná tepelná kapacita

Je mírou tepelné jímavosti látky vztažená na jednotku její hmotnosti. Rovná se množství energie, kterou je třeba dodat (při stálém tlaku) vzorku materiálu o definované hmotnosti a hmotnosti 1 kg, aby se ohřál o 1 K. Je definována vztahem:

$$c = \frac{E}{m \cdot \Delta\theta} \quad (3.2)$$

kde

c	je měrná tepelná kapacita,
E	energie (množství přivedeného tepla),
m	hmotnost látky,
$\Delta\theta$	přírůstek teploty.

3.1.4 Tepelný tok

Je množství tepla, které proudí do nebo ze systému (prostoru) za jednotku času, zahrnuje všechny složky šíření tepla, znamená výkon přenášený při přenosu tepla vedením (kondukcí), prouděním (konvekcí) nebo sáláním (radiací). Je definován podílem přenášeného tepla a příslušného času:

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad (3.3)$$

kde

Φ	je tepelný tok,
Q	přenášené teplo,
t	čas.

3.1.5 Hustota tepelného toku

Vyjadřuje tepelný tok připadající na metr čtvereční plochy průtoku tepla. Je definována podílem tepelného toku a plochy, jíž tento tok kolmo prochází:

$$q = \frac{d\Phi}{dA} \quad (3.4)$$

kde

q	je hustota tepelného toku,
Φ	tepelný tok,
A	plocha.

3.1.6 Součinitel tepelné vodivosti

Vyjadřuje schopnost stejnorodého, izotropního materiálu vést (při dané střední teplotě) teplo, je mírou schopnosti látky přenášet teplo vedením bez proudění látky. Je definován podílem hustoty ustáleného tepelného toku q a gradientu teploty v látce:

$$\lambda = \frac{\vec{q}}{-\text{grad}\theta} \quad (3.5)$$

kde

- λ je součinitel tepelné vodivosti,
- $\text{grad}\theta$ gradient teploty,
- \vec{q} vektor hustoty ustáleného tepelného toku sdíleného vedením.

3.1.7 Plošná tepelná propustnost materiálu

Vyjadřuje schopnost vrstvy materiálu, popř. nestejnorodé vrstvy materiálu, popř. stavební konstrukce dané tloušťky a plochy šířit teplo, kvantifikuje vliv všech složek šíření tepla. Je definována podílem hustoty tepelného toku q a rozdílu teplot mezi protilehlými povrchy stěny:

$$L = \frac{q}{\Delta\theta_{si}} \quad (3.6)$$

U rovinné stěny nebo vrstvy o tloušťce d souvisí L se součinitelem tepelné vodivosti podle vztahu:

$$L = \frac{\lambda}{d} \quad (3.7)$$

kde

- L je plošná tepelná prostupnost,
- q hustota tepelného toku.
- $\Delta\theta_{si}$ rozdíl průměrných teplot vrstvy materiálu,
- λ součinitel tepelné vodivosti,
- d tloušťka vrstvy.

3.1.8 Součinitel teplotní vodivosti

Vyjadřuje rychlost vyrovnání teplot v tělese. Je definován podílem součinitele tepelné vodivosti λ a součinu měrné tepelné kapacity c a objemové hmotnosti ρ látky podle vztahu:

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \quad (3.8)$$

kde

- λ je součinitel tepelné vodivosti,
- c měrná tepelná kapacita,
- ρ vektor objemová hmotnost ve stavu definované vlhkosti.

3.1.9 Součinitel prostupu tepla

Vyjadřuje schopnost soustavy, tvořené dvěma plynnými nebo kapalnými prostředími a jedním čtverečním metrem stěny mezi nimi, přenášet teplo. Je definován podílem hustoty tepelného toku a rozdílem teplot prostředí obklopujících stěnu:

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{\Phi}{(\theta_1 - \theta_2) \cdot A} \quad (3.9)$$

kde

U	je součinitel prostupu tepla
R_T	odpor konstrukce při prostupu tepla
Φ	tepelný tok,
θ_1	teplota prostředí 1,
θ_2	teplota prostředí 2,
A	plocha.

3.1.10 Termodynamická teplota

Je základní veličina vyjadřující tepelný stav látky podle střední kinetické energie neuspořádaného pohybu molekul. Základní jednotkou je kelvin, určený jako $1/273,16$ rozdílu mezi termodynamickou nulovou teplotou a teplotou trojného bodu vody $T_{tr} = 273,16$ K, tj. teplotou rovnovážného stavu tří skupenství vody.

3.1.11 Celsiova teplota

Vyjadřuje tepelný stav látky rozdílem její termodynamické teploty a normální teploty T_n . Normální teplota, původně určená teplotou rovnovážného stavu vody a ledu za normálního tlaku, je mezinárodně stanovena hodnotou:

$$T_n = T_{tr} - 0,01 \text{ K} = 273,15 \text{ K} \quad (3.10)$$

a představuje Celsiovu nulovou teplotu $\theta_n = 0$ °C.

Vztah mezi termodynamickou stupnicí a stupnicí Celsiovou se vyjádří rovnicí:

$$T = \theta + 273,16 \quad (3.11)$$

kde

T	je termodynamická teplota,
θ	Celsiova teplota.

3.2 Šíření tepla

Základní podmínkou pro šíření tepla prostředím jsou rozdílné teploty na různých místech téhož prostředí. Teplo potom postupuje z míst s vyšší teplotou do míst s teplotou nižší, dochází k vyrovnání teplot.

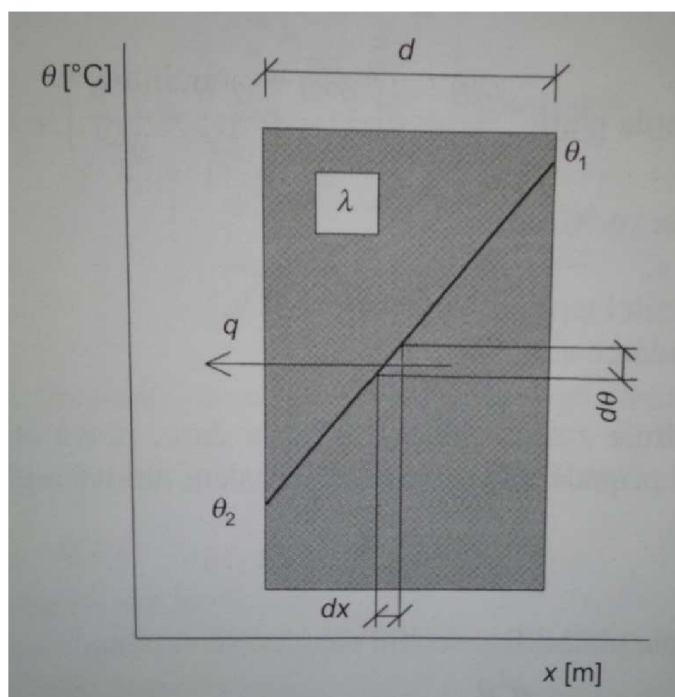
Teplo se šíří třemi způsoby:

- Vedením (kondukcí),
- Prouděním (konvekcí),
- Sáláním (radiací).

Šíření tepla se obvykle nerealizuje pouze jediným ze způsobů, ale reálná výměna tepla je převážně jejich kombinací.

3.2.1 Šíření tepla vedením

Přenos tepla vedením v pevných látkách (za určitých podmínek i v kapalinách a plynech) je transportem tepelné energie ve směru klesající teploty. Je tomu tak proto, že teplejší, rychleji kmitající molekuly, předávají svou kinetickou energii sousedním, pomaleji kmitajícím molekulám. Přenos tepla vedením se uskutečňuje mezi bezprostředně sousedícími částicemi. Obecně je teplota bodu tělesa nejen funkcí prostorových souřadnic x , y , z , ale i času t .



Obr. 3.1 Sdílení tepla vedením. [3]

3.2.1.1 Ustálený teplotní stav

Pokud se nemění teplota s časem, hovoříme o teplotním poli ustáleném – stacionárním. Ustálený teplotní stav je zjednodušující předpoklad používaný v tepelně technických výpočtech, avšak nevystihuje zcela skutečnou situaci. Vychází z předpokladu, že stavu když stavební konstrukce odděluje dvě prostředí s konstantními teplotami, které se v čase nemění, potom se bude tepelný tok šířit od vyšší teploty

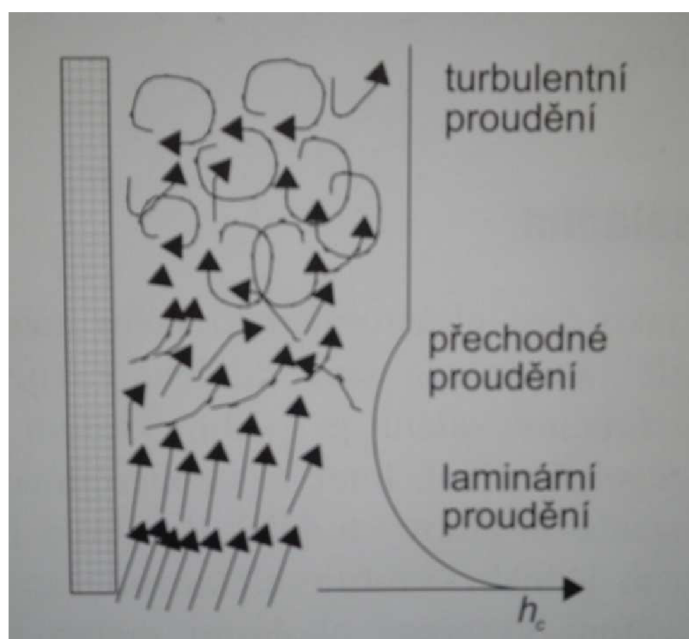
k nižší. Při jednorozměrném teplotním poli, kde jsou teploty v jednotlivých bodech konstrukce dané pouze jejich polohou, platí: hustota tepelného toku je přímo úměrná rozdílu teplot vzduchu a na tepelně technických vlastnostech konstrukce.

3.2.1.2 Neustálený teplotní stav

Jestliže je teplota funkcí času, potom je teplotní pole neustálené, což charakterizuje neustálený – nestacionární teplotní stav přenosu tepla, při kterém jsou teploty v jednotlivých bodech konstrukce dané svou polohou a mění se v závislosti na čase. Když doprostřed prostoru umístíme nějaké těleso s vyšší teplotou, nastává k vzájemnému vyrovnání teplot. Postupně se zahřívají povrchové vrstvy ostatních těles, a pak i jejich vnitřní vrstvy. Po určitém čase se teploty tělesa vyrovnají teplotou prostředí a nastane tepelná rovnováha.

3.2.2 Šíření tepla prouděním

Prouděním se šíří teplo jen v kapalných a plynných látkách, a to tak, že se částice látek pohybují a přenášejí přitom teplo. Místní (lokální) ohřátí a ochlazení plynu nebo kapaliny vyvolává přemísťování částic, čímž se přirozeným, volným prouděním vyrovnává teplota látek. Dochází tak k přirozenému proudění teplotné látky, jejíž rychlost je ohraničena, a proto i intenzita výměny tepla prouděním za předpokladu jejího přirozeného toku je poměrně malá. Pro zvýšení intenzity výměny tepla je potřebné použít nuceného proudění, které vytvoříme pomocí různých technických zařízení – čerpadel a ventilátorů.



Obr. 3.2 Proudění vzduchu okolo povrchu tělesa při ohřívání vzduchu. [3]

3.2.3 Šíření tepla sáláním

Sálání je nutno chápat jako část elektromagnetického záření, které umožňuje přenos tepla mezi tělesy nezávisle na tom, zda jsou oddělena vakuem nebo látkovým, pro záření prostupným prostředím. Tepelné sálání je podintervalem elektromagnetického záření a označuje se také jako tepelné záření. Interval, ve kterém se považuje elektromagnetické záření za tepelné sálání, spadá do vlnových délek 0,1 μm a 100 μm . Každý materiál nebo konstrukce svým povrchem jednak vyzařuje elektromagnetické záření včetně tepelného sálání a současně toto záření vyzářené okolními materiály nebo konstrukcemi svým povrchem pohlcuje a mění v teplo. Tepelné sálání je především spojeno především se střední termodynamickou teplotou sálajícího tělesa – zdroje sálání, sálavými vlastnostmi povrchu zdroje (odrazivost, pohltivost, propustnost, emisivita) i vlastnostmi povrchů, na něž sálání dopadá.

Přenos tepla sáláním se uskutečňuje převážně zářením infračerveným (tepelným), zčásti světlem a zářením ultrafialovým.

Toto záření patří mezi technicky nejdůležitější oblasti elektromagnetického spektra v intervalech délek:

- 100 až 380 nm záření ultrafialové,
- 780 až 4000 nm záření infračervené (tepelné),
- 380 až 780 nm záření světelné (světlo).

3.3 Tepelně technické vlastnosti materiálů

Při tepelně technických výpočtech v úrovni návrhu se jako vstupní atribut vychází z fyzikálních vlastností materiálů.

Jedná se o:

- objemovou hmotnost,
- vlhkost,
- tepelnou vodivost,
- měrnou tepelnou kapacitu.

Při používání hodnot jejich vlastností je třeba znát podmínky, za kterých byly zjištěny, ale i podmínky, ve kterých bude materiál exploatovaný. Z experimentálních měření víme, že tepelně technické vlastnosti stavebních materiálů nejsou konstantní veličiny, ale závisí na mnoha parametrech. Pokud je používáme jako konstantní veličiny, celý proces zjednodušíme s předpokladem, že výstupy platí v určitém intervalu aplikace. Hodnoty tepelně technických vlastností stavebních materiálů se zjišťuje jednak měřením v laboratořích a jednak na zabudovaných konstrukcích. Následně se staticky vyhodnocují.

3.4 Měření tepelně technických vlastností stavebních materiálů

Nejvýznamnější tepelně technickou vlastností stavebních materiálů, z pohledu tepelné techniky, se jeví jejich tepelná vodivost. Měřicí metody pro zjišťování tepelné vodivosti stavebních materiálů se dělí na stacionární a dynamické. Podstata stacionárních metod je v měření hustoty tepelného toku procházejícího vzorkem a povrchových teplot vzorku v ustáleném tepelném stavu. Z naměřených hodnot, ze známé měřené plochy a tloušťky vzorku pak vypočítáme součinitel tepelné vodivosti. Při použití dynamické metody se zpravidla na měřený materiál působí časově proměnlivým tepelným polem a odečítání potřebných parametrů se vykonává průběžně. Stacionární metody jsou časově náročnější než dynamické, ale dosahují větší přesnosti. Dynamická metoda je jediné možné řešení pro měření žáruvzdorných materiálů při vyšších teplotách.

Stacionární metody měření tepelné vodivosti dělíme na:

- Metodu chráněné tepelné desky nebo chráněných konců roury, nebo i metodu primární,
- Metodu měření hustoty tepelného toku (pro desku nebo rouru) nebo i metodu sekundární

Podle obou metod může být zkonstruováno zařízení jedno nebo dvouvzorkové, to znamená uspořádání asymetrické nebo symetrické.

Při měření v podmínkách, kdy střední teplota vzorku, vypočtená jako průměr z rozdílných teplot na jejich plochách, je vzdálená od teploty okolí (laboratoře), je nutné použít ještě pasivní tepelnou izolaci kolem desek a vzorku nebo uzavření desek a vzorku do prostoru, popřípadě ohrazení stěnami, jejichž teplota je udržována na střední hodnotě.

3.4.1 Stacionární metody

3.4.1.1 Metoda chráněné tepelné desky

Metoda chráněné tepelné desky je uvedena v české normě:

- ČSN 72 7012-1
- ČSN 72 7012-2

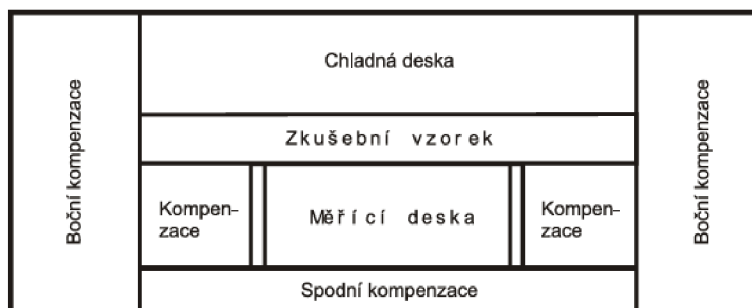
Uspořádání měřicí části přístroje je schematicky znázorněno na Obr. 3.3. Přístroj je zhotoven tak, aby se na každém z povrchů deskového vzorku udržela rovnoměrná teplota, na každém povrchu jiná (rozdíl teplot je obvykle 20 K nebo 10 K), aby také bylo možno změřit množství tepla, které projde jednotkou plochy vzorku se

zanedbatelnými ztrátami do okolí. K tomu slouží kompenzační části, které obklopují část měřicí po bocích ze spodu, která jsou udržována na stejné teplotě jako část měřicí. Součinitel tepelné vodivosti se vypočítá ze střední hodnoty naměřených veličin.

$$\lambda = \frac{Q \cdot d}{A \cdot (T_1 - T_2)} \quad (3.12)$$

kde

- λ je součinitel tepelné vodivosti,
- Q zpravidla se rovná elektrickému výkonu topné spirály v měřicí části,
- d tloušťka vzorku,
- A plocha povrchů,
- $T_1 - T_2$ termodynamický teplotní rozdíl povrchových teplot vzorku.



Obr. 3.3 Konstrukční uspořádání měřícího zařízení podle ČSN 72 7012-2. [4]

3.4.1.2 Metoda měření tepelného toku

Metoda měření tepelného toku je uvedena v české normě:

- ČSN 72 7012-1
- ČSN 72 7012-3

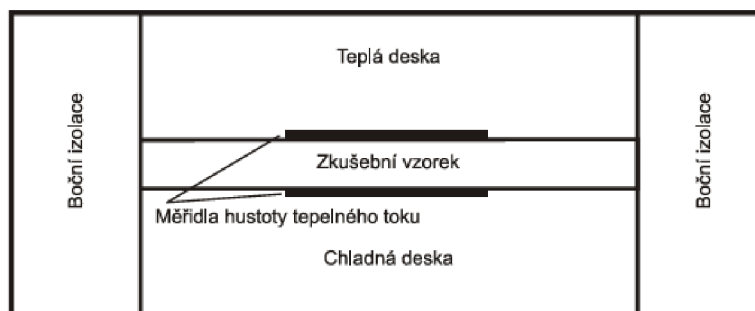
Uspořádání měřicí části přístroje je schematicky znázorněno na Obr. 3.4. Je založena na použití jednoho nebo dvou měřidel hustoty tepelného toku vzorku, umístěných na jedné nebo obou plochách vzorku. Uspořádání může nabýt i mnohem složitější symetrické konfigurace s použitím dvou vzorků a čtyř měřidel tepelného toku.

Tepelná vodivost pro nejjednodušší uspořádání (jeden vzorek a jedno měřidlo tepelného toku), se vypočítá podle vzorce:

$$\lambda = \frac{q \cdot d}{(T_1 - T_2)} \quad (3.13)$$

kde

- λ je součinitel tepelné vodivosti,
 q hustota tepelného toku vzorku,
 d tloušťka vzorků,
 $T_1 - T_2$ termodynamický teplotní rozdíl povrchových teplot vzorku.



Obr. 3.4 Konstrukční uspořádání měřícího zařízení podle ČSN 72 7012-3. [4]

3.4.1.3 Metoda měření tepelné izolace na kruhovém potrubí

Metoda měření tepelné izolace na kruhovém potrubí je uvedena v české normě:

- ČSN 72 7011

Na trubku s vyhřívaným tělesem uvnitř se upraví měřená válcová izolace s vnitřním průměrem d a vnějším D . Z tepelného výkonu q a rozdílu povrchových teplot se vypočítá tepelná vodivost:

$$\lambda = \frac{q \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right)}{[2\pi \cdot (T_1 - T_2)]} \quad (3.14)$$

kde

- λ je součinitel tepelné vodivosti,
 q hustota tepelného toku vzorku,
 d vnitřní průměr válcové izolace,
 D vnější průměr válcové izolace,
 $T_1 - T_2$ termodynamický teplotní rozdíl povrchových teplot vzorku.

Deformace jednorozměrného tepelného toku na koncích trubky se eliminuje přidáním okrajových úseků se samostatně regulovaným topením. Vedení tepla mezi měřicí částí a okrajovými částmi trubky je sníženo keramickými kroužky nebo otvory v trubce. Po celé délce trubky jsou připevněny termoelektrické články. Topný výkon

všech částí se reguluje tak, aby byla jejich teplota vyrovnaná. Doba ustálení je přibližně od 5 do 17 hodin. Maximální teplota měření je omezena použitým materiálem konstrukce. Pro měření při nižších teplotách se vnitřek trubky ochlazuje chladícím médiem. Na trubkových zařízeních se měří materiály sypké, vláknité a tuhé izolační skruže. Běžná nejistota měření je 2 až 3 %.

3.4.2 Kontaktní dynamické metody na měření termo-fyzikálních parametrů

Rychlý rozvoj v oblasti nových materiálů zvyšuje potřebu zkoušet jejich termo-fyzikální vlastnosti při nestandardních podmínkách (např. na vzorku menších rozměrů, při měření v terénu, při vysokých teplotách), při kterých může být aplikace klasických stacionárních metod značně náročná. Kontaktní dynamické metody poskytují pro stanovení termo-fyzikálních parametrů materiálů alternativní řešení i při výše uvedených nestandardních podmínkách.

Nejrozšířenější dynamické metody jsou:

- metoda topného drátu,
- metoda topného pásu,
- metoda jehlové sondy,
- metoda plošné sondy.

Kontaktní dynamické metody se charakterizují jako jednoduché a rychlé měřicí metody, které reprodukují výsledky získané stacionárními metodami s přesností 5-10 % a v některých případech umožňují současně měření více termo-fyzikálních parametrů.

3.5 Tepelné izolační materiály [4]

Počátek používání stavebních tepelných izolací v konstrukcích má svůj původ hluboko v historii stavění. Vývoj těchto materiálů postupoval tím rychleji, čím se zvyšovala životní úroveň lidí a potřeba snižovat množství energie a vyčerpatelných přírodních zdrojů.

Rozdělení podle použití a způsobu aplikace:

- Vnější izolace obvodového pláště
- Izolace střešního pláště
- Vnitřní vodorovné a svislé konstrukce
- Vnitřní izolace obvodového pláště
- Speciální aplikace

V současné době lze tepelné izolační materiály na českém trhu rozdělit do skupin uvedených v následující tabulce.

Tab. 3.1 Rozdělení tepelně izolačních materiálů. [4]

Skupina materiálů	Materiál	ρ_v	λ
		[kg/m ³]	[W/(m.K)]
Pěnoplastické látky	pěnové polystyreny	30	0,035
	extrudované polystyreny	30	0,030
	pěnové polyuretany	35	0,027
	pěnové polyethyleny	25	0,026
	pěněné pryskyřice	40	0,040
	pěněné PVC	60	0,043
Vláknité materiály	skleněná vlákna	50	0,038
	minerální vlákna	75	0,037
	syntetická vlákna	160	0,065
	izolace na bázi ovčí vlny	30	0,039
Pěněné silikáty	pěnové sklo	120	0,044
Minerální materiály	expandovaný perlit	75	0,060
	expandovaný vermikulit	100	0,065
	strusková pemza	500	0,130
	keramzit	350	0,110
Materiály na bázi dřeva a přírodních vláken	piliny a mineralizované hobliny	140	0,060
	sláma a rákos	70	0,050
	korek a korkové desky	150	0,058
	dřevovláknité a dřevotřískové desky	400	0,092
Materiály na bázi celulóзовých vláken	drcený mineralizovaný papír	30	0,039
	desky z asfaltového papíru	60	0,065
Materiály nové generace	kalciumsilikáty	300	0,063
	Vakuová izolace	10	0,008

S vývojem nových moderních stavebních materiálů v dnešní době je snaha spojit dobré tepelně technické a mechanické vlastnosti, případně i další užité vlastnosti. Většina běžných stavebních materiálů, které vykazují poměrně vysoké mechanické pevnosti, má značně vysoký součinitel tepelné vodivosti.

Hodnota součinitele tepelné vodivosti závisí v podstatě na objemové hmotnosti stavebního materiálu, neboť samotná objemová hmotnost je funkcí pórovitosti stavebního materiálu. Se zvyšující se objemovou hmotností se zvětšuje i hodnota součinitele tepelné vodivosti. Všechny stavební látky jsou složeny ze základní látky a vzduchových pórů. Právě vzduch v těchto pórech má výrazně nižší součinitel tepelné vodivosti, který je závislý na velikosti a tvaru póru. Díky pórovitosti tedy reálný

stavební materiál vykazuje lepší tepelně izolační vlastnosti, než samotná základní látka, z níž se skládá.

3.6 Průzkum trhu

Při průzkumu trhu jsem se zaměřil na sortiment izolačních materiálů používaných pro vnější izolace obvodového pláště.

V Tab. 3.2 jsou uvedeny příklady firem vyrábějící tyto materiály. U těchto firem byl vybrán materiál s nejmenším součinitelem tepelné vodivosti λ . Šířka materiálu pro porovnání byla zvolena 60 mm. Uvedená cena materiálů je bez DPH.

Tab. 3.2 Stručný přehled vybraných firem a příklady jejich materiálů používaných k izolaci vnější stěny [7, 8, 9, 10]

Výrobce	Pěnový polystyrén EPS	Pěnový polystyrén XPS	Kamenná vlna	Sklenná vlna	Název	Tloušťka	Cena	λ
						[mm]	[Kč/m ²]	[W/m.K]
ISOVER	-				Grey wall	60	119,4	0,032
				-	TF Profi 6	60	246,0	0,036
ROCKWOOL			-		Frontrock MAX E	60	195,0	0,036
KNAUF		-			Polyfoam C - 350 TG	60	312,0	0,035
			-		Nobasil FKD S	60	288,0	0,036
				-	TP 138	60	162,0	0,032
BACHL	-				100 F fasádní	60	144,0	0,036

4 MĚŘENÍ

Pro měření byly vybrány tři druhy materiálů:

- Pěnový polystyren EPS (výrobce: ISOVER)
- TC Ceramic HB (výrobce: Capstone Mfg.)
- Skelná vlna (výrobce: ISOVER)

Tloušťka vzorků pěnového polystyrenu EPS a TC Ceramic HB byla zvolena 0,30 cm, 0,60 cm a 0,65 cm. Tloušťka skelné vlny byla 0,60 cm a 1,00 cm. Zdrojem tepla se zvolil, Thermo Scientific Cimarec. Jedná se o plotýnku poskytující celou řadu možností pro různé potřeby ohřevu vzorku, včetně snadného čitelného digitálního displeje. Plotýnka se umístila pro všechna měření do krabice, aby se potlačil nežádoucí vliv průvanu. Umístění plotýnky jde vidět na Obr. 4.1.



Obr. 4.1 Umístění plotýnky v ochranné krabici.

Základní informace o Thermo Scientific Cimarec:

- Typ: HP131220-33Q
- Rozsah provozních teplot: 5 °C až 540 °C (41°F až 1004 °F)
- Vyhřívaný povrch: sklokeramická deska o rozměrech 220 x 220 mm
- Napájení: 240 V, 50/60 Hz
- Výkon: 1060 W

Pro měření vlastností Thermo Scientific Cimarec byla použita termokamera od společnosti FLUKE Ti55. Na všechna ostatní měření byla použita termokamera od společnosti FLUKE Ti25.

Základní informace o kamerách Ti55, Ti25: [4] [5]

- Provozní teplota: -10 °C až 50 °C (14°F až 122 °F)
- Zorné pole: 23 ° x 17 ° (u Ti55 k dispozici přídavné objektivy)
- Přesnost: ± 2 °C nebo ± 2 % (podle toho, co je větší)
- Displej: barevný LCD
- Rozsahy měření teploty:

Ti25

-20 °C až 350 °C

Ti55

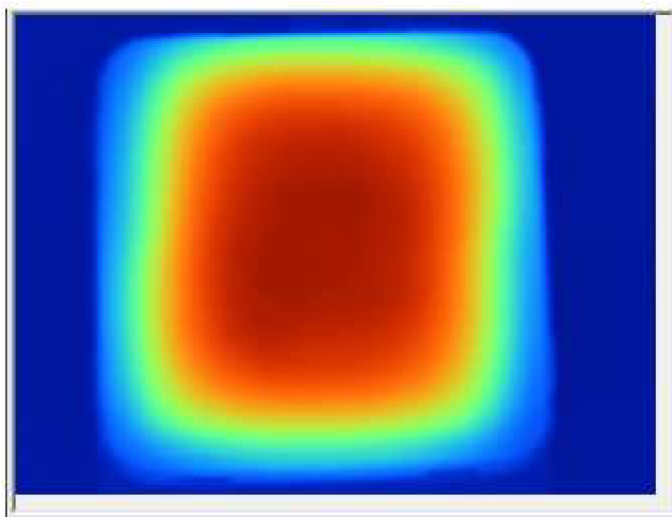
-20 °C až 100 °C

-20 °C až 350 °C

-250 °C až 600 °C

4.1 Změření rozložení teploty na plotýnce

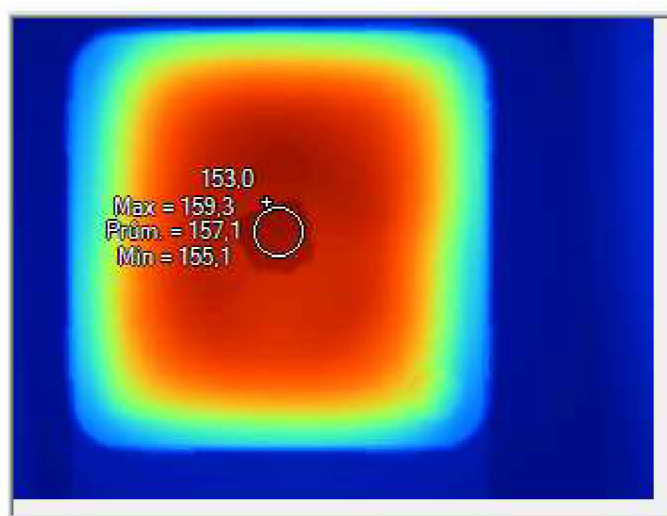
Pro správné umístění vzorků na plotýnce bylo pomocí termokamery FLUKE Ti55 změřeno a vyhodnoceno teplotní rozložení. Rozložení teploty bylo změřeno po ustálení plotýnky (20 minut) a jde vidět na Obr. 4.2.



Obr. 4.2 Teplotní rozložení plotýnky.

4.2 Ověření nastavené teploty a určení emisivity povrchu plotýnky

Po měření teplotního rozložení bylo potřeba zjistit, zda odpovídá hodnota nastavená na displeji teplotě skutečné (na povrchu). Z důvodu neznalosti emisivity povrchu byl nanesen na plotýnku sprej o emisivitě 0,96. Po zaschnutí spreje se na plotýnce nastavila teplota 160 °C. Po 20 minutách se změřila teplota. Zároveň s vyhodnocením teploty plotýnky se zjistila emisivita povrchu. Místo nanesení spreje a měření teploty jde vidět na Obr. 4.3. Emisivita povrchu se zjišťovala v bodě, který měl změřenou hodnotu 150 °C. Emisivita povrchu plotýnky vyšla 0,92.



Obr. 4.3 Místo nanesení černého spreje s emisivitou 0,96 a změřené teploty.

4.3 Zkouška ochranné vrstvy

Základní podmínkou pro stanovení správné teploty povrchu měřeného vzorku je znalost její emisivity. Kvůli neznalosti emisivity povrchů u měřených vzorků byl nanesen na kontrolní místa černý sprej o emisivitě 0,96 (ThermaSpray 800). Avšak tento sprej způsobí destrukci samotného polystyrénu. Pro zabránění ničení vzorku bylo potřeba vytvoření ochranné vrstvy. K tomuto účelu byly testovány dva přípravky:

- Styro RC (Rychle schnoucí barva pro nástřik pěnového polystyrénu a podobných materiálů.)
- lepidlo Herkules

Cílem bylo získání co nejmenší vrstvy, která zabráni destrukci polystyrenu. Ochranná vrstva se testovala nanesením spreje PRIMA.

Základní specifikace spreje PRIMA:

- Barva: černá matná
- Doba schnutí: 12 hodin
- Kód výrobku: RAL9005

Nejprve se testoval sprej Styro RC, který byl nanesen na vzorek polystyrénu horizontálně. Na druhý vzorek byl nanesen v horizontálním a vertikálním směru. Doba pro zaschnutí obou vzorků byla 1 hodina. Po uplynutí této doby se nanese na vzorky černý sprej PRIMA. Výsledek jde vidět na Obr. 4.4 a Obr. 4.5



Obr. 4.4 Polystyrénový vzorek po nanesení černého spreje PRIMA s ochrannou vrstvou v horizontálním směru (Styro RC).



Obr. 4.5 Polystyrénový vzorek po nanesení černého spreje PRIMA s ochrannou vrstvou v horizontálním a vertikálním směru (Styro RC).

Z Obr. 4.4 a Obr. 4.5 lze vidět, že vrstva nanosená pouze v horizontálním směru nepostačuje a vrstva nanosená v obou směrech zabraňuje ničení vzorku.

Při testování lepidla Herkules se na jeden vzorek polystyrénu nanese různý poměr lepidla a vody. Umístění jednotlivého procentního zastoupení lepidla v nanosené vrstvě jde vidět na Obr. 4.6. Doba pro zaschnutí tohoto vzorku byla 24 hodin. Poté byl na vzorky nanesen sprej PRIMA. Výsledek jde vidět na Obr. 4.7.

80 %	50 %	90 %
100 %	70 %	60 %

Obr. 4.6 Rozložení procentního zastoupení lepidla Herkules v ochranné vrstvě na vzorku polystyrénu.



Obr. 4.7 Polystyrénový vzorek s různým procentním zastoupením lepidla Herkules po nanesení černého spreje PRIMA.

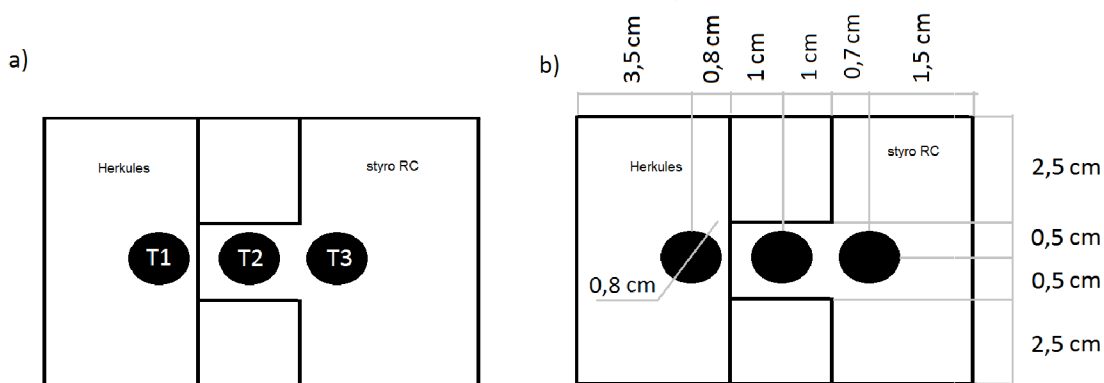
Z Obr. 4.7 jde vidět, že ředěním lepidla se zhoršují ochranné schopnosti. Nejlepší ochranná vrstva ze všech poměrů je tedy 100 % Herkules.

4.4 Rozložení ochranné vrstvy na vzorcích polystyrénu a volba místa nanesení ThermaSpray 800 na měřených vzorcích

Na polystyrénové vzorky se nanasla ochranná vrstva. Po jejím zaschnutí se na tři měřicí místa nastříkal ThermaSpray 800. Viz Obr. 4.8 a). První místo bylo na lepidle Herkules a dvě na spreji Styro RC. Přesné umístění jednotlivých měřicích míst jde vidět na Obr. 4.8 b). Rozměry polystyrenových vzorků jsou pro všechny zvolené tloušťky stejné.

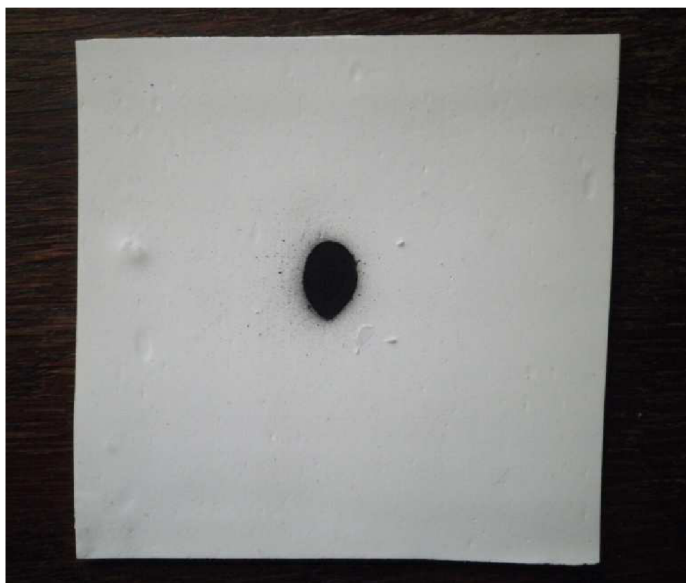
Základní specifikace ThermaSpray 800:

- Barva: černý
- Emisivita = 0,96
- Doba schnutí: 1 hodiny



Obr. 4.8 a) Měřicí místa na polystyrénovém vzorku, b) Rozměry polystyrénového vzorku. 12

Na keramické vzorky byl nanesen ThermaSpray 800 na jedno měřicí místo a to do středu vzorků. Umístění jde vidět na Obr. 4.9. Pro tloušťku vzorku 0,30 cm a 0,60 cm byly rozměry vzorku 10 x 10 cm. U tloušťky vzorku 0,65 byly rozměry 13 x 13 cm.



Obr. 4.9 Umístění ThermaSpray 800 na vzorku TC Ceramic HB.

Na povrch vzorků skelné vaty byl na jednu polovinu nanesen ThermaSpray 800, co jde vidět na Obr. 4.10. Rozměry vzorků pro tloušťku 0,60 byly 3 x 3 cm a pro tloušťku 1 cm rozměry 4 x 3 cm.



Obr. 4.10 Umístění spreje s emisivitou 0,96 na vzorcích skelné vlny.

4.5 Poloha Ti25

Termovizní kamera Ti25 byla umístěna nad plotýnku ve vzdálenosti 65 cm. Z důvodu zajištění stejné vzdálenosti u všech měření byl vytvořen uchycovací mechanismus. Poloha Ti25 a plotýnky jde vidět na Obr. 4.11.



Obr. 4.11 Umístění termokamery Ti25 a plotýnky.

4.6 Zjištění tepelné závislosti daných vzorků

Pro všechna měření platí:

- Plotýnka vložena do krabice.
- Na digitálním displeji nastavená teplota 60 °C.
- Doba ustálení 20 minut.

4.6.1 Polystyrénové vzorky:

Po ustálení teploty se na plotýnku umístil polystyrénový vzorek o tloušťce 0,30 cm. Umístění jde vidět na Obr. 4.12. Pomocí termokamery Ti25 se potom postupně měřila změna teploty na vzorku v závislosti na čase v místech T1, T2, T3. Toto měření se opakovalo pro vzorky polystyrénu o tloušťkách 0,60 cm a 0,65 cm, které byly

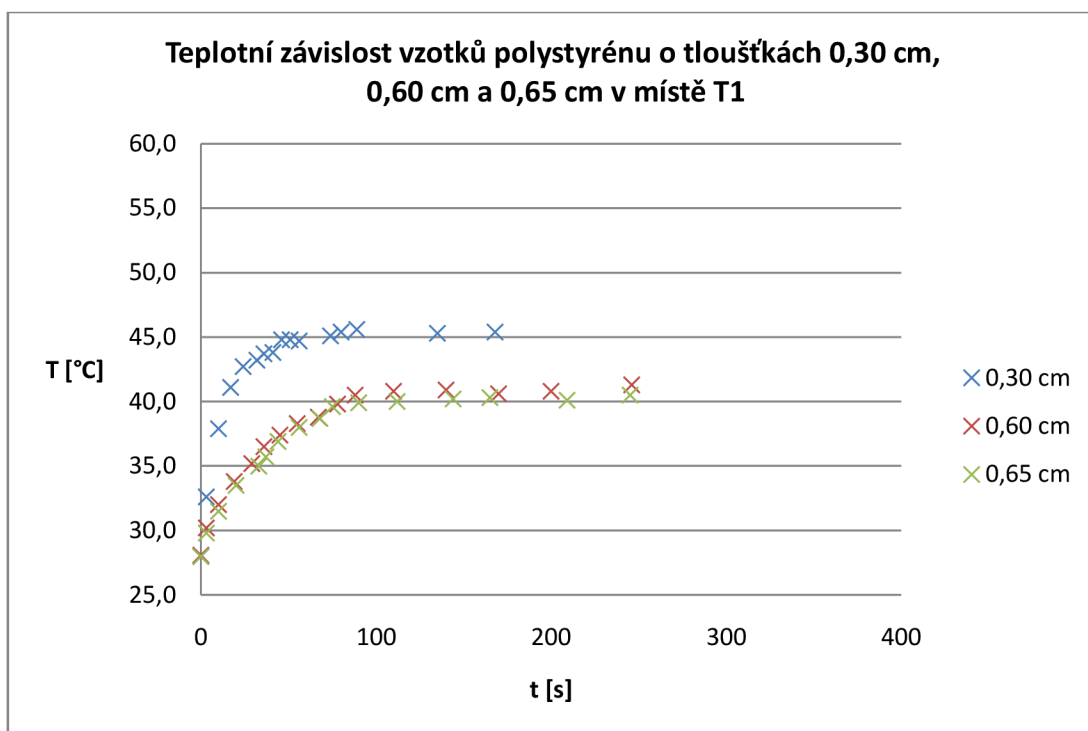
umístěny na stejném místě. Změřené hodnoty jsou v Tab. 4.1. Změřené tepelné závislosti jsou zachycené na Obr. 4.13, Obr. 4.14 a Obr. 4.15.



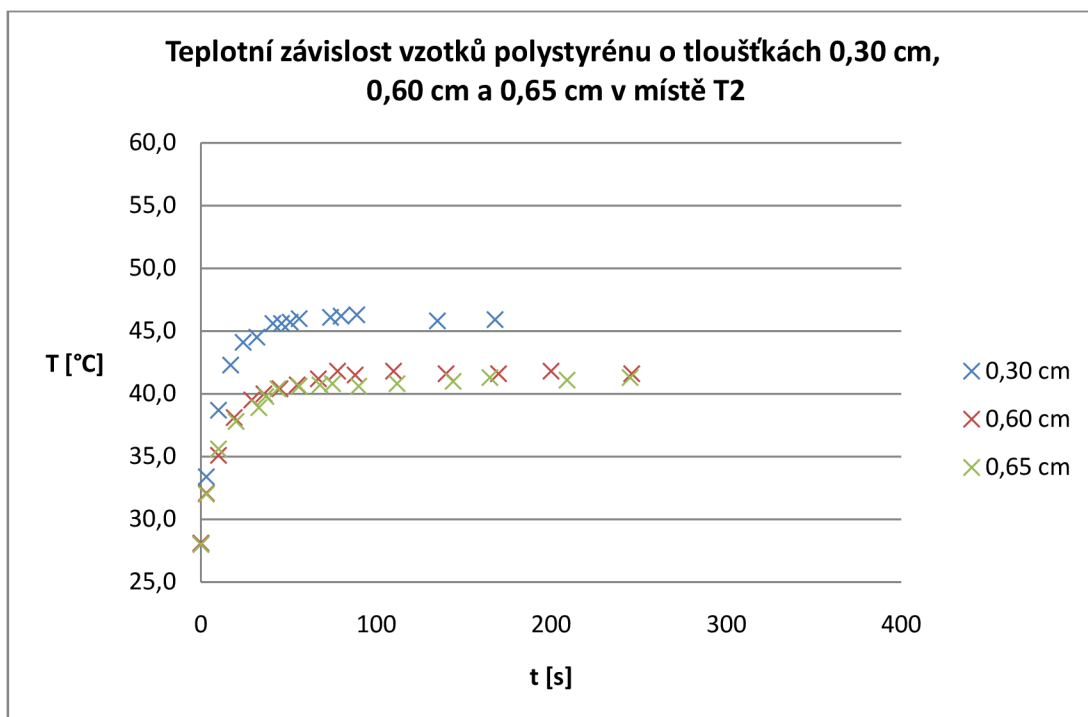
Obr. 4.12 Poloha polystyrénového vzorku na plotýnce.

Tab. 4.1 Změřené hodnoty teplotní závislosti polystyrénových vzorků pro různé tloušťky.

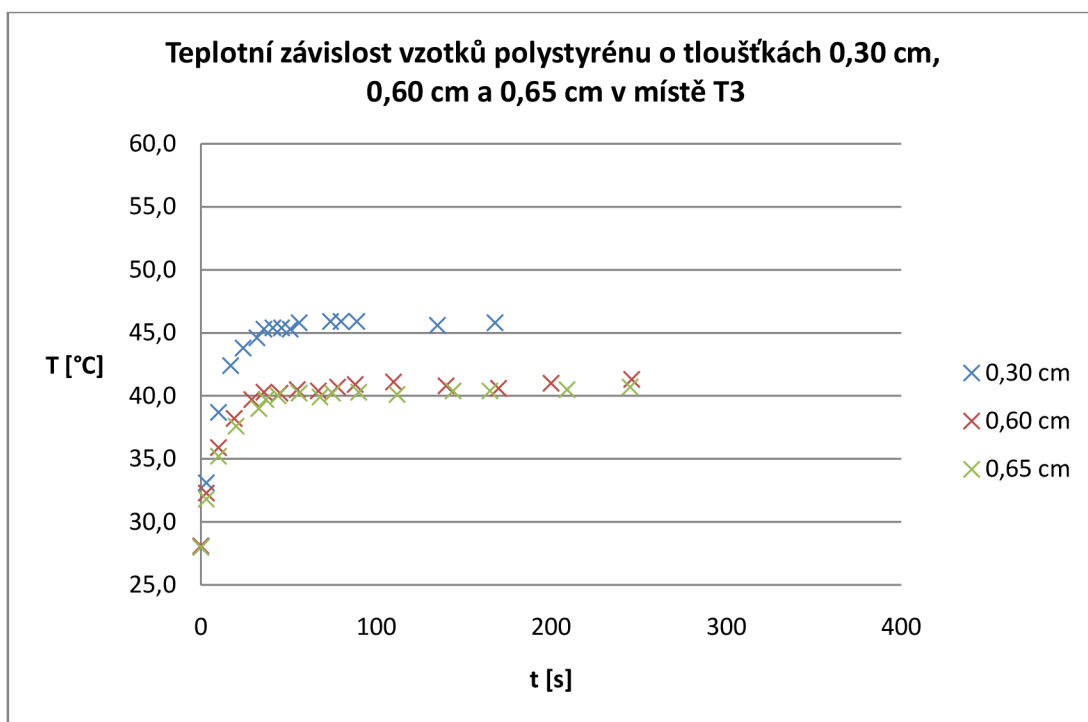
Tloušťka vzorku: 0,30 cm				Tloušťka vzorku: 0,60 cm				Tloušťka vzorku: 0,65 cm			
t	T1	T2	T3	t	T1	T2	T3	t	T1	T2	T3
[s]	[°C]	[°C]	[°C]	[s]	[°C]	[°C]	[°C]	[s]	[°C]	[°C]	[°C]
0	28,0	28,0	28,0	0	28,1	28,1	28,1	0	28,0	28,0	28,0
3	32,6	33,4	33,1	3	30,2	32,1	32,3	3	29,8	32,0	31,8
10	37,9	38,7	38,7	10	32,0	35,1	35,9	10	31,5	35,6	35,2
17	41,1	42,3	42,4	19	33,8	38,1	38,2	20	33,5	37,8	37,6
24	42,7	44,1	43,8	29	35,2	39,5	39,7	33	35,0	38,9	39,0
32	43,2	44,5	44,6	36	36,5	40,0	40,3	37	35,7	39,8	39,7
36	43,7	45,3	45,3	45	37,4	40,4	40,2	44	36,9	40,4	40,0
41	43,8	45,6	45,4	55	38,3	40,7	40,5	56	38,0	40,6	40,2
46	44,8	45,6	45,4	67	38,8	41,2	40,4	68	38,7	40,7	39,9
51	44,8	45,7	45,3	78	39,8	41,8	40,7	75	39,6	40,8	40,2
56	44,7	46,0	45,8	88	40,5	41,5	40,9	90	39,9	40,6	40,3
74	45,1	46,1	45,9	110	40,8	41,8	41,1	112	40,0	40,8	40,1
80	45,4	46,2	45,9	140	40,9	41,6	40,8	144	40,2	41,0	40,4
89	45,6	46,3	45,9	170	40,6	41,6	40,6	165	40,3	41,3	40,4
135	45,3	45,8	45,6	200	40,8	41,8	41,0	209	40,1	41,1	40,5
168	45,4	45,9	45,8	246	41,3	41,6	41,3	245	40,5	41,3	40,7



Obr. 4.13 Srovnání vzorků polystyrénu o různých tloušťkách, které byly změřené v místě T1



Obr. 4.14 Srovnání vzorků polystyrénu o různých tloušťkách, které byly změřené v místě T2



Obr. 4.15 Srovnání vzorků polystyrénu o různých tloušťkách, které byly změřené v místě T3

4.6.2 TC Ceramic HB:

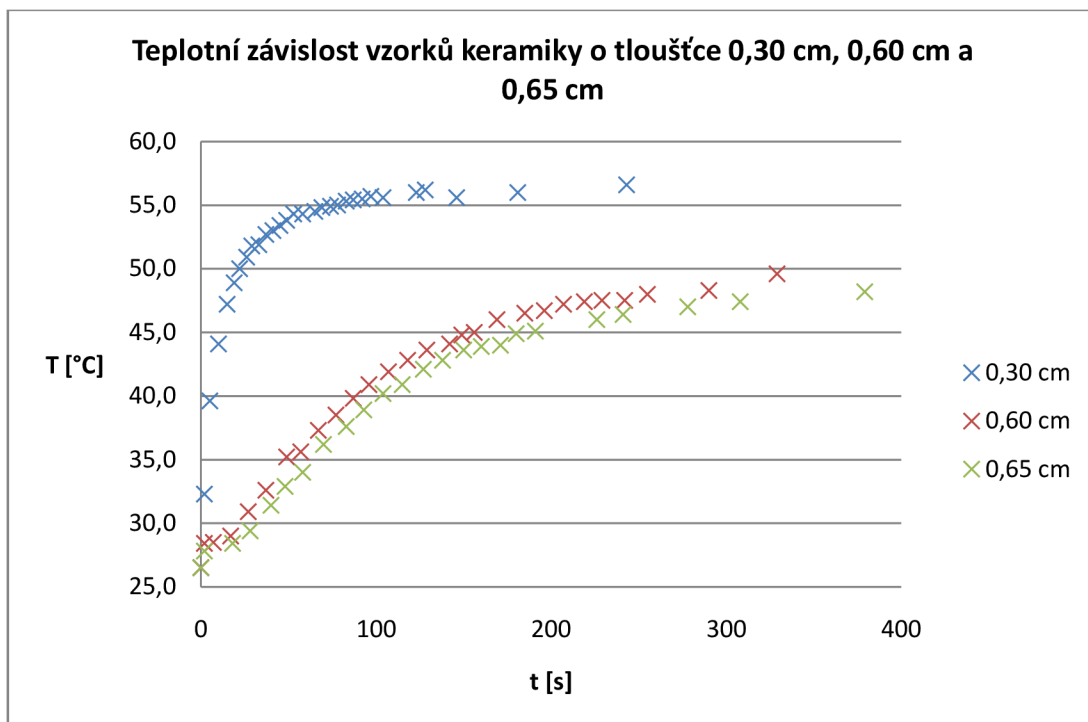
Po ustálení teploty se na plotýnku umístil vzorek o tloušťce 0,30 cm. Umístění jde vidět na Obr. 4.13. Pomocí termokamery Ti25 se měřila změna teploty na vzorku v místě, kde byl nanesen černý sprej, až do jejího ustálení. Toto měření se opakovalo pro vzorky o tloušťkách 0,60 cm a 0,65 cm, které byly umístěny na stejném místě. Změřené hodnoty jsou zaznamenány v Tab. 4.2 a vyhodnoceny na Obr. 4.17.



Obr. 4.16 Poloha keramického vzorku na plotýnce.

Tab. 4.2 Změřené hodnoty teplotní závislosti keramických vzorků pro různé tloušťky.

Tloušťka vzorku: 0,30 cm		Tloušťka vzorku: 0,60 cm		Tloušťka vzorku: 0,65 cm	
t	T	t	T	t	T
[s]	[°C]	[s]	[°C]	[s]	[°C]
0	26,5	0	26,5	0	26,5
2	32,3	2	28,4	2	27,8
5	39,6	7	28,5	18	28,4
10	44,1	17	29,0	28	29,4
15	47,2	27	30,9	40	31,4
19	48,9	37	32,6	48	32,9
22	50,0	49	35,2	58	34,0
26	50,9	57	35,6	70	36,2
29	51,8	67	37,3	83	37,6
33	51,9	77	38,5	93	38,9
37	52,7	87	39,8	104	40,2
41	53,0	96	40,9	115	40,9
45	53,4	107	41,9	127	42,1
49	53,8	118	42,8	138	42,8
53	54,3	129	43,6	150	43,6
58	54,3	142	44,1	160	43,9
65	54,5	149	44,8	171	44,0
69	54,8	156	45,0	180	44,9
74	54,9	169	46,0	191	45,1
78	55,0	185	46,5	226	46,0
83	55,3	196	46,7	241	46,4
87	55,4	207	47,2	278	47,0
92	55,5	219	47,4	308	47,4
97	55,7	229	47,5	379	48,2
104	55,6	242	47,5		
123	56,0	255	48,0		
128	56,2	290	48,3		
146	55,6	329	49,6		
181	56,0	387	48,9		
243	56,6				
283	56,8				



Obr. 4.17 Srovnání vzorků TC Ceramic HB o různých tloušťkách

4.6.3 Skelná vlna:

Po ustálení teploty se na plotýnku umístil vzorek skelné vlny s příčným charakterem vláken a tloušťce 0,30 cm. Umístění jde vidět na Obr. 4.18. Pomocí termokamery Ti25 se měřila změna teploty na vzorku v závislosti na čase, až do jejího ustálení. Toto měření se opakovalo pro vzorek skelné vlny s příčným charakterem vláken a tloušťce 1 cm. Změřené hodnoty jsou zaznamenány v Tab. 4.3 a vyhodnoceny na Obr. 4.20.



Obr. 4.18 Poloha vzorku skelné vlny s příčným charakterem vláken.

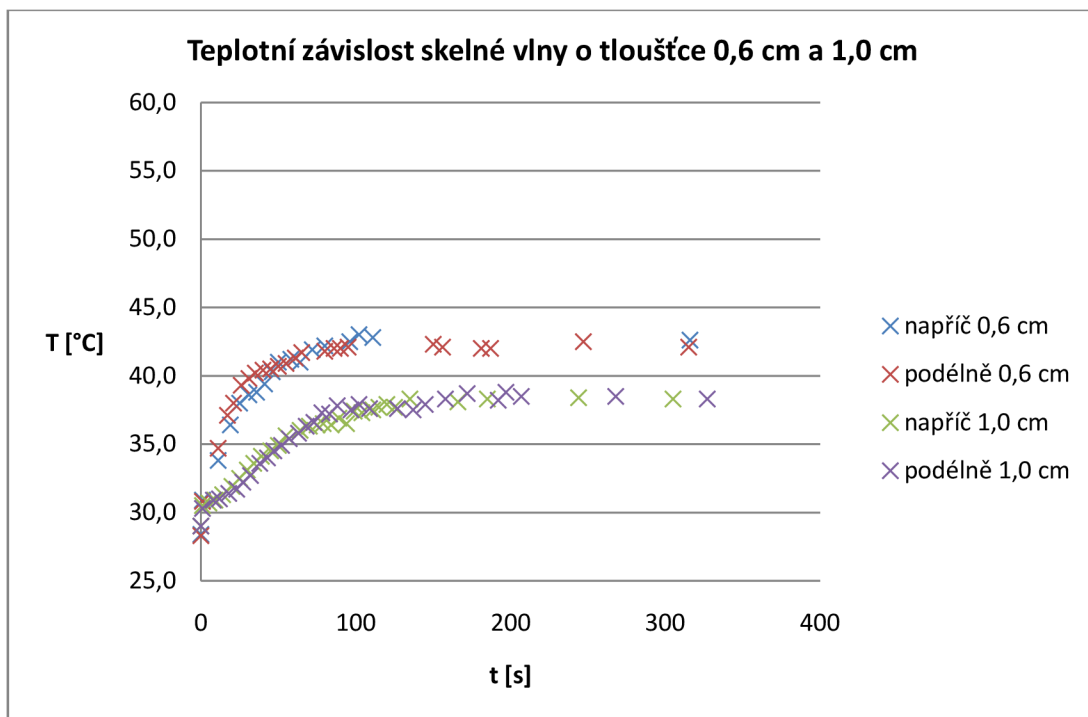
Po ustálení teploty se na plotýnku umístil vzorek skelné vlny s podélným charakterem vláken a tloušťce 0,30 cm. Umístění jde vidět na Obr. 4.19. Pomocí termokamery Ti25 se měřila změna teploty na vzorku v závislosti na čase, až do jejího ustálení. Toto měření se opakovalo pro vzorek skelné vlny s podélným charakterem vláken a tloušťce 1 cm. Změřené hodnoty jsou zaznamenány v Tab. 4.3 a vyhodnoceny na Obr. 4.20.



Obr. 4.19 Poloha vzorku skelné vlny s podélným charakterem vláken.

Tab. 4.3 Změřené hodnoty teplotní závislosti vzorků skelné vlny pro různé tloušťky a rozdílný charakter vláken.

Tloušťka vzorku: 0,6 cm				Tloušťka vzorku: 1 cm			
Příčně		Podélně		Příčně		Podélně	
t	T	t	T	t	T	t	T
[s]	[°C]	[s]	[°C]	[s]	[°C]	[s]	[°C]
0	28,4	0	28,3	0	29,0	0	29,0
1	30,9	1	30,8	1	30,5	1	30,3
11	33,8	11	34,7	5	30,7	8	30,9
19	36,4	17	37,1	9	30,9	12	31,0
25	38,0	21	38,0	14	31,3	18	31,4
31	38,6	26	39,3	20	31,9	23	31,7
36	38,8	31	39,8	25	32,5	27	32,2
41	39,4	35	40,2	30	33,1	32	32,7
46	40,3	40	40,4	34	33,6	38	33,6
50	41,0	45	40,5	39	34,1	43	34,0
58	41,2	50	40,7	45	34,5	47	34,5
64	41,0	55	40,9	50	34,9	52	34,9
72	41,9	61	41,3	55	35,6	57	35,4
80	42,2	65	41,7	64	36,0	63	35,8
96	42,5	80	41,8	70	36,3	68	36,3
102	43,0	86	42,0	75	36,4	73	36,6
111	42,8	90	42,0	79	36,5	78	37,3
316	42,6	95	42,1	84	36,4	83	37,2
		150	42,3	89	36,9	88	37,8
		156	42,1	94	36,5	97	37,5
		181	42,0	99	37,4	102	37,9
		187	42,0	104	37,3	109	37,6
		247	42,5	111	37,5	127	37,6
		315	42,1	115	37,7	137	37,5
				120	37,9	145	37,9
				125	37,7	158	38,3
				135	38,3	172	38,7
				166	38,1	192	38,2
				185	38,3	197	38,8
				244	38,4	207	38,5
				305	38,3	268	38,5
						327	38,3



Obr. 4.20 Srovnání skelné vlny o různých tloušťkách s příčným a podélným charakterem vláken

4.7 Zhodnocení změřených výsledků:

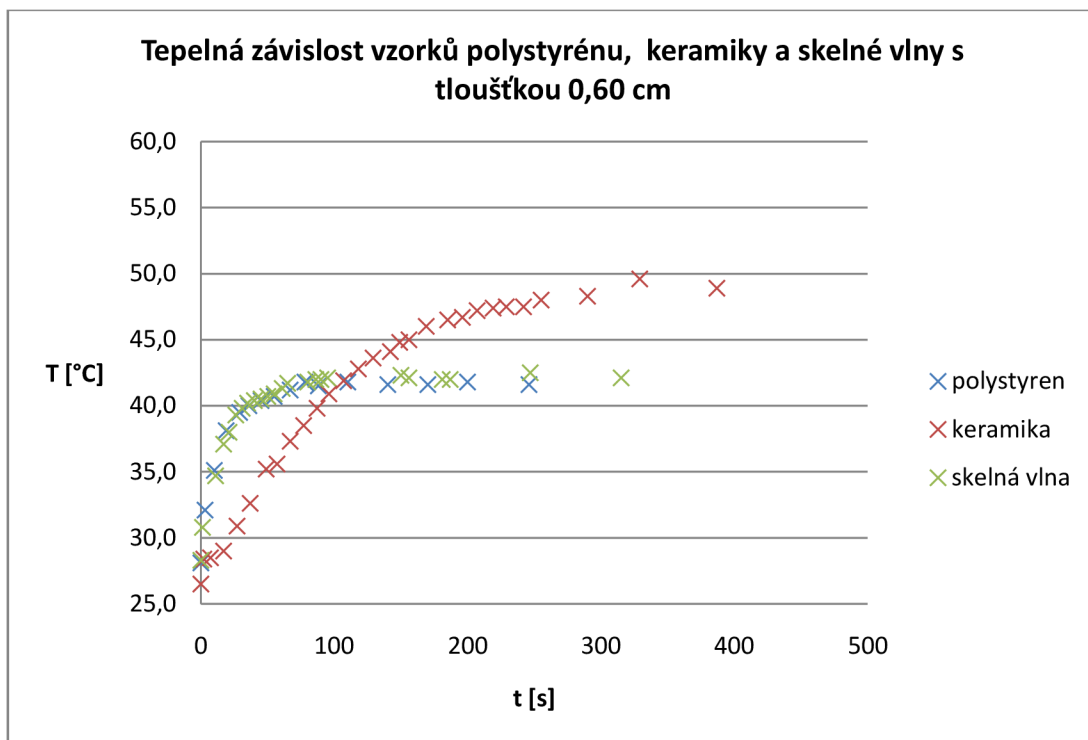
Při měření polystyrénových vzorků se ukázalo, že rozdíl měřících míst (T1- lepidlo Herkules, T2- sprej Styro RC) byl do 2 °C. Větší rozdíl byl ve strmosti teplotní závislosti, kdy v bodě T2 je oproti T1 větší strmost.

Při měření vzorků TC Ceramic HB byly změřeny největší teploty ze všech měření.

Při měření vzorků skelné vlny se ukázalo, že teplotní závislost stejně širokých vzorků jak pro příčný i podélný charakter vláken je skoro stejný.

U všech měření se ukázalo, že s rostoucí šířkou vzorku se zmenšuje strmost změřené teplotní závislosti a dosažená maximální teplota rovněž klesá.

Srovnání měřených vzorků o tloušťce 0,6 cm jde vidět na Obr. 4.21.



Obr. 4.21 Srovnání všech tří materiálů o tloušťce 0,60 cm (TC Ceramic HB, polystyren: v místě T2, skelná vlna: podélný charakter vláken)

Z Obr. 4.21 jde vidět, že teplotní závislosti vzorků skelné vlny a polystyrénu se takřka překrývají. Naopak na vzorku TC Ceramic HB byla změřena menší strmost teplotní závislosti a větší dosažená hodnota teploty.

5 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývala problematikou bezdotykového měření tepelných vlastností materiálů, používaných zejména ve stavebnictví.

K získání celkového přehledu k dané problematice jsou v bakalářské práci uvedeny základní pojmy a informace o bezdotykovém měření teploty a tepelných vlastnostech materiálů.

V části zabývající se trhem s izolačními materiály je uveden přehled druhů materiálů. Jsou zde i uvedeny příklady výrobců těchto izolačních materiálů.

V kapitole měření je popsán postup jednotlivých měření pro dané vzorky materiálů. V této kapitole je i provedeno i zhodnocení jednotlivých měření tepelné závislosti a porovnání jednotlivých vzorků mezi sebou.

6 LITERATURA

- [1] KREIDL, M. *Měření teploty - Senzory a měřící obvody*. 1 vyd., Praha: BEN, 2005. 240 s. ISBN 80-7300-145-4
- [2] *Zpravodaj pro měření a regulaci firmy OMEGATM: Bezdotykové měření teploty*. Č. 1, 2. vydání. Newport Electronic, spol. s r.o., Karviná 2001.
- [3] VAVERKA, J. a kol. *Stavební tepelná technika a energetika budov*. 1 vyd., Brno: VUTIUM, 2006. 648 s. ISBN 80-21429-0
- [4] ZACH, J. *Speciální izolace*. Brno: VUT, 2006
- [5] *Ti10, Ti25, TiR, TiR-návod k použití*, Brno 2008
- [6] *Ti45, Ti50, Ti55 termokamera IR FlexCam-návod k použití*, Brno 2009
- [7] *Izolace vnějších stěn* [online]. c2005, [cit.2011-25-05]. Dostupné z: <<http://www.bachl.cz/index1.php?typ=BLA&showid=65>>.
- [8] *Ceník produktů*. URL: <<http://www.isover.cz/data/files/cenik-mw-eps-4-2011-171.pdf>> [cit.2011-15-03].
- [9] *Ceník stavebních izolací*. URL: <http://www.knaufinsulation.cz/files/ki_cz/upload/documents/KI-cenik-SI-2011_11-04-21b.indd.pdf> [cit.2011-01-04].
- [10] *Ceník stavebních a technických izolací*. URL: <http://www.rockwool.cz/files/Common%20Design%20Elements/dealers/price%20list/Cenik_CZ_01_04_2011.pdf>, [cit.2011-01-04].

Seznam příloh

Příloha 1. CD/DVD